

# TEKNOLOGI GAMBAR DIGITAL

Dr. Mars Caroline Wibowo. S.T., M.Mm.Tech



# TEKNOLOGI GAMBAR DIGITAL

Dr. Mars Caroline Wibowo. S.T., M.Mm.Tech



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

**PENERBIT :**  
YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK  
Jl. Majapahit No. 605 Semarang  
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144  
Email : penerbit\_ypat@stekom.ac.id

ISBN 978-623-96089-6-5 (PDF)



# TEKNOLOGI GAMBAR DIGITAL

Dr. Mars Caroline Wibowo. S.T., M.Mm.Tech



YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK

**PENERBIT :**  
YAYASAN PRIMA AGUS TEKNIK  
Jl. Majapahit No. 605 Semarang  
Telp. (024) 6723456. Fax. 024-6710144  
Email : [penerbit\\_ypat@stekom.ac.id](mailto:penerbit_ypat@stekom.ac.id)

## **TEKNOLOGI GAMBAR DIGITAL**

### **Penulis :**

Dr. Mars Caroline Wibowo. S.T., M.Mm.Tech

**ISBN : 9 786239 608965**

### **Editor :**

Dr. Joseph Teguh Santoso, S.Kom., M.Kom.

### **Penyunting :**

Dr. Mars Caroline Wibowo. S.T., M.Mm.Tech

### **Desain Sampul dan Tata Letak :**

Irdha Yudianto

### **Penebit :**

Yayasan Prima Agus Teknik Bekerja sama dengan  
Universitas Sains & Teknologi Komputer (Universitas STEKOM)

### **Redaksi :**

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. (024) 6723456

Fax. 024-6710144

Email : [penerbit\\_ypat@stekom.ac.id](mailto:penerbit_ypat@stekom.ac.id)

### **Distributor Tunggal :**

#### **Universitas STEKOM**

Jl. Majapahit no 605 Semarang

Telp. (024) 6723456

Fax. 024-6710144

Email : [info@stekom.ac.id](mailto:info@stekom.ac.id)

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa ijin tertulis dari penerbit

# Kata Pengantar

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena dengan rahmat, karunia, serta taufik dan hidayah-Nya kami dapat menyelesaikan penyusunan buku berjudul **TEKNOLOGI GAMBAR DIGITAL** dengan harapan untuk dapat dipergunakan oleh kalangan para akademisi.

Tujuan utama penyusunan buku ini adalah untuk memudahkan mahasiswa dalam memahami dan menguasai pemahaman tentang gambar digital dan jenisnya. Buku teks ini mempelajari tentang berbagai jenis gambar digital serta pemrosesan gambar digital, sehingga memudahkan para mahasiswa untuk memahami apa yang disampaikan pada buku ini serta bagi pendidik dapat menunjang untuk proses kegiatan belajar mengajar.

Semoga buku ini dapat dipahami bagi siapapun yang membacanya. Sekiranya buku yang telah disusun ini dapat berguna bagi kami sendiri maupun orang yang membacanya. Sebelumnya kami mohon maaf apabila terdapat kesalahan kata-kata yang kurang berkenan dan kami memohon kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa depan.

Semarang, Januari 2021

**Dr. Mars Caroline Wibowo, S.T., M.M.Tech**

Penulis

# DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>iv</b>
<b>PEMROSESAN GAMBAR DIGITAL DALAM DOMAIN FREKUENSI.....</b>	<b>1</b>
Pengantar.....	1
Meninjau kembali Transformasi dan Seri Fourier .....	2
FFT (Fast Fourier Transform).....	5
Meninjau kembali ekuasi gambar .....	5
1. Pemfilteran spasial linier (konvolusi) .....	6
2. Pemfilteran Domain Frekuensi .....	7
3. Pemfilteran Low-pass .....	10
4. Pemfilteran High-pass.....	11
5. Filter High-pass .....	12
6. Filter Band-pass dan Band-Stop .....	12
Restorasi Gambar.....	15
Penyaringan terbalik .....	15
Penyaringan optimal atau Wiener.....	18
Rekonstruksi entropi maksimum .....	20
Restorasi interaktif.....	20
EDOF (Extended depth of field) .....	20
Transformasi wavelet.....	20
Transformasi wavelet diskrit.....	22
<b>KOMPRESI GAMBAR.....</b>	<b>24</b>
Pengantar.....	24
Ukuran File Gambar yang tidak dikompresi.....	24
Informasi dan Data Gambar.....	25
Dasar Kompresi .....	26
Jenis Redundansi.....	27
Mengukur tingkat kompresi.....	29
Ketergantungan Scene dan Kompresi .....	29
Persentase Kompresi.....	29
Bit Rate .....	29
Ketergantungan scene dan kompresi .....	30

Teori Informasi .....	30
Struktur Gambar dan Entropi.....	32
Teorema Shannon .....	35
Model Kompresi Gambar .....	35
Kompresi Lossless .....	37
1. Metode Kompresi Lossless .....	37
2. Mengurangi redundansi spasial.....	37
A. Enkode run-length.....	37
B. Pengkodean bidang bit dan kode abu-abu.....	38
C. Pengkodean diferensial .....	40
3. Mengurangi redundansi coding: pengkodean variable-length.....	40
A. Pengkodean Huffman .....	41
B. Teknik kamus - kompresi LZW.....	42
Kompresi Lossy .....	44
Mengevaluasi Kompresi Lossy.....	45
Metriks Distorsi .....	45
1. Mean absolute error (MAE) .....	46
2. Rata-rata kesalahan kuadrat (MSE) .....	46
3. Rasio signal-to-noise (SNR) .....	46
4. Rasio puncak signal-to-noise (PSNR).....	46
Metode penilaian alternatif .....	47
Metode Kompresi Lossy .....	47
Kuantisasi.....	49
Standar Kompresi Lossy .....	49
1. Standar JPEG (Joint Photographic Experts Group) .....	49
1) Pre-processing.....	49
2) Kuantitasi.....	50
3) Pengodean entropi .....	50
2. Standar JPEG 2000 .....	51
4) Pre-processing.....	52
5) Kuantitasi.....	52
6) Pengodean entropi .....	52

<b>ALUR KERJA GAMBAR DIGITAL .....</b>	<b>54</b>
Rantai Penggambaran dan Alur kerja gambar .....	54
Prinsip yang memandu alur kerja yang efektif .....	55
Pendekatan alur kerja.....	57
Resolusi dan rantai penggambaran digital .....	57
Interpolasi .....	58
Metode Interpolasi dan Asosiasi Artefak.....	59
Interpolasi dan Alur kerja gambar .....	61
Menghitung resolusi yang diperlukan untuk hasil gambar .....	62
Bit depth : Gambar 8-bit versus 16 bit.....	63
Manajemen warna.....	65
Alur kerja warna .....	66
Format File.....	69
Akuisisi Gambar .....	70
Alur kerja dan RAW capture .....	70
Editing gambar.....	74
Output gambar .....	74
Pengarsipan gambar .....	75
Optimisasi alur kerja gambar .....	75
Contoh alur kerja .....	77
1. Fotografi Komersial .....	77
a) Akuisisi .....	77
b) Pengolahan Gambar.....	77
c) Output dan pengarsipan .....	78
2. Penggambaran Forensik .....	78
a) Akuisisi .....	78
b) Pengolahan Gambar.....	78
c) Output dan pengarsipan .....	79
3. Penggambaran Medikal.....	79
a) Akuisisi .....	79
b) Pengolahan Gambar.....	79
c) Output dan pengarsipan .....	79

<b>REPRODUKSI WARNA DIGITAL .....</b>	<b>80</b>
Pengantar.....	80
Colour Space dan pengkodean warna .....	81
Klasifikasi Colour Space.....	82
RGB (Red, green, Blue).....	82
CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Black) .....	82
HSL (Hue, Saturation, Lightness) dan yang serupa.....	83
YCC (Luminance, Chrominance 1, Chrominance 2) dan yang serupa.....	83
CIE Colour Space .....	83
Colorimetric colour space .....	84
Colour appearance space.....	84
Colour space yang tergantung pada perangkat/device.....	84
Status Gambar.....	85
Pengkodean warna sensor .....	85
Pengkodean warna yang mengacu pada pemandangan .....	85
Pengkodean warna yang mengacu pada output .....	86
Pengkodean warna yang mengacu pada keaslian .....	87
Standar colour space dan pengkodean colour space .....	87
RGB (standar RGB) dan Pnegkodean colour space yang mengacu pada RGB .....	88
YCC dan hal yang terkait dengan YCC.....	90
ROMM RGB dan RIMM RGB.....	91
Adobe RGB 1998.....	91
Karakteristik warna perangkat .....	92
Model Fisik .....	93
Model Numerik.....	97
Regresi .....	99
Tabel Look-up dengan interpolasi .....	101
Evaluasi pada model karakteristik .....	104
Karakteristik Display .....	105
Karakterisasi perangkat input digital .....	108
Mapping Gamut .....	111
Tujuan mapping Gamut .....	112
Teknik Mapping Gamut.....	113

<b>REPRODUKSI TONE.....</b>	<b>116</b>
Teori pada Reproduksi Tone.....	116
Fungsi transfer dan gamma.....	116
Fungsi transfer keseluruhan dan gamma keseluruhan .....	117
Reproduksi Tone subjektif, gamma optimal dan kondisi tampilan .....	118
Diagram Kuadran.....	119
Reproduksi tone perangkat pencitraan dan sistem pengkodean gambar .....	121
1. Fungsi transfer display CRT .....	121
2. Fungsi transfer LCD (Liquid crystal display) .....	123
3. Mengukur fungsi transfer Display .....	123
4. Fungsi transfer perangkat akuisisi digital .....	125
5. Mengukur fungsi transfer perangkat akuisisi.....	126
Image encoding (Pengkodean gambar) : Fungsi transfer RGB, Adobe RGB dan JPEG .....	127
Fungsi transfer pada printer .....	129
Pengukuran lainnya terkait Tone dan Kontras.....	129
1. Dynamic range dan rasio kontras.....	129
2. Kontras di area seragam, target uji, dan gambar.....	131
3. Kuantisasi non-linier, persyaratan bit-depth, dan koreksi gamma.....	132
<b>EKSPOSUR DAN KONTROL GAMBAR.....</b>	<b>137</b>
Eksposur Kamera.....	137
Hubungan Antara Eksposur Dan Logaritma.....	138
Apertur Relatif .....	139
Shutter Speed .....	139
Subject Luminance Ratio.....	140
Rentang Sensor Yang Dinamis .....	141
Eksposur Optimal Dan Fungsi Transfer .....	141
Exposure Meters .....	143
Hand-Held Exposure Meter .....	146
Penerimaan Angle.....	147
Nilai Eksposur.....	148
Faktor Eksposur .....	150
Kegagalan Hukum Timbal Balik .....	150
Jenis Pengukuran Cahaya .....	151

1. Pengukuran cahaya insiden.....	151
2. Pengukuran cahaya yang dipantulkan.....	152
3. Mode metering dalam kamera.....	152
4. Spot Metering.....	152
5. Partial area metering .....	152
6. Centre-weighted average metering .....	152
7. Matriks Metering atau multi-zona Metering.....	153
8. Eksposur flash elektronik.....	153
9. Guide Number.....	154
Teknik pengukuran cahaya pantulan .....	154
1. Pengukuran luminasi pemandangan total .....	155
2. Mengukur middle-grey-surface .....	155
3. Pengukuran luminansi bayangan tergelap.....	156
4. Pengukuran luminansi sorotan paling ringan.....	156
Nilai Rata rata .....	156
Teknik Eksposur Dan Kamera Digital.....	156
Menggunakan Histogram Gambar .....	157
Gambar HDR (High-Dynamic-Range).....	159
<b>PENGANTAR PROSES PENCITRAAN (IMAGING) .....</b>	<b>162</b>
Pengantar .....	162
Proses Pencitraan .....	163
Kontrol gambar .....	166
Kontrol bentuk gambar .....	167
Depth of Field .....	167
Tone (Nada) dan kontras.....	168
Kontrol Pencahayaan dalam scene aslinya .....	168
Warna 174	
Asal muasal fotografi.....	168
1. Kamera obscura.....	169
2. Eksperimen awal .....	170
3. Menuju proses pengembangan – Daguerreotype .....	170
4. Proses positif negatif.....	171
5. Bahan modern .....	172
6. Photographic Today .....	172

7. Karakteristik bahan fotografi .....	172
Menangkap warna.....	174
Gambar Digital.....	176
1. Gambar digital awal .....	176
2. Sensor CMOS .....	176
3. Colour digital capture.....	177
Perangkat digital lainnya.....	178
Representasi gambar digital .....	179
Resolusi spasial.....	181
Bit depth.....	182
Representasi warna .....	183
Ukuran file dan format file .....	183
Imaging chain .....	184
Mengevaluasi kualitas gambar.....	186
<b>FORMAT FILE GAMBAR DIGITAL.....</b>	<b>188</b>
Pengantar.....	188
Raster Dan Vektor Grafis.....	188
Bit-Depth Support Dan Colour Encoding.....	190
Metode Kompresi.....	190
Standarisasi Format.....	190
Metadata Dan Exif .....	191
Manajemen Warna .....	191
Fitur Tambahan .....	191
TIFF (Tagged Image File Format).....	191
TIFF/EP.....	193
TIFF/IT .....	194
JPEG (Joint Photographic Experts Group) .....	194
JPEG 2000 (Joint Photographic Experts Group 2000) .....	195
RAW .....	196
DNG (Digital Negative).....	198
GIF (Graphics Interchange Format).....	199
PNG (Portable Network Graphics) .....	201
PSD (Photoshop Document).....	203
PCD (Photo CD) .....	204

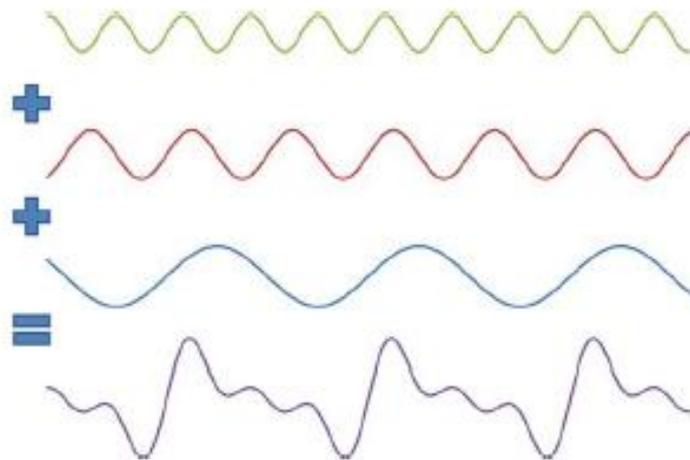
PS (Postskript) Dan EPS (Encapsulated Postscript) .....	205
EPS.....	205
PDF (Portable Document Format) .....	205
<b>PENYIMPANAN GAMBAR DAN PENGARSIPAN.....</b>	<b>207</b>
Pengantar.....	207
Harapan Hidup Media Fotografi Tradisional.....	208
Kondisi Pemrosesan.....	209
Dark Fading .....	210
Light Fading.....	214
Kondisi Penyimpanan .....	216
Gas Atmosfer .....	218
Toning.....	219
Harapan Hidup Digital Printing .....	220
Teknologi Percetakan Dan Media.....	220
Faktor Permanen Dan Pengujian Untuk Print Digital.....	221
Penyimpanan Gambar Digital Dan Usia Penyimpanan .....	223
Perangkat Penyimpanan Magnetis.....	225
Penyimpanan Optik Disk .....	226
Masalah Pengarsipan Gambar Digital Lainnya .....	228
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>230</b>

# Pemrosesan Gambar Digital Dalam Domain Frekuensi

## Pengantar

Gambar digital adalah deretan angka persegi panjang yang mewakili luminansi dan warna pada posisi diskrit dalam sebuah adegan. Gambar dapat dianggap sebagai matriks piksel, setiap piksel memiliki tiga nilai numerik (yaitu satu per saluran warna). Posisi piksel mengidentifikasi koordinat spasial dan setiap nilai piksel mewakili intensitas saluran warna pada posisi itu. Ketiga nilai piksel bergantung pada model warna yang digunakan. Misalnya, mereka mungkin mewakili komponen warna primer red, green, dan blue (misalnya RGB), atau mereka mungkin mewakili luminansi dan dua nilai kromatisitas yang dinormalisasi (misalnya YCC).

Kekuatan pemrosesan dan manipulasi gambar digital terletak pada fakta sederhana bahwa dengan komputer modern sangat mudah untuk memproses angka. Mayoritas teknik yang dijelaskan sebelumnya berkonsentrasi pada pemrosesan data gambar yang disajikan dalam bentuk di atas. Pemrosesan dapat diterapkan sebagai operasi untuk piksel individu, yang dikenal sebagai proses titik, di mana setiap nilai piksel keluaran adalah hasil dari operator yang diterapkan ke piksel input di posisi yang sama, mis. penerapan fungsi transformasi skala abu-abu untuk mengubah nilai nada dan kontras. Atau, ini mungkin bergantung pada hubungan posisi dua atau lebih piksel dan nilainya, yang dikenal sebagai pemrosesan lingkungan, mis. perbedaan atau rata-rata nilai piksel tetangga. Menerapkan teknik pemrosesan gambar digital dengan cara ini ke data gambar seperti di atas disebut ‘bekerja dalam domain spasial ‘ atau ‘pemrosesan gambar spasial’.



**Gambar 1.** Konstruksi sinyal dengan penambahan gelombang sinus.

Memperkenalkan konsep frekuensi spasial dan transformasi Fourier. Daripada mempertimbangkan sinyal dalam istilah nilai yang direpresentasikan pada setiap titik, kita dapat membayangkan sinyal tersebut terdiri dari jumlah frekuensi yang berbeda-beda. Ide yang dikemukakan oleh matematikawan Fourier secara konseptual sederhana, tetapi memiliki konsekuensi yang luas di banyak bidang sains dan teknologi. Fourier menunjukkan bahwa semua fungsi (sinyal) dapat direpresentasikan dengan penambahan sejumlah gelombang sinus dan cosinus dari berbagai frekuensi dan fase. Jumlah gelombang sinus dan cosinus dalam beberapa hal mungkin mendekati tak terbatas. Dia selanjutnya membuktikan bahwa untuk setiap sinyal unik ada satu set gelombang unik untuk mewakili sinyal itu.

Menganalisis sistem pencitraan dengan memeriksa konten frekuensinya (yaitu melihat jumlah setiap gelombang sinus dan kosinus), kita mungkin sampai pada fungsi transfer modulasi (MTF) dan teori Fourier pembentukan gambar di antara banyak lainnya. Dimungkinkan untuk mentransformasikan antara frekuensi spasial dan sinyal asli yang diwakili dalam aplikasi transformasi Fourier (lihat nanti).

Prinsip sebagian besar operasi pemrosesan frekuensi dapat dipahami dengan berkonsentrasi pada gambar monokrom. Perlu dicatat bahwa, karena perbedaan antara kinerja mata manusia terhadap sinyal chrominance dan luminansi, khususnya resolusi respons chrominance yang buruk, umumnya untuk pemrosesan yang berbeda diterapkan pada setiap saluran gambar. Kecuali ditentukan, untuk mengerjakan gambar abu-abu (atau saluran tunggal).

salah satu alat utama dalam pemrosesan gambar adalah filter digital. Ada dua kelas dasar filter digital spasial: linier dan non-linier. Secara umum, hanya filter spasial linier yang memiliki implementasi Fourier (atau domain frekuensi) setara langsung. Hal ini karena filter linier diterapkan dengan cara yang konsisten dengan teori sistem linier (filter spasial linier diterapkan oleh konvolusi topeng dengan gambar). Filter tersebut juga dapat digabungkan dan efeknya sebagian besar terbalik dalam batasan representasi integer yang digunakan untuk gambar digital. Seperti yang akan kita lihat nanti, sementara filter non-linier dapat digabungkan, efeknya, setelah diterapkan pada gambar, tidak dapat dibatalkan. Ini adalah pertimbangan penting saat mendesain alur kerja untuk memproses gambar dan memikirkan poin yang tepat untuk merekam atau mencadangkan gambar.

Sebagai alat penting untuk mentransformasikan antara domain spasial dan frekuensi, transformasi Fourier akan ditinjau secara singkat sebelum mengembangkan implementasi diskritnya. Konvolusi akan diperkenalkan kembali dan implementasinya dalam ruang frekuensi akan dibahas. Restorasi gambar dan transformasi ruang gambar lebih lanjut, transformasi cosinus diskrit dan wavelet, akan diperkenalkan.

## Meninjau kembali Transformasi dan Seri Fourier

Ditunjukkan bahwa penambahan gelombang sinus dan cosinus yang cukup akan memungkinkan reproduksi sinyal yang diinginkan. Penambahan tiga gelombang sinus dapat diwakili oleh:

Ekuasi 28.1

$$f(x) = a_1 \sin(ux) + a_2 \sin(2ux) + a_3 \sin(3ux)$$

dimana  $u$  adalah frekuensi spasial dan  $a$  adalah koefisien untuk setiap gelombang sinus. Notasi ini tidak efisien, namun, untuk sejumlah besar gelombang sinus dan bentuk yang lebih kompak diberikan oleh:

Ekuasi 28.2

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(nux)$$

Untuk menambahkan perubahan fasa dan himpunan konstan kita dapat menulis ulang di atas sebagai:

Ekuasi 28.3

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nux) + b_n \sin(nux)$$

Ini adalah seri Fourier. Rumus Euler adalah hasil klasik dalam trigonometri dan menyatakan bahwa:

Ekuasi 28.4

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$$

Menggunakan rumus Euler, Ekuasi 28.3 dapat ditulis ulang sebagai:

Ekuasi 28.5

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{inux}$$

di mana  $c_n$  adalah koefisien yang terkait dengan  $a_n$  dan  $b_n$  melalui:  $a_n = c_n + c_{-n}$  dan  $b_n = i(c_n - c_{-n})$ . Untuk fungsi non-periodik  $f(x)$ , transformasi Fourier  $F(u)$  didefinisikan sebagai:

Ekuasi 28.6

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{2\pi i u x} dx$$

Fungsi kompleks  $F(u)$  merepresentasikan banyaknya frekuensi yang ada  $u$  dalam non-periodik  $f(x)$ . Amplitudo total sinyal pada frekuensi  $u$  diberikan oleh modulus  $F(u)$ . Transformasi Fourier terbalik dapat diturunkan menggunakan pendekatan serupa dan mengubah sinyal yang direpresentasikan dalam domain frekuensi ke dalam domain spasial:

Ekuasi 28.7

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u) e^{-2\pi i u x} du$$

Dengan menggunakan transformasi Fourier dan kebalikannya, dimungkinkan untuk keluar masuk ruang frekuensi secara efisien. Beberapa hasil umum untuk transformasi Fourier.

Sinyal yang telah didigitalkan adalah sampel diskrit dalam jumlah terbatas, yaitu tidak kontinu atau panjang tak terhingga. Ini berarti bahwa tidak mungkin menggunakan formulasi berkelanjutan dari transformasi Fourier untuk memproses gambar sampel kami yang terpisah. Transformasi Fourier diskrit satu dimensi (DFT) dapat ditulis sebagai:

Ekuasi 28.8

$$f(u) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-2\pi i \frac{ux}{M}}$$

dimana M adalah jumlah sampel diskrit (jumlah titik data).

Transformasi terbalik diberikan oleh:

Ekuasi 28.9

$$f(v) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} F(u) e^{-2\pi i \frac{ux}{M}}$$

Untuk sebagian besar tujuan praktis, DFT mendekati transformasi Fourier, kecuali pengenalan aliasing dan pembatasan bandwidth. Jika n sampel diberi spasi pada  $\delta x$ , maka frekuensi sampel akan diberi spasi pada  $\delta u = 2W_{Max}n$ , yang setara dengan  $1/\delta x$ , di mana frekuensi spasial maksimum terdapat pada output,  $W_{Max} = 1/2\delta x$ . Frekuensi diatas ini tidak di tolak tetapi dialias tentang frekuensi Nyquist dan mencemari frekuensi spasial pada keluarannya.

Transformasi Fourier dan DFT dapat diperluas ke dua dimensi, di mana:

Ekuasi 28.10

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) e^{-2\pi i (ux+vy)} dx dy$$

adalah transformasi Fourier dua dimensi dan

Ekuasi 28.11

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-2\pi i (\frac{ux}{M} + \frac{uy}{N})}$$

DFT dua dimensi di mana M dan N adalah jumlah titik data di setiap dimensi.

Transformasi terbalik diberikan oleh:

Ekuasi 28.12

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) f(u, v) e^{-2\pi i (ux+vy)} du dv$$

dan

Ekuasi 28.13

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} f(u, v) e^{-2\pi i (\frac{ux}{M} + \frac{uy}{N})}$$

untuk kasus kontinu dan diskrit dua dimensi masing-masing.

Ekuasi 28,11 dapat dipisahkan dan karenanya dapat ditulis ulang:

Ekuasi 28.14

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} e^{-2\pi i \frac{ux}{N}} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-2\pi i \frac{vy}{N}}$$

Ini adalah hasil yang penting karena menunjukkan bahwa DFT dua dimensi dapat diimplementasikan dengan menghitung DFT satu dimensi dari setiap kolom dan kemudian DFT satu dimensi dari setiap baris hasil tersebut. Pentingnya ini akan menjadi jelas ketika kita membahas transformasi Fourier cepat.

### FFT (Fast Fourier Transform)

FFT adalah metode untuk menghitung DFT satu dimensi secara efisien, umumnya mengurangi perkiraan jumlah operasi yang diperlukan dari  $N^2$  ke  $N \log N$ , di mana  $N$  adalah jumlah titik data dan logaritma ke basis 2. FFT yang paling umum adalah Cooley-Tukey algoritma, yang secara iteratif membagi titik data  $N$  menjadi dua transformasi dengan panjang  $N/2$ . Satu transformasi adalah titik data ganjil dan yang lainnya dari titik data genap. Algoritme dapat diterapkan secara rekursif sampai  $N$  transformasi panjang data 1 diperlukan. Setelah transformasi dilakukan, DFT yang telah selesai dapat direkonstruksi. karena alasan pemisahan rekursif itulah panjang data  $2^n$  lebih disukai.

### Meninjau kembali ekuasi gambar

Dengan ketentuan bahwa sistem linier dan stasioner, gambar dapat dianggap dibentuk dari penambahan fungsi penyebaran titik berskala (PSF) yang tumpang tindih dalam arah  $x$  dan  $y$ . Adegan masukan dapat dilambangkan sebagai  $Q(x, y)$ , gambar keluaran sebagai  $Q'(x, y)$  dan PSF sebagai  $I(x, y)$ . Secara matematis, hubungan di antara mereka diberikan oleh ekuasi pencitraan :

Ekuasi 28.15

$$Q'(x_p, y_p) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(x, y) I(x_p - x, y_p - y) dx dy$$

Ini adalah integral konvolusi dua dimensi. Ini mewakili proses yang dijelaskan sebelumnya untuk menambahkan PSF berskala di atas permukaan gambar. Integral mewakili proses penjumlahan ketika masing-masing PSF saling berdekatan.

Itu sering ditulis sebagai:

Ekuasi 28.16

$$Q'(x, y) = Q(x, y) \otimes I(x, y)$$

atau bahkan hanya:

Ekuasi 28.17

$$Q' = Q \otimes I$$

di mana  $\otimes$  menunjukkan konvolusi seperti sebelumnya.

## 1. Pemfilteran spasial linier (konvolusi)

Bahwa kernel konvolusi dapat dibuat untuk menghasilkan efek tertentu pada gambar. Hasil yang diinginkan dikontrol oleh ukuran dan nilai yang diberikan ke kernel. Proses konvolusi dijelaskan saat menangani pembentukan citra. Di sini kami meninjau implementasi digital diskrit. Rumus konvolusi digital adalah:

Ekuasi 28.18

$$\sum_{m=\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{n=\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} h(m, n) f(i - m, j - n)$$

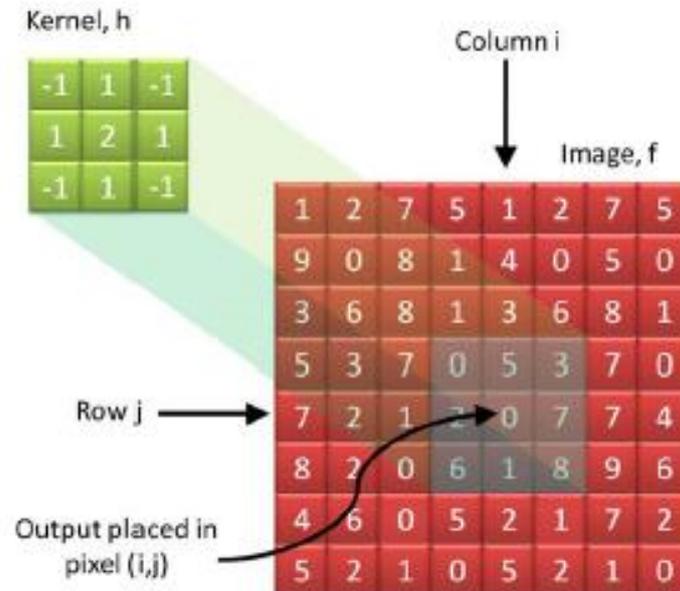
misalnya:

Ekuasi 28.19

$$g = h \otimes f$$

Dalam dua ekuasi ini,  $f$  mewakili gambar asli dan  $h$  adalah array filter berukuran  $M \times M$  di mana  $M$  adalah angka ganjil (biasanya 3 atau 5). Output dari konvolusi,  $g$ , adalah gambar yang diproses.

Gambar 2 mengilustrasikan proses. Array angka adalah bagian dari gambar digital,  $f$ , di bawah konvolusi dengan array filter  $3 \times 3$ ,  $h$ . Kernel konvolusi diposisikan di atas  $f$ , pada posisi  $(i, j)$  dan dikalikan dengan nilai gambar. Kesembilan hasil kali dijumlahkan dan hasilnya ditempatkan pada posisi  $(i, j)$ . Ini kemudian diulangi untuk semua nilai  $(i, j)$ , kehati-hatian harus diberikan pada nilai-nilai pada batas gambar. Perlu dicatat bahwa hasil dari konvolusi identik dengan hasil dari implementasi domain frekuensi ekuivalen ketika gambar dianggap periodik dalam ruang nyata. Perlu juga dicatat bahwa karena semua kalkulasi berdasarkan keluaran integer, akan ada beberapa kesalahan pembulatan yang terkait dengan aplikasi setiap kernel. Lebih lanjut, pemotongan akan terjadi jika nilai keluaran tidak dapat direpresentasikan menggunakan kedalaman bit yang ditentukan dari gambar karena terlalu besar atau terlalu kecil. Efek ini dapat diminimalkan dengan menggabungkan kernel konvolusi yang melakukan beberapa proses menjadi satu operasi.



**Gambar 2.** Konvolusi digital.

## 2. Pemfilteran Domain Frekuensi

Teorema konvolusi, menunjukkan bahwa filter spasial linier dapat diimplementasikan dengan perkalian dalam domain frekuensi. Secara khusus, konvolusi Ekuasi 28.19 dapat diimplementasikan oleh hubungan:

Ekuasi 28.20

$$G = H \times F$$

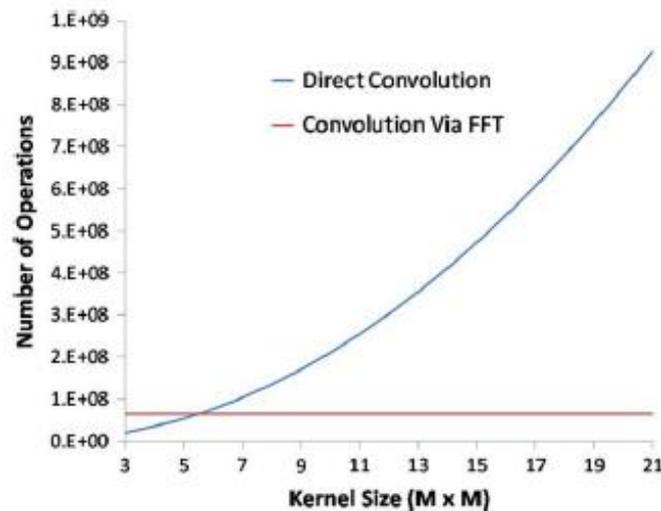
di mana  $F$  adalah transformasi Fourier dari gambar asli  $f$ , Transformasi Fouriernya dari filter  $h$  dan  $G$  adalah transformasi Fourier dari gambar yang diproses  $g$ . Sebuah gambar digital yang direpresentasikan dalam domain spasial diproses dengan mengambil transformasi Fourier-nya, mengalikan transformasi itu dengan filter ruang frekuensi, dan kemudian menggunakan transformasi Fourier terbalik untuk mengembalikan gambar yang dihasilkan kembali ke domain spasial. Untuk alasan yang disebutkan sebelumnya, algoritme FFT mengharuskan gambar berbentuk persegi, dengan jumlah piksel pada dimensi menjadi pangkat 2 (128, 256, 512, 1024, dll.).

Jumlah operasi untuk FFT kira-kira  $N \log N$ . Oleh karena itu, untuk melakukan konvolusi dalam ruang frekuensi pada gambar berukuran  $N \times N$  membutuhkan:

- Operasi  $N \log N$  (base2) ke FFT setiap baris =  $N^2$  operasi  $\log N$  ke FFT gambar dalam satu arah.
- $N^2 \log N$  tambahan  $N$  ke FFT hasil untuk membuat DFT dua dimensi (2D) untuk gambar, dengan total  $2N^2 \log N$ .
- Operasi  $2N^2 \log N$  tambahan untuk melakukan DFT 2D pada kernel. Perhatikan bahwa kernel harus memiliki ukuran yang sama seperti pada gambar di ruang frekuensi untuk dapat mengalikan setiap titik dalam DFT 2D.
- Perkalian  $N^2$  untuk mengalikan DFT 2D.
- Operasi  $2N^2 \log N$  tambahan untuk mengubah gambar kembali ke domain spasial.

Oleh karena itu, jumlah total operasi untuk melakukan konvolusi dalam domain frekuensi dengan urutan perkiraan  $6N^2 \log N + N^2$ . Untuk melakukan konvolusi dalam domain spasial pada gambar piksel  $N \times N$  yang sama dengan kernel  $M \times M$  dengan asumsi gambar diperlakukan sebagai periodik, kami memerlukan kira-kira:

- Operasi  $M^2$  untuk memperbanyak kernel dengan gambar di satu lokasi.
- $M^2 - 1$  penambahan untuk menjumlahkan hasil di lokasi tersebut.
- Satu pembagian untuk menskalakan hasilnya, dengan total operasi  $2M^2$  di setiap lokasi piksel.
- Ulangi langkah di atas di setiap lokasi gambar, atau  $N^2$  kali.



**Gambar 3.** Kernel Size

Gambar 3 Jumlah operasi yang diperlukan untuk melakukan konvolusi dalam domain spasial dan frekuensi pada gambar  $1024 \times 1024$  piksel versus ukuran kernel.

Oleh karena itu, jumlah total operasi untuk melakukan konvolusi dalam domain spasial kira-kira  $2M^2N^2$ . Gambar 3 mengilustrasikan bahwa untuk ukuran kernel kecil pada gambar  $1024 \times 1024$  piksel, terdapat sedikit keuntungan dalam melakukan penghitungan dalam ruang frekuensi. Namun, dengan bertambahnya ukuran kernel, keuntungan dari melakukan kalkulasi dalam ruang frekuensi terlihat jelas. Keuntungan lebih lanjut dapat diperoleh saat menerapkan filter ke serangkaian gambar, atau urutan film. 2D FFT dari kernel hanya perlu dihitung satu kali dan dengan demikian jumlah perhitungan untuk setiap frame tambahan dikurangi menjadi  $4N^2 \log N + N^2$ . Perlu dicatat bahwa di atas adalah perkiraan umum dan ada banyak teknik untuk mengurangi jumlah perhitungan lebih lanjut dalam kedua kasus, seperti penyimpanan hasil untuk digunakan kembali, dll.

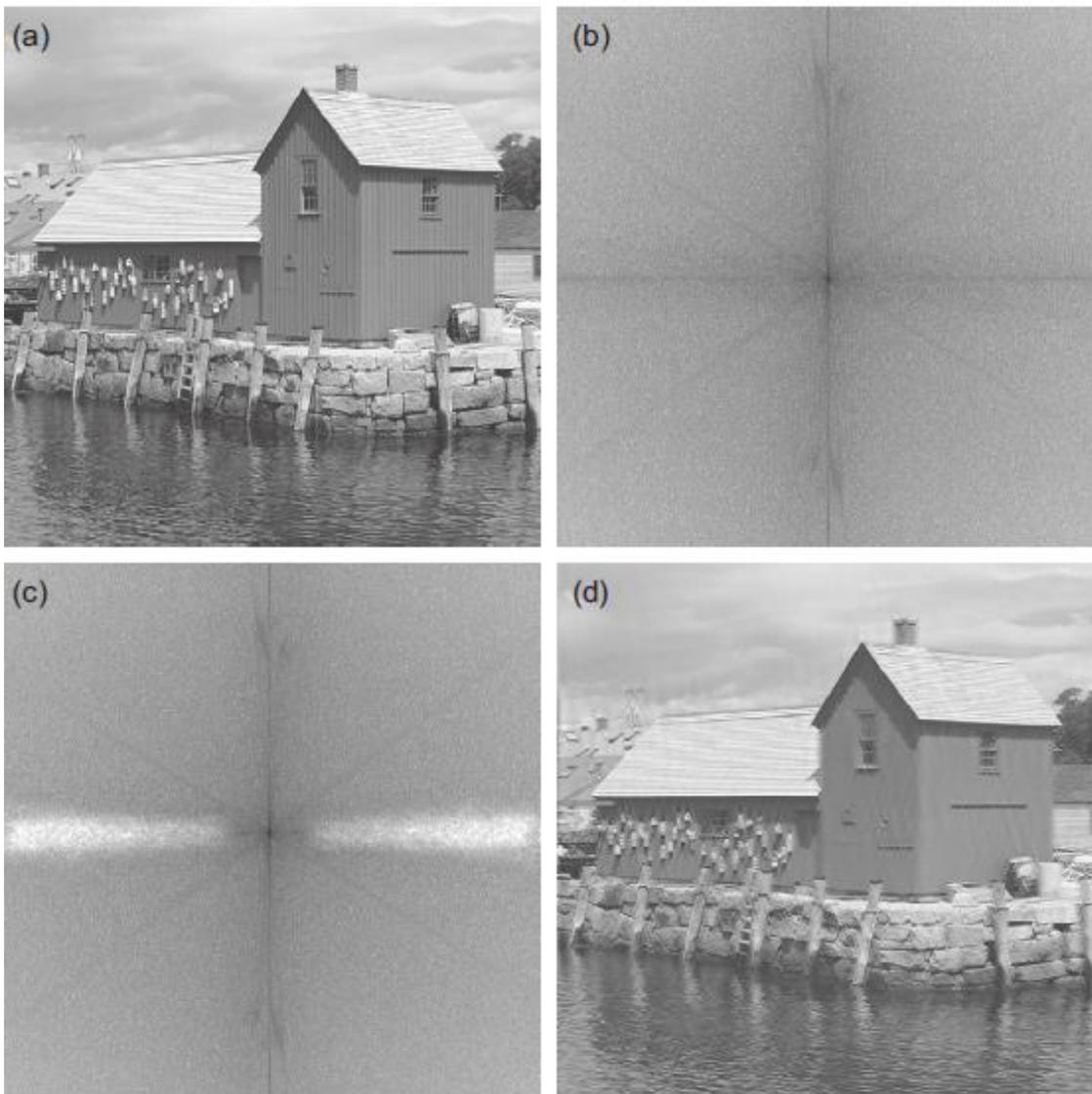
Filter ruang frekuensi sering dikembangkan dari pertimbangan konten frekuensi gambar dan modifikasi yang diperlukan untuk konten frekuensi tersebut, daripada rute alternatif ke operasi konvolusi ruang nyata. Sebuah analogi sederhana adalah sistem suara. Jika satu set speaker memiliki respons trebel atau bass yang sangat buruk, dimungkinkan untuk mengatasi batasan ini dengan meningkatkan frekuensi tersebut menggunakan ekualiser grafis. Sebaliknya, jika musik memiliki terlalu banyak trebel atau bass, equalizer grafis digunakan untuk mengurangi frekuensi tersebut.

Gambar 4 mengilustrasikan pendekatan filter semacam itu. Transformasi Fourier pada Gambar 4b menunjukkan komponen vertikal dan horizontal yang kuat. Dengan melemahkan frekuensi tinggi horizontal (Gambar 4c), dimungkinkan untuk menekan tepi vertikal (Gambar 4d). Efek yang sama dapat dicapai dengan mengoperasikan secara langsung pada nilai piksel yang sesuai dalam gambar aslinya, tetapi ini akan membutuhkan perhatian yang cukup untuk menghasilkan hasil yang mulus.

Filter linier memiliki dua properti penting:

1. Dua atau lebih filter dapat diterapkan secara berurutan dalam urutan apa pun ke gambar. Efek totalnya sama.
2. Filter dua atau lebih dapat digabungkan dengan konvolusi untuk menghasilkan satu filter. Menerapkan filter ini ke gambar akan memberikan hasil yang sama seperti filter terpisah yang diterapkan secara berurutan.

Sifat-sifat di atas mudah terlihat ketika mempertimbangkan konvolusi dalam domain frekuensi. Karena konvolusi dalam domain spasial diwakili oleh perkalian dalam domain frekuensi, penerapan banyak filter dapat terjadi dalam urutan apapun tanpa mempengaruhi hasil. Selanjutnya, frekuensi filter dapat dikalikan bersama sebelum diaplikasikan pada gambar.



Gambar 4 (a) Gambar asli. (b) Transformasi Fourier dari (a). (c) Transformasi Fourier dari (b) dengan frekuensi yang dilemahkan seperti yang ditunjukkan oleh area pucat. (d) Gambar olahan yang dihasilkan

### 3. Pemfilteran Low-pass

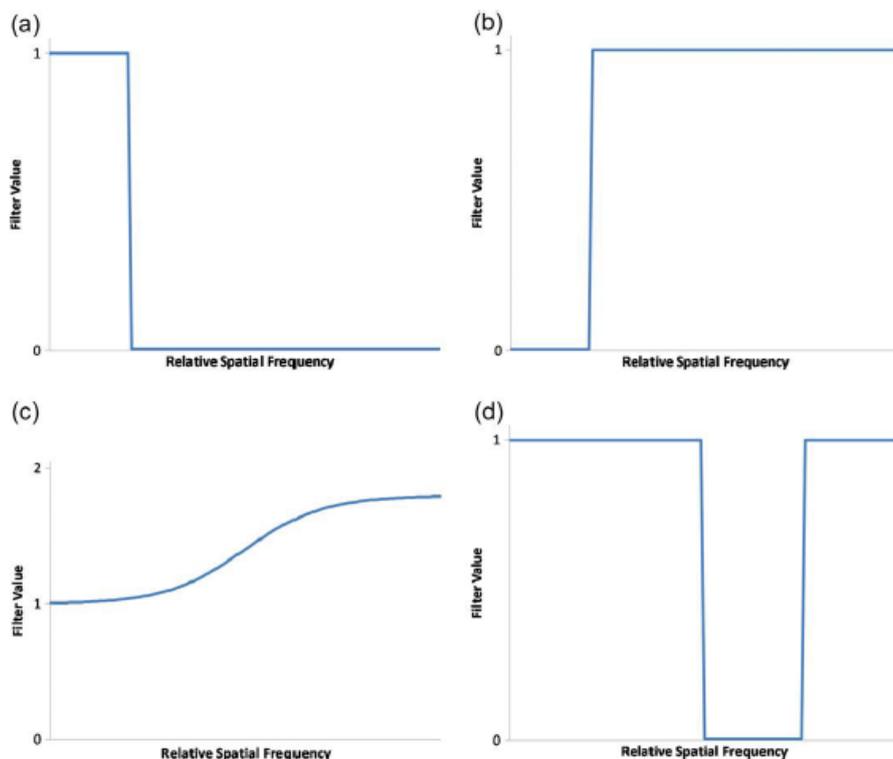
Filter yang menghilangkan semua frekuensi di atas batas yang dipilih dikenal sebagai filter low-pass (Gambar 5a). Ini dapat didefinisikan sebagai:

Ekuasi 28.21

$$H(u, v) = 1 \text{ untuk } u^2 + v^2 \leq W_0^2 = 1 \text{ lainnya}$$

dimana  $u$  dan  $v$  adalah frekuensi spasial yang diukur dalam dua arah ortogonal (biasanya horizontal dan vertikal).

$W_0$  adalah batas yang dipilih. Gambar 28.6 mengilustrasikan efek filter top-hat, kadang-kadang juga disebut filter ideal. Selain ‘mengaburkan’ gambar dan menghaluskan noise, filter sederhana ini cenderung menghasilkan artefak ‘dering’ di perbatasan. Ini dapat dipahami dengan mempertimbangkan operasi ekuivalen di ruang nyata. Transformasi Fourier (atau transformasi Fourier terbalik) dari fungsi top-hat adalah fungsi Bessel. Ketika ini berbelit-belit dengan sebuah tepi, profil tepi dibuat tidak terlalu mendadak (buram) dan sayap yang beresilasi dari fungsi Bessel menciptakan riak pada gambar di sepanjang tepi. Untuk menghindari artefak riak yang tidak diinginkan ini, filter biasanya dimodifikasi dengan membuat jendela transisi mendadak pada  $W_0$  dengan transisi bertahap dari 1 ke 0 pada rentang kecil frekuensi yang berpusat di  $W_0$ . Gaussian, Hamming dan triangular adalah contoh jendela jenis ini.



**Gambar 5.** Fungsi transfer untuk filter low-pass (a), high-pass (b), high-boost (c) dan band-stop (d).

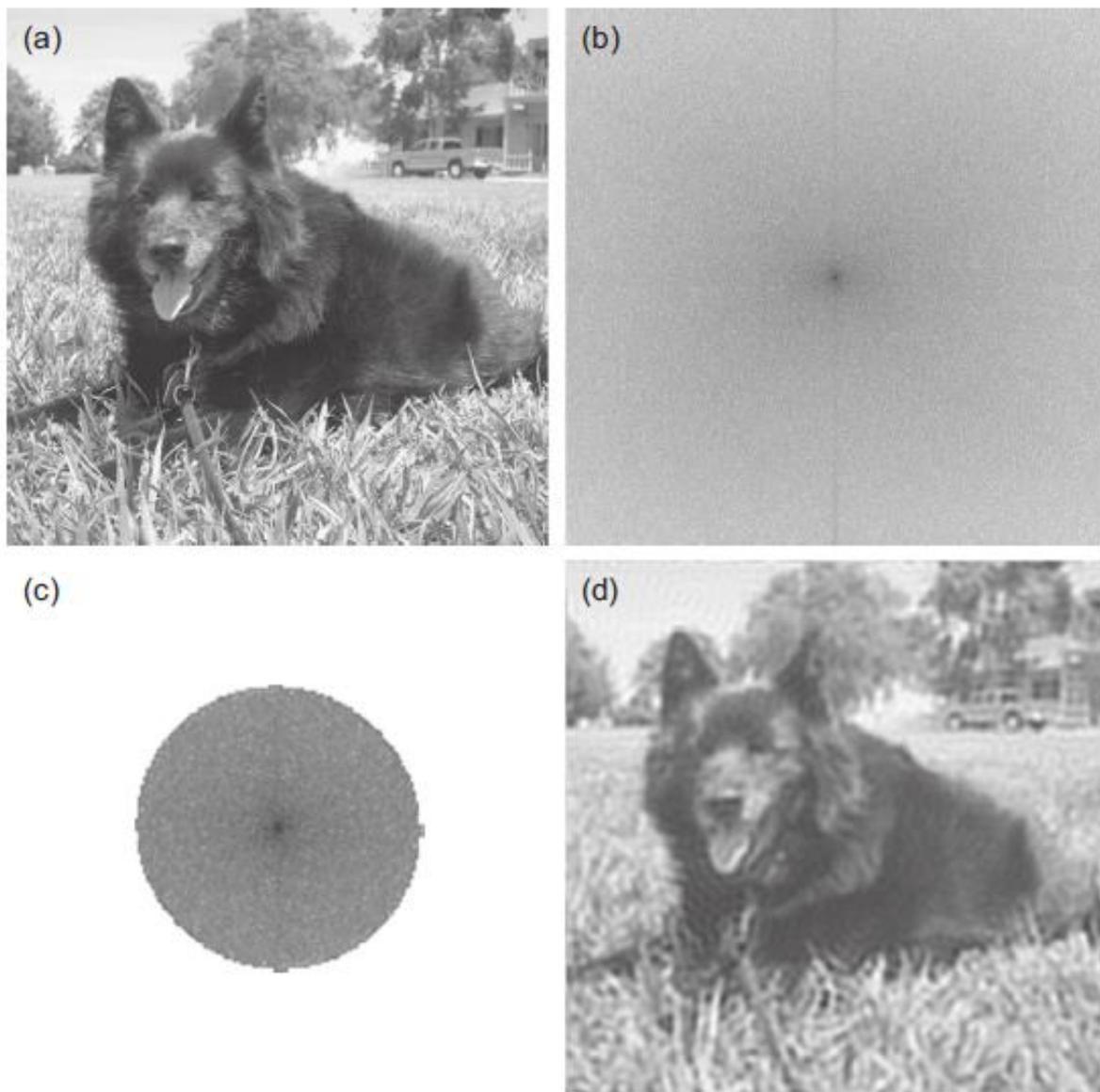
#### 4. Pemfilteran High-pass

Jika filter low-pass dibalik, kita mendapatkan filter high-pass (Gambar 5b):

Ekuasi 28.22

$$H(u, v) = 1 \text{ untuk } u^2 + v^2 \leq W_0^2 = 1 \text{ lainnya}$$

Filter ini menghilangkan semua frekuensi spasial rendah di bawah  $W_0$  dan melewatkan semua frekuensi spasial di atas  $W_0$ . Berdering sekali lagi menjadi masalah dengan filter ini dan diperlukan jendela. Gambar 6 mengilustrasikan hasil filter highpass tipe Gaussian.



**Gambar 6.** (a) Gambar asli. (b) Transformasi Fourier dari (a). (c) Transformasi Fourier dari (b) dengan frekuensi yang dilemahkan oleh filter low-pass seperti pada Ekuasi 28.21. (d) Gambar olahan yang dihasilkan.

## 5. Filter High-pass

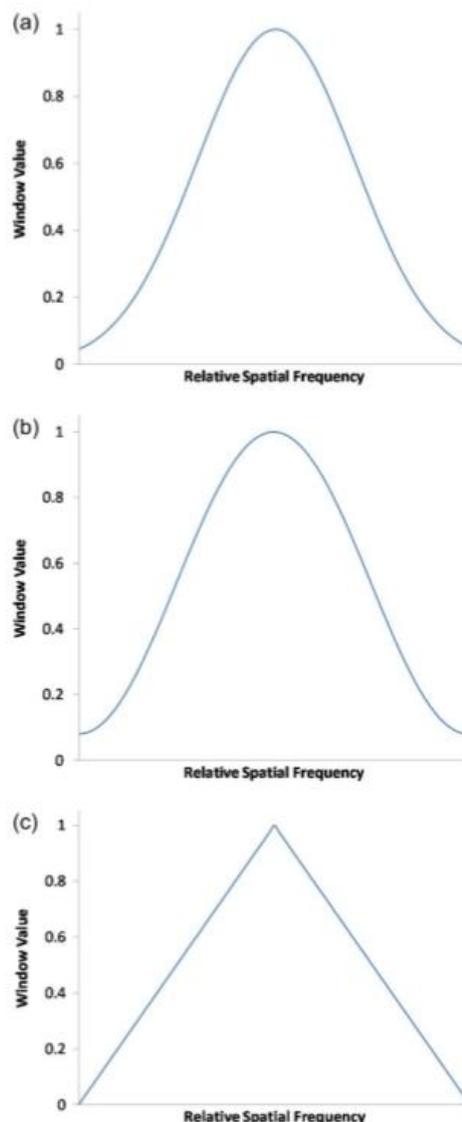
Peningkatan frekuensi spasial tinggi secara selektif dimungkinkan untuk membuat filter high-pass (Gambar 5c):

Ekuasi 28.23

$$H(u, v) = 1 \text{ untuk } u^2 + v^2 \leq W_0^2 \geq 1$$

Di wilayah di mana filter lebih besar dari satu, fungsi jendela dapat digunakan. Karena tepian sebagian besar dikaitkan dengan frekuensi spasial tinggi, maka dimungkinkan untuk menciptakan ilusi bahwa gambar dipertajam. Hal ini dapat, bagaimanapun, menyebabkan 'tell-tale' over- dan undershoot ketika profil tepi diplot. Lebih lanjut, karena bentuk kurva MTF yang khas, frekuensi spasial yang tinggi biasanya dikaitkan dengan rasio signal-to-noise yang rendah dan dengan demikian penguatan frekuensi yang berlebihan di wilayah ini dapat meningkatkan efek noise. Gambar 7 mengilustrasikan hasil filter berkekuatan tinggi.

## 6. Filter Band-pass dan Band-Stop



**Gambar 7.** Contoh fungsi windowing Gaussian (a), Hamming (b) dan segitiga (c).

Filter bass-pass dan band-stop mirip dengan filter high-pass dan low-pass kecuali rentang frekuensi tertentu yang dienuasi atau ditransmisikan oleh filter (Gambar d). Filter band-pass dapat didefinisikan sebagai:

Ekuasi 28.24

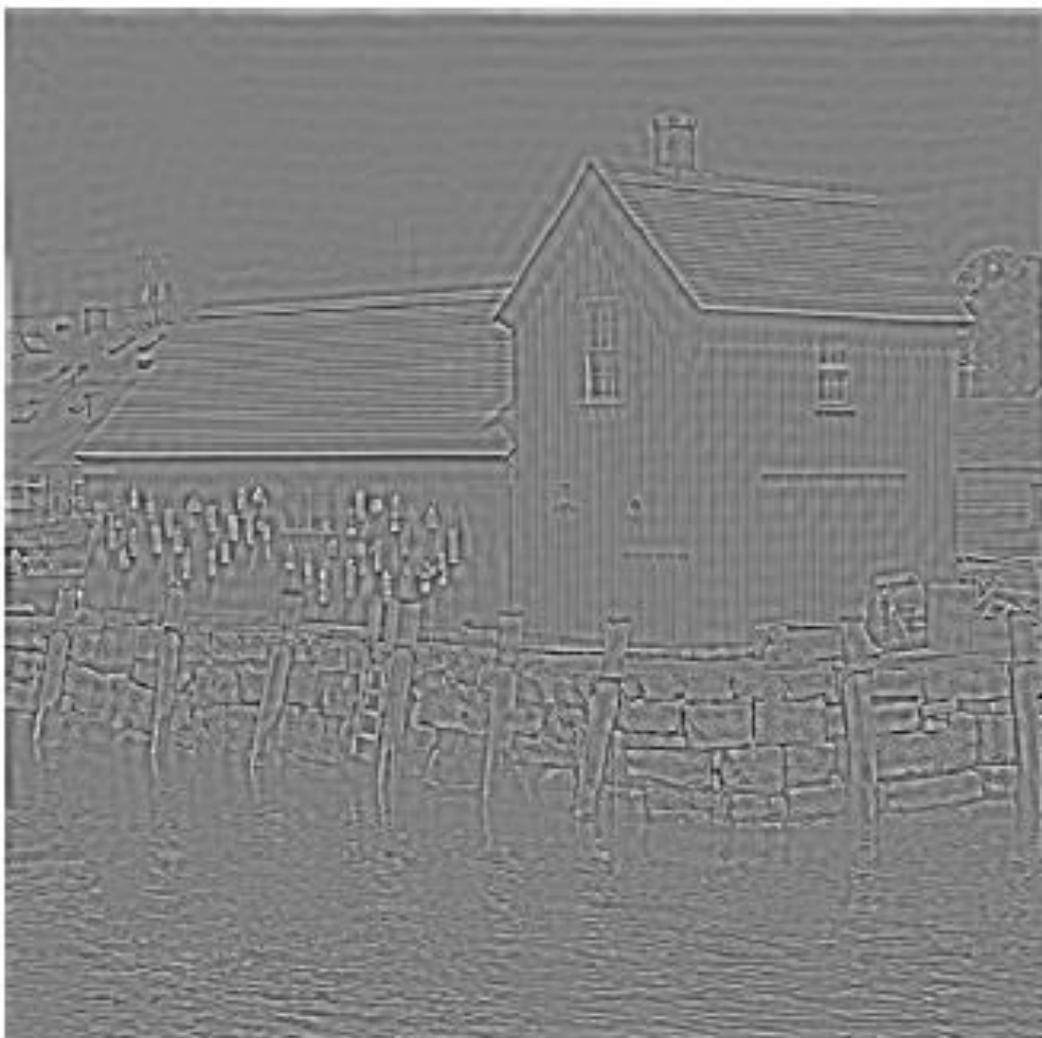
$$H(u, v) = 1 \text{ untuk } W_0^2 \leq u^2 + v^2 \leq W_1^2 = 0$$

dimana  $W_0$  to  $W_1$  merepresentasikan jangkauan frekuensi yang akan dilalui. Filter band-stop didefinisikan sebagai:

Ekuasi 28.25

$$H(u, v) = 0 \text{ untuk } W_1^2 \leq u^2 + v^2 \leq W_1^2$$

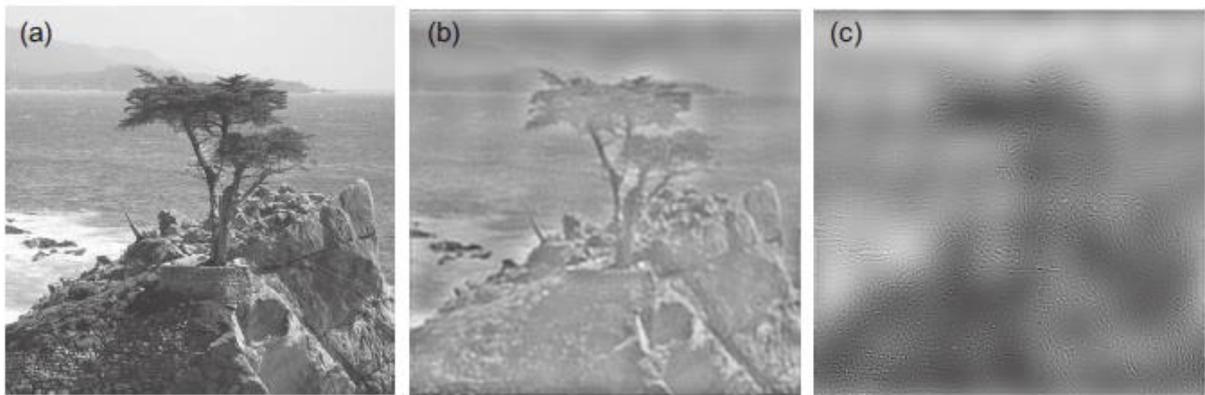
Jenis filter ini dapat sangat berguna untuk menghilangkan atau meningkatkan pola periodik. Gambar 10a-c mengilustrasikan efek penerapan filter band-pass dan band-stop ke gambar.



**Gambar 8** Filter Band Pass



**Gambar 9** Hasil penerapan filter high-boost pada gambar Gambar 4a.



**Gambar 10.** (a) Gambar asli. (b) Hasil dari penerapan filter band-pass ke (a). (c) Hasil dari penerapan filter band-stop ke (a).

## Restorasi Gambar

Dalam istilah yang sangat umum, dua proses degradasi selalu memengaruhi gambar saat diambil, atau selanjutnya direproduksi: gambar menjadi kabur dan noise ditambahkan. Proses pemulihan gambar yang telah terdegradasi, dengan menggunakan beberapa pengetahuan tentang fenomena degradasi, dikenal sebagai restorasi. Fungsi degradasi dapat diukur secara langsung jika sistem gambar yang digunakan untuk merekam gambar tersedia, informasi apriori, atau dalam kasus tertentu seperti astrofotografi, dapat diperkirakan dari gambar itu sendiri, informasi a posteriori.

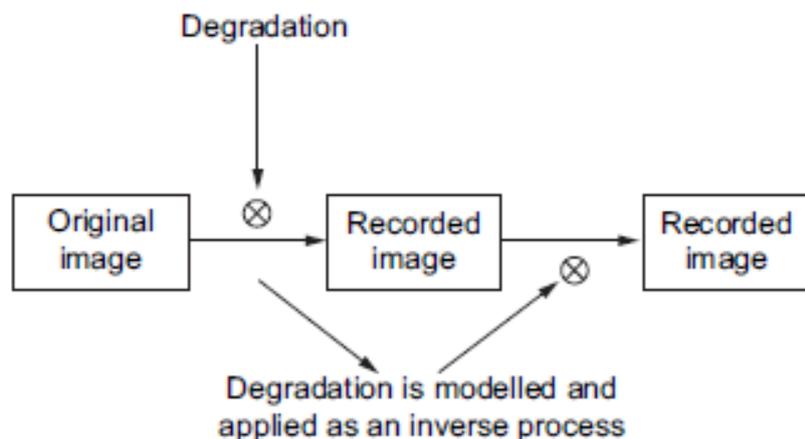
Teknik pemrosesan gambar yang dipilih untuk memanipulasi gambar untuk memperbaikinya untuk beberapa keputusan berbasis mesin atau visual berikutnya biasanya disebut prosedur peningkatan. Restorasi gambar mensyaratkan kita memiliki model degradasi, yang dapat dibalik dan diterapkan sebagai filter. Prosedurnya diilustrasikan pada Gambar 11.

We assume linearity so that the degradation function can be considered as convolution with PSF together with the addition of noise, i.e.,

Equation 28.26

$$f(x, y) = g(x, y) \otimes h(x, y) + n(x, y)$$

where  $f(x, y)$  is the recorded image,  $g(x, y)$  is the original image (‘ideal’),  $h(x, y)$  is the PSF of the system and  $n(x, y)$  is the noise.



**Gambar 11** Model sederhana untuk pemulihan gambar dari degradasi.

Kita perlu menemukan proses koreksi  $C\{\}$  untuk diterapkan ke  $f(x, y)$  dengan maksud memulihkan  $g(x, y)$ , yaitu  $C\{f(x, y)\} \rightarrow g(x, y)$  (atau setidaknya sesuatu yang dekat). Idealnya proses koreksi harus operasi sederhana, seperti konvolusi.

### Penyaringan terbalik

Ini adalah bentuk restorasi gambar yang paling sederhana. Ini mencoba untuk menghilangkan efek PSF dengan membuat dan menerapkan filter terbalik. Menulis ekuivalen ruang Fourier dari Ekuasi 28.26 kita dapatkan:

Ekuasi 28.27

$$F(u, v) = G(u, v).H(u, v) + N(u, v)$$

di mana F, G, H, dan N mewakili transformasi Fourier dari f, g, h dan n masing-masing; u dan v adalah variabel frekuensi spasial pada arah x dan y.

Perkiraan untuk gambar yang dipulihkan,  $G_{est}(u, v)$  dapat diperoleh dengan menggunakan:

Ekuasi 28.28

$$G_{est}(u, v) = \frac{F(u, v)}{H(u, v)} = G(u, v) + \frac{N(u, v)}{H(u, v)}$$

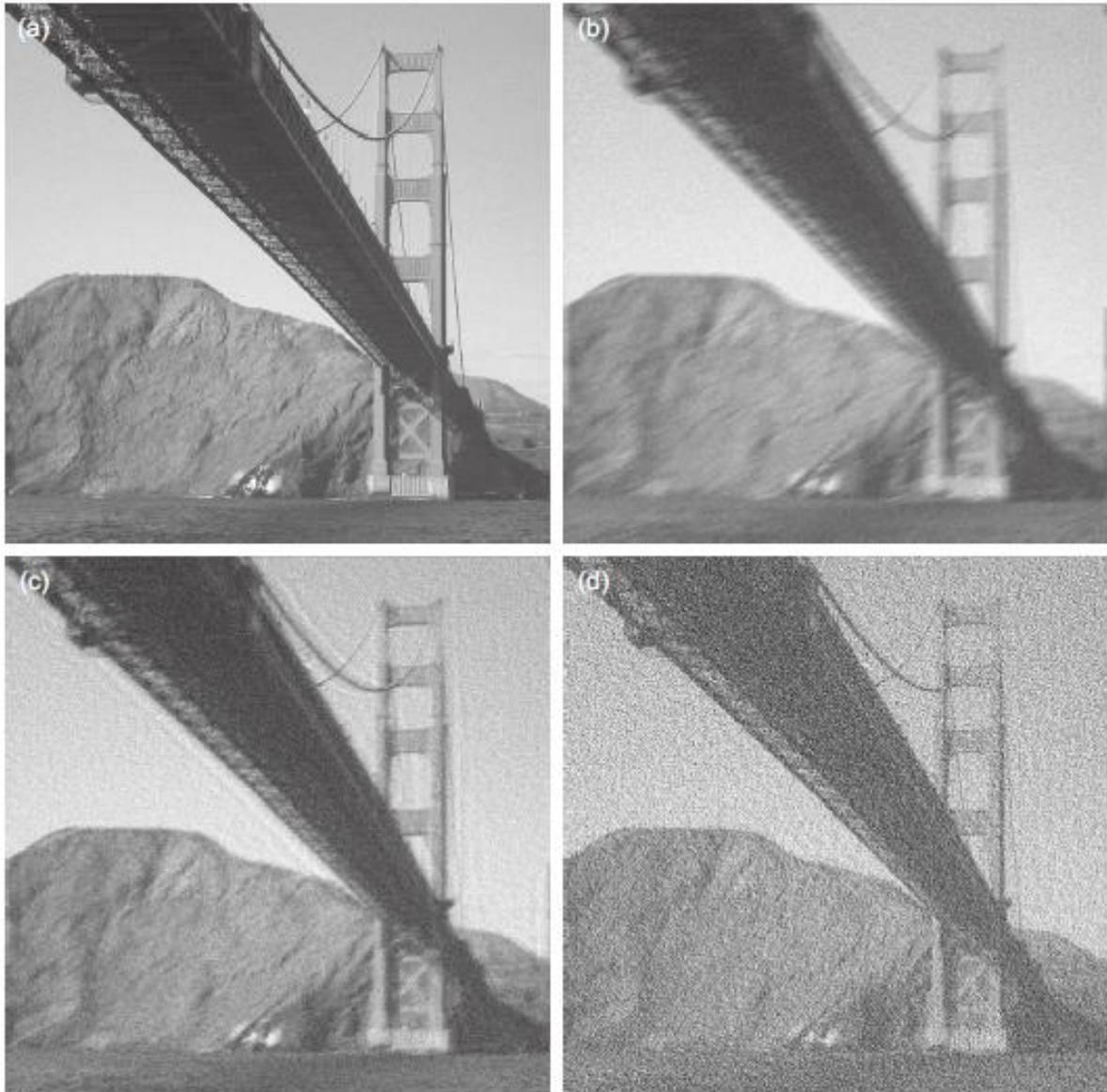
Jika tidak ada gangguan,  $N(u, v) = 0$  dan jika  $H(u, v)$  tidak mengandung nilai nol, kita mendapatkan rekonstruksi yang sempurna. Umumnya noise hadir dan  $N(u, v) \neq 0$ . Seringkali memiliki nilai konstan untuk semua frekuensi yang signifikan. Karena, untuk sebagian besar degradasi,  $H(u, v)$  cenderung nol untuk nilai besar u dan v, suku tersebut

Ekuasi 28.29

$$\frac{N(u, v)}{H(u, v)}$$

akan menjadi sangat besar pada frekuensi spasial yang tinggi. Oleh karena itu, gambar yang direkonstruksi sering kali tidak dapat digunakan karena tingkat noise yang tinggi.

Masalah ini dapat diilustrasikan dengan sangat mudah menggunakan filter penajaman sederhana. Meskipun proses degradasi spesifik tidak terlibat dalam penurunan filter, beberapa bentuk khas untuk  $h(x, y)$  tersirat. Efek dari filter semacam itu secara luas setara dengan penerapan Ekuasi 28,28 diikuti oleh transformasi Fourier terbalik. Gambar 12 menunjukkan contoh.



**Gambar 12** Gambar asli (a) telah mengalami proses konvolusi yang rumit pada tahap penangkapan yang melibatkan gerakan (b). Koreksi filter Wiener menghasilkan (c). Pemfilteran terbalik sederhana menghasilkan hasil bising dalam (d).

Terlepas dari masalah yang dijelaskan di atas, seringkali jauh lebih mudah untuk bekerja dalam domain frekuensi saat mencoba mendekonvolusi gambar. PSF sistem pencitraan biasanya kecil dibandingkan dengan ukuran gambar. Karena itu, perubahan kecil pada perkiraan PSF menyebabkan perubahan besar pada gambar dekonvolusi. Hubungan tersebut dapat dipahami lebih jauh dengan mempertimbangkan transformasi Fourier dari fungsi Gaussian, Ekuasi 7.21. Transformasi Fourier dari Gaussian adalah Gaussian lain dengan lebar yang berubah. Karena semakin sempit di ruang nyata, ia tumbuh lebih luas di ruang frekuensi. Oleh karena itu, jika kita membayangkan fungsi penyebaran garis (LSF) dari suatu sistem sebagai fungsi Gaussian, kita dapat dengan jelas melihat bahwa LSF kecil akan menghasilkan MTF yang ekstensif. Karena MTF meluas pada rentang frekuensi yang besar, MTF akan menjadi kurang sensitif terhadap perubahan kecil jika digunakan untuk mendekonvolusi gambar.

## Penyaringan optimal atau Wiener

Pendekatan yang lebih baik untuk pemulihan gambar adalah dengan memodifikasi proses penyaringan terbalik untuk memperhitungkan informasi tentang tingkat noise. Filter Wiener diturunkan untuk tujuan ini. Ini mencoba untuk merekonstruksi gambar dengan menemukan bukan versi gambar yang 'ideal' atau 'sebenarnya', tetapi gambar optimal yang secara statistik merupakan rekonstruksi terbaik yang dapat dibentuk. Gambar optimal didefinisikan sebagai gambar yang memiliki kesalahan kuadrat terkecil minimum dari gambar 'ideal'. Dalam praktiknya kita tidak tahu apa yang dimaksud dengan gambar 'ideal'. masalahnya diekspresikan seperti ini untuk memungkinkan penurunan matematika terus berlanjut.

Pertimbangkan gerakan rekonstruksi  $(x, y)$  dari gambar 'ideal'  $g(x, y)$ . Kami ingin meminimalkan perbedaan kuadrat terkecil, yaitu yang kami butuhkan

Ekuasi 28.30

$$|G_{est}(x, y) - g(x, y)|^2$$

menjadi minimum. Tanda kurung  $\langle \rangle$  menunjukkan rata-rata untuk semua nilai  $x$  dan  $y$ . Ini juga akan berguna untuk melakukan ini dengan konvolusi. Dengan kata lain kita ingin mencari filter  $y(x, y)$ , katakanlah, seperti itu:

Ekuasi 28.31

$$G_{est}(x, y) = f(x, y) \otimes y(x, y)$$

dan kondisi minimum di atas berlaku.

Dalam ruang Fourier, Ekuasi 28.31 dapat dituliskan sebagai:

Ekuasi 28.32

$$G_{est}(u, v) = F(u, v).Y(u, v)$$

di mana  $Y(u, v)$  adalah transformasi Fourier dari  $y(x, y)$ . Menggunakan Ekuasi 28.27, hasil ini menjadi:

Ekuasi 28.33

$$G_{est}(u, v) = G(u, v).H(u, v).Y(u, v) + Y(u, v).N(u, v)$$

Kondisi minimisasi dapat ditulis ulang dalam domain frekuensi:

Ekuasi 28.34

$$\langle |G_{est}(u, v) - G(u, v)|^2 \rangle$$

Minimalisasi ini terjadi sehubungan dengan filter  $Y(u, v)$  dan ditulis sebagai:

Ekuasi 28.35

$$\frac{\delta}{\delta Y} \langle |G_{est} - G|^2 \rangle = 0$$

di mana subskrip  $u$  dan  $v$  dihilangkan untuk kejelasan. Ekuasi 28.35 menjadi:

Ekuasi 28.36

$$\frac{\delta}{\delta Y} \langle |GHY + NY - G|^2 \rangle = 0$$

Jika kita mengasumsikan noise  $n(x, y)$  memiliki mean nol dan tidak bergantung pada sinyal, maka semua suku bentuk  $\langle N(u, v) \rangle$  akan menjadi nol dan dapat diabaikan. Jika suku kuadrat dalam Ekuasi 28.36 diperluas dan disederhanakan, kondisi minimisasi dapat diselesaikan untuk menghasilkan:

Ekuasi 28.37

$$Y(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H^2(u, v)|^2 + \frac{|N(u, v)|^2}{|G(u, v)|^2}}$$

di mana  $H^*(u, v)$  adalah konjugat kompleks dari  $H(u, v)$ . Hal ini karena notasi dari matematika kompleks dan muncul karena fungsi umum  $H(u, v)$  memiliki suku nyata dan imajiner yang terpisah untuk memungkinkan fungsi sebaran asimetris  $h(x, y)$ . Hasil di atas adalah filter Wiener klasik. Jika kita mengasumsikan fungsi sebaran penurunan adalah simetris, Ekuasi 28.37 tereduksi menjadi:

Ekuasi 28,38

$$Y(u, v) = \frac{H(u, v)}{|H^2(u, v)|^2 + \frac{|N(u, v)|^2}{|G(u, v)|^2}}$$

Perhatikan bahwa dalam kasus bebas noise, di mana  $N(u, v) \rightarrow 0$ , Ekuasi 28.38 tereduksi menjadi:

Ekuasi 28.39

$$Y(u, v) = \frac{1}{H(u, v)}$$

yang hanya merupakan filter terbalik yang ideal. Syarat

Ekuasi 28.40

$$\frac{|N(u, v)|^2}{|G(u, v)|^2}$$

dalam Ekuasi 28.38 dapat didekati dengan kebalikan dari rasio signal-to-noise kuadrat seperti yang dijelaskan dalam Ekuasi 24.12. Oleh karena itu, Ekuasi 28.38 di atas dapat didekati dengan:

Ekuasi 28.41

$$Y(u, v) = \frac{H(u, v)}{H^2(u, v) + \left( \frac{\sigma^2 N}{\sigma^2 t - \sigma^2 N} \right)}$$

Ekuasi 28.41 menawarkan cara yang berguna untuk merancang filter ruang frekuensi untuk memerangi degradasi yang diketahui (misalnya, keburaman gerakan yang seragam) saat gambar berisik.

## **Rekonstruksi entropi maksimum**

Secara umum dengan teknik rekonstruksi lainnya, hal ini bertujuan untuk menemukan rekonstruksi gambar yang paling mulus, mengingat versi degradasi yang bising. Ia melakukannya dengan mempertimbangkan nilai piksel dari suatu gambar sebagai probabilitas, dari mana entropi gambar dapat didefinisikan. Entropi dari gambar yang direkonstruksi, yang dibentuk tanpa adanya batasan, akan menjadi maksimum jika semua probabilitasnya sama. Dengan kata lain, ini akan terdiri dari white noise. Ketika batasan diterapkan dengan menggunakan informasi dalam gambar asli yang mengalami degradasi, rekonstruksi yang optimal untuk gambar tersebut terbentuk. Proses ini melibatkan iterasi (perkiraan berulang) dan akan mencakup dekonvolusi dari PSF yang diketahui atau diperkirakan. Teknik ini mahal secara komputasi dan perawatan diperlukan untuk menghindari efek yang berbeda atau beresilasi. Ini digunakan secara luas untuk rekonstruksi gambar astronomi yang berisik di mana informasi mengenai batas resolusi dan pendeteksian dicari.

## **Restorasi interaktif**

Dalam banyak aplikasi pemrosesan gambar digital, operator akan memiliki kesempatan untuk bereaksi terhadap hasil dari proses tertentu. Kemudian menjadi menguntungkan untuk memanfaatkan intuisi pengamat berpengalaman untuk restorasi gambar interaktif. Mengingat sifat tindakan noise dan proses degradasi yang tidak pasti, sebagian besar prosedur restorasi akan mendapatkan keuntungan dari fleksibilitas ini. Misalnya, istilah daya derau-ke-sinyal dari Ekuasi 28.41 dapat diganti dengan konstanta yang ditentukan oleh operator, dipilih dengan trial and error untuk menghasilkan koreksi yang paling tepat.

## **EDOF (Extended depth of field)**

Pemulihan gambar digunakan di beberapa kamera modern untuk mencoba meningkatkan depth of field yang tampak. Dengan memodifikasi PSF lensa agar konsisten (meskipun tidak selalu sebaik pada bidang yang lebih dalam), adalah mungkin untuk selanjutnya memulihkan sharpness yang hilang dengan menggunakan pemulihan gambar. Efek yang dihasilkan adalah lensa memiliki depth of field yang tampaknya lebih besar. Teknik ini dapat menghilangkan kebutuhan akan fokus otomatis, sehingga mengurangi jumlah komponen mekanis dan meningkatkan keandalan sistem. Biaya prosedur, bagaimanapun, adalah peningkatan kompleksitas pemrosesan gambar dan kemungkinan noise. Karena noise cenderung berubah tergantung pada kondisi eksposur, model noise dari sensor perlu disertakan secara internal ke sistem pencitraan untuk mengoptimalkan rekonstruksi. Selanjutnya, variasi PSF di seluruh bidang pandang perlu diperhitungkan. Sensor ponsel modern, yang sangat membutuhkan EDOF, dapat mendekonvolusi gambar secara real time.

## **Transformasi wavelet**

Terlepas dari pentingnya transformasi Fourier dalam pencitraan, ada banyak transformasi lain yang terbukti berguna untuk berbagai aplikasi. Kegunaan hebat dalam kompresi gambar modern adalah transformasi wavelet. Transformasi hanyalah metode untuk mengubah sinyal dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Bentuk yang diubah itu tergantung pada fungsi dasarnya. Dalam kasus Transformasi Fourier, basis konversinya adalah gelombang sinus dan, seperti yang telah kita lihat, fase pada setiap frekuensi diubah dengan menambahkan proporsi

gelombang kosinus dengan frekuensi yang sama. Gelombang-gelombang ini dianggap meluas tanpa batas di ruang angkasa.

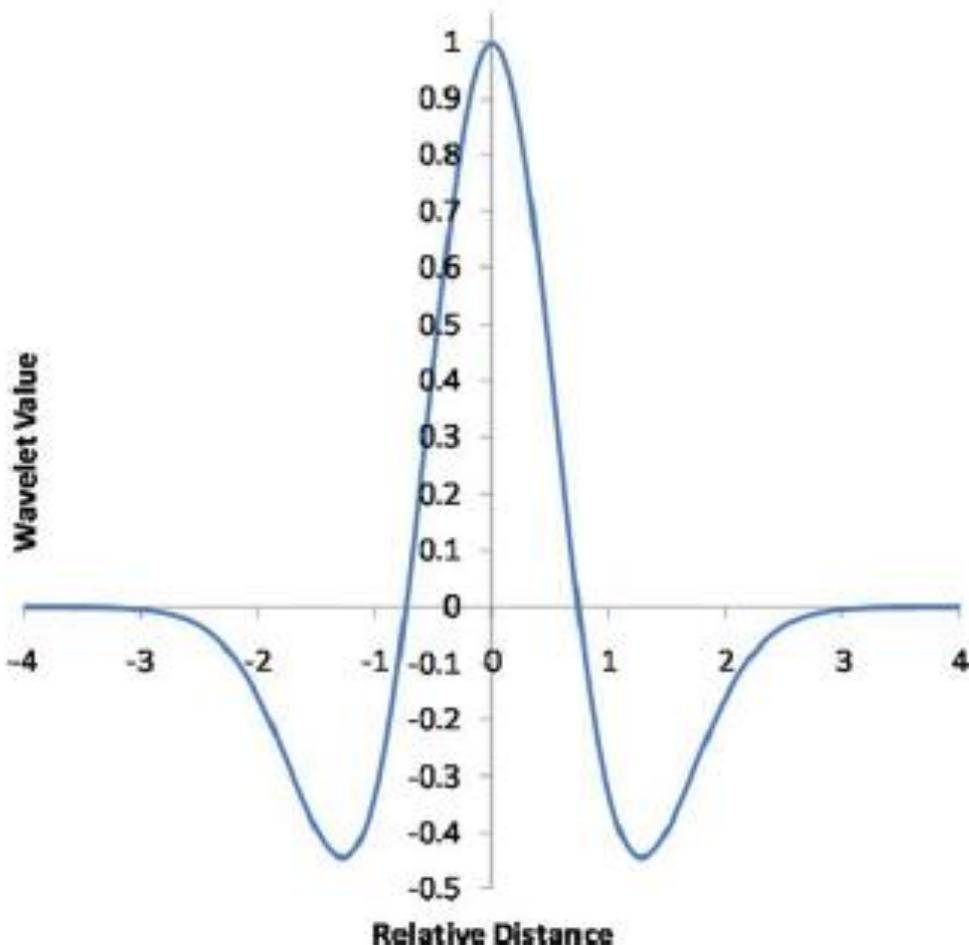
Batasan dari transformasi Fourier adalah bahwa meskipun ia mengungkapkan frekuensi spasial mana yang terkandung dalam gambar sebagai total, ia tidak memberi tahu kita di mana frekuensi tersebut terjadi dalam gambar. Itu tidak terlokalisasi secara spasial. Sebuah wavelet terbatas di ruang angkasa dan mungkin mempengaruhi denyut nadi energi. Gambar 13 menunjukkan wavelet tipikal, meskipun perlu dicatat bahwa ada banyak jenis, dengan berbagai bentuk. Wavelet digunakan sebagai fungsi dasar dari transformasi wavelet.

Transformasi wavelet kontinu (CWT) dapat ditulis sebagai:

Ekuasi 28.42

$$F(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int f(x) \cdot \psi * \left( \frac{x - \tau}{s} \right) dx$$

dimana  $\Psi(x)$  adalah wavelet,  $f(x)$  fungsi yang akan ditransformasikan,  $\tau$  variabel translasi dan  $s$  variabel skala. Wavelet dapat dianggap berbelit-belit dengan sinyal input. Ini digeser melalui sinyal saat  $s$  diubah. Skala wavelet secara efektif diskalakan menggunakan  $s$ , yang mengubah skala detail terkait, yaitu kumpulan frekuensi spasial yang dianalisis.



**Gambar 13** Sebuah wavelet tipikal yang digunakan dalam transformasi wavelet kontinu, wavelet topi Meksiko.

Menafsirkan ini dengan cara yang kurang matematis, kita dapat membayangkan bentuk konvolusi dari ekuasi tersebut serupa dengan pemfilteran atau korelasi yang cocok, dan wavelet sedang diubah ukurannya. Untuk ‘ukuran ‘ (skala) wavelet tertentu, transformasi wavelet mencari tahu berapa banyak wavelet yang ada di setiap titik dalam gambar. Transformasi kemudian mengulangi ini untuk banyak ‘ukuran ‘ (skala) wavelet. Saat wavelet diskalakan menjadi kecil, wavelet menganalisis informasi kecil atau resolusi tinggi dan sebaliknya, jika berukuran besar, resolusi rendah atau struktur besar.

## Transformasi wavelet diskrit

Transformasi wavelet diskrit (DWT) bukan hanya versi diskrit dari CWT di atas seperti halnya untuk transformasi Fourier. DWT beroperasi melalui metode yang dikenal sebagai pengkodean sub-band dan secara iteratif menguraikan sinyal menjadi pita frekuensi spasial yang terus menurun. Di jantung operasinya, sepasang filter cermin segi empat (QMF) dibuat. QMF terdiri dari filter high-pass dan low-pass yang respons impulsnya terkait erat oleh:

Ekuasi 28.43

$$h_H[n] = (-1)^n h_L[n]$$

di mana  $h_H$  adalah respons impuls frekuensi tinggi dan  $h_L$  respons frekuensi rendah. Penerapan kedua filter ke sinyal menghasilkan dua keluaran, salah satunya berisi frekuensi spasial yang lebih tinggi dan satu lagi frekuensi spasial yang lebih rendah, oleh karena itu disebut pengkodean sub-band. Kami menunjukkan informasi detail frekuensi spasial yang lebih tinggi, informasi perkiraan frekuensi spasial yang lebih rendah. Filter diterapkan dalam operasi tipe konvolusi seperti sebelumnya:

Ekuasi 28.44

$$F_L[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f[n] h_L[2n - k]$$

dan

Ekuasi 28.45

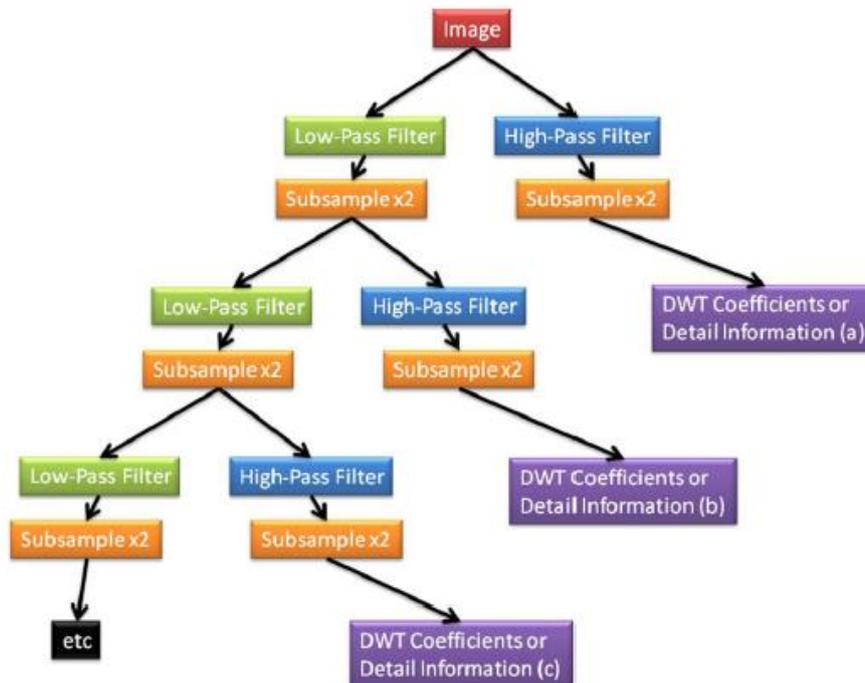
$$F_H[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f[n] h_H[2n - k]$$

di mana  $f$  adalah sinyal diskrit asli,  $F$  adalah sinyal yang difilter dan  $h$  adalah filter. Subskrip  $L$  dan  $H$  masing-masing menunjukkan frekuensi rendah dan tinggi. Karena sinyal telah difilter untuk memuat setengah jumlah frekuensi spasial, maka dari teorema Nyquist, setengah dari sampel dapat dihapus tanpa mengubah informasi yang terkandung dalam setiap hasil. Salah satu tujuan dari desain pasangan filter QMF yang efisien adalah untuk menghasilkan pasangan filter yang dapat merekonstruksi sinyal asli setelah penghapusan sampel yang berlebihan secara efektif.

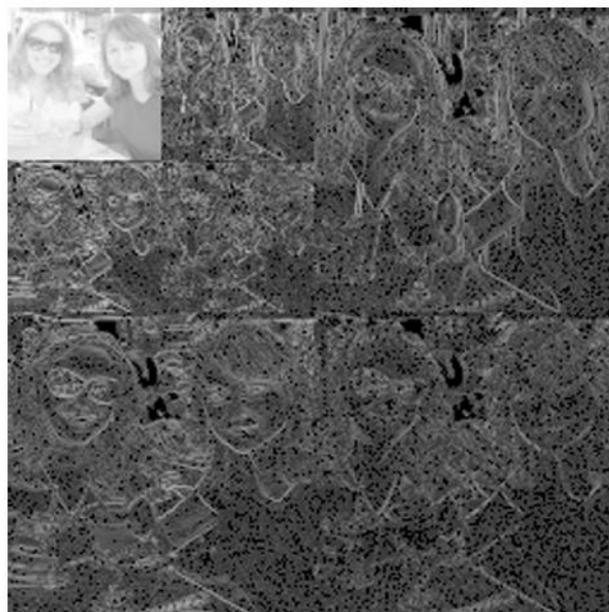
DWT melanjutkan dengan menerapkan secara iteratif filter low-pass dan high-pass, juga dikenal sebagai scaling dan wavelet filter, berturut-turut ke sinyal, kemudian subsampling untuk menghilangkan informasi yang berlebihan (Gambar 14). Ini menciptakan bank filter atau pohon dekomposisi. Informasi dari filter wavelet menghasilkan koefisien DWT pada setiap

tingkat dekomposisi dan bahwa dari filter penskalaan diproses lagi untuk menghasilkan koefisien untuk tingkat berikutnya.

Rekonstruksi sinyal dilakukan dengan meningkatkan hasil pada setiap tingkat dekomposisi dan meneruskannya melalui filter rekonstruksi. Filter rekonstruksi persis sama dengan filter kecuali filter terbalik secara spasial. Manfaat DWT untuk pencitraan adalah di area kompresi gambar,. Dengan kuantisasi atau penghilangan koefisien yang mewakili frekuensi spasial tertinggi dalam gambar, informasi dapat dihilangkan dengan dampak visual yang minimal (Gambar 15).



**Gambar 14** Pohon dekomposisi transformasi wavelet diskrit.



**Gambar 15.** Penerapan transformasi wavelet Haar ke citra.

# Kompresi Gambar

## Pengantar

Pertumbuhan penggunaan Internet secara global, ditambah dengan peningkatan metode transmisi data digital, seperti penggunaan broadband dan jaringan nirkabel secara luas, berarti bahwa rentang informasi yang lebih besar ditampilkan dengan menggunakan gambar digital. Perbaikan dalam teknologi sensor gambar digital memungkinkan produksi gambar digital yang lebih besar pada saat akuisisi. Kemajuan di bidang-bidang seperti pencitraan 3D, pencitraan multispektral, dan pencitraan dynamic range tinggi semuanya menambah persyaratan yang sudah sangat besar dalam hal penyimpanan dan transmisi data yang dihasilkan. Biaya penyimpanan permanen terus menurun, tetapi kebutuhan untuk menemukan metode kompresi data yang baru dan efisien sebelum penyimpanan tetap menjadi masalah yang relevan.

Banyak pekerjaan telah dilakukan, selama beberapa dekade, di bidang komunikasi dan pemrosesan sinyal untuk menentukan metode pengurangan data, tanpa mempengaruhi informasi yang disampaikan secara signifikan. Baru-baru ini telah ada fokus pada pengembangan dan adaptasi metode ini untuk menangani secara khusus data yang mewakili gambar.

Dalam banyak kasus, atribut unik dari gambar (dibandingkan dengan tipe representasi data lainnya), misalnya struktur spasial dan statistiknya, dan karakteristik khas dari gambar alami dalam domain frekuensi dieksploitasi untuk mengurangi ukuran file. Selain itu, keterbatasan sistem visual manusia, dalam hal resolusi, fungsi sensitivitas kontras, diskriminasi nada dan warna, digunakan dengan cara yang cerdas untuk menghasilkan kompresi gambar yang signifikan yang dapat terlihat hampir tidak dapat dibedakan dari gambar asli yang tidak dikompresi.

## Ukuran File Gambar yang tidak dikompresi

Ukuran file gambar yang tidak dikompresi adalah ukuran data gambar saja, tanpa menyertakan ruang yang digunakan oleh aspek lain dari file yang disimpan dalam format tertentu, seperti header file dan metadata. Ini dihitung atas dasar bahwa jumlah digit biner (atau panjang kode) yang sama ditetapkan untuk setiap piksel. Ukuran file gambar yang disimpan pada disk (diakses melalui properti file) dapat berbeda secara signifikan dari ukuran yang dihitung ini, terutama jika ada informasi tambahan yang disematkan dalam file, atau jika file telah dikompresi dengan cara tertentu. Ukuran file yang tidak terkompresi (dalam bit) dihitung dengan menggunakan:

Ekuasi 29.1

$$F = \text{jumlah piksel} \times \text{jumlah channel} \times \text{jumlah bit per channel}$$

Ukuran file yang lebih umum diekspresikan dalam kilobyte (kb) atau megabyte (Mb), yang diperoleh dengan membagi jumlah bit dengan  $(8 \times 1024)$  atau  $(8 \times 1024 \times 1024)$  masing-masing. Beberapa contoh ukuran file yang tidak dikompresi untuk format media yang umum diberikan pada Tabel 29.1.

<b>Tabel 1 Ukuran file untuk beberapa jenis format media</b>					
<b>MEDIA</b>	<b>DIMENSI</b>		<b>RESOLUSI</b>	<b>BIT DEPTH</b>	<b>UKURAN FILE UNCOMPR ESS (Mb)</b>
	<b>H</b>	<b>V</b>			
Scan pada film 35mm (RGB)	36mm	24 mm	2400 ppi	24 bit per pixel	22.1
Gambar dari sensor megapixel 10.1 (RGB)	10.1 juta piksel aktif pada resolusi asli			24 bit per pixel	28.1
Gambar dari punggung digital format sedang (RGB)	49.1 mm	36.8 mm	7416 x 66 = 40.135.492 pixel aktif	16 bit per channel x 3 channel = 48 bit per pixel	241 <sup>†</sup>
Print 10 x 8 (CMYK)	10 in.	8 in.	300 dpi	32 bit per pixel	27.5
Gambar ditampilkan di tiga perempat ukuran monitor XGA	764 pixel	574 pixel	ditampilkan pada 72 ppi	24 bit per pixel	1.3
<sup>†</sup> File gambar dari kamera belakang jenis ini biasanya merupakan file RAW terkompresi tanpa kerugian, jauh lebih kecil dari nilai yang dihitung ini.					

## Informasi dan Data Gambar

Konversi pemandangan asli (atau gambar nada kontinu) menjadi gambar digital melibatkan pengambilan sampel spasial dari distribusi intensitas, diikuti dengan kuantisasi. Meskipun pengguna melihat gambar direpresentasikan sebagai larik piksel berwarna, angka yang mewakili setiap piksel berada pada tingkat dasar aliran digit biner, yang memungkinkannya untuk dibaca dan disimpan oleh komputer. Semua informasi di dalam komputer pada suatu saat akan diwakili oleh data biner dan oleh karena itu data gambar mewakili salah satu dari banyak jenis informasi yang dapat dikompresi. Banyak metode yang digunakan untuk memampatkan gambar memiliki dasar dalam teknik yang dikembangkan untuk memampatkan jenis informasi lain ini.

Pada titik ini, penting untuk mendefinisikan data dan informasi, karena ini adalah konsep inti di balik kompresi gambar. Pada dasarnya, informasi adalah pengetahuan tentang sesuatu dan merupakan kualitas yang melekat pada suatu citra. Dalam istilah komunikasi, informasi terkandung dalam setiap pesan yang dikirimkan antara sumber dan penerima. Data adalah sashutter yang digunakan untuk mengirim pesan dan merupakan kumpulan informasi yang

terorganisir. Dalam gambar digital, informasi terkandung dalam susunan nilai piksel, tetapi datanya adalah sekumpulan digit biner yang mewakilinya saat dikirimkan atau disimpan.

Teori informasi adalah cabang dari matematika terapan yang menyediakan kerangka kerja yang memungkinkan kuantifikasi informasi yang dihasilkan atau ditransmisikan melalui saluran komunikasi. Kerangka kerja ini dapat diterapkan pada banyak jenis sinyal. Dalam kompresi gambar, gambar digital adalah sinyalnya, dan sedang dikirim melalui sejumlah saluran komunikasi saat bergerak melalui rantai gambar digital. Proses kompresi melibatkan pengurangan data yang merepresentasikan informasi atau pengurangan konten informasi itu sendiri. Reduksi data umumnya dicapai dengan menemukan metode yang lebih efisien untuk merepresentasikan (menyandikan) informasi.

Dalam gambar yang mengandung sejumlah piksel, setiap piksel dapat dianggap sebagai sumber informasi. Isi informasi gambar berhubungan dengan probabilitas setiap piksel mengambil salah satu dari  $n$  nilai yang mungkin. Kisaran nilai yang mungkin, terkait dengan kedalaman bit gambar.

Proses memperoleh informasi setara dengan menghilangkan ketidakpastian. Oleh karena itu, konten informasi dapat dianggap sebagai ukuran prediktabilitas: gambar yang mengandung piksel yang semuanya memiliki nilai piksel yang sama memiliki tingkat prediktabilitas yang tinggi dan oleh karena itu setiap piksel tidak memberi kita banyak informasi. Ide inilah yang menjadi dasar banyak teori kompresi. Jika sekumpulan hasil sangat dapat diprediksi, maka sumber informasi dikatakan mengandung redundansi.

Jumlah redundansi dalam kumpulan data dapat dihitung menggunakan redundansi data relatif ( $R_d$ ), yang menghubungkan jumlah bit informasi dalam kumpulan data yang tidak terkompresi dengan kumpulan data yang dikompresi yang mewakili informasi yang sama sebagai berikut:

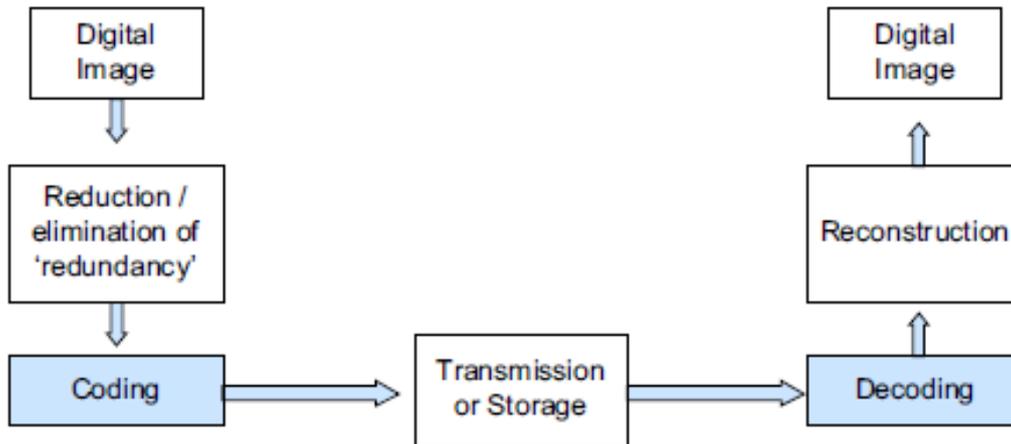
Ekuasi 29.2

$$R_d = 1 - \frac{N_{kompres}}{N_{oroginal}}$$

Perhatikan bahwa pecahan dalam ekspresi ini adalah kebalikan dari rasio kompresi untuk dua kumpulan data ini, yang akan kita bahas nanti.

## Dasar Kompresi

Metode kompresi mengeksploitasi redundansi dengan sekumpulan data. Dengan menghapus beberapa redundansi, mereka mengurangi ukuran kumpulan data yang diperlukan tanpa (sebaiknya) mengubah pesan yang mendasarinya. Sejauh mana redundansi dapat dihilangkan tergantung pada berbagai faktor, seperti jenis sinyal yang dikompresi. Misalnya, teks, gambar diam, gambar bergerak, dan audio semuanya memiliki jenis redundansi yang berbeda dan persyaratan yang berbeda dalam hal rekonstruksinya.



**Gambar 16** Algoritme kompresi gambar terdiri dari dua proses: proses kompresi yang terjadi saat file disimpan dan proses dekompresi yang sesuai saat file yang dikompresi dibuka kembali. f menunjukkan bahwa keluaran merupakan perkiraan masukan dan mungkin tidak identik.

Saat menjelaskan metode kompresi, kami sebenarnya mempertimbangkan dua proses: proses kompresi dan dekompresi yang sesuai (lihat Gambar 16). Tujuannya adalah agar versi kumpulan data yang didekompresi sedekat mungkin dengan aslinya. Namun, penting untuk dicatat bahwa kompresi bisa jadi lossless atau lossy.

Metode kompresi lossless, seperti namanya, memampatkan data tanpa menghapus informasi apa pun, yang berarti bahwa setelah dekompresi, rekonstruksi akan sama dengan aslinya. Namun, jumlah kompresi yang dicapai akan dibatasi. Jenis informasi tertentu memerlukan rekonstruksi yang sempurna, dan oleh karena itu hanya metode lossless yang dapat diterapkan.

Metode kompresi lossy menghilangkan redundansi pada data dan informasi, dalam mengalirkan beberapa kerugian dalam versi yang direkonstruksi. Kompresi lossy dimungkinkan dalam kasus di mana ada beberapa toleransi untuk kehilangan dan tergantung pada jenis informasi yang diwakili. Contoh situasi seperti itu adalah situasi di mana beberapa informasi berada di luar kemampuan penerima. Proses ini terkadang digambarkan sebagai penghapusan hal-hal yang tidak relevan. Dalam metode lossy selalu ada trade-off antara tingkat kompresi yang dicapai dan tingkat kehilangan kualitas dalam sinyal yang direkonstruksi.

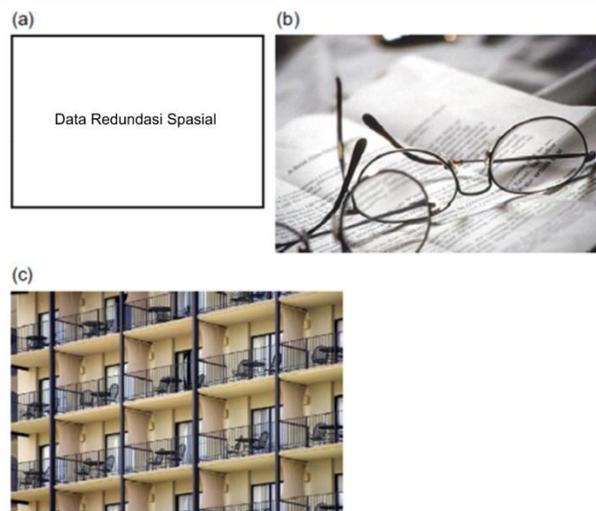
## Jenis Redundansi

Secara matematis, proses kompresi dapat dilihat sebagai penghilangan korelasi dalam citra. Ada sejumlah area redundansi yang biasanya ada dalam gambar digital tipikal:

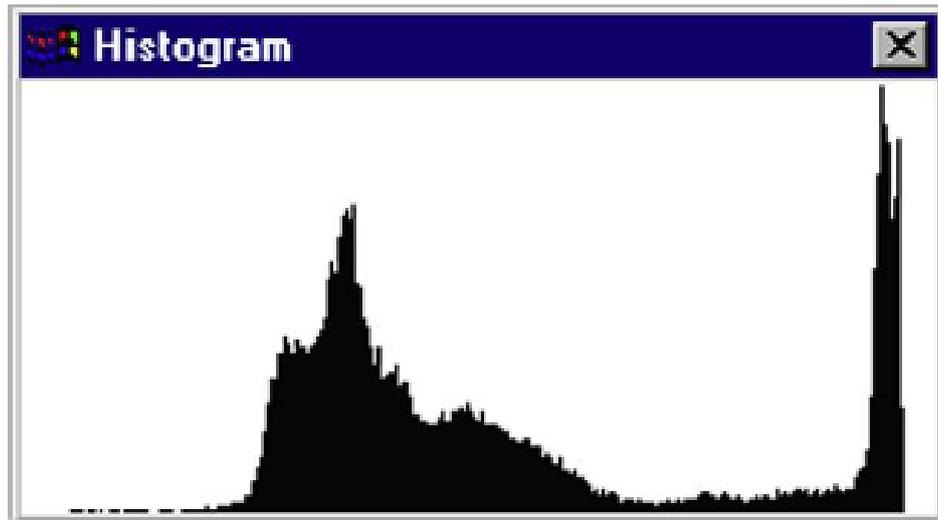
- *Redundansi spasial.* Jenis redundansi ini mengacu pada korelasi antara piksel tetangga dan oleh karena itu redundansi yang melekat pada nilai piksel (juga dikenal sebagai redundansi interpiksel). Korelasi dapat terdiri dari beberapa piksel yang berurutan dengan nilai yang sama, di area di mana terdapat sekumpulan warna, misalnya. Lebih umum dalam gambar alami, bagaimanapun, piksel tetangga tidak akan identik, tetapi akan memiliki nilai yang sama dengan perbedaan yang sangat kecil. Pada gambar di mana ada pola berulang, mungkin ada korelasi antara kelompok piksel. Jenis redundansi antar-piksel tertentu terjadi antara piksel dalam posisi yang sama dalam frame berikutnya dalam urutan gambar (yaitu dalam aplikasi video). Hal ini dikenal

sebagai interframeredundancy, atau redundansi temporal; terutama membahas gambar diam, oleh karena itu definisi redundansi spasial sebelumnya dibahas di sini.

- *Redundansi statistik.* Jika sebuah gambar direpresentasikan secara statistik (yaitu dalam istilah histogramnya), umumnya gambar tersebut akan berisi beberapa nilai piksel yang muncul lebih sering daripada yang lain. Memang, beberapa nilai piksel mungkin tidak terwakili dalam gambar sama sekali dan akan muncul sebagai celah dalam histogram. Untuk mengalokasikan kode biner yang sama panjangnya ke semua nilai piksel, terlepas dari frekuensinya, berarti kode itu sendiri akan mengandung redundansi. Jumlah kompresi yang signifikan dapat dicapai dengan menggunakan kode panjang variabel, di mana nilai yang paling sering muncul diberi kode yang lebih pendek daripada nilai yang lebih jarang. Metode kompresi yang memanfaatkan redundansi statistik (juga dikenal sebagai redundansi pengkodean) kadang-kadang disebut teknik pengkodean entropi, dan memiliki dasar dalam teorema pengkodean sumber Shannon (lihat nanti). Kebanyakan skema kompresi lossy akan menyertakan tahap pengkodean entropi lossless.
- *Redundansi psikovisual.* Karena sistem visual manusia tidak memiliki kepekaan yang sama dalam menanggapi semua informasi visual, beberapa informasi yang terkandung di dalam gambar kurang penting secara visual. Informasi tersebut dapat dikurangi atau dihilangkan tanpa menghasilkan perbedaan visual yang signifikan. Contohnya adalah pengurangan frekuensi yang kurang penting bagi sistem visual manusia yang digunakan dalam algoritme seperti algoritme kompresi lossy baseline JPEG (Joint Photographic Experts Group). Selain itu, dalam beberapa metode, informasi warna dikuantisasi dengan pengambilan sampel saluran chroma sementara informasi luminansi dihitung dipertahankan, karena diskriminasi warna dalam sistem visual manusia kurang sensitif dibandingkan dengan pencahayaan. Pengurangan redundansi psikovisual melibatkan penghapusan informasi dan bukan hanya data dan oleh karena itu metode yang terlibat tidak dapat dibalik dan merugikan.



**Gambar 17.** Jenis redundansi spasial. (A) Nilai piksel identik yang dijalankan cenderung terjadi pada gambar yang berisi grafik atau teks (mis. Gambar faks). (b) Dalam gambar alami, piksel yang berurutan mungkin memiliki nilai yang serupa, meningkat atau menurun dalam jumlah kecil. Gambar ini mengandung banyak frekuensi rendah dan oleh karena itu gradasi nada halus. (c) Kelompok piksel mungkin berkorelasi di bidang pola berulang. Meskipun gambar ini sangat sibuk, pola berulang berarti bahwa nilai piksel mungkin cukup dapat diprediksi.



**Gambar 18.** Coding redundansi. Histogram gambar akan sering menampilkan satu atau beberapa puncak, yang menunjukkan bahwa beberapa nilai piksel lebih mungkin daripada yang lain.

### **Mengukur tingkat kompresi**

Algoritma kompresi lossless dapat dievaluasi dengan beberapa cara, misalnya dalam hal kompleksitasnya; atau dalam waktu yang dibutuhkan untuk kompresi dan dekompresi. Namun, tindakan yang paling umum dan umumnya paling berguna berkaitan dengan jumlah kompresi yang dicapai

### **Ketergantungan Scene dan Kompresi**

Rasio kompresi adalah rasio jumlah bit yang digunakan untuk merepresentasikan data sebelum kompresi, dibandingkan dengan jumlah bit yang digunakan dalam file yang dikompresi. Ini dapat dinyatakan sebagai angka tunggal (laju kompresi), tetapi lebih sering sebagai rasio sederhana, misalnya rasio kompresi 2: 1, yang menunjukkan bahwa ukuran file terkompresi adalah setengah dari ukuran file asli

### **Persentasi Kompresi**

Berasal dari rasio kompresi, persentase kompresi menentukan jumlah kompresi dalam hal pengurangan ukuran file dalam file terkompresi sebagai persentase dari ukuran file asli. yaitu jika file terkompresi seperlima dari ukuran aslinya, maka pengurangan persentase akan menjadi  $4/5 \times 100 = 80\%$ .

### **Bit Rate**

Kecepatan bit menentukan jumlah rata-rata bit yang diperlukan untuk mewakili sampel tunggal dalam gambar yang dikompresi, yaitu bit per piksel. Ini adalah ukuran yang sangat umum digunakan, tetapi hanya bermakna jika dibandingkan dengan jumlah bit per piksel yang dialokasikan dalam dokumen asli yang tidak dikompresi. Umumnya gambar asli berukuran 8 atau 16 bit per piksel. Jika gambar 8-bit dikompresi ke rasio kompresi 2: 1, maka kecepatan bit terkompresi akan menjadi 4 bit per piksel.

## **Ketergantungan scene dan kompresi**

Meskipun masalah ketergantungan adegan dalam kualitas gambar dibahas secara rinci, hal itu disebutkan secara singkat di sini sehubungan dengan kompresi gambar. Ini adalah dasar untuk memahami kompresi dalam hal tingkat kompresi yang dapat dicapai baik dalam sistem lossless maupun lossy, serta dalam hal kualitas gambar kompresi lossy.

Karena semua kompresi didasarkan pada penghapusan redundansi, dan redundansi dalam gambar secara langsung terkait dengan konten gambar, maka kompresi secara inheren bergantung pada pemandangan. Tingkat kompresi lossless yang dicapai dengan mengeksploitasi redundansi ini bervariasi dari satu gambar ke gambar lainnya, yang berarti bahwa dua gambar (berbeda) dengan ukuran tidak terkompresi yang sama akan dikompres ke ukuran file yang berbeda menggunakan algoritme yang sama. Pada dasarnya, seperti yang akan kita lihat, beberapa gambar lebih mudah dikompres daripada yang lain, dan algoritme kompresi gambar tertentu akan bekerja pada beberapa gambar lebih baik daripada yang lain.

Ketergantungan adegan juga ada dalam algoritma lossy, yang termasuk langkah pengkodean entropi, mengkuantisasi gambar berdasarkan pengurangan redundansi psikovisual, tingkat yang lagi-lagi merupakan hasil dari konten adegan yang berbeda. Distorsi yang diperkenalkan oleh algoritme lossy akan bergantung pada karakteristik tertentu (seperti karakteristik frekuensi spasial) dalam gambar, dengan beberapa gambar lebih rentan terhadap artefak tersebut daripada yang lain. Oleh karena itu, gambar saat dikompresi oleh sistem lossy, serta menghasilkan rasio kompresi keluaran yang berbeda, juga akan menghasilkan jumlah kesalahan yang berbeda.

Terakhir, penilaian kualitas gambar terkompresi juga bergantung pada pemandangan. Dalam kompresi lossy, distorsi akan lebih terlihat di beberapa gambar, sementara ditutupi oleh struktur gambar tertentu di gambar lain. Selain itu, beberapa distorsi mungkin lebih bermasalah secara visual bagi pengamat daripada yang lain, yang berarti bahwa kehilangan kualitas gambar dari dua gambar dapat dievaluasi secara berbeda, bahkan jika tingkat kesalahan yang diukur secara obyektif telah diperkenalkan.

Semua poin ini hanya berfungsi untuk menggambarkan fakta bahwa tidak ada satu metode kompresi yang optimal untuk semua gambar, baik pendekatan lossless atau lossy sedang dipertimbangkan.

## **Teori Informasi**

Transmisi informasi dianggap sebagai sumber informasi, yang berisi sejumlah kemungkinan hasil, dan proses mendapatkan informasi menghasilkan pengurangan ketidakpastian tentang sumbernya. Dalam istilah umum, hasil adalah simbol dalam alfabet dari simbol yang mungkin. Dalam gambar digital, simbol (biasanya) adalah nilai piksel dan alfabet adalah kisaran nilai yang tersedia. Di sini latar belakang teori informasi dijabarkan lebih lanjut, dalam konteks kompresi citra.

Teori ini didasarkan pada karya Claude Elwood Shannon, yang merupakan seorang insinyur listrik yang bekerja di Bell Labs dan pada tahun 1948 menerbitkan makalah yang sekarang terkenal: 'A Mathematical Theory of Communication' di Bell System Technical Journal. Dalam makalah ini Shannon membahas masalah transmisi informasi melalui saluran yang bising. Hasil inti dari karyanya adalah definisi informasi diri, yang merupakan ukuran informasi yang terkait dengan hasil individu dari variabel acak. Selfinformation menghubungkan probabilitas hasil tertentu yang terjadi pada konten informasinya dan secara

keseluruhan mendefinisikan tingkat ketidakpastian dalam sumber informasi. Informasi diri yang terkandung dalam hasil tertentu secara langsung bergantung pada kemungkinan kemunculannya. Jika probabilitas suatu peristiwa tinggi, maka informasi dirinya rendah dan sebaliknya.

Jika suatu sumber memiliki  $n$  hasil, dan probabilitas yang terkait dengan hasil  $X$  adalah  $P(X)$ , maka informasi diri,  $i(X)$ , terkait dengan  $X$  diberikan oleh:

Ekuasi 29.3

$$i(X) = \log_y \frac{1}{P(X)} = -\log_y P(X)$$

Probabilitasnya tentu saja akan berkisar dari 0 hingga 1. Penggunaan logaritma menghasilkan informasi-diri yang meningkat seiring dengan penurunan probabilitas. Dalam ekspresi tersebut, basis dari logaritma,  $y$ , belum ditentukan. Unit informasi yang ditentukan bergantung pada basis ini. Dalam kompresi gambar, kami mempertimbangkan nilai piksel yang diwakili oleh digit biner, atau bit, dan oleh karena itu dianggap basis 2, karena setiap digit biner hanya dapat memiliki satu dari dua hasil.

Jika informasi diri berkaitan dengan jumlah informasi yang diperoleh dari hasil tertentu dan dalam istilah pencitraan dari piksel tertentu, kami biasanya lebih tertarik pada jumlah informasi dalam gambar, pengukuran ketidakpastian gambar secara keseluruhan sebagai sumber. Ini dapat diukur dengan menggunakan konsep entropi sumber. Entropi adalah jumlah rata-rata informasi yang dibawa oleh simbol individu dari sumbernya.

Jika suatu sumber memiliki  $n$  kemungkinan hasil, dan hasil individu ke  $i$  diberikan sebagai  $X_i$ , maka informasi diri rata-rata yang terkait dengan sumber tersebut adalah:

Ekuasi 29.4

$$H = \sum P(X_i) i(X_i)$$

Ini menyatakan bahwa entropi yang terkait dengan sumber sama dengan jumlah informasi dari semua hasil, masing-masing dikalikan dengan probabilitasnya. Seperti yang akan kita lihat, dalam gambar digital ini dapat dengan mudah didekati dari histogram gambar. Jumlah rata-rata informasi yang dibawa oleh piksel memberi tahu kita lebih banyak tentang sifat gambar dan dapat digunakan secara lebih umum sebagai ukuran komparatif antara gambar.

Mengganti Ekuasi 29.3 ke Ekuasi 29.4 dan menyatakan logaritma ke basis 2 menghasilkan ekspresi yang lebih umum digunakan, juga diberikan dalam Ekuasi 24.33, untuk kalkulasi entropi:

Ekuasi 29.5

$$H = \sum P(X_i) \log_2 \frac{1}{P(X_i)} \text{ bit}$$

Ini dapat ditulis sebagai alternatif:

Ekuasi 29.6

$$H = \sum P(X_i) \log_2 P(X_i) \text{ bit}$$

Ekuasi 29.5 dan 29.6 mendefinisikan jumlah rata-rata bit informasi per simbol sumber dan dalam gambar ini biasanya mengacu pada jumlah rata-rata bit per piksel. Ini dapat diperluas lebih jauh ke blok simbol atau piksel; entropi kemudian dihitung dari probabilitas blok nilai yang terjadi (di mana probabilitas simbol individu dalam urutan dikalikan bersama untuk menghasilkan probabilitas gabungan). Untuk balok dengan panjang  $b$ , entropi dihitung dari  $b$  dikalikan entropi simbol tunggal.

Untuk mempertimbangkan relevansi entropi dengan masalah kompresi citra, kita harus kembali melihat kapasitas informasi dari suatu citra. Kapasitas informasi, seperti namanya, mempertimbangkan jumlah maksimum informasi yang dapat ditransmisikan dari suatu sumber informasi. Jumlah maksimum informasi akan disampaikan jika semua hasil dari sumber informasi memiliki kemungkinan yang sama. Dalam kasus gambar yang mengandung  $n$  kemungkinan nilai piksel, jika semua nilai piksel memiliki probabilitas yang sama, maka semua  $P(X_i) = 1/n$ , yang berjumlah 1 (karena ada  $n$  kemungkinan hasil) dan Ekuasi 29.6 menjadi:

Ekuasi 29.7

$$H = \log_2(n) \text{ bit}$$

Ini berarti bahwa setiap piksel mampu membawa informasi  $\log_2(n)$  bit dan jadi kami mengatakan bahwa kapasitas informasi adalah  $\log_2(n)$  bit per piksel. Kapasitas informasi,  $C$ , dari gambar yang mengandung  $m$  piksel per satuan luas akan menjadi:

Ekuasi 29.8

$$C = m \log_2(n) \text{ bit per area unit}$$

yang juga diberikan dalam Ekuasi 24.35.

Seperti yang diharapkan, jika nilai  $m$  adalah jumlah piksel aktual dalam gambar, ekspresi ini setara untuk menghitung ukuran file yang tidak dikompresi.

Diasumsikan dalam ekspresi ini bahwa piksel tidak bergantung satu sama lain - dengan kata lain, tidak ada korelasi di antara keduanya. Dalam kenyataannya, biasanya terdapat beberapa korelasi antar piksel, yang berarti bahwa kandungan informasi untuk gambar tipikal akan lebih kecil daripada kapasitas informasinya. Perbedaan antara konten informasi dan kapasitas informasi inilah yang menentukan jumlah redundansi spasial dalam gambar.

## Struktur Gambar dan Entropi

Meskipun dua gambar dengan resolusi spasial dan kedalaman bit yang sama akan memiliki kapasitas informasi yang sama, namun kandungan informasinya akan berbeda karena sebagian besar ditentukan oleh struktur spasial, atau susunan piksel dalam setiap gambar. Ekuasi 29.7 mendefinisikan entropi untuk situasi di mana semua hasil dari variabel acak kemungkinannya sama. Dalam kasus seperti itu entropi berada pada maksimum dan sama dengan kapasitas informasi. Kasus sebaliknya terjadi ketika satu hasil pasti. Dalam kasus ini,  $P(X_i)$  untuk sebagian besar nilai akan menjadi 0 dan untuk satu nilai akan menjadi 1. Karena  $\log(1) = 0$ , entropi dalam hal ini adalah 0.

Dalam istilah pencitraan, gambar noise acak adalah contoh salah satunya, di mana semua nilai mungkin sama-sama mungkin, sedangkan gambar di mana satu nilai pasti akan menjadi patch seragam dari nilai itu. Oleh karena itu, gambar yang hanya berisi noise acak memiliki entropi maksimum dan patch seragam memiliki entropi nol. Dalam kasus yang tidak terlalu ekstrem, gambar dengan warna yang berubah dengan mulus, blok nilai piksel yang seragam, atau pola atau tekstur berulang akan cenderung memiliki nilai entropi yang lebih rendah daripada gambar yang nilainya berubah dengan cepat dan acak dengan cara yang tidak dapat diprediksi. (Gambar 20) mengilustrasikan beberapa contoh dari kedua jenis gambar dan nilai entropinya yang sesuai. Gambar berwarna diubah menjadi skala abu-abu 8-bit untuk perhitungan entropi, dan oleh karena itu kapasitas informasi dan nilai entropi maksimum yang mungkin untuk semuanya adalah 8 bit per piksel.

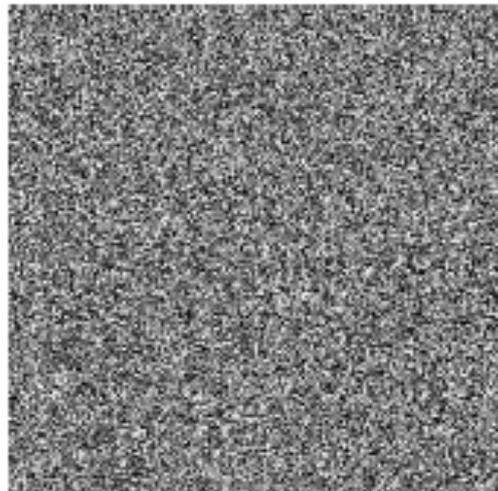
Karena entropi adalah ukuran konten informasi, ini memberikan beberapa korelasi dengan jumlah redundansi statistik dalam gambar. Oleh karena itu, prediktabilitas nilai piksel dalam gambar dapat menjadi indikator display image, nilai entropi, dan pada akhirnya jumlah kompresi lossless yang dapat dicapai saat mengeksploitasi redundansi statistik saja.

Namun perlu diperhatikan bahwa karena entropi pada akhirnya adalah ukuran statistik, terdapat kasus khusus di mana nilai entropi tidak secara akurat memprediksi display image atau kemungkinan kompresi. Contohnya adalah gradien atau ramp sempurna, di mana setiap nilai piksel yang berurutan satu lebih besar dari nilai sebelumnya. Dalam hal ini semua nilai piksel memiliki kemungkinan yang sama, tetapi nilainya sangat dapat diprediksi berdasarkan yang sebelumnya. Dalam kasus ini, nilai entropi tinggi akan dihasilkan, tetapi ini tidak akan mencerminkan struktur atau display image.

(a)



Entropy=0



Entropy=8.0

(b)



Entropy=7.22

(c)



Entropy=7.79

**Gambar 20.** Struktur gambar dan entropi. (a) Gambar seragam dan gambar entropi maksimum dan histogramnya. (b) Gambar dengan entropi rendah. (c) Gambar dengan entropi tinggi. Gambar berwarna diubah menjadi skala abu-abu 8-bit untuk kalkulasi entropi

## Teorema Shannon

Proses pengkodean dalam konteks kompresi gambar melibatkan penetapan satu set digit biner ke simbol sumber. Ini bisa berupa nilai piksel individual, kumpulan nilai piksel, atau representasi alternatif dari informasi gambar. Secara umum kita berbicara tentang pengkodean gambar-yaitu, proses mengubah informasi gambar menjadi kode. Kode panjang tetap sebagai tanda jumlah bit yang sama untuk setiap simbol, menghasilkan redundansi dalam kode. Pekerjaan Shannon melihat masalah seputar pengurangan redundansi semacam itu.

Bagian pertama dari pekerjaan Shannon melibatkan saluran informasi bebas gangguan, di mana tujuannya adalah untuk merepresentasikan informasi dalam metode yang paling efisien. Dia menganggap sumber tanpa memori, di mana simbol sumber secara statistik independen: tidak ada nilai yang lebih mungkin sebagai hasil dari nilai yang mendahuluinya. Keluaran dari sumber tersebut adalah sekumpulan simbol dengan panjang  $b$  dari alfabet, bukan simbol sumber tunggal. Setiap simbol harus diwakili oleh codeword, dan dalam kasus gambar satu set digit biner.

Shannon mempertimbangkan panjang codeword rata-rata minimum untuk menghasilkan kode yang dapat didekode secara unik, di mana setiap simbol diberi codeword unik dan setiap kumpulan codeword dapat diterjemahkan menjadi hanya satu urutan simbol asli. Oleh karena itu, itu sama sekali tidak ambigu. Panjang rata-rata minimum ini menentukan tingkat kompresi yang dapat dicapai dengan mengurangi redundansi pengkodean saja, tanpa mengurangi redundansi lain yang mungkin juga ada dalam gambar.

Misalkan  $f_k$  adalah variabel dalam interval  $[0,1]$  yang mewakili tingkat abu-abu pada gambar,  $L$  jumlah total tingkat abu-abu dan  $P(f_k)$  probabilitas terjadinya  $f_k$ . Jumlah bit yang dibutuhkan untuk merepresentasikan setiap individu  $f_k$  adalah  $n(f_k)$  dan panjang rata-rata kode adalah:

Ekuasi 29.9

$$L_{ave} = \sum_{k=0}^{L-1} P(f_k)n(f_k)$$

Teorema pertama Shannon mendefinisikan batas atas dan bawah untuk panjang rata-rata kode jika kode tersebut optimal, yaitu redundansi kode telah dikurangi atau dihilangkan. Ini menghubungkan panjang kode rata-rata dengan entropi sumber sebagai berikut:

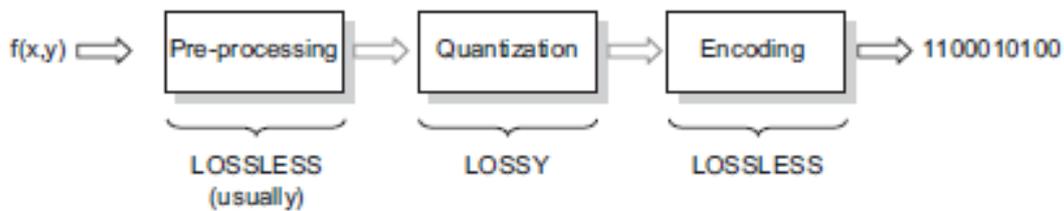
Ekuasi 29.10

$$H \leq L_{ave} + 1$$

Ini menyatakan bahwa panjang rata-rata minimum kode dalam kode yang optimal adalah antara entropi dan entropi +1.

## Model Kompresi Gambar

Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 20, proses kompresi gambar melibatkan dua algoritme: algoritme kompresi, yang berasal dari larik piksel dan menghasilkan aliran byte yang dikodekan; dan algoritma dekompresi, yang membalikkan proses untuk kembali menghasilkan larik nilai piksel. Yang terakhir mungkin atau mungkin tidak identik dengan kumpulan nilai asli. Masing-masing algoritma ini biasanya terdiri dari beberapa tahapan. Model tahapan yang mungkin dalam algoritma kompresi diilustrasikan pada Gambar 21.



**Gambar 21.** Model umum dari tahapan yang mungkin dalam algoritma kompresi gambar.

Meskipun ada tiga tahap dalam model ini, tidak setiap sistem kompresi akan menyertakan ketiganya. Secara khusus, jika sistem menghasilkan kompresi lossless, maka tidak akan ada tahap kuantisasi. Ketiga tahap tersebut sesuai dengan pengurangan tiga jenis redundansi:

- Pra-pemrosesan melibatkan pengurangan redundansi antar-piksel, biasanya memetakan data piksel asli menjadi representasi alternatif. Contohnya termasuk pengkodean urutan nilai berulang (run of values) dalam pengkodean run-length, produksi string nilai perbedaan dalam pengkodean diferensial, atau transformasi data menjadi array koefisien frekuensi dengan transformasi frekuensi seperti cosinus diskrit transform (DCT) digunakan dalam kompresi JPEG. Transformasi warna dari ruang warna RGB ke ruang warna luminance -chrominance juga dapat dilakukan pada tahap ini. Semua metode ini dapat dibalik dan karena itu tanpa kerugian. Namun, beberapa sistem mungkin menggunakan transformasi non-invertible (misalnya standar kompresi JPEG 2000 memiliki opsi untuk menggunakan transformasi wavelet diskrit non-invertible pada tahap ini).
- Tahap kuantisasi, yang digunakan hanya dalam algoritma lossy, adalah titik di mana informasi, daripada data, dibuang. Ini paling sering dilakukan pada koefisien frekuensi yang merupakan keluaran dari tahap pra-pemrosesan tetapi juga dapat dilakukan pada saluran chrominance. Jumlah dan metode kuantisasi akan ditentukan sesuai dengan persyaratan kualitas gambar yang ditentukan oleh aplikasi dan pengguna. Tahap kuantisasi bekerja untuk mengurangi redundansi psikovisual dan oleh karena itu ditentukan dan dibatasi oleh kemampuan sistem visual manusia.
- Tahap pengkodean ada di semua sistem. Ini melibatkan produksi, paling umum, kode biner dengan panjang variabel menggunakan salah satu dari banyak teknik pengkodean entropi, sehingga mengurangi redundansi statistik

Meskipun tahap pengkodean entropi dapat digunakan pada nilai piksel asli, dalam sistem lossless ini lebih sering digunakan pada keluaran operasi pemetaan, sedangkan dalam sistem lossy digunakan pada keluaran dari tahap kuantisasi.

Tentu saja ada model dekompresi yang setara. Namun, penting untuk dicatat bahwa tahap kuantisasi tidak dapat dibalik. Oleh karena itu, dekompresi hanya akan melibatkan dua tahap apakah kompresi itu lossless atau lossy: decode nilai input biner diikuti dengan prosedur pemetaan terbalik untuk menghasilkan nilai gambar yang direkonstruksi.

Bagian berikut membahas spesifikasi metode kompresi. Bagian tentang kompresi lossless mengilustrasikan beberapa metode individual yang digunakan dalam berbagai tahap lossless model yang diberikan di atas dan bagian tentang kompresi lossy menempatkan metode ini dalam konteks yang lebih luas dari sistem kompresi keseluruhan.

# Kompresi Lossless

## 1. Metode Kompresi Lossless

Metode kompresi lossless memanfaatkan redundansi dalam data gambar (redundansi spasial dan coding) tanpa mengubah informasi yang mendasarinya. Pendekatan paling sederhana, seperti pengkodean run-length, berurusan dengan redundansi spasial saja, dengan keberhasilan terbatas dalam hal tingkat kompresi yang dicapai. Teknik yang lebih kompleks, yang lebih umum digunakan dalam kompresi gambar warna kontinu (baik sendiri atau sebagai singlestage dari algoritme multi-tahap), mengurangi redundansi pengkodean saja untuk menghasilkan kode dengan panjang variabel (misalnya pengkodean Huffman). Metode seperti pengkodean aritmatika, yang masih lebih kompleks, berurusan dengan redundansi spasial dan pengkodean. Terakhir, ada sejumlah teknik kamus adaptif, yang membangun tabel kode untuk merepresentasikan urutan nilai yang berulang dalam aslinya. Meskipun pendekatan yang dijelaskan di bagian berikut tidak memiliki kerugian, dalam beberapa kasus ada versi kerugian yang setara berdasarkan prinsip dasar yang sama. Selain itu, sejumlah teknik ini digunakan dalam satu atau lebih tahap lossless dalam skema kompresi lossy seperti JPEG.

## 2. Mengurangi redundansi spasial

### A. Enkode run-length

Dalam gambar di mana terdapat banyak piksel berdekatan yang identik, pendekatan sederhana untuk menghilangkan jenis redundansi spasial ini melibatkan pengkodean serangkaian nilai (yaitu, angka untuk mewakili nilai dan angka yang mewakili berapa kali nilai diulang - Gambar 22). Proses dengan nilai yang sama cenderung tidak terjadi pada gambar alami, lebih sering terjadi pada gambar yang berisi teks atau grafik.

Run-length encoding (RLE) awalnya dikembangkan untuk encoding gambar faksimile (FAX) (yang hanya terdiri dari nilai hitam atau putih) dan digunakan terbatas untuk menyandikan nilai piksel aktual dari gambar warna kontinu. Namun, ia memiliki aplikasi dalam kompresi gambar nada kontinu bila digunakan dalam kombinasi dengan metode kompresi lainnya. Misalnya, dalam algoritme di mana bidang bit dikodekan secara individual (lihat di bawah), setiap bidang bit secara efektif merupakan gambar biner dan menjalankan nilai lebih mungkin terjadi. Selain itu, ini dapat digunakan sebagai tahap akhir dalam skema kompresi lossy berbasis transformasi (lihat bagian selanjutnya tentang kompresi JPEG).

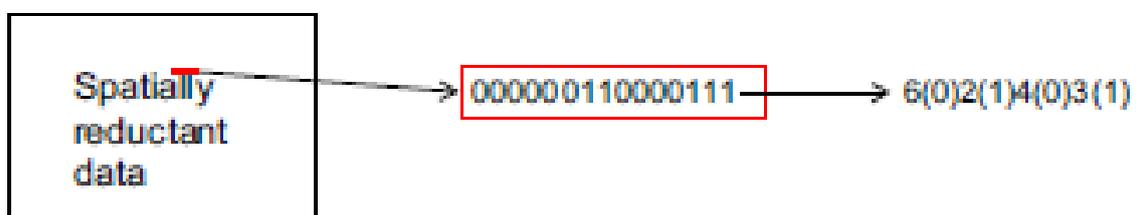
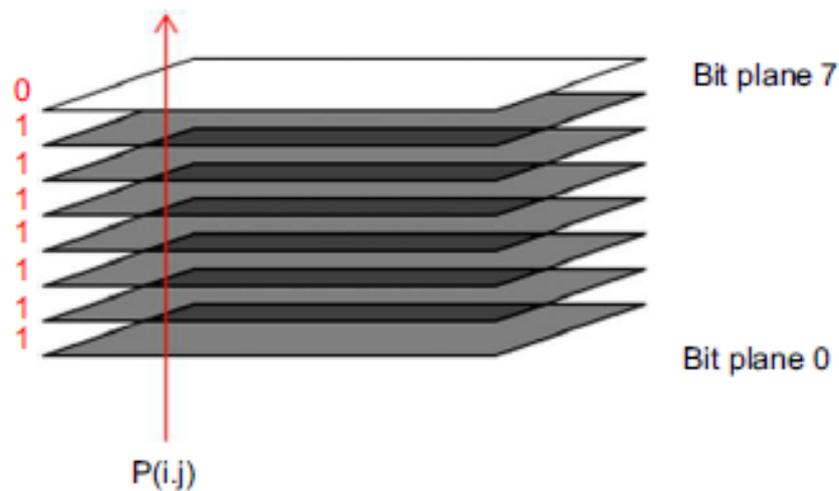


Figure 29.6 Run-length coding.

Gambar 22. Pengkodean run-length.



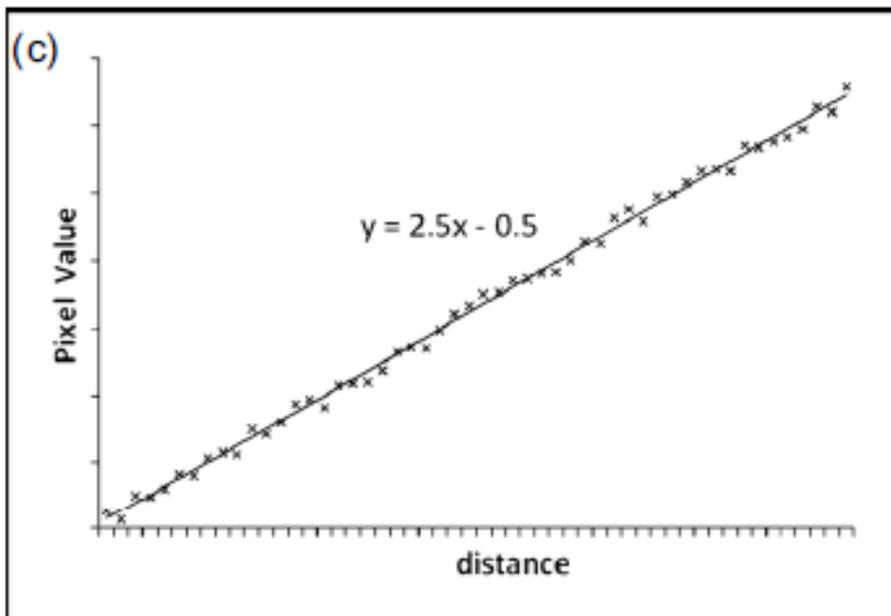
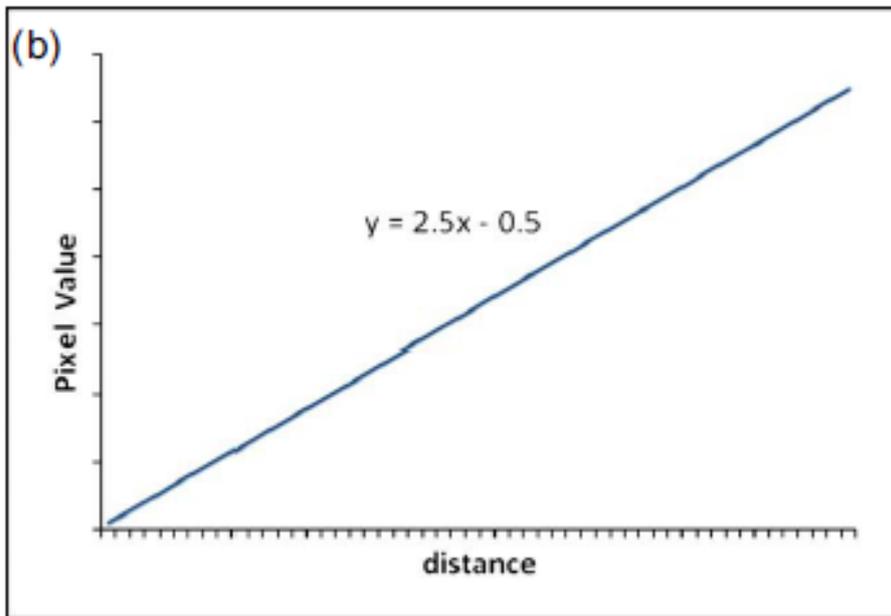
**Gambar 23** Representasi bidang bit dari gambar 8-bit

### **B. Pengkodean bidang bit dan kode abu-abu**

Nilai piksel dalam gambar 8-bit yang tidak dikompresi masing-masing akan diwakili oleh kode biner 8-bit, yaitu string satu dan nol. Dimungkinkan untuk menganggap gambar sebagai satu set bidang bit. Dalam Gambar 23, kode biner untuk urutan nilai piksel direpresentasikan sebagai tumpukan digit biner. Jika tumpukan ini diiris secara horizontal, setiap level mewakili bidang bit terpisah, yaitu pada setiap level nilai piksel diwakili oleh satu bit. Setiap bidang bit individu sebenarnya adalah gambar biner. Sejumlah metode kompresi menerapkan dekomposisi bidang bit, mengompresi setiap gambar biner secara terpisah.

(a)

Original Sequence	54	55	55	56	57	59	58	59	60	61
Difference Values	54	1	0	1	1	2	-1	1	1	1



**Gambar 24** Pengkodean Diferensial (a) Urutan asli dan urutan alternatif dari nilai-nilai perbedaan. (B) Datafollowingasimplerule. (c) Model ditambah sisa.

Tingkat atas dalam tumpukan, sesuai dengan digit biner pertama dari setiap kode, dikenal sebagai bit paling signifikan dan tingkat bawah sebagai bit paling tidak signifikan. Mayoritas dari struktur gambar direpresentasikan dalam bidang bit yang paling signifikan, sedangkan bidang bit yang paling tidak signifikan muncul sebagai gangguan acak. Ini merupakan hasil dari cara kode biner didistribusikan. Digit pertama dalam kode biner 8-bit adalah 0 untuk semua

nilai di bawah 128 dan 1 untuk semua nilai pada 128 dan di atasnya, sedangkan digit terakhir berubah untuk setiap nilai lainnya seiring dengan peningkatan nilai piksel. Karena nilai piksel yang berurutan cenderung serupa sebagai akibat dari redundansi spasial, kemungkinan besar akan ada banyak run of value di bidang bit yang paling signifikan. Metode yang bekerja pada bidang bit individu akan sering menggunakan berbagai bentuk pengkodean run-length ke bidang bit ini dan mencapai beberapa tingkat kompresi.

Peningkatan lebih lanjut dalam tingkat kompresi dapat dicapai dengan menggunakan kode abu-abu sebelum pengkodean bidang bit, yang mengatur ulang kode biner sehingga dalam nilai piksel yang berurutan, hanya 1 bit yang berubah.

Misalnya, nilai 127 dan 128 dalam kode biner 8-bit, seperti yang dijelaskan di atas, masing-masing adalah [01111111] dan [10000000]. Kode abu-abu 8-bit untuk dua nilai yang sama adalah [01000000] dan [11000000]. Di mana kode biner berarti bahwa run nilai mendominasi hanya di bidang bit yang paling signifikan, perubahan ke kode abu-abu untuk semua nilai piksel juga menghasilkan lebih banyak run nilai di bidang bit yang paling tidak signifikan.

### **C. Pengkodean diferensial**

Meskipun rangkaian nilai yang identik tidak sering terjadi dalam gambar alami, nilai piksel yang berurutan sering kali nilainya sangat dekat, khususnya di area gambar frekuensi rendah. Dalam kasus seperti itu, mungkin lebih tepat untuk menyandikan perbedaan kecil antara nilai, daripada nilai itu sendiri. Contoh urutan nilai dan representasi alternatif nilai tersebut diilustrasikan pada Gambar 24a. Karena sebagian besar nilai dalam urutan kedua kecil, mereka memerlukan lebih sedikit bit penyimpanan dan oleh karena itu beberapa kompresi dapat dicapai dengan tetap mempertahankan rekonstruksi yang sempurna.

Beberapa metode diferensial, yang dikenal sebagai metode pengkodean prediktif, mencoba mendeskripsikan perubahan data menggunakan aturan atau model sederhana. Contoh sederhana dari data tersebut dan aturan terkait ditunjukkan secara grafis pada Gambar 24b. Tidak mungkin data gambar akan mengikuti aturan tersebut dengan sempurna, dalam hal ini akan ada urutan penyimpangan dari aturan tersebut, yang dikenal sebagai residual (Gambar 24c). Daripada mengekspresikan nilai piksel gambar secara eksplisit, model dan nilai sisa dapat disimpan, asalkan nilai pertama dalam urutan diketahui. Sekali lagi, karena residu cenderung sangat kecil, mereka akan membutuhkan bit yang lebih sedikit daripada nilai aslinya. Beberapa metode prediksi, daripada menentukan aturan untuk seluruh dataset, akan memprediksi nilai berdasarkan sejumlah piksel sebelumnya.

Metode pengkodean diferensial mungkin tanpa kerugian atau kerugian (dalam kasus di mana nilai yang diprediksi tidak tepat). Modulasi delta, suatu bentuk modulasi kode pulsa diferensial (DPCM) adalah contoh skema pengkodean prediktif lossy.

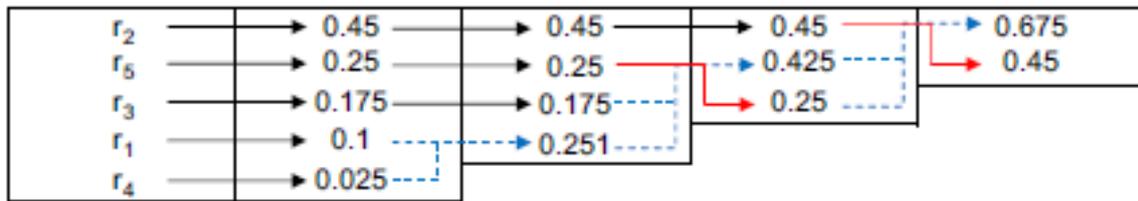
### **3. Mengurangi redundansi koding: pengkodean variable-length**

Jumlah dan kompleksitas berbagai metode kompresi yang memanfaatkan redundansi pengkodean (dan dalam beberapa kasus redundansi antar-piksel) membatasi penyertaannya dalam teks ini; Oleh karena itu, kami akan berkonsentrasi pada salah satu metode yang paling umum digunakan, pengkodean Huffman, sebagai ilustrasi pengkodean variabel-panjang. Informasi tentang metode lain yang umum digunakan seperti pengkodean aritmatika dapat ditemukan dalam sumber-sumber yang tercantum di buku ini.

Seperti yang telah dibahas, pada kebanyakan gambar alami akan ada beberapa nilai piksel yang lebih sering muncul yang, jika semua dikodekan dengan codeword yang sama, akan

menghasilkan tingkat redundansi yang tinggi dalam kode biner yang dihasilkan. Metode pengkodean panjang-variabel berusaha untuk mengurangi redundansi ini, menghasilkan panjang rata-rata kode yang paling pendek (Ekuasi 29.9) per simbol sambil menghasilkan kode yang dapat didekode secara unik. Prinsip dasar di balik metode tersebut adalah produksi kode yang efisien, yaitu kode di mana nilai yang paling sering muncul diberi jumlah bit terpendek. Metode pengkodean variabel-panjang kadang-kadang disebut teknik pengkodean entropi, karena mereka bertujuan untuk menghasilkan kode yang optimal menurut teorema pertama Shannon, yaitu panjang rata-rata kode terkait dengan entropi sumber menurut Ekuasi 29.10.

### A. Pengkodean Huffman



**Gambar 25** Pengurangan sumber dalam pengkodean Huffman

Pengkodean Huffman adalah salah satu metode pengkodean variabel-panjang yang paling umum digunakan. Ia bekerja dengan terlebih dahulu mengevaluasi himpunan simbol sesuai dengan probabilitasnya dan kemudian membangun pohon probabilitas, dari mana kode biner untuk simbol diturunkan.

<b>Tabel 1 Contoh nilai sumber yang digunakan untuk membuat kode Huffman</b>		
SIMBOL SUMBER (R <sub>k</sub> )	FREKUENSI (H <sub>k</sub> )	PROBABILITAS (H <sub>k</sub> /N)
r1	40	
r2	180	0.1
r3	70	0.45
r4	10	0.175
r5	100	0.025
	N=400	0.25

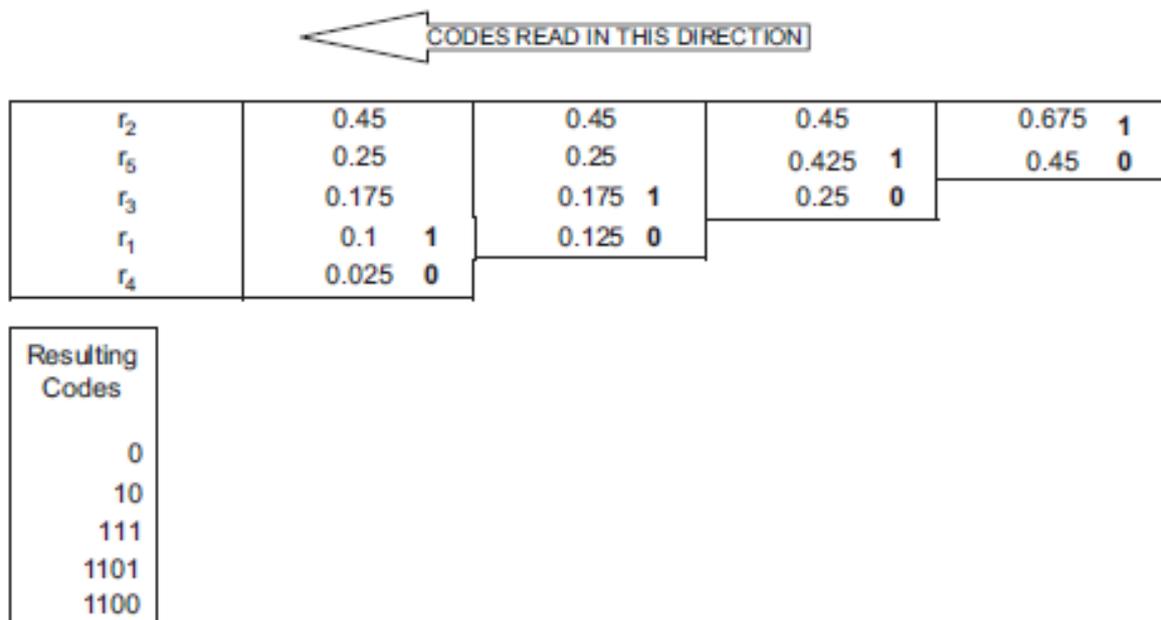
Pada Tabel 1 satu set lima simbol sumber yang mungkin, r1-r5, terdaftar. Ini hanyalah sekumpulan nilai, tetapi sederhananya anggaplah mereka sebagai satu set tingkat abu-abu yang mungkin dalam gambar digital. Kolom kedua pada tabel menunjukkan frekuensi kemunculan setiap tingkat abu-abu. Nilai-nilai ini setara dengan yang ditampilkan dalam histogram gambar. Probabilitas setiap level abu-abu yang terjadi dapat diperkirakan dari histogram gambar dengan:

Ekuasi 29.11

$$P(r_k) \approx \frac{H_k}{N}$$

dimana  $P(r_k)$  adalah histogram yang dinormalisasi dan merupakan probabilitas terjadinya nilai  $r_k$ ,  $H_k$  adalah jumlah nilai dari  $r_k$  dalam histogram dan  $N$  adalah jumlah total dari jumlah piksel citra. Nilai-nilai ini dicantumkan di kolom ketiga tabel.

Kode Huffman dibuat dengan membuat ‘pohon ‘ probabilitas, di mana probabilitas disusun ulang dari yang terbesar ke terkecil. Pada reduksi sumber pertama, dua probabilitas terbawah digabungkan dengan menjumlahkannya. Probabilitas yang dihasilkan kemudian disusun ulang dari yang terbesar ke terkecil dan proses diulangi hingga hanya dua probabilitas yang tersisa. Proses pengurangan sumber untuk nilai dan probabilitasnya pada Tabel 1 diilustrasikan pada Gambar 25. Setelah proses ini, nilai diberi kode dengan mengalokasikan 1 dan 0 ke dua cabang terbawah dari pohon (yang digabungkan) pada setiap tahap reduksi sumber (Gambar 26). Urutan kedua nilai tidak menjadi masalah, asalkan sama secara keseluruhan. Jalur probabilitas untuk setiap simbol dilacak dari sumber yang dikurangi kembali ke aslinya (kanan ke kiri pada Gambar 26), dengan digit biner yang ditambahkan saat ditemukan, menghasilkan kode di kolom terakhir pada Gambar 26.



**Gambar 26** Konstruksi kode dalam pengkodean Huffman.

### B. Teknik kamus - kompresi LZW

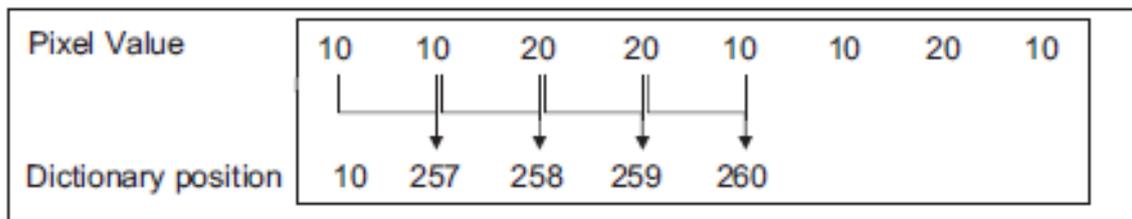
Pengkodean Lempel-Ziv-Welch (LZW) adalah algoritma kompresi lossless berbasis kamus yang dikembangkan pada tahun 1984 sebagai penyempurnaan dari algoritma LZ78.

Algoritma bekerja dengan membuat tabel (atau kamus) nilai dari gambar, menyandikan string simbol saat bertemu dengannya. Pada tahap inisialisasi, untuk gambar monokrom 8-bit, 256 nilai pertama dalam kamus ditetapkan ke nilai piksel 0-255. Setelah ini, pembuat encode memeriksa gambar dalam bentuk kelompok piksel. Pasangan nilai piksel pertama yang ditemukan ditetapkan ke ruang berikutnya yang tersedia dalam kamus (yaitu 257). Proses ini diulangi setiap kali pasangan baru ditemukan.

Misalnya, dalam urutan nilai piksel pada Gambar 29.11, posisi 257 dalam kamus mewakili urutan 10-10 dan seterusnya. Saat berikutnya urutan piksel yang sudah ada di kamus ditemukan, piksel berikutnya juga diperiksa dan ditambahkan ke urutan yang dikenali, menjadi

entri kamus baru. Dalam contoh, urutan 10-10-20 sekarang akan menjadi posisi kamus 261. Proses ini diulangi sampai kamus penuh. Entri dalam kamus akan terdiri dari angka yang mewakili urutan sebelumnya ditambah nilai piksel baru, tetapi akan dikodekan sebagai satu angka. Besar kecilnya nomor ini akan tergantung pada ukuran kamus. Untuk kamus 9-bit, 512 urutan dapat disimpan. Akibatnya, sekelompok n piksel, daripada diwakili oleh n kali jumlah bit per piksel, akan diwakili oleh 9 bit yang mengkodekan nomor posisi kamus dari grup tersebut. Kamus tentu saja harus disimpan dengan data gambar yang dikompresi, tetapi dalam gambar yang berisi banyak grup piksel berulang, kompresi yang signifikan dapat dicapai. Oleh karena itu, kompresi LZW memanfaatkan redundansi coding dan antar-piksel, tetapi seperti semua metode kompresi gambar, kompresi ini sangat bergantung pada pemandangan, seperti yang diilustrasikan oleh gambar pada Gambar 28.

LZW adalah metode yang dipatenkan, dan telah diintegrasikan ke dalam berbagai format file, membentuk dasar kompresi dalam file Graphic Interchange Format (GIF), sebagai opsi dalam file Tagged Image File Format (TIFF) dan juga dimasukkan dalam Portable Document Format (PDF) file.



**Gambar 27** Pengkodean urutan piksel dalam pengkodean LZW.

## Kompresi Lossy



Tingkat kompresi: 1: 1.5

Bagian sebelumnya telah mengilustrasikan berbagai pendekatan untuk kompresi yang memberikan sinyal yang direkonstruksi secara sempurna. Namun, menurut teorema pertama Shannon, tingkat kompresi lossless yang dapat dicapai pada dasarnya dibatasi oleh entropi gambar. Untuk banyak aplikasi pencitraan, khususnya dalam transmisi gambar melalui Internet, tingkat kompresi ini tidak memadai untuk memenuhi permintaan akan pemrosesan yang cepat dan ukuran file yang kecil. Hal ini menyebabkan berkembangnya sejumlah sistem kompresi lossy. Metode ini tentu saja hanya sesuai dalam situasi di mana penurunan kualitas dapat ditoleransi. Gambar untuk penggunaan web, misalnya, biasanya dimaksudkan untuk dilihat pada layar komputer dengan resolusi yang relatif rendah dan bukan untuk hasil cetakan. Selain itu, gambar-gambar ini dan yang digunakan dalam aplikasi multimedia sering kali dilihat dengan cepat dan dalam kelipatan. Namun demikian, salah satu persyaratan dari sistem kompresi lossy yang baik harus memberikan kualitas gambar yang dianggap terbaik untuk tingkat kompresi tertentu atau ukuran file yang diperlukan. Seperti yang akan kita lihat, ini dicapai dengan mengeksploitasi properti dan tiruan dari sistem visual manusia, mengurangi

informasi psikovisual yang berlebihan dan, dalam beberapa kasus, meningkatkan informasi yang lebih penting secara visual.



Tingkat kompresi: 1: 2.1

### **Mengevaluasi Kompresi Lossy**

Mengukur kinerja skema kompresi lossy adalah masalah yang kompleks. Dimana skema lossless umumnya hanya dievaluasi dalam hal kecepatan kompresi, beberapa perhitungan tingkat kerugian juga harus dipertimbangkan dalam menentukan kegunaan sistem lossy. Ukuran kinerja sangat penting dalam desain sistem ini; kehilangan informasi harus diimbangi dengan kecepatan kompresi.

Dalam kompresi lossless, di mana rekonstruksi sempurna tidak lagi menjadi kriteria, kecepatan kompresi bukanlah ukuran yang memadai, karena semua data dapat dibuang dan mencapai kecepatan kompresi maksimum. Teori distorsi laju, juga berasal dari penelitian Shannon tentang teori informasi, mendefinisikan hubungan antara laju kompresi dan beberapa ukuran distorsi. Teori ini memberikan batasan teoretis untuk tingkat kompresi lossy yang dapat dicapai, berdasarkan entropi minimal, tanpa melebihi tingkat distorsi tertentu. Hubungan ini sering didefinisikan dalam fungsi distorsi laju. Banyak sistem kompresi lossy menggunakan teori distorsi laju sebagai dasar untuk mengoptimalkan kinerjanya.

### **Metriks Distorsi**

Metode paling sederhana untuk mengukur kerugian yang ditimbulkan oleh sistem melibatkan pengukuran perbedaan antara nilai gambar asli dan hasil rekonstruksi. Metrik distorsi mengukur perbedaan total antara gambar atau perbedaan rata-rata per piksel dan sering digunakan sebagai ukuran kinerja dalam sistem lossy. Berikut adalah contoh metrik distorsi tersebut:

### 1. Mean absolute error (MAE)

Metode ini membandingkan perbedaan antara nilai piksel asli dan nilai rekonstruksi, lalu menemukan rata-rata di seluruh gambar:

Ekuasi 29.2

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_n - \hat{x}_n|$$

dimana N = jumlah total piksel pada citra,  $x_n$  = nilai piksel n pada gambar asli dan  $\hat{x}_n$  = nilai piksel pada gambar terkompresi.

### 2. Rata-rata kesalahan kuadrat (MSE)

Metode ini membandingkan perbedaan antara nilai piksel asli dan nilai rekonstruksi, dan mengkuadratkannya sebelum menemukan nilai rata-rata di seluruh gambar:

Ekuasi 29.13

$$MAE = \sum_{n=1}^N (x_n)^2$$

### 3. Rasio signal-to-noise (SNR)

SNR membandingkan kekuatan sinyal asli dengan mean squared error (MSE) seperti yang dihitung di atas:

Kekuatan sinyal asli;

Ekuasi 29.14

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n)^2$$

Ekuasi 29.15

$$SNR = \frac{P}{MSE}$$

Ini kemudian diubah menjadi desibel dengan:

Ekuasi 29.

$$SNR = 10 \log_{10}(SNR)$$

### 4. Rasio puncak signal-to-noise (PSNR)

PSNR mendefinisikan rasio antara kekuatan maksimum yang mungkin dari sinyal dan noise dalam istilah MSE yang dijelaskan di atas. Ini dinyatakan dalam desibel sebagai berikut:

Ekuasi 29.17

$$PSNR = (dB) = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{max}{\sqrt{MSE}} \right)$$

di mana ‘maks’ adalah nilai piksel maksimum yang mungkin dalam gambar, ditentukan oleh kedalaman bit.

Masalah dengan pendekatan ini adalah bahwa nilai yang diperoleh seringkali tidak berkorelasi baik dengan kerugian yang dirasakan dalam kualitas gambar. Misalnya, terjemahan sederhana dari seluruh gambar dengan satu piksel akan menyebabkan peningkatan yang signifikan pada semua nilai piksel, tanpa mengubah display image.

## Metode penilaian alternatif

Metode penilaian lain dapat digunakan, seperti pengukuran kualitas gambar atau penilaian kualitas gambar. Distorsi, kejernihan, dan kualitas gambar. Oleh karena itu mereka secara singkat diperkenalkan di sini dalam konteks penggunaannya dalam penilaian gambar yang dikompresi.

Kualitas gambar yang direkonstruksi sehubungan dengan aslinya dapat diukur. Hal ini dicapai baik dengan menggunakan penilaian kelayakan subjektif atau dengan mencoba model matematis respon dari sistem visual manusia dan menggunakannya untuk memproses gambar sebelum perbandingan numerik. Dalam penilaian kejelasan subjektif, pengamat diminta untuk membandingkan gambar asli dengan versi terkompresi di berbagai tingkat kompresi dan mengevaluasi titik dalam kisaran di mana mereka melihat perbedaan (perbedaan yang terlihat). Kedua pendekatan itu rumit: pertama dengan kepraktisan melakukan sejumlah besar tes untuk sejumlah besar gambar, yang kedua karena kesulitan dalam merancang model yang secara akurat mencerminkan proses visual manusia.

Yang lebih kompleks lagi adalah evaluasi kualitas gambar terkompresi, yang mencoba tidak hanya untuk mengukur tingkat kehilangan atau kesesuaian antara gambar asli dan gambar terkompresi, tetapi juga seberapa dapat diterima atau menyusahkan kehilangan tersebut bagi pengamat manusia. Jenis kesalahan atau artefak yang diperkenalkan oleh berbagai sistem berbeda dan menghasilkan efek visual yang berbeda. Beberapa distorsi lebih bermasalah secara visual daripada yang lain. Faktanya, pada rasio kompresi yang lebih rendah, beberapa distorsi sebenarnya dapat menghasilkan sedikit peningkatan pada kualitas gambar yang dirasakan (contohnya adalah artefak dering dalam JPEG, yang dapat mengakibatkan gambar tampak dipertajam pada kecepatan kompresi rendah). Pengukuran kualitas gambar dapat memperhitungkan hasil yang tidak diharapkan tersebut, oleh karena itu memberikan evaluasi yang lebih akurat dari efek algoritme daripada pengukuran distorsi atau fi litas. Penilaian kualitas gambar dapat dilakukan secara obyektif atau subyektif, dengan komplikasi praktis yang sama seperti penilaian ketidaksesuaian.

Studi tentang persepsi tetap merupakan area penting penelitian yang sedang berlangsung dan merupakan dasar dalam evaluasi dan desain sistem kompresi lossy yang sukses.

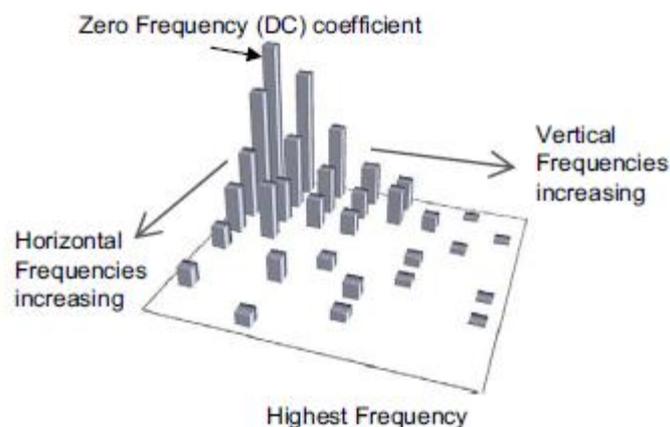
## Metode Kompresi Lossy

Ada sejumlah pendekatan berbeda untuk kompresi gambar yang lossy. Mereka terbagi dalam dua kategori: metode pengkodean lossy predictive (atau diferensial) dan metode yang menyandikan frekuensi dalam gambar. Yang terakhir, yang paling banyak digunakan adalah metode kompresi berbasis transformasi seperti JPEG. Metode kompresi wavelet juga termasuk dalam kategori ini.

Seperti rekan lossless mereka, metode prediksi menggunakan sampel sebelumnya (dan dalam kasus kompresi gambar bergerak, sampel yang didekodekan berikutnya), terkadang dengan model data untuk memprediksi nilai. Sisa, yaitu perbedaan dari nilai prediksi, juga dikodekan dengan model prediksi. Perbedaan antara metode ini dan metode lossless adalah dimasukkannya langkah pengukur. Jika metode lossless menyalin nilai perbedaan yang tepat sehingga menghasilkan rekonstruksi yang sempurna, dalam sistem lossy nilai perbedaan dikuantisasi. Perbedaan aktual dari model mungkin mengandung komponen pecahan. Dalam sistem lossy, ini dapat dibulatkan ke bilangan bulat terdekat.

Kategori kedua dari kompresi lossy, alih-alih mengompresi nilai piksel gambar secara langsung, menggunakan beberapa bentuk transformasi linier dari nilai piksel gambar untuk menghasilkan sekumpulan koefisien transformasi (dengan jumlah yang sama dengan jumlah nilai piksel). Ini kemudian dikuantisasi dan dikodekan sebagai gantinya. Transformasi mendekorasi data gambar, memberikan representasi ruang frekuensi gambar yang paling umum. Metode ini bekerja pada premis bahwa sejumlah besar daya gambar terkonsentrasi di beberapa frekuensi (lebih rendah), yang berarti bahwa koefisien frekuensi yang lebih tinggi mungkin nol atau mendekati nol. Respon frekuensi dari sistem visual manusia, yang didefinisikan oleh fungsi sensitivitas kontras, menunjukkan bahwa kita memiliki kepekaan yang lebih terhadap beberapa frekuensi daripada yang lain, dengan frekuensi tertentu yang sangat tinggi berada di luar kemampuan visual kita. Memanfaatkan redundansi psikovisual ini berarti bahwa beberapa frekuensi dapat dilemahkan dengan sedikit dampak visual. Koefisien frekuensi diatur ulang untuk memusatkan koefisien besaran yang lebih tinggi bersama-sama. Setelah kuantisasi, array koefisien dapat dikompresi menggunakan kombinasi pengkodean panjang-variabel dan pengkodean runlength. Gambar 28 mengilustrasikan blok tipikal dari koefisien transformasi yang disusun ulang setelah keluaran dari DCT dari blok nilai piksel dengan ukuran yang sama.

Karena itu hanya ringkasan singkat dari properti mereka yang diberikan di sini. Di mana sebagian besar sistem kompresi berbasis transformasi menggunakan upon berbasis representasi frekuensi dalam fungsi basis usoidal (seperti DCT dalam JPEG), transformasi wavelet didasarkan pada ‘gelombang kecil ‘ yang kompak dan terlokalisasi dengan frekuensi yang bervariasi.



**Gambar 28** Representasi tiga dimensi dari tata letak tipikal besaran koefisien dari transformasi kosinus diskrit setelah penataan ulang. Komponen frekuensi nol di kiri atas memiliki magnitudo tertinggi dan dikelilingi oleh koefisien frekuensi rendah. Frekuensi meningkat dalam zig-zag diagonal, ke komponen frekuensi tertinggi di kanan bawah.

Komponen frekuensi tertinggi berukuran sangat kecil atau nol.

Umumnya mereka diimplementasikan dengan menggunakan sub-band filter bank. Bank filter terdiri pada setiap tahap dari scaling filter, yang menggunakan beberapa bentuk low-pass filter dan down-sampling untuk menghasilkan gambar versi resolusi yang lebih rendah. Selain itu, pada setiap tahap sebuah wavelet filter, yang mungkin dianggap sebagai sebuah filter high-pass, menghasilkan keluaran frekuensi tinggi pada resolusi yang sama dalam orientasi gambar yang berbeda (vertikal, horizontal, diagonal).

Wavelet yang diimplementasikan dengan cara ini memberikan bentuk analisis multiresolusi, menguraikan gambar menjadi serangkaian sub-band dua dimensi. Masing-masing gambar terdiri dari satu gambar down-sampel, seperempat ukuran sub-band sebelumnya, dan tiga gambar ukuran-perempat yang mewakili frekuensi tinggi dalam arah horizontal, vertikal, dan diagonal. Setiap gambar yang disampel ke bawah kemudian dapat didekomposisi lebih lanjut menjadi kumpulan empat sub-band yang lebih kecil dan seterusnya. Area yang luas dari representasi yang dihasilkan terdiri dari detail atau informasi tepi pada latar belakang nol - seperti yang diharapkan dari output filter high-pass. Representasi ini dapat dikompresi jauh lebih mudah daripada nilai piksel asli dan memberikan keuntungan tambahan dari pengkodean gambar pada berbagai resolusi. Yang terakhir meningkatkan kapabilitas skema kompresi standar menggunakan wavelet, JPEG 2000, yang dijelaskan nanti dalam bab ini.

## **Kuantisasi**

Semua skema kompresi lossy menggunakan beberapa bentuk kuantisasi. Pendekatan paling sederhana menggunakan kuantisasi skalar, di mana kisaran nilai pada input (apakah nilai piksel atau output dari beberapa metode pra-pemrosesan) dipetakan ke kisaran nilai output yang lebih kecil. Kuantisasi skalar mungkin seragam, membagi rentang menjadi interval dengan jarak yang sama, atau tidak seragam, di mana jarak interval bervariasi di seluruh rentang. Metode penghitung berkode entropi mengoptimalkan kuantisasi dengan meminimalkan entropi untuk tingkat distorsi tertentu. Kuantisasi dapat lebih ditingkatkan dengan mengelompokkan keluaran sumber bersama-sama sebagai satu blok dan mengkuantisasi kisaran blok. Pendekatan ini dikenal sebagai kuantisasi vektor, dan dapat memberikan distorsi yang lebih rendah untuk laju kompresi tertentu daripada metode kuantisasi skalar.

## **Standar Kompresi Lossy**

### **1. Standar JPEG (Joint Photographic Experts Group)**

Standar JPEG adalah standar kompresi gambar digital internasional pertama yang dikembangkan untuk gambar diam rona kontinu (baik skala abu-abu dan warna). Ini dikembangkan sebagai tanggapan atas kemajuan teknologi digital dan kebutuhan untuk pengurangan ukuran file gambar untuk penyimpanan dan transmisi dengan kehilangan kualitas visual yang minimal. Meskipun dikembangkan dengan sejumlah mode operasi yang berbeda, termasuk mode lossless berdasarkan pengkodean prediktif dan mode pengkodean progresif lossy, itu adalah mode sekuensial baseline lossy yang terbukti paling banyak digunakan. Berikut ini adalah ringkasan singkat dari tahapan utama dalam algoritma:

#### **a) Pre-processing**

- Dalam gambar berwarna, data gambar dapat dikurangi dengan mengubah ke ruang warna luminansi-krominan seperti  $YCbCr$  dan mengambil sampel saluran chroma. Ini memanfaatkan fakta bahwa sistem visual manusia kurang sensitif terhadap perbedaan warna daripada perubahan nada.
- Gambar dibagi menjadi sub-gambar berukuran 8x8 piksel. Setiap blok kemudian diproses secara individual menggunakan langkah-langkah berikut.

- Blok diubah menjadi koefisien frekuensi menggunakan transformasi kosinus diskrit dua dimensi, menghasilkan 64 koefisien yang mewakili besaran frekuensi yang berbeda untuk blok tersebut.

**b) Kuantisasi**

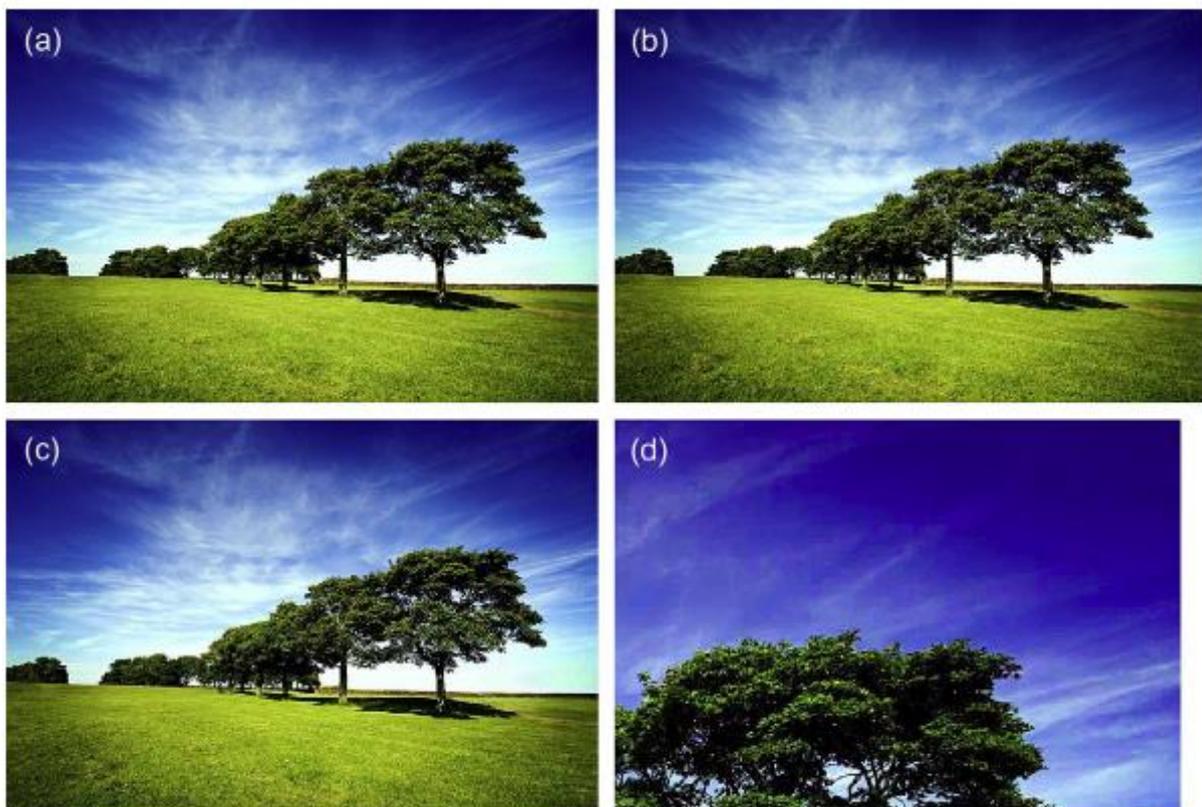
- Koefisien DCT disusun ulang menggunakan urutan zig-zag melalui setiap blok. Koefisien frekuensi dari setiap blok dikuantisasi menggunakan tabel kuantisasi tertimbang secara visual, pemilihannya didasarkan pada tingkat kualitas yang ditentukan oleh input pengguna, menghasilkan komponen frekuensi tertinggi dan komponen berskala terendah dikurangi atau dihilangkan.

**c) Pengodean entropi**

- Modulasi kode pulsa diferensial (DPCM) koefisien DC dari semua blok. Koefisien DC adalah koefisien frekuensi nol dan mewakili nilai piksel rata-rata dari blok tersebut.
- Kode run-length/Huffman yang dimodifikasi untuk setiap blok koefisien AC (semuanya tersisa).

Dekompresi algoritme menghasilkan gambar yang direkonstruksi dan dapat dilihat. Setiap tahapan algoritma kompresi dibalik terlepas dari tahap kuantisasi (yang tidak dapat diubah).

Algoritme JPEG mampu mencapai rasio kompresi hingga 100: 1 dengan penurunan kualitas gambar yang terkait. Namun, hal ini dianggap tidak menimbulkan kerugian pada rasio kompresi 20: 1 atau kurang (Gambar 29), yang berarti bahwa artefak yang diperkenalkan oleh algoritme tidak terlihat di sebagian besar gambar oleh sebagian besar pengamat.



**Gambar 29.** Kompresi lossless perseptual. (a) Gambar asli. (b) Kompresi JPEG pada 20: 1. (c) Kompresi JPEG pada 50: 1. (d) Bagian dari (c) diperbesar.



**Gambar 30.** Artefak dalam kompresi JPEG: Perbesaran lebih lanjut dari Gambar 29c mengilustrasikan artefak ‘pemblokiran’ di seluruh gambar, meskipun itu adalah beberapa yang tersembunyi di area detail. Artefak ‘berdering’ dan artefak warna yang meluntur terlihat di sekitar tepi pepohonan.

Artefak yang dihasilkan oleh JPEG berbeda dan dapat dikenali (Gambar 29d dan 30). Keluaran dari tahap DCT menghasilkan 64 blok koefisien yang disusun secara spasial sehingga berhubungan dengan besaran frekuensi di wilayah spasial yang sama pada gambar aslinya. Pada tingkat kompresi yang lebih tinggi, hal ini dapat mengakibatkan artefak pemblokiran, yang muncul karena kuantisasi kasar di setiap blok piksel, yang berarti tepi blok menjadi terlihat. Gambar JPEG juga mengalami artefak berdering. Ini adalah hasil dari pemotongan tiba-tiba dari koefisien frekuensi tinggi yang mempengaruhi penampilan tepi pada khususnya dan terbukti sebagai osilasi atau ‘riak’ di sekitar tepi kontras tinggi. Hal ini khususnya menjadi masalah pada gambar yang berisi teks, yang cenderung direproduksi dengan sangat buruk dalam gambar JPEG. Akhirnya, dalam gambar berwarna, distorsi warna dapat terlihat di area nada netral, sebagai hasil dari pengambilan sampel saluran chroma pada pra-pemrosesan.

Terlepas dari karakteristik artefak ini, JPEG mungkin adalah format gambar terkompresi yang paling banyak digunakan secara global dan gambar JPEG adalah keluaran standar untuk banyak kamera digital, terutama format konsumen.

## 2. Standar JPEG 2000

Persyaratan yang semakin meningkat dari teknologi dan aplikasi yang memproduksi dan menggunakan gambar digital, khususnya perluasan aplikasi Internet dan multimedia, mendorong pengembangan standar baru untuk menangani area di mana JPEG dan standar gambar lainnya gagal memberikan hasil. JPEG 2000 Part 1 distandarisasi pada tahun 2001 dengan fitur-fitur berikut:

- Distorsi kecepatan unggul dan performa kualitas gambar subjektif pada kecepatan bit rendah dibandingkan standar yang ada, persyaratan utama transmisi gambar jaringan dan aplikasi penginderaan jauh.

- Kemampuan untuk mengompres gambar dua-level, skala abu-abu, warna dan multi-komponen, memungkinkan kompresi dokumen yang berisi gambar dan teks.
- Kemampuan untuk menyandikan gambar dengan karakteristik berbeda, misalnya gambar alam, gambar dari aplikasi ilmiah dan medis, gambar yang berisi teks atau grafik komputer.
- Pengkodean lossless dan lossy, memungkinkan penggunaan JPEG 2000 oleh aplikasi seperti pencitraan medis, di mana rekonstruksi lossless diperlukan. Lossy progresif hingga dekompresi lossless berarti bahwa gambar dapat dikompresi tanpa kehilangan, tetapi kemudian didekompresi ke level kompresi atau kualitas lossy yang diperlukan. Secara efektif, satu versi gambar yang dikompresi dapat digunakan dalam berbagai konteks.
- Transmisi progresif dengan akurasi piksel atau resolusi spasial, terutama penting untuk arsip gambar dan aplikasi penjelajahan web.
- Kekokohan terhadap kesalahan bit untuk transmisi melalui saluran komunikasi nirkabel.
- Fitur khusus untuk meningkatkan fleksibilitas, seperti pengkodean kawasan yang diminati dan keamanan gambar pelindung.

Pengoperasian algoritme ini jauh lebih kompleks daripada JPEG. Namun, ringkasan singkat disediakan di sini untuk perbandingan:

**a) Pre-processing**

- Sebuah gambar opsional tahap ‘tiling’ - pembagian gambar besar menjadi ubin gambar yang tidak tumpang tindih.
- Transformasi warna opsional yang dapat dibalik atau tidak dapat diubah dapat diterapkan.
- Transformasi wavelet diskrit yang dapat dibalik atau tidak dapat diubah (masing-masing untuk kompresi lossless atau lossy). Gambar atau ubin gambar diuraikan menjadi sejumlah ‘sub-band’. Setiap sub-band terdiri dari koefisien yang menggambarkan komponen frekuensi horizontal dan vertikal pada resolusi tertentu (lihat Gambar 30).

**b) Kuantisasi**

- Sub-band koefisien dikuantisasi secara terpisah menggunakan pengukur skalar seragam dengan opsi ukuran langkah pengukur yang berbeda untuk sub-band yang berbeda, berdasarkan dynamic range dari sub-band. Ukuran langkah kuantitas akan menjadi 1 jika kompresi lossless diperlukan.

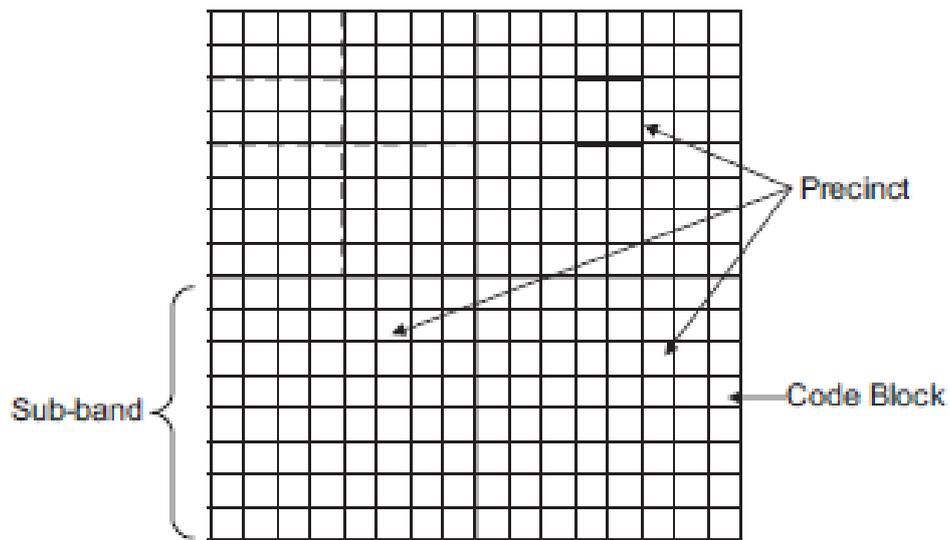
**c) Pengodean entropi**

- Sub-band dibagi menjadi kawasan dan blok kode (lihat Gambar 31). Setiap blok kode dimasukkan secara independen dalam urutan raster ke dalam pembuat kode entropi.
- Blok kode dikodekan oleh bidang bit individu, menggunakan tiga lintasan dari pembuat kode aritmatika.

Gambar JPEG 2000 tidak mengalami pemblokiran artefak kecuali gambar tersebut telah di-tile. Karena ukuran langkah kuantisasi berbeda di sub-band yang berbeda, kesalahan akan terbentuk dengan cara yang sangat berbeda, menjadi kurang seragam di lokasi spasial dibandingkan dengan blok JPEG. Artefak ‘menghaluskan’ atau ‘noda’ muncul, bagaimanapun, pada tingkat kompresi yang lebih tinggi. Ini muncul sebagai kaburnya wilayah kecil di dalam gambar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 32. Efek visual dering juga ada dalam JPEG 2000, tetapi berkurang dibandingkan dengan JPEG karena susunan sub-band,

yang berarti bahwa mereka kurang terlokalisasi dan kesalahan didistribusikan ke seluruh gambar. Oleh karena itu, mereka cenderung kurang terlihat dibandingkan artefak penghalus.

JPEG 2000 belum diadopsi secara luas, terutama dalam aplikasi pencitraan komersial, yang telah beralih ke alur kerja format gambar RAW. Namun, hal itu diantisipasi bahwa itu akan menemukan aplikasi dalam pencitraan ilmiah (ini sudah digunakan dalam pencitraan forensik di Inggris) dan pengarsipan, dan banyak penelitian sedang dilakukan untuk menggunakannya di bidang ini.



**Gambar 31.** Diagram yang mengilustrasikan partisi ubin atau komponen gambar menjadi blok kode dan kawasan. Berdasarkan diagram oleh Skodras et al. (2001)



**Gambar 32** Gambar yang mengilustrasikan artefak penghalusan khas JPEG 2000.

# Alur Kerja Gambar Digital

## Rantai Penggambaran dan Alur kerja gambar

Manajemen gambar digital melalui imaging chain adalah operasi yang kompleks. Banyaknya pilihan yang tersedia dalam hal perangkat keras, perangkat lunak, format file, dan teknik pemrosesan gambar berarti bahwa ada banyak keputusan yang harus dibuat selama penyampaian gambar dari akuisisi ke keluaran. Keputusan ini memengaruhi cara gambar diproses, yang pada akhirnya akan menentukan jumlah dan visibilitas artefak yang dihasilkan, dan juga kualitas gambar secara keseluruhan.

Rantai gambar digital generik diilustrasikan pada Gambar 31. Perangkat input dan output sangat bervariasi dalam teknologi dan karakteristik; oleh karena itu, gambar harus dimanipulasi dengan berbagai cara saat melewati rantai. Imaging chain hibrid menggabungkan proses berbasis perak-halida dengan proses digital, misalnya memindai dokumen asli fotografis yang kemudian diproses dan dikeluarkan secara digital.

Pertimbangan alur kerja gambar merupakan aspek penting dalam pengelolaan proyek gambar digital. Alur kerja menentukan urutan operasi yang akan dilakukan dan urutan terjadinya. Tujuan utama dari alur kerja yang baik adalah untuk menyediakan kerangka kerja yang menyederhanakan proses pengambilan keputusan, memungkinkan pengguna untuk bekerja secara efisien sambil memberikan hasil yang optimal untuk aplikasi pencitraan tertentu.

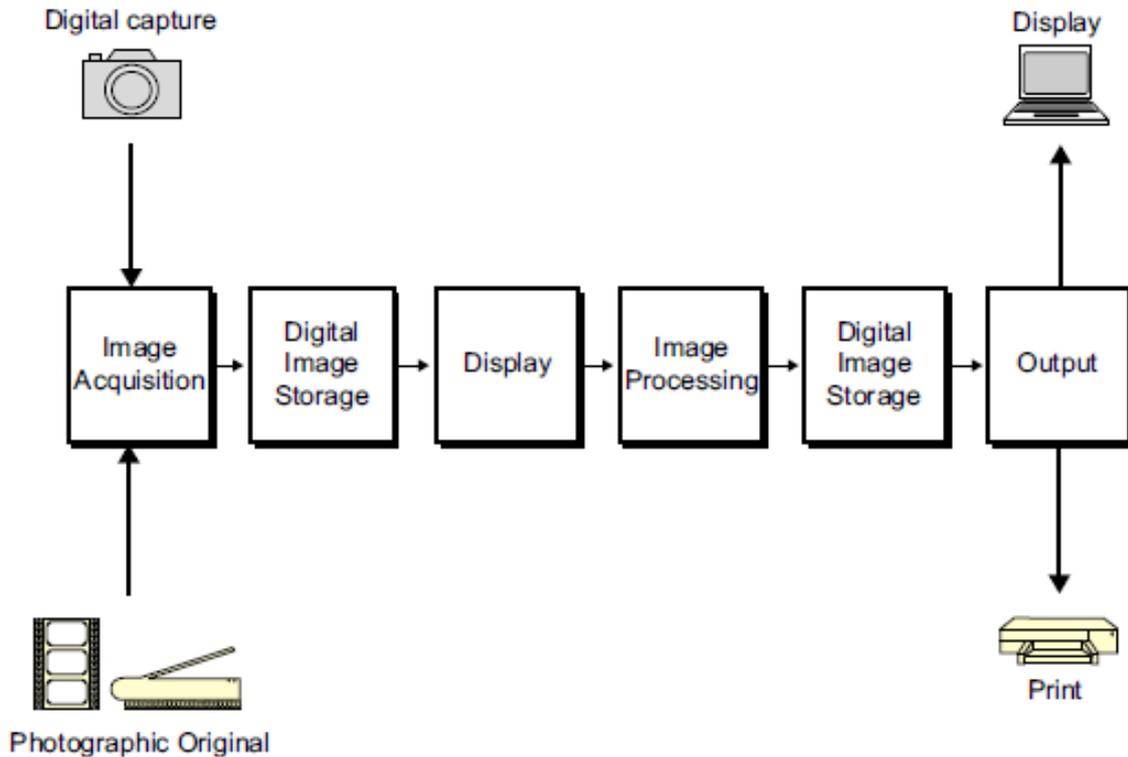
Definisi alur kerja yang sesuai untuk proyek fotografi bergantung pada berbagai faktor. Idealnya, terutama untuk proyek digital skala besar, alur kerja akan direfleksikan sebelum pembelian peralatan. Lebih umum, bagaimanapun, alur kerja perlu dioptimalkan dalam batasan peralatan, perangkat lunak dan fasilitas yang tersedia. Memperoleh dan mempertahankan kualitas gambar yang optimal harus menjadi perhatian utama, tetapi harus diimbangi dengan kebutuhan untuk pemrosesan, penyimpanan, dan biaya yang efisien. Persyaratan aplikasi pencitraan pada akhirnya akan menentukan kepentingan relatif dari masalah ini. Jika gambar akan diproses untuk keluaran tertentu, maka alur kerja dapat disederhanakan. Namun, penggunaan gambar di masa mendatang seringkali lebih sulit untuk didefinisikan dan mungkin dibatasi oleh pendekatan ini; ini juga harus menjadi pertimbangan dalam hal keputusan tentang kualitas pengambilan dan pengarsipan gambar.

Jika aliran kerja digital cukup memenuhi kebutuhan aplikasi, maka pendekatan menyeluruh harus digunakan, dengan pemikiran yang diberikan pada pengaturan perangkat keras yang akan digunakan dan berbagai proses gambar yang dapat diterapkan dalam perangkat lunak. Aspek teknis yang harus dipertimbangkan harus mencakup:

- resolusi gambar di seluruh imaging chain ;
- kedalaman bit gambar;
- perlunya interpolasi (dalam proses pengambilan sampel ulang) dan pada tahap apa ini harus dilakukan;
- manajemen warna dan ruang warna yang akan digunakan;
- di mana penyesuaian atau penyempurnaan gambar rantai harus dilakukan;
- apakah pengaturan perangkat keras otomatis mungkin merupakan pendekatan yang tepat untuk mempercepat alur kerja;

- format file yang akan digunakan dan apakah kompresi lossy memungkinkan atau diinginkan.

Untuk melihat implikasi dari beberapa masalah ini, ini tidak dimaksudkan sebagai resep untuk alur kerja pencitraan yang ideal, melainkan diskusi yang menyajikan beberapa latar belakang subjek, memungkinkan pengguna untuk mempertimbangkan aspek teknis dari pencitraan rantai secara koheren ketika mendekati proyek gambar digital mereka sendiri.



**Gambar 31** Rantai gambar digital. Tahapan selanjutnya dapat disertakan dalam rantai, misalnya tahap pemrosesan tambahan saat menangkap file RAW.

### Prinsip yang memandu alur kerja yang efektif

Persyaratan yang sangat bervariasi dari aplikasi pencitraan yang berbeda berarti bahwa tidak mungkin untuk menentukan aliran kerja generik yang cocok di semua kasus. Namun, dimungkinkan untuk membuat beberapa pedoman umum yang dapat diterapkan pada banyak aplikasi, sebagai berikut:

1. Kualitas gambar saat pengambilan. Kekhawatiran utama adalah kualitas gambar dan kuncinya adalah kualitas gambar yang optimal saat pengambilan. Salah satu tujuan dalam alur kerja adalah untuk menangkap gambar dengan kualitas setinggi mungkin, dalam batasan peralatan dan dengan mempertimbangkan persyaratan kecepatan pemrosesan.
2. Kualitas gambar melalui imaging chain. Selanjutnya, alur kerja harus berusaha untuk mempertahankan kualitas gambar di seluruh imaging chain, dengan meminimalkan kesalahan pada gambar yang disebabkan oleh berbagai proses saat bergerak melalui rantai.
3. Pendekatan alur kerja berdasarkan keluaran gambar. Kedua pedoman sebelumnya harus diseimbangkan dengan kebutuhan gambar yang ‘cocok untuk aplikasi’. Ini berarti

bahwa dalam beberapa kasus kecepatan pemrosesan dan ukuran file keluaran yang kecil mungkin lebih penting daripada kualitas gambar maksimum.

4. Pendekatan yang efisien. Alur kerja harus efisien, yang berarti bahwa di semua tahapan dalam rantai, tujuannya harus untuk pendekatan yang disederhanakan jika memungkinkan, dengan proses yang tidak perlu dihilangkan. Alur kerja harus cukup fleksibel untuk memungkinkan pemrosesan ekstra pada setiap gambar sesuai kebutuhan. Memiliki urutan langkah sederhana yang akan berfungsi untuk sebagian besar gambar akan membantu meningkatkan kecepatan dan meminimalkan kehilangan kualitas yang tidak perlu.
5. Pengulangan. Pendekatan yang efisien akan berulang, yang berarti bahwa pemrosesan gambar diterapkan secara teratur dan disengaja jika memungkinkan, daripada menggunakan pendekatan ad hoc yang jauh lebih sulit untuk ditiru. Ini juga dapat membantu mempercepat pengeditan gambar, karena langkah-langkah pemrosesan menjadi kebiasaan bagi pengguna, dan dapat memfasilitasi pemrosesan (batch) otomatis.
6. Interpolasi. Interpolasi yang tidak perlu harus dihindari. Jika proses pengambilan sampel ulang akan digunakan, proses tersebut harus diminimalkan. Pertimbangan harus diberikan pada metode interpolasi yang digunakan dan titik alur kerja di mana metode tersebut akan diterapkan.
7. Format file. Penggunaan format file standar memastikan bahwa hasil dapat diprediksi di berbagai platform, aplikasi, dan imaging chain. Format file harus dipilih secara hati-hati dalam hal properti dan kesesuaiannya pada tahap tertentu dalam imaging chain. Pemikiran harus diberikan pada masalah kompresi gambar; kompresi lossy hanya boleh diterapkan jika perlu.
8. Manajemen warna. Tujuan dari manajemen warna adalah untuk memastikan bahwa reproduksi nada dan warna dikontrol dan menghasilkan hasil yang dapat diprediksi (dan diinginkan). Ini melibatkan keputusan tentang pengkodean ruang warna yang akan digunakan di seluruh imaging chain dan bagaimana serta di mana konversi warna harus terjadi. Konversi yang tidak perlu antara ruang warna harus dihindari untuk meminimalkan artefak seperti pita warna. Secara umum, pendekatan 'openloop' untuk manajemen warna diinginkan, memungkinkan fleksibilitas jika perangkat lebih lanjut ditambahkan ke imaging chain. Untuk sebagian besar proyek, manajemen warna Konsorsium Warna Internasional memberikan solusi yang elegan dan dapat diimplementasikan dengan tingkat masukan pengguna yang lebih besar atau lebih kecil. Perlu dicatat bahwa pendekatan openloop tidak selalu diperlukan, misalnya dalam aplikasi penelitian, tetapi ini adalah kasus khusus, di mana warna dikontrol oleh karakterisasi dan konstruksi transformasi yang spesifik ke perangkat yang terlibat. Dalam kasus seperti itu, aliran kerja gambar ditentukan seluruhnya oleh dan akan spesifik untuk persyaratan proyek.
9. Mengarsipkan data. Pengarsipan gambar memerlukan keputusan yang harus dibuat dalam hal format file yang sesuai, media penyimpanan dan cara gambar yang diarsipkan diatur, dikelola, dan data gambar akan dimigrasi di masa mendatang. Idealnya, data gambar harus diarsipkan pada beberapa tahap, sebelum dan sesudah pengoptimalan.
10. Organisasi dan pengambilan data. Alur kerja harus mencakup strategi untuk katalogisasi dan pengambilan gambar, yang membutuhkan sistem pelabelan dan kata kunci. Perangkat lunak database gambar dan aplikasi alur kerja pencitraan dapat membantu dalam proses ini.

## **Pendekatan alur kerja**

Penting untuk mempertimbangkan keluaran gambar dan persyaratan kualitas gambar sebelum desain alur kerja. Jika keluaran diketahui dan kecepatan serta efisiensi adalah yang terpenting, maka pendekatan terbaik mungkin adalah menangkap gambar secara khusus untuk keluaran tersebut, yaitu dengan resolusi yang cukup tetapi tidak lebih. Ini dapat disebut produksi untuk alur kerja keluaran di mana tahapan dalam imaging chain dipertimbangkan dalam hal persyaratan pada keluaran. Keuntungan dari pendekatan ini adalah kesederhanaan dan kecepatan. Dengan ukuran dan kualitas yang dibutuhkan pada keluaran yang ditentukan, langkah-langkah sebelumnya mudah untuk didefinisikan. Ruang warna yang optimal untuk pemetaan ke keseluruhan perangkat output dapat dipilih selama atau setelah pengambilan. Mungkin layak untuk menerapkan beberapa penyesuaian gambar menggunakan pemrosesan batch. Jenis aliran kerja ini cocok saat menangani gambar bervolume tinggi yang membutuhkan pemrosesan dan pengiriman gambar dengan cepat, yang merupakan persyaratan khas fotografi jurnalistik dan olahraga.

Memproduksi gambar untuk keluaran tertentu dapat membatasi penggunaan alternatif, terutama jika gambar memiliki resolusi terbatas, atau jika kompresi lossy telah diterapkan. Untuk mempertahankan rentang opsi seluas mungkin untuk keluaran gambar di masa mendatang, produksi untuk pendekatan kualitas optimal dapat digunakan. Dalam kasus ini, gambar diambil pada resolusi optimal perangkat penangkap dan tetap pada resolusi tersebut tanpa mengubah ukurannya. Pengodean warna dipilih sehingga nada warna cukup besar untuk mencakup nada berbagai perangkat output dan salinan master diarsipkan dalam format file yang tidak terkompresi. Pendekatan ini kurang efisien dalam hal tingkat pemrosesan dan penyimpanan gambar yang diperlukan. Persyaratan alur kerja yang sama adalah tipikal aplikasi pencitraan yang menangani gambar berkualitas sangat tinggi dalam volume rendah, misalnya dalam iklan kelas atas, arsip museum, atau fotografi editorial.

## **Resolusi dan rantai penggambaran digital**

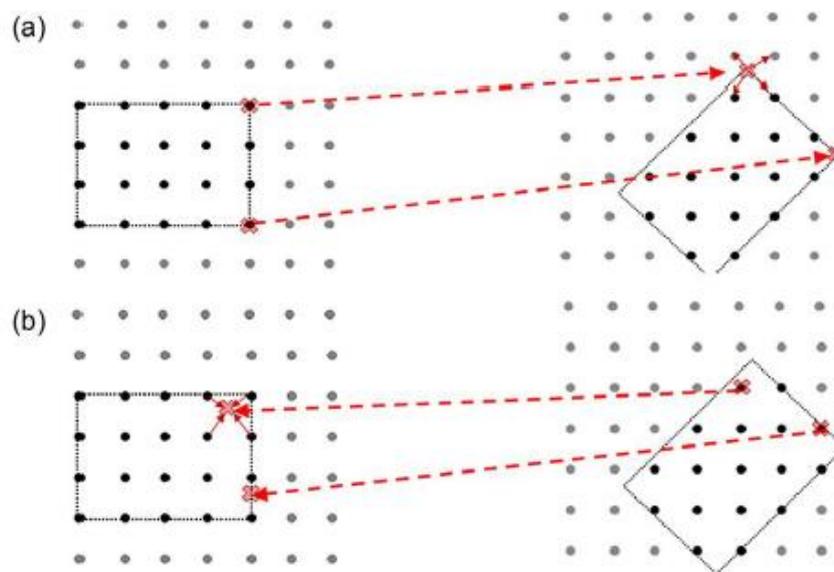
Resolusi adalah atribut gambar yang memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas gambar, baik dalam hal kemampuan sistem untuk merepresentasikan konten adegan secara memadai dan juga pada kualitas subjektif gambar seperti yang dirasakan oleh penonton. Perubahan jumlah piksel dalam sistem digital sebagian besar dicapai dengan interpolasi (dijelaskan di bawah), yang dapat memasukkan artefak digital ke dalam gambar. Dampak resolusi piksel gambar dan perubahan apa pun di dalamnya harus dipertimbangkan sebagai bagian fundamental dari alur kerja gambar.

Resolusi istilah ketika dibahas dalam kaitannya dengan sistem gambar digital bisa membingungkan. definisi resolusi yang ‘sebenarnya ‘ adalah sebagai ukuran kemampuan perekaman detail dari suatu sistem. Dalam gambar digital istilah ini diterapkan dengan berbagai cara. Ini sering digunakan oleh produsen kamera untuk menggambarkan jumlah piksel sebuah sensor. Ini lebih tepat disebut resolusi piksel dan dapat didefinisikan sebagai jumlah piksel secara horizontal dan vertikal, atau sebagai angka gabungan dalam bentuk megapiksel, yang menggambarkan jumlah total piksel dalam jutaan piksel. Resolusi spasial sensor gambar dapat didefinisikan sebagai alternatif, dalam hal jumlah piksel yang tersedia per satuan jarak, umumnya piksel per inci (ppi).

Resolusi piksel sering dikutip sebagai gambaran keunggulan saat membandingkan sensor yang berbeda. Namun, kemampuan perekaman detail aktual dari sistem, meskipun terkait dengan ini, tidak ditentukan olehnya. Dalam membandingkan dua sensor, sensor dengan jumlah piksel

yang lebih besar tidak secara otomatis menghasilkan kualitas gambar yang lebih baik karena banyak faktor, termasuk dimensi sensor, yang akan mempengaruhi ukuran dan bentuk fungsi penyebaran titik.

Kemampuan imaging chain untuk merepresentasikan detail tidak hanya bergantung pada resolusi tangkapan, tetapi juga dipengaruhi oleh resolusi perangkat output apa pun dalam rantai tersebut. Saat gambar bergerak melalui imaging chain, jumlah piksel akan tetap sama kecuali proses pemotongan atau pengambilan sampel dilakukan. Namun, nomor piksel ini hanya menjadi berarti jika dipertimbangkan dalam hal resolusi perangkat, terutama perangkat output. Sebagian besar perangkat dalam rangkaian akan memiliki resolusi piksel asli, yang dapat didefinisikan sebagai jumlah piksel maksimum yang dapat ditangkap atau direproduksi tanpa interpolasi dan merupakan properti inheren dari sistem; ini akan sering dijelaskan dalam piksel per inci (ppi). Untuk perangkat output, ini akan menentukan jumlah total piksel, dan jumlah maksimum piksel per inci yang dapat direproduksi tanpa interpolasi. Sekali lagi, resolusi spasial efektif dari perangkat output akan ditentukan oleh ukuran dan bentuk dari fungsi penyebaran titik (PSF) dan berbagai faktor lainnya. Perlu juga dicatat bahwa piksel yang ditampilkan pada monitor dapat diwakili oleh berbagai bentuk dan konfigurasi RGB triad. Lebih lanjut, piksel yang dicetak sebenarnya dapat terdiri dari berbagai konfigurasi kelompok titik-titik yang dicetak daripada satu titik jika digital half-toning digunakan untuk merepresentasikan nada kontinu.



Gambar 32 Interpolasi nilai piksel diperlukan saat memutar gambar dengan sudut selain kelipatan  $90^\circ$ . Ini dapat diterapkan dalam pemetaan maju (a) di mana posisi keluaran setiap piksel masukan dihitung. Dalam hal ini nilai piksel masukan yang berada di antara posisi piksel akan dipisahkan di antara piksel keluaran terdekat dengan interpolasi. Perhatikan bahwa salah satu piksel telah dipetakan ke posisi di luar gambar. Alternatifnya adalah pemetaan terbalik (b), di mana posisi piksel keluaran dipetakan kembali untuk menemukan posisinya dalam gambar masukan dan nilainya dihitung sebagai interpolasi antara piksel masukan yang paling dekat dengan posisi ini.

## Interpolasi

Jika gambar telah ditangkap pada resolusi piksel asli sensor dan akan ditampilkan atau dicetak pada resolusi asli perangkat output, maka setiap piksel dari perangkat masukan akan sama

persis dengan piksel pada perangkat output. Dalam situasi ini, dimensi spasial gambar keluaran akan ditentukan oleh jumlah piksel pada citra. Namun, dalam banyak kasus, ukuran gambar perlu diubah ke atas atau ke bawah untuk mencapai dimensi yang diperlukan. Mengubah ukuran gambar adalah proses pengambilan sampel ulang (interval pengambilan sampel didefinisikan ulang), yaitu karena tidak ada lagi rasio 1: 1 antara piksel pada input dan output, nilai piksel akan diinterpolasi.

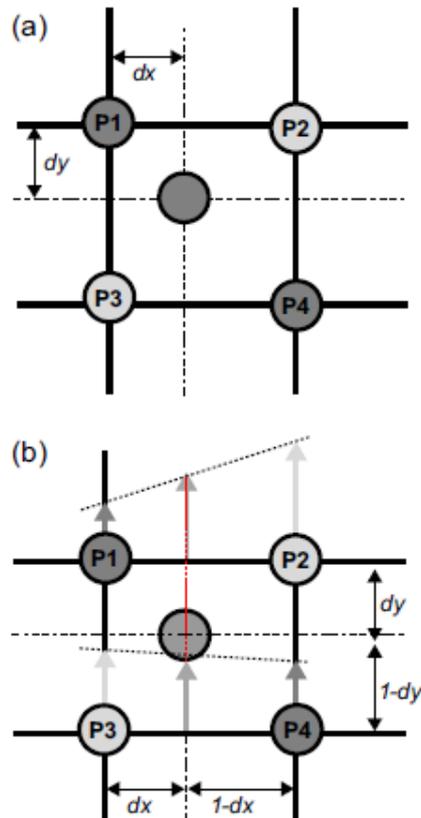
Karena pengambilan sampel ulang ke resolusi yang lebih rendah dapat menghasilkan aliasing frekuensi tinggi di dalam gambar, hasil yang lebih baik dapat dihasilkan dengan mendahului interpolasi dengan tahap penyaringan lolos-rendah, untuk menghilangkan frekuensi tinggi. Proses ini dapat dibangun untuk algoritma dan perangkat lunak pengambilan sampel khusus.

Interpolasi dalam bentuk resampling dapat terjadi pada beberapa tahap dalam imaging chain. Jika gambar ditangkap baik oleh scanner atau kamera digital pada resolusi selain resolusi asli sensor, maka algoritma interpolasi diterapkan dalam prosesor sinyal digital dari perangkat penangkap dan, dalam kasus kamera digital, mungkin diterapkan sebelum, dalam hubungannya dengan atau setelah demosaicing warna. Demikian pula, interpolasi mungkin diterapkan oleh perangkat lunak konversi RAW. Resolusi default yang diidentifikasi untuk gambar ketika dibuka di antarmuka aplikasi RAW adalah jumlah piksel aktual yang ditangkap oleh sensor dan karenanya sesuai dengan resolusi input asli; hal lain akan dicapai dengan interpolasi. Alternatifnya, pengambilan sampel ulang dapat diterapkan dalam aplikasi pemrosesan gambar. Pada keluaran, gambar pada resolusi selain resolusi asli perangkat output (jika printer) biasanya akan diinterpolasi ke resolusi tersebut oleh perangkat lunak perangkat; oleh karena itu, hasil yang lebih dapat diprediksi dan secara teoritis lebih optimal akan dicapai dengan mengirimkan gambar ke perangkat itu pada resolusi tersebut untuk memulai.

Mengubah ukuran gambar bukan satu-satunya operasi yang melibatkan interpolasi. Transformasi spasial atau geometris dari bidang gambar (seperti rotasi, terjemahan, koreksi distorsi geometrik, dan 'transformasi bebas') melibatkan reposisi semua atau sebagian piksel dalam gambar. Operasi ini sering kali menghasilkan piksel yang dipetakan ke posisi antara koordinat piksel (Gambar 32), dalam hal ini nilai piksel harus diinterpolasi. Oleh karena itu, mereka mewakili potensi kompromi kualitas gambar lebih lanjut.

## **Metode Interpolasi dan Asosiasi Artefak**

Proses interpolasi melibatkan estimasi nilai baru dari nilai yang diketahui. Secara umum, interpolasi adalah proses rata-rata dan oleh karena itu tidak dapat memberikan peningkatan dalam resolusi detail halus, yaitu nilai piksel baru dihasilkan, tetapi tingkat detail baru tidak diselesaikan. Algoritme interpolasi nonadaptif menggunakan metode interpolasi yang sama di seluruh bidang gambar. Ada berbagai pendekatan, yang berbeda dalam hal ukuran lingkungan piksel yang digunakan dalam perhitungan dan metode estimasi yang digunakan. Pilihan metode tertentu adalah keseimbangan antara kecepatan pemrosesan, akurasi, dan artefak yang dihasilkan.



**Gambar 33** Metode interpolasi non-adaptif. (a) Sampling tetangga terdekat. (b) Interpolasi Bilinear. Perhatikan perbedaan warna piksel terakhir.

Pendekatan paling sederhana untuk memperkirakan nilai piksel baru adalah interpolasi tetangga terdekat, yang hanya mereplikasi piksel gambar, memberikan piksel baru nilai yang sama dengan tetangga terdekatnya (Gambar 33a). Ini adalah metode tercepat, tetapi menghasilkan penurunan kualitas terbesar, karena artefak yang timbul, dan digunakan terutama untuk gambar yang berisi ilustrasi dengan tepi yang keras. Karena nilai piksel tidak dirata-ratakan, tetapi disalin, artefak bergerigi akan terlihat jelas pada tepi diagonal (lihat Gambar 34b).

Interpolasi bilinear memperkirakan nilai yang hilang dengan menggabungkan nilai dari empat piksel terdekat, menyesuaikan fungsi linier antara titik yang berdekatan dan kemudian menghitung nilai rata-rata dari fungsi ini (Gambar 33b). Proses rata-rata menghasilkan gambar yang sedikit kabur (lihat Gambar 34c). Interpolasi bilinear lebih lambat daripada interpolasi tetangga terdekat, tetapi akan menghasilkan lebih sedikit artefak dalam gambar nada kontinu.

Interpolasi bikubik bahkan lebih kompleks, menggunakan nilai 16 piksel dan menyesuaikan fungsi permukaan kubik di antara keduanya untuk memberikan perkiraan nilai piksel baru. Semakin besar jumlah piksel yang digunakan dalam penghitungan dan kompleksitas fungsinya, berarti estimasi tersebut lebih akurat dibandingkan dengan dua metode sebelumnya. Hal ini memberikan peningkatan kualitas gambar yang signifikan, dengan hasil yang lebih halus pada tepi diagonal tetapi lebih sedikit keburaman gambar secara keseluruhan (lihat Gambar 34d).

Algoritme interpolasi adaptif mengubah pendekatan piksel demi piksel untuk berbagai jenis konten gambar untuk meminimalkan visibilitas artefak. Algoritme semacam itu dapat diimplementasikan di belakang layar oleh prosesor sinyal perangkat keras untuk menghasilkan

hasil yang optimal untuk perangkat tersebut. Mereka juga dapat diterapkan dalam perangkat lunak berpemilik yang dikembangkan untuk mengelola proses pencitraan tertentu, seperti pembesaran gambar atau pencetakan. Banyak metode adaptif akan menerapkan versi algoritme yang berbeda di edge, karena ini adalah area gambar di mana artefak interpolasi paling terlihat. Ada sejumlah metode adaptif yang kini tersedia di versi perangkat lunak pemrosesan gambar yang lebih baru yang dioptimalkan untuk operasi pengambilan sampel ulang tertentu.



**Gambar 34** Hasil dari metode interpolasi berbeda saat mengubah ukuran gambar warna kontinu. (a) Gambar asli. (b) Sampling tetangga terdekat menghasilkan pikselasi parah dan artefak bergerigi pada diagonal. (c) Interpolasi Bilinear menghasilkan peningkatan diagonal bergerigi, tetapi gambar terlihat kabur. (d) Hasil terbaik diperoleh dengan menggunakan interpolasi bikubik, yang menghasilkan artefak bergerigi paling sedikit dan gambar paling tajam. Gambar telah diubah ukurannya menjadi tiga kali ukuran aslinya. Gambar ‘Jembatan Anzac di Malam Hari’ iStockphoto/TSKB/Tim Barrett

## Interpolasi dan Alur kerja gambar

Gambar 34 mengilustrasikan artefak yang mungkin diperkenalkan oleh algoritma interpolasi yang digunakan saat mengubah ukuran gambar. Oleh karena itu, jika ingin diminimalkan, interpolasi hanya boleh diterapkan jika benar-benar diperlukan. Seperti yang telah dijelaskan, titik di mana interpolasi diterapkan akan bergantung pada pendekatan aliran kerja.

Misalnya, jika gambar hanya akan digunakan untuk halaman web, resolusi maksimum atau asli dari sensor mungkin tidak diperlukan. Dalam kasus ini, mungkin cukup memadai untuk menangkap gambar pada resolusi yang lebih rendah, atau untuk menurunkan sampel cukup awal dalam imaging chain. Jika gambar perlu diubah ukurannya, hasil optimal dapat dicapai dengan menggunakan algoritma interpolasi adaptif yang secara otomatis diterapkan oleh perangkat penangkap. Namun demikian, mungkin saja hasilnya lebih baik untuk keluaran tertentu menggunakan salah satu algoritme yang tersedia di perangkat lunak konversi RAW atau perangkat lunak pemrosesan gambar. Penting untuk dicatat bahwa pendekatan optimal hanya dapat dilakukan dengan membandingkan gambar secara berdampingan menggunakan kedua metode tersebut.

Jelasnya, jika tujuan alur kerja adalah untuk memberikan kualitas optimal dan fleksibilitas untuk mengeluarkan gambar ke media yang berbeda, maka gambar tidak boleh diubah ukurannya sampai nanti dalam imaging chain. Khususnya, jika gambar kemungkinan besar mengalami banyak pengeditan, kualitas yang lebih tinggi akan dipertahankan dengan melakukan penyesuaian gambar pada gambar dengan resolusi lebih tinggi dan kemudian melakukan pengecilan. Oleh karena itu, pendekatan yang paling umum adalah mengubah

ukuran gambar di akhir pipeline pemrosesan gambar saat menyiapkannya untuk keluaran. Gambar kemudian dapat dipertajam jika perlu untuk melawan efek penghalusan dari interpolasi.

## Menghitung resolusi yang diperlukan untuk hasil gambar

Saat gambar disiapkan untuk keluaran tertentu, penting untuk menghitung resolusi piksel yang diperlukan berdasarkan resolusi perangkat output dan dimensi fisik yang diperlukan dari gambar keluaran. Perhitungan seperti itu diperlukan untuk memastikan bahwa gambar yang diambil memiliki resolusi piksel yang cukup tinggi untuk persyaratan keluaran dan untuk menetapkan apakah interpolasi akan diperlukan. scanner biasanya memiliki fleksibilitas dalam hal resolusi input yang dapat diatur oleh pengguna. Ekuasi 14.1 menjelaskan hubungan antara resolusi input dan output dalam hal dimensi gambar asli yang dipindai dan gambar keluaran. Saat mengambil gambar menggunakan kamera digital, pilihan resolusi input akan dibatasi dan tidak mungkin sama persis dengan perangkat output (Tabel 2).

Secara umum, jika gambar akan disiapkan untuk ditampilkan pada monitor, gambar tersebut dapat ditentukan dalam hal jumlah piksel yang diperlukan. Ukuran gambar keluaran yang dibutuhkan dapat ditentukan dengan menetapkan seberapa besar gambar yang akan ditampilkan di layar dan berdasarkan perhitungan pada salah satu dimensi layar yang diberikan pada Tabel 2. Jika gambar akan ditempatkan di halaman web, dimensi layar harus dipilih dengan cermat untuk mewakili monitor 'rata-rata'. Monitor dengan resolusi yang lebih tinggi hanya akan menampilkan gambar dalam ukuran yang mencakup proporsi layar yang lebih kecil.

<b>Tabel 2 Contoh resolusi yang diperlukan untuk keluaran web</b>	
<b>SISTEM</b>	<b>DIMENSI PIKSEL (H x v)</b>
Resolusi monitor XGA	1024 x 768
Resolusi gambar yang diperlukan untuk ditampilkan pada tiga perempat ukuran layar	768 x 576
Resolusi pengambilan minimum untuk kamera compact digital biasa	640 x 480
Resolusi pengambilan minimum untuk kamera digital SLR profesional tipikal	1936 x 1288

Gambar yang akan disiapkan untuk dicetak harus diperhatikan dalam hal ukuran cetakan keluaran yang diperlukan. Resolusi printer bervariasi. Seperti yang telah dijelaskan, kualitas tertinggi akan diperoleh jika gambar dikirim ke printer pada resolusi aslinya, dengan mempertahankan korespondensi satu-ke-satu antara piksel masukan dan keluaran. Namun, tidak semua printer memiliki resolusi asli. Khususnya pada beberapa printer inkjet modern, dimungkinkan untuk memvariasikan jumlah dan ukuran titik yang dicetak, menghasilkan berbagai resolusi cetak untuk media yang berbeda. Untuk gambar 'kualitas fotografi', printer inkjet biasanya bekerja dengan resolusi dari 180 hingga 360 ppi. Penting untuk diperhatikan bahwa spesifikasi teknis untuk resolusi printer inkjet biasanya mengacu pada jumlah maksimum titik per inci. Nilai ini bisa sedikit menyesatkan, karena tidak sesuai dengan piksel yang dicetak per inci, yang dihasilkan dari kumpulan titik dengan warna berbeda. Oleh karena itu, nilai yang benar untuk ppi maksimum harus ditetapkan dari pabrikan. Printer warna-berkelanjutan dapat bervariasi antara 240 dan 400 ppi. Resolusi standar yang dikutip untuk pencetakan offset adalah 300 ppi, tetapi resolusi yang diperlukan mungkin lebih rendah dari ini. Dimensi piksel yang diperlukan untuk gambar dapat dihitung dengan mengalikan resolusi

yang diperlukan dalam ppi dengan dimensi gambar dalam inci. Misalnya, untuk gambar yang dicetak pada 300 dpi dan 10x8 inci, diperlukan 3000x2400 piksel.

### **Bit depth : Gambar 8-bit versus 16 bit**

Konversi analog-ke-digital yang diterapkan pada keluaran sinyal dari sensor gambar dapat menghasilkan kedalaman bit yang jauh lebih tinggi daripada yang ada pada gambar yang diambil. Ini terjadi sebelum banyak tahapan pemrosesan gambar lainnya yang terjadi pada perangkat penangkap dan memungkinkan pengurangan kesalahan pembulatan yang dihasilkan sebagai hasil dari bekerja dengan matematika integer. Gambar, setelah disimpan, dalam banyak kasus akan berupa 8 atau 16 bit per saluran. Pilihan kedalaman bit adalah keseimbangan antara persyaratan dalam kemudahan pemrosesan, ukuran file, dan kualitas gambar.

Ketentuan bekerja dengan gambar 8-bit didasarkan pada kebutuhan untuk menyediakan tingkat individu yang cukup untuk merepresentasikan gambar secara visual sebagai nada kontinu. Namun demikian, karena gambar diproses melalui imaging chain, terutama saat koreksi tonal diterapkan baik dalam penyesuaian level atau kurva, atau sebagai koreksi gamma, banyak level intensitas (level abu-abu) dapat dikuantisasi menjadi sama. nilai integer, menghasilkan rentang tonal di mana beberapa level abu-abu hilang (disebut posterization). Persyaratan kedalaman bit untuk koreksi gamma dan efeknya pada tingkat keluaran gambar diilustrasikan dalam Tabel 3. Gambar 35 menunjukkan efek posterisasi pada gambar 8-bit dan histogramnya (perhatikan bahwa gambar ini telah diproses dengan sangat berat untuk menekankan kedua efek).

Bekerja dengan gambar 16-bit berarti ada lebih banyak level yang tersedia (65, 536 alih-alih 256) per saluran, mengurangi efek posterisasi, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 36. Dengan demikian, kuantisasi 16-bit membantu menjaga kualitas gambar tetapi menghasilkan file berukuran dua kali lipat dari gambar 8-bit yang setara. File enam belas-bit tidak didukung oleh semua format file (saat ini, mereka didukung oleh format RAW, TIFF, PSD, PNG dan JPEG 2000). Hingga saat ini, tingkat dukungan 16-bit dalam aplikasi pemrosesan gambar terbatas, yang berarti bahwa proses tertentu yang tersedia untuk gambar 8-bit tidak dapat dilakukan pada gambar 16-bit, meskipun dalam versi perangkat lunak saat ini hal ini tidak terlalu menjadi masalah.

Pada saat penulisan, sejumlah printer mendukung pencetakan gambar 16-bit dengan tujuan menyediakan gamut printer yang diperluas. Ini berguna saat bekerja dengan file RAW yang diambil pada 16 bit, menggunakan ruang warna yang luas seperti Pro Photo RGB dan mempertahankan alur kerja 16-bit seluruhnya. Apakah peningkatan dalam keluaran gamut dibandingkan dengan gamut dari printer 8-bit yang menggunakan delapan atau lebih tinta cukup signifikan untuk kemampuan pencetakan 16-bit untuk menjadi standar masih belum jelas.



**Gambar 35** Artefak posterisasi yang disebabkan oleh pemrosesan gambar dari gambar 8-bit (a) muncul sebagai kontur yang terlihat dalam nada yang berubah secara halus pada gambar dan menghasilkan histogram ‘seperti sisir’ (b).



**Gambar 36** Versi 16-bit dari gambar pada Gambar 35 yang diproses dengan cara yang sama (a) menampilkan kontur yang dikurangi (terlihat di wilayah pusat mid-tone dan bayangan) dan histogram yang jauh lebih halus (b).

## Manajemen warna

Panduan Gambar digital Fotografi Universal (UPDIG), yang diproduksi oleh koalisi UPDIG (lihat Bibliografi), menjelaskan salah satu tujuan aliran kerja digital sebagai pelestarian display image saat gambar bergerak melalui dan di antara imaging chain. Hal ini memerlukan manajemen warna dari imaging chain, dengan informasi yang diperlukan untuk transformasi

warna gambar antara ruang warna yang akan disertakan, atau disematkan dalam, file gambar. Ruang warna digital dan memberikan informasi tentang karakterisasi perangkat gambar digital. Implementasi proses ini dalam arsitektur manajemen warna ICC di mana alur kerja manajemen warna dibahas secara lebih rinci. Jadi, di sini subjek diperkenalkan dalam konteks alur kerja pencitraan yang lebih umum.

Dalam manajemen warna ICC, proses kalibrasi dan karakterisasi menghasilkan profil perangkat. Ini adalah file data yang berisi informasi tentang reproduksi nada dan warna setiap perangkat. Profil digunakan oleh sistem manajemen warna (CMS) untuk konversi warna antar perangkat. File tersebut dapat dikirim sebagai file terpisah dengan file gambar atau tertanam di dalamnya. Jika gambar dengan profil tertanam dikirim antara imaging chain, tampilan warna gambar harus dipertahankan. Ini mengasumsikan bahwa profilnya akurat, bahwa kondisi perangkat yang dikalibrasi sebelum pemfilteran tetap sama dan bahwa imaging chain tujuan juga dikelola dengan warna menggunakan manajemen warna ICC. Idealnya, semua perangkat dalam rantai harus diutamakan.

Profil kamera hanya berguna jika diterapkan pada data gambar dalam status gambar yang mengacu pada pemandangan. Namun, sebagian besar kamera tidak merender data gambar yang mengacu pada pemandangan, melainkan menggunakan salah satu dari dua opsi rendering warna alternatif. Rendering deskripsi reproduksi menengah mengkodekan gambar secara langsung ke dalam ruang warna RGB yang mengacu pada keluaran standar seperti sRGB atau Adobe RGB 98 dan merupakan pendekatan yang paling banyak digunakan. Ruang warna standar dipilih oleh pengguna di pengaturan kamera. Alternatifnya, rendering warna yang ditanggung secara manual dapat digunakan, di mana datanya dikeluarkan sebagai file RAW. Dalam hal ini gambar setelah konversi RAW juga (biasanya) dikodekan dalam ruang warna RGB yang mengacu pada keluaran standar, sekali lagi dipilih oleh pengguna. Oleh karena itu, profil yang digunakan dengan gambar yang diambil menggunakan kamera digital biasanya adalah profil ruang warna untuk ruang warna di mana gambar tersebut dikodekan.

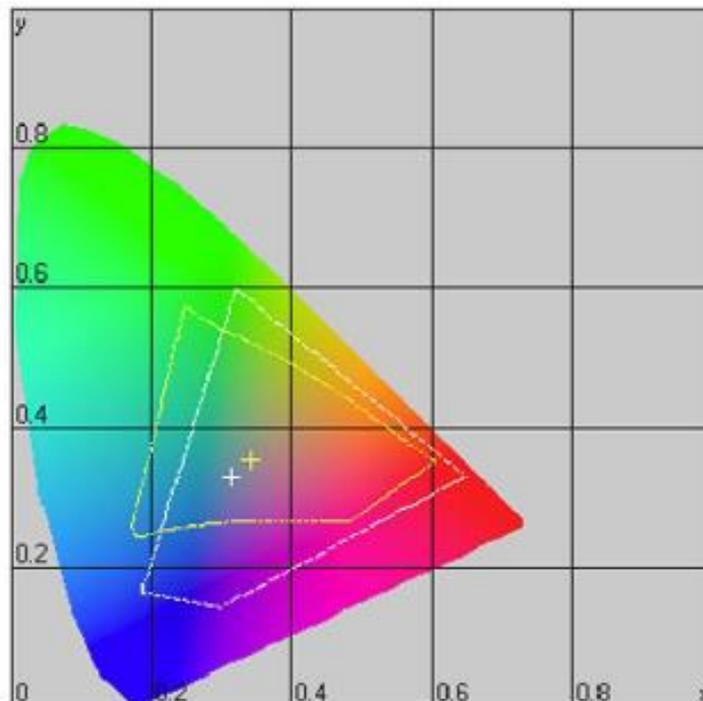
Profil tampilan sangat penting, karena tampilan digunakan untuk mengedit gambar dan memproyeksikan gambar secara halus. Profil tampilan idealnya adalah profil kustom yang dihasilkan dengan melakukan pengukuran dari permukaan tampilan. Kondisi tampilan sekitar harus dikontrol dengan cermat oleh semua pengguna gambar untuk memastikan profil tampilan tetap akurat. Scanner dan printer biasanya disertakan dengan profil umum dari pabrikan, tetapi hasil yang lebih baik untuk kedua perangkat akan diperoleh dari profil khusus. Profil scanner umum umumnya tidak mengimbangi kisaran pengaturan berbeda yang mungkin diterapkan, meskipun gambar yang dipindai dapat disimpan ke ruang warna standar untuk menghindari kebutuhan akan profil kustom. Profil kustom juga optimal untuk printer guna memastikan akurasi halus dan tampilan warna keluaran.

## **Alur kerja warna**

Kecuali jika profil masukan sedang digunakan, tujuan umum dalam mengatur ruang warna saat akuisisi adalah untuk memilih pengkodean ruang warna RGB standar agar paling cocok dengan keseluruhan untuk keluaran tertentu. Jika keluaran tidak diketahui, maka disarankan untuk memilih ruang warna yang cukup besar untuk mencakup sebagian besar atau semua gamut perangkat output yang mungkin. Ada serangkaian pengkodean ruang RGB standar, masing-masing mencakup nada yang berbeda, yang paling cocok dengan rentang perangkat masukan dan keluaran yang berbeda; tidak ada satu ruang warna yang ideal untuk semua situasi pencitraan. Ada empat yang saat ini ditentukan dalam perangkat lunak konversi RAW generik,

sRGB (Ruang warna RGB Standar) pada awalnya dirancang sebagai ruang warna default untuk gambar multimedia; oleh karena itu, gamutnya dioptimalkan untuk paling cocok dengan gamut tampilan tabung sinar katoda referensi (CRT). sRGB memiliki gamut yang relatif sempit dan juga sangat tidak cocok dengan ruang CMYK, karena tidak dapat mereproduksi sebagian besar wilayah cyan yang tersedia untuk printer (lihat Gambar 37). Kedua faktor ini membuat RGB kurang cocok dibandingkan beberapa ruang warna yang dijelaskan di bawah, jika gambar akan dikeluarkan untuk dicetak. Namun, jika output alur kerja diketahui untuk tampilan web atau multimedia, sRGB adalah pilihan yang optimal; biasanya juga ditentukan sebagai ruang warna yang akan disematkan dalam gambar yang akan dikirimkan ke laboratorium warna digital profesional atau vendor cetak digital konsumen untuk produksi cetakan layar. Jika gambar yang akan di-output dalam sRGB tidak memerlukan koreksi warna atau tonal, maka pendekatan paling sederhana adalah menangkap ke dalam sRGB. Namun, dalam banyak kasus, hasil yang lebih baik dapat diperoleh dengan menangkap ke dalam ruang warna dengan gamut yang lebih luas, melakukan pengeditan gambar, lalu mengonversinya ke sRGB.

Colormatch RGB diperkenalkan oleh RadiusTM untuk rangkaian monitor grafis profesional Pressview. Keuntungannya adalah respons nada yang sangat cocok dengan keluaran pers; oleh karena itu, ini digunakan terutama untuk pekerjaan prepress high-end. Ini memiliki gamut yang lebih besar daripada sRGB, meskipun masih memotong beberapa area cyan jika dibandingkan dengan ruang warna CMYK, tetapi relatif kecil dibandingkan dengan mayoritas gamut lain yang sekarang tersedia. Adobe RGB 98 telah menggantikannya sebagai ruang warna RGB pilihan untuk hasil cetak.

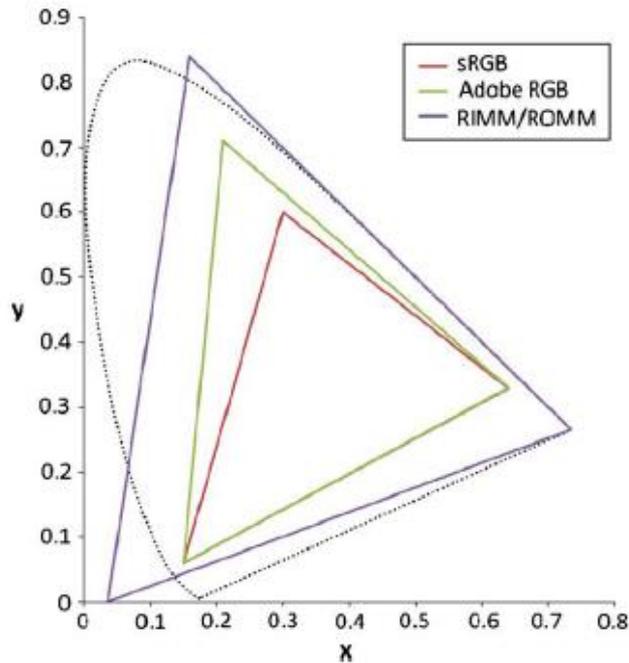


**Gambar 37** Contoh ketidakcocokan gamut antara ruang warna sRGB dan CMYK yang diilustrasikan pada diagram kromatisitas CIE 1931 x, y. Batas kuning yang lebih kecil menunjukkan tingkat gamut untuk CMYK berlapis Euroscale, sedangkan yang putih adalah tingkat sRGB. Salib menunjukkan titik putih untuk masing-masing. Gambar dibuat menggunakan Gretag Macbeth Pro file Editor Versi 5.05b.

Adobe RGB 98 memiliki gamut yang lebih luas daripada sRGB dan Colormatch RGB. Ini mencakup sebagian besar gamut CMYK yang digunakan dalam pencetakan offset; oleh karena itu, ini awalnya digunakan sebagai ruang warna kerja default untuk pekerjaan pra-cetak. Saat ini, ini umumnya digunakan dalam dua situasi: (1) jika penggunaan gambar di masa mendatang tidak ditentukan, wide gamutnya kemungkinan besar mencakup keseluruhan perangkat potensial, baik tampilan maupun hard copy; gambar harus ditangkap dan dipertahankan dalam Adobe RGB 98; (2) bila keluaran gambar diketahui melalui pencetakan inkjet atau pewarna-sublimasi, maka gamut lebar juga diperlukan. Pada printer ini, konversi dari RGB ke CMYK dilakukan secara internal oleh device driver (bukan sebelum gambar dikirim untuk dicetak) dan mereka membutuhkan file RGB sebagai input; oleh karena itu, ruang warna RGB harus sedekat mungkin dengan ruang CMYK, dan Adobe RGB 98 adalah pilihan yang baik.

Meskipun sRGB dan Adobe RGB 98 cukup memadai untuk mencocokkan gamut dari sebagian besar perangkat output yang tersedia saat ini, tidak ada ruang warna yang mendekati sepenuhnya ruang warna sebagian besar sensor gambar. Menangkap ke dalam ruang warna ini pada dasarnya membatasi rentang warna jenuh yang dapat direproduksi oleh sensor. ProPhoto RGB (dikembangkan oleh Kodak ProPhoto RGB sebagai versi ROMM RGB;) adalah ruang warna dengan gamut yang sangat lebar; memang, sebagian dari keseluruhannya berada di luar gamut sistem visual manusia, yang diilustrasikan dalam diagram kromatisitas CIE x, y pada Gambar 38.

Luasnya ProPhoto RGB berarti bahwa ini lebih cocok dengan gamut dari sebagian besar sensor gambar. Dengan demikian, memperoleh gambar ke dalam ProPhoto RGB memungkinkan lebih banyak keseluruhan dari sensor gambar yang akan digunakan. Bagaimanapun, pendekatan ini harus digunakan dengan hati-hati; beberapa warna yang tersedia di ProPhoto RGB tidak dapat ditampilkan pada monitor, artinya tidak ada cara untuk memeriksanya selama pengeditan. Ukuran keseluruhan berarti bahwa ProPhoto hanya benar-benar praktis saat menggunakan alur kerja 16-bit dari input ke output; jika gamut direpresentasikan hanya dengan menggunakan 256 level per saluran yang tersedia dalam gambar 8-bit, maka posterisasi akan menjadi parah, karena hasil dari perbedaan warna yang lebih besar antara level yang berbeda. Namun, dalam alur kerja 16-bit, gamut lebar memungkinkan ruang untuk level tambahan yang tersedia. Dengan kemajuan teknologi tampilan dan pencetakan, ukuran gamut akan meningkat di masa mendatang dan gambar yang diambil saat ini dalam gamut lebar mungkin akan dihasilkan di masa mendatang untuk memanfaatkan perkembangan ini.



**Gambar 38** Diagram kromatisitas CIE 1931 x, y yang mengilustrasikan gamut sRGB, Adobe RGB 98 dan ProPhoto RGB. Perhatikan bahwa ProPhoto RGB melampaui batas warna yang dapat dilihat oleh sistem visual manusia. diwakili dalam CIE  $u'$ ,  $v'$  ruang.  $U'$ . diagram kromatisitas  $v'$  lebih linier perseptual daripada diagram x, y; namun, dalam manajemen warna, gamuts lebih sering direpresentasikan dalam ruang x, y, karenanya dimasukkan di sini.)

File gambar untuk pencetakan offset akhirnya dikeluarkan sebagai file CMYK, ruang warna tertentu bergantung pada pers dan jenis kertas. Proses konversi ke CMYK bukanlah kasus sederhana untuk mengubah mode warna gambar dalam aplikasi pemrosesan gambar tetapi memerlukan, seperti untuk semua konversi, profil sumber dan tujuan, serta maksud rendering. Seringkali, file RGB dengan profil tertanam akan dipasok ke printer, yang akan melakukan konversi. Cara lainnya, fotografer melakukan konversi dengan menggunakan profil yang disediakan oleh printer. Dalam kasus ini, titik di mana konversi RGB-ke-CMYK dilakukan harus dipertimbangkan dalam hal aliran kerja. Pada hari-hari awal pengelolaan warna, adalah hal umum untuk mengonversi ke ruang warna CMYK yang relevan sesegera mungkin setelah pengambilan: alur kerja 'pengikatan awal'. Pendekatan ini sederhana dan berarti bahwa cara gambar diproses dibatasi dalam gamut keluaran sejak awal. Namun, sekarang jauh lebih umum untuk beroperasi menggunakan alur kerja RGB sampai gambar menjadi keluaran, yang dijelaskan sebagai aliran kerja 'pengikatan akhir'. oleh karena itu hanya membatasi gamut di akhir aliran kerja. Adobe RGB 98 adalah pilihan yang baik dalam kasus ini, untuk alasan yang dijelaskan di atas. Menggunakan hasil alur kerja RGB dalam file yang lebih kecil melalui tahap awal dari rantai pengolahan dan lebih banyak operasi pemrosesan gambar yang tersedia, dan memfasilitasi potensi gamut keluaran alternatif di masa depan.

## Format File

Alur kerja yang efektif bergantung pada penggunaan format file yang distandarisasi, yang berarti bahwa mereka dapat dikenali di seluruh rantai dan platform pencitraan. Format file yang sekarang menjadi standar atau standar de facto untuk aplikasi pencitraan memiliki berbagai properti, yang berarti bahwa ini paling berguna untuk berbagai bagian alur kerja gambar. Fitur

penting adalah: (1) penggunaan kompresi lossless atau lossy; (2) dukungan untuk lapisan, jalur, dan fungsi pengeditan gambar lainnya; dan (3) persyaratan penyimpanan dan pemrosesan alur kerja. Seringkali, format berbeda akan digunakan pada tahapan berbeda dalam alur kerja.

## **Akuisisi Gambar**

Format file gambar diam yang tersedia di kamera digital seringkali terbatas pada file JPEG, RAW dan dalam beberapa kasus file TIFF dan/atau JPEG 2000. Biasanya file yang diambil JPEG akan memiliki berbagai opsi untuk pengaturan kualitas dan terkadang kisaran tambahan pengaturan resolusi, sedangkan file RAW dan TIFF akan diambil pada resolusi sensor gambar. Kisaran format yang tersedia untuk gambar yang dipindai jauh lebih besar.

Pendekatan alur kerja adalah faktor terbesar yang memengaruhi pemilihan format. Dalam alur kerja ‘produksi untuk kualitas’. kualitas optimal akan dicapai dengan menangkap dalam format RAW, yang juga memiliki keuntungan untuk pengarsipan gambar. Dalam alur kerja ‘produksi untuk keluaran’. terutama jika perputaran cepat dari volume gambar yang tinggi merupakan persyaratan, maka pemrosesan tambahan yang terlibat dalam menangani file RAW (dan penyimpanan ekstra yang diperlukan pada kartu memori) dapat membuatnya menjadi pilihan yang kurang tepat.

Kompresi lossy yang digunakan oleh JPEG akan menciptakan artefak yang terlihat pada tingkat kompresi yang tinggi, meskipun efeknya pada kualitas gambar yang terlihat akan bergantung pada aplikasi pencitraan, resolusi gambar dan konten pemandangan. Jika aplikasi memerlukan kualitas tinggi tetapi perputaran cepat, maka menangkap file TIFF yang tidak dikompresi akan memungkinkan akuisisi gambar tanpa artefak kompresi, dengan trade-off yang tak terelakkan dalam hal ukuran file dan keserbagunaan. File TIFF lebih besar daripada file RAW yang setara, tanpa tingkat kontrol yang diberikan oleh konversi RAW kepada pengguna.

Untuk penerbitan Internet, file JPEG umumnya merupakan pilihan yang disukai untuk gambar warna kontinu. Apakah ini telah ditangkap sebagai file JPEG atau dikonversi ke JPEG untuk keluaran akan tergantung pada jenis pekerjaan yang dilakukan. File JPEG sering dideskripsikan sebagai persepsi lossless pada tingkat kompresi rendah, yaitu ketika diambil pada pengaturan JPEG kualitas tinggi di kamera digital (ini setara dengan Q8 atau di atasnya dalam skala kualitas 1-10 yang kadang-kadang digunakan) - Meskipun file TIFF umumnya lebih disukai sebagai file keluaran untuk pencetakan, JPEG kualitas tinggi mungkin juga sesuai untuk gambar yang dicetak untuk beberapa aplikasi, selama memiliki resolusi yang cukup tinggi.

Aplikasi pencitraan seperti fotografi olahraga dan banyak jurnalisme foto biasanya mengandalkan pengambilan JPEG. Dalam kasus ini, volume gambar yang besar kemungkinan besar akan diambil pada satu waktu; oleh karena itu, penyimpanan terbatas pada yang tersedia di kamera. Selain itu, gambar perlu dikirim ke meja berita secepat mungkin, sehingga pemrosesan gambar harus diminimalkan dan ukuran file dibatasi oleh bandwidth yang tersedia untuk transmisi. Dalam kasus seperti itu, sebagian besar pemrosesan gambar, seperti koreksi tonal, white balance, dan penajaman, dapat diterapkan di kamera menggunakan pengaturan otomatis atau kustom untuk menghasilkan gambar yang cukup baik untuk output yang diperlukan.

## **Alur kerja dan RAW capture**

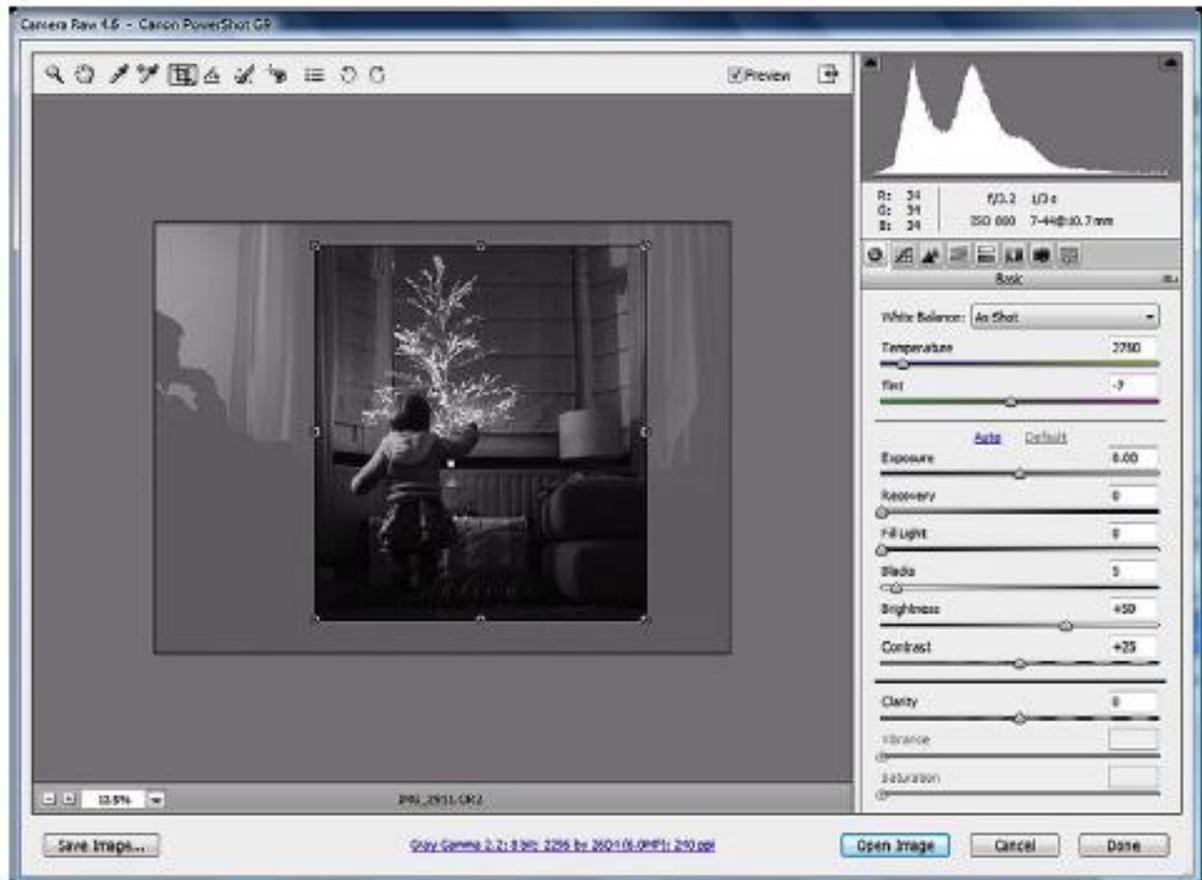
Pengambilan file RAW menunjukkan perubahan yang signifikan dalam alur kerja pencitraan. pengambilan RAW menunda rendering warna dan banyak File RAW bukanlah file yang ‘diselesaikan’ dengan cara yang sama seperti file JPEG atau TIFF. File RAW terdiri dari data

yang hampir tidak diproses secara langsung dari sensor gambar, sebelum interpolasi warna (‘demosaijing’). Ini melewati banyak pemrosesan yang secara otomatis diterapkan oleh perangkat akuisisi saat menyimpan ke format lain, seperti white balance, koreksi gamma/nada, ruang warna dan bahkan pengaturan resolusi. Alur kerja RAW berisi tahap pemrosesan gambar tambahan segera setelah pengambilan, yaitu konversi RAW, yang dilakukan menggunakan plug-in seperti ‘Camera RAW’ (lihat Gambar 39) di Adobe Photoshop atau aplikasi manajemen gambar seperti Adobe Lightroom, atau menggunakan perangkat lunak konversi RAW berpemilik yang khusus untuk format RAW. RAW adalah istilah umum untuk sekelompok format berpemilik berdasarkan prinsip yang sama dari rendering warna yang ditangguhkan secara manual; namun belum ada standar).

Oleh karena itu, tahap akuisisi dalam alur kerja RAW jauh lebih sederhana daripada saat menggunakan format file lainnya. Secara umum, satu-satunya pengaturan dalam kamera yang akan memengaruhi data mentah yang diambil adalah ISO speed, yang menentukan ‘sensitivitas’ efektif sensor (atau lebih tepatnya penguatan yang diterapkan pada sinyal sensor), dan kombinasi aperture/shutter speed yang dipilih dari pembacaan eksposur yang dihasilkan. Dalam banyak kasus, data mentah yang ditangkap akan memiliki reproduksi nada linier, yang memungkinkan koreksi gamma selama pemrosesan. Metode ‘mengekspos ke kanan’ dari histogram dapat digunakan untuk memperluas jumlah bit yang dialokasikan ke detail bayangan dalam gambar, yang dikurangi sebagai hasil dari output linier. Di beberapa perangkat, kurva nada non-linier juga dapat diterapkan ke data mentah di titik pengambilan. Meskipun variabel lain seperti kedalaman bit, keseimbangan putih, dan ruang warna mungkin disetel di kamera, semua itu tidak akan memengaruhi hasil, karena merupakan penyesuaian yang diterapkan setelah, atau terkait dengan, demosaicing. Untuk semua format file lainnya, pengaturan ini menentukan proses gambar yang dilakukan oleh perangkat penangkap pengolah sinyal digital (DSP). Dalam kasus file RAW, proses diterapkan selama konversi RAW. Pengaturan kamera akan disertakan dengan data dan mungkin muncul sebagai pengaturan default di perangkat lunak konversi RAW, tetapi dapat diubah oleh pengguna.

Bergantung pada perangkat lunaknya, konversi RAW umumnya mencakup opsi untuk perubahan ukuran terbatas, penyempurnaan pencahayaan dan white balance, dan pengaturan ruang warna akuisisi sebagai minimum. Beberapa versi memungkinkan penyesuaian nada dan warna yang kompleks, misalnya untuk menonjolkan detail bayangan atau sorotan. Ini mungkin dengan menggunakan slider sederhana atau pengeditan yang lebih canggih yang diberikan oleh penyesuaian level atau kurva. Selain itu, penajaman, penghilangan noise, dan koreksi geometrik dapat dilakukan.

Kisaran perangkat lunak konversi RAW yang tersedia dan tingkat serta jenis proses gambar yang berbeda yang tersedia bagi pengguna dapat menjadi masalah, terutama jika beberapa kamera dari produsen berbeda digunakan secara teratur. Karena format RAW adalah hak milik, dan non-standar, pengaturan data, informasi yang disertakan dengannya, dan antarmuka perangkat lunak konversi RAW berbeda-beda di antara produsen. Adobe telah membuat kemajuan dalam menyediakan solusi untuk masalah ini dengan plug-in Camera RAW, yang dapat melakukan konversi RAW menggunakan antarmuka yang sama untuk sebagian besar versi file RAW. Namun, karena ini adalah pendekatan ‘satu ukuran untuk semua’, dalam beberapa kasus hasil yang lebih baik dapat diperoleh dengan menggunakan konverter berpemilik. Selanjutnya, Adobe juga telah mengembangkan format RAW mereka sendiri, Digital Negative (.dng), yang dipromosikan oleh Adobe sebagai format RAW universal dan saat ini dikirimkan untuk standardisasi. Beberapa produsen kamera telah menyertakan dukungan untuk file .dng sebagai opsi dalam kamera digital mereka.

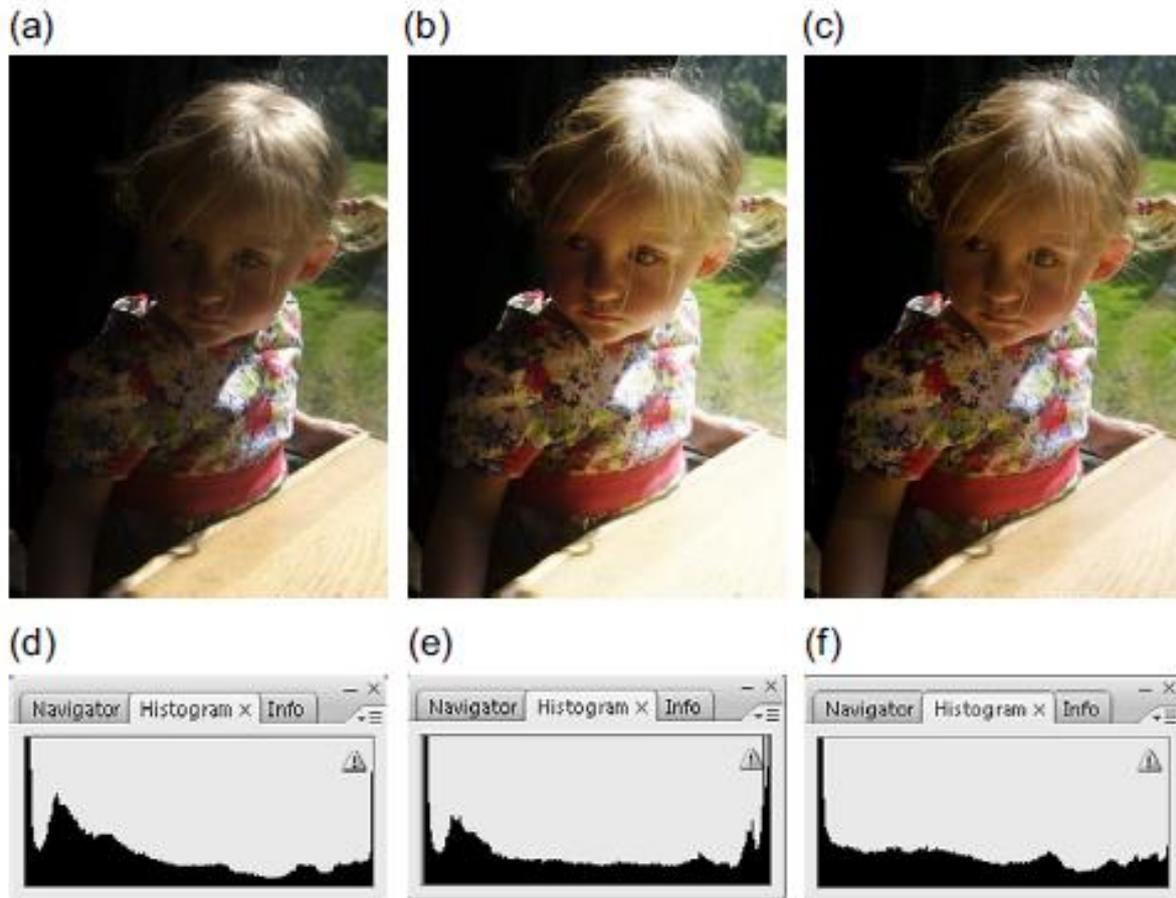


**Gambar 39** Antarmuka RAW Kamera, versi 4.6.

Keuntungan nyata untuk bekerja dengan file RAW adalah tingkat kontrol yang diberikan kepada pengguna. Pemrosesan gambar yang diterapkan secara otomatis oleh perangkat penangkap saat rendering ke deskripsi reproduksi menengah malah dilakukan secara interaktif.

Yang terpenting, pengeditannya tidak merusak. Hasilnya dilihat pada tampilan besar (dan sebaiknya diunggah), sebelum difinalisasi. Interpolasi warna dan proses gambar lainnya hanya diterapkan pada data pada titik di mana gambar disimpan ke format lain dan pengguna cukup melihat pratinjau hasil di layar sebelum ini.

Implikasi dalam hal kualitas gambar paling terlihat saat menerapkan koreksi ke kisaran nada warna. Sebuah gambar disimpan sebagai format lain, daripada rentang tonalnya dan oleh karena itu level eksposurnya akan disetel di seluruh rentang nilai yang ditentukan oleh kedalaman bit dari file gambar. Seperti yang telah dibahas, menerapkan proses gambar seperti koreksi gamma ke kisaran nilai dapat mengakibatkan posterisasi gambar, khususnya dalam gambar 8-bit. Perubahan pada tingkat kecerahan global dan kontras gambar pada dasarnya terbatas - jika tingkat abu-abu dalam gambar menutupi sepenuhnya histogram gambar, maka perubahan ini pada akhirnya dapat mengakibatkan terpotongnya sorotan atau bayangan. Namun, file ARAW, bit penuh kedalaman sensor masih tersedia, artinya kisaran nilai gambar yang diambil dapat disesuaikan dengan hati-hati agar sesuai dengan kisaran ini tanpa pemotongan.



**Gambar 40** Hasil penyesuaian tonal pada gambar yang kurang terang diterapkan ke file JPEG 8-bit dan file RAW yang diambil. (a) Gambar asli. (b) Hasil kontras dan kecerahan disesuaikan dari tangkapan JPEG. (c) Hasil kontras dan kecerahan disesuaikan selama konversi RAW. (d) Histogram asli. (e) Histogram yang disesuaikan JPEG. (f) Histogram yang disesuaikan RAW.

Gambar 40a mengilustrasikan gambar dengan kontras rendah yang sedikit kurang, yang telah ditangkap sebagai file JPEG 8-bit dan file RAW. Penyesuaian tonal untuk mengoreksi eksposur dan kontras harus diterapkan pada file JPEG dalam perangkat lunak penyunting gambar (Gambar 40b); untuk file RAW penyesuaian diterapkan selama konversi RAW (Gambar 40c). Meskipun penyesuaian tonal telah meningkatkan eksposur dan kontras gambar JPEG pada Gambar 40b, ada beberapa pemotongan yang jelas dalam sorotan. Gambar RAW yang disesuaikan pada Gambar 40c mempertahankan lebih banyak detail sorotan, terutama terlihat pada rambut dan juga pada pola di atas meja. Histogram dari ketiga gambar ditampilkan pada Gambar 40def. Histogram terakhir, yaitu dari file RAW yang telah disesuaikan, menampilkan klip yang jauh lebih sedikit daripada histogram dari gambar JPEG yang telah disesuaikan, terutama pada sorotan. Ini juga menampilkan lebih sedikit pangkasan daripada gambar asli yang kurang terang, yang menunjukkan bahwa pencahayaan aktual telah diubah secara efektif, daripada rentang nada yang didistribusikan ulang di antara titik yang sama. Selain itu, ini lebih halus, menunjukkan distribusi nada yang lebih merata.

Menggunakan alur kerja RAW memiliki keuntungan lebih lanjut dalam hal pengarsipan gambar. Sifat non-destruktif konversi RAW dan fakta bahwa gambar yang diproses disimpan

sebagai format baru berarti bahwa file RAW tidak berubah dan dapat diproses ulang berulang kali.

File RAW yang dioptimalkan juga dapat disimpan sebagai file .dng, mempertahankan penyesuaian tetapi memungkinkan pengeditan lebih lanjut. Dengan asumsi bahwa format .dng distandarisasi, ini akan menjadi format yang ideal untuk pengarsipan gambar.

## **Editing gambar**

Pengeditan gambar adalah proses yang berubah-ubah, di mana gambar dapat diproses dengan cara yang agak 'non-linier'. Pengguna dapat menerapkan proses dan kemudian kembali ke status gambar yang diedit sebelumnya, menggabungkan elemen gambar yang diedit, memproses hanya area gambar yang dipilih, atau menyempurnakan sejauh mana proses gambar tertentu mempengaruhi gambar. Berbagai fungsi dalam aplikasi pengeditan modern, seperti palet histori yang 'tidak dapat dibatalkan' dan opsional, penggunaan lapisan, masking gambar, alat seleksi canggih, dan kemampuan untuk mengubah pilihan menjadi jalur vektor, memfasilitasi pendekatan ini untuk pemrosesan gambar.

Format file gambar yang digunakan pada tahap pengeditan paling berguna jika mereka dapat mendukung beberapa atau semua fungsi ini, memungkinkan pengguna untuk menyimpan dan membuka kembali gambar pada tahap tertentu dalam pengeditan dan melanjutkan dari bagian yang ditinggalkannya. Format Adobe Photoshop Document (PSD) dikembangkan untuk tujuan ini dan sebagian besar mendukung fungsi ini. TIFF dan JPEG 2000 mendukung lapisan yang tidak digabungkan. Format PNG tidak mendukung lapisan tetapi memungkinkan alpha channel tambahan dengan transparansi variabel, dari jenis yang digunakan dalam topeang gambar. Semua format ini mampu mendukung 16 bit per piksel atau per saluran.

Selain itu dan yang terpenting, semua format ini menggunakan kompresi lossless (meskipun JPEG 2000 juga secara opsional menggunakan kompresi lossy). Mengedit gambar terkompresi lossy dan kemudian menyimpannya kembali dengan kompresi lossy akan menimbulkan kesalahan lebih lanjut pada gambar; setiap pengeditan dan penyimpanan akan menyebabkan kerusakan lebih lanjut. Oleh karena itu, jika sebuah gambar mungkin memerlukan pengeditan yang rumit menggunakan alat yang dijelaskan di atas, maka gambar tersebut idealnya dikonversi dari format lossy seperti JPEG ke file PSD atau TIFF, sebagai perantara.

## **Output gambar**

Format file untuk keluaran ditentukan oleh persyaratan aplikasi pencitraan tertentu. Jika pengguna mengirim file secara langsung ke perangkat output maka biasanya file tersebut dioptimalkan, dan pertimbangan yang sama, yang dijelaskan di bagian sebelumnya tentang akuisisi gambar, berlaku. Jika gambar untuk Internet, maka menyimpannya sebagai file JPEG dalam ruang warna sRGB adalah solusi umum, menyediakan ukuran file kecil dan reproduksi warna yang optimal di layar. Gambar yang akan dikirim ke printer desktop umumnya harus berupa file JPEG berkualitas tinggi atau file TIFF, meskipun file PSD mungkin sudah dicetak ulang. Umumnya file RAW memerlukan konversi ke format lain sebelum pencetakan proof.

Ketika file sedang dikirimkan untuk reproduksi di tempat lain, format yang diperlukan biasanya akan ditentukan. Untuk aplikasi pencitraan seperti jurnalisme foto, JPEG berkualitas tinggi dengan profil warna ICC yang sesuai seringkali memadai untuk web dan keluaran cetakan. Metadata International Press Telecommunications Council (IPTC) yang mendeskripsikan sumber gambar, detail fotografer, hak cipta, captioning, dan kata kunci idealnya harus

dimasukkan ke dalam file, untuk memastikan bahwa semua informasi yang diperlukan dikirimkan bersama gambar tersebut.

Dalam alur kerja yang menghasilkan media cetak berkualitas lebih tinggi, gambar mungkin dihasilkan sebagai TIFF yang dioptimalkan atau JPEG berkualitas tinggi. Sebagai alternatif, file RAW berpemilik dapat dikirimkan, memungkinkan klien untuk melakukan pengoptimalan sendiri, meskipun ini jauh lebih jarang dan berarti bahwa fotografer tidak memiliki pengaruh nyata atas bagaimana gambar diproses. Opsi yang lebih baik mungkin mengirimkan file DNG yang telah disesuaikan, memungkinkan klien untuk melihat versi fotografer yang dioptimalkan, tetapi dengan opsi untuk mengeditnya sendiri.

## **Pengarsipan gambar**

Jika menangkap file RAW, masuk akal untuk mengarsipkan file RAW asli sebelum pemrosesan apa pun. Ini memfasilitasi kemungkinan pengoptimalan gambar beberapa kali untuk berbagai jenis keluaran dan berarti bahwa salinan master akan selalu disimpan. Idealnya, file yang disesuaikan juga harus diarsipkan. Format untuk ini akan bergantung pada alur kerja, tetapi menggunakan format yang mendukung lapisan berarti bahwa penyesuaian gambar dapat diubah di masa mendatang, karena gambar tidak akan diselesaikan hingga lapisan digabungkan atau diratakan. Akhirnya, jika gambar sedang disiapkan untuk keluaran tertentu, maka praktik yang baik adalah mengarsipkan salinan dari file yang telah diselesaikan, jika ada masalah dengan transmisi file, atau klien kehilangan file dan meminta salinan. Format file dalam hal ini akan bergantung pada keluaran dan mungkin termasuk kompresi lossy.

File master RGB adalah file yang dioptimalkan dengan gamut luas ruang warna RGB yang disimpan pada resolusi asli sensor, tidak dipertajam dan disimpan sebagai file PSD atau TIFF. Ini menunjukkan versi kualitas tertinggi dari gambar setelah dioptimalkan dan diselesaikan. Mengarsipkan file master RGB dengan file RAW berarti bahwa file berkualitas tinggi dan dioptimalkan dapat digunakan berulang kali, misalnya untuk keluaran yang berbeda, tanpa harus melalui prosedur konversi RAW. Untuk keluaran berkualitas sangat tinggi, seperti yang diperlukan dalam periklanan kelas atas, file master RGB dapat digunakan untuk menyiapkan beberapa versi gambar untuk klien, masing-masing untuk keluaran yang berbeda.

## **Optimisasi alur kerja gambar**

Produksi gambar yang dioptimalkan melibatkan penerapan sejumlah penyesuaian gambar, yang diperlukan untuk mengimbangi karakteristik sensor dan kondisi pengambilan. Pengoptimalan mungkin melibatkan pemotongan dan pengubahan ukuran, koreksi nada dan warna, penghilangan derau dan debu, dan penajaman dalam jumlah terbatas. Koreksi dapat diterapkan secara global, tetapi seringkali ada kebutuhan untuk beberapa penyesuaian lokal juga. Penyesuaian global diterapkan pertama kali, yang mungkin meniadakan kebutuhan untuk penyempurnaan lebih lanjut pada area gambar tertentu.

Alur kerja bervolume tinggi dan berkualitas lebih rendah akan lebih cepat dan lebih efisien jika beberapa penyesuaian dapat diotomatiskan saat pengambilan gambar. Contohnya termasuk penerapan kurva nada kustom yang dioptimalkan untuk keluaran pada perangkat yang diambil, atau penerapan penajaman kamera dan peredam bising. Dalam contoh di mana gambar JPEG ditangkap pada resolusi asli sensor, penyesuaian global minimal pada nada dan warna mungkin cukup untuk banyak gambar. Proses lain seperti pengubahan ukuran, koreksi geometrik dan penghilangan dan penajaman noise lokal lebih lanjut mungkin diperlukan, tetapi dapat diterapkan pada basis gambar demi gambar dalam aplikasi pengeditan gambar.

Untuk alur kerja kelas atas, mungkin diperlukan lebih banyak penyesuaian gambar untuk mengoptimalkan kualitas gambar akhir. Hal mendasar dalam menentukan urutan penyesuaian gambar dilakukan adalah format file dan jenis perangkat lunak yang digunakan. Jika file RAW sedang ditangkap, kualitas yang lebih tinggi akan dipertahankan dengan melakukan penyesuaian global pada white balance, reproduksi nada dan warna dalam perangkat lunak pemrosesan RAW. Penajaman global dan penghilangan noise juga dapat diterapkan pada saat ini. Ini sejalan dengan proses dalam kamera yang disebutkan di atas. Setelah koreksi mendasar ini diterapkan, gambar dapat disimpan dan dibuka dalam aplikasi pengeditan gambar untuk diproses lebih lanjut.

Jika konversi RAW bukan bagian dari pipeline pemrosesan, sebagian besar penyesuaian akan dilakukan dalam satu aplikasi pengeditan. Ada pengecualian untuk ini, seperti penggunaan perangkat lunak pihak ketiga dan plugin yang dikembangkan untuk melakukan proses pengeditan gambar tertentu. Contohnya termasuk aplikasi yang dikembangkan secara khusus untuk mengubah ukuran, menghilangkan noise atau penajaman gambar, yang menggunakan algoritme adaptif yang lebih canggih daripada yang biasanya tersedia dalam aplikasi pengeditan gambar.

Ketika semua penyempurnaan gambar dilakukan dalam aplikasi pengeditan, operasi geometris seperti rotasi, koreksi perspektif, dan pemotongan harus dilakukan di awal proses penyesuaian. Memangkas area gambar yang tidak diinginkan sangatlah penting, karena piksel ekstra berlebihan jika tidak akan disertakan dalam histogram gambar dan dapat mempengaruhi koreksi nada dan warna menggunakan level dan kurva. Adalah logis untuk melakukan penyesuaian nada dan warna global sebagai langkah berikutnya. Penyesuaian level pada saluran warna individual dapat meningkatkan reproduksi nada, meningkatkan kontras secara keseluruhan, dan mengoreksi warna netral. Penyesuaian kurva memiliki keuntungan tambahan untuk mengubah satu bagian dari rentang nada (atau rentang warna, jika diterapkan ke saluran terpisah) tanpa mengubah area lain secara signifikan, tetapi ini membutuhkan beberapa keterampilan untuk detail lebih lanjut tentang jenis proses spasial ini). Kedua jenis penyesuaian ini paling baik diterapkan sebagai lapisan penyesuaian daripada langsung ke nilai gambar. Mengedit dengan cara yang tidak merusak ini memungkinkan hasil menjadi lebih baik dan membantu meminimalkan pemotongan, garis warna dan posterisasi.

Penghilangan dan penajaman noise dapat diterapkan pada berbagai tahap dalam imaging chain. Penting untuk diperhatikan bahwa penerapan satu operasi mungkin memerlukan operasi lainnya, karena penajaman global dapat meningkatkan noise dan penghilangan bising dapat mengakibatkan pelunakan tepi yang tidak diinginkan. Dalam kondisi pengambilan tertentu, seperti mereka yang menggunakan pengaturan ISO speed tinggi, atau eksposur tingkat cahaya rendah yang lama, penghilangan noise akan diperlukan dan mungkin paling baik dilakukan di perangkat pengambilan atau prosesor RAW.

Penajaman dapat diterapkan pada beberapa tahap berbeda. Meskipun dalam teori penajaman tidak boleh diterapkan sampai tahap akhir, karena kemungkinan peningkatan noise, dalam praktiknya seringkali berguna untuk mempertajam lebih awal dalam imaging chain untuk memastikan bahwa kualitas gambar memuaskan untuk persyaratan alur kerja. Penajaman pengambilan dapat dilakukan di dalam kamera atau di perangkat lunak scanner untuk mengimbangi proses digitalisasi, atau sebagai alternatif selama konversi RAW. Penajaman juga dapat dilakukan jika gambar sedang diedit, sebagai tahap pemrosesan akhir untuk mengkompensasi keburaman yang disebabkan oleh proses lain seperti pengubahan ukuran. Terakhir, gambar juga dapat dipertajam untuk keluaran tertentu. Apakah penajaman diterapkan

hanya pada satu atau semua tahapan yang berbeda akan bergantung pada alur kerja dan keluaran.

Hal ini penting untuk tidak terlalu mempertajam, karena ini akan menghasilkan artefak 'halo' yang jelas. Hasil yang lebih baik dapat dicapai dengan menggunakan algoritme adaptif, atau hanya dengan menerapkan penajaman pencahayaan. Hasil dapat diselesaikan dengan mengaplikasikan penajaman menggunakan layer. Selain itu, jika file penajaman sedang diasah, maka penajaman ketiga harus disimpan pada lapisan terpisah, sehingga derajat dan metode penajaman dapat diubah untuk keluaran yang berbeda.

## **Contoh alur kerja**

Setelah membahas berbagai aspek alur kerja gambar, kami menyelesaikan ini dengan beberapa studi kasus yang menggambarkan alur kerja umum yang saat ini digunakan untuk berbagai jenis pencitraan. Ini adalah contoh asli, berdasarkan informasi yang diberikan oleh tiga fotografer berbeda.

### **1. Fotografi Komersial**

Gambar yang dihasilkan dalam contoh ini mencakup berbagai jenis fotografi komersial kelas atas, seperti potret wajah, mode, dan karya arsitektur. Tujuan penting dari alur kerja ini adalah perolehan dan pemeliharaan kualitas dan fleksibilitas gambar yang optimal, di mana media keluaran tidak ditentukan, atau di mana beberapa gambar keluaran diperlukan pada jenis media yang berbeda (dengan kualitas yang berbeda).

#### **a) Akuisisi**

Gambar diambil pada resolusi asli sensor (mis. 29 megapiksel), menggunakan punggung digital format sedang. Kamera dikendalikan menggunakan perangkat lunak penangkap jarak jauh dan laptop. Pengambilan RAW adalah satu-satunya pilihan dan, dalam hal ini, data gambar yang mengacu pada pemandangan adalah keluaran, untuk diubah ke keadaan gambar yang mengacu pada keluaran menggunakan profil kamera tertanam. Berbagai macam profil untuk sensor dalam kondisi iluminasi yang berbeda disediakan. Menggunakan profil kamera memberikan gamut yang jauh lebih besar daripada ruang kerja RGB standar yang biasanya tersedia pada konversi RAW. Gambar diambil pada kedalaman sensor 16-bit penuh.

#### **b) Pengolahan Gambar**

Mayoritas penyesuaian gambar diterapkan selama konversi RAW, menggunakan aplikasi manajemen alur kerja seperti Adobe Lightroom. Ini termasuk pemotongan, koreksi nada dan warna, semua dilakukan dalam ruang warna sensor. Jika gambar langsung disiapkan untuk hasil cetakan, maka akan dipertajam pada tahap terakhir.

Jika gambar memerlukan lebih banyak penyesuaian lokal, atau akan digabungkan dengan gambar lain, itu disimpan sebagai file PSD dan diimpor ke Adobe Photoshop. Dalam kasus ini, penajaman tidak dilakukan selama konversi RAW, tetapi diterapkan dengan menggunakan unsharp mask sebagai tahap pengeditan terakhir di Photoshop.

Kualitas gambar dipertahankan dengan menghindari proses resampling jika memungkinkan, menerapkan sebagian besar penyesuaian gambar dengan cara yang tidak merusak (sampai file selesai), baik selama konversi RAW atau menggunakan lapisan di Photoshop dan bekerja pada 16 bit dalam gamut besar ruang warna sensor sampai tahap keluaran.

### **c) Output dan pengarsipan**

Mengikuti penyesuaian yang diterapkan selama konversi RAW, file RAW yang dioptimalkan diarsipkan (perhatikan bahwa penyesuaian tersebut masih tidak merusak pada tahap ini dan hanya menggambarkan maksud pengeditan dari fotografer). Jika gambar diedit lebih lanjut di Photoshop, maka copy pekerjaan dalam format PSD, dengan lapisan penyesuaian masih utuh, juga akan diarsipkan.

Tahap akhir dalam mempersiapkan file keluaran untuk dicetak melibatkan konversi ruang warna ke Adobe RGB 98, memperbesar ukuran jika cetakan besar diperlukan dan konversi ke file TIFF 8-bit. Gambar untuk keluaran Internet diubah menjadi sRGB, diperkecil dan disimpan sebagai file JPEG 8-bit.

## **2. Penggambaran Forensik**

Area pencitraan forensik yang luas berkaitan dengan penangkapan dan penyajian gambar bukti, dijelaskan oleh Cabang Pengembangan Ilmiah Kantor Pusat (HOSDB UK): ‘Bukti, dalam hal gambar diam atau cuplikan video, adalah presentasi fakta visual tentang kejahatan atau individu yang diajukan oleh penuntut ke pengadilan untuk mendukung kasus mereka. ‘Gambar tersebut memerlukan jejak audit, yang dapat berupa tulisan, elektronik atau keduanya, yang menjelaskan sumber gambar dan kondisi pengambilan gambar. Jejak audit juga mencakup detail dari setiap pemrosesan gambar yang dilakukan, untuk membuktikan keaslian gambar.

Contoh ini berkaitan dengan pengambilan gambar sidik jari. Detail halus yang terkandung dalam sidik jari membutuhkan gambar berkualitas tinggi dan resolusi tinggi untuk analisis atau perbandingan. Standar internasional untuk pengambilan sidik jari, berdasarkan pedoman HOSDB UK (lihat Bibliografi), menetapkan bahwa gambar keluaran harus pada perbesaran sebesar aslinya dengan resolusi 500 ppi.

### **a) Akuisisi**

Gambar diambil pada resolusi asli sensor menggunakan kamera refleks lensa tunggal (SLR) digital. Mereka paling sering ditangkap sebagai file TIFF (sebagai format non-kepemilikan), meskipun praktik kerjanya bervariasi. Dalam beberapa kasus, file RAW berpemilik dapat ditangkap sebagai gantinya. Ruang warna pengambilan diatur ke sRGB, baik dalam pengaturan kamera atau selama konversi RAW. Umumnya penajaman gambar (jika opsi dalam kamera) dimatikan pada tahap pengambilan. ISO speed rendah disarankan untuk meminimalkan noise, meskipun beberapa gambar mungkin diambil dalam level cahaya rendah. Penghapusan noise dapat dilakukan dengan menyaring, atau dengan membuat rata-rata beberapa gambar dari subjek yang sama.

### **b) Pengolahan Gambar**

Tahap ini bervariasi tergantung pada bagaimana gambar akan digunakan, pedoman agen lokal dan jumlah pemrosesan yang diterapkan pada pengambilan gambar dalam pengaturan kamera. Minimal, koreksi tonal diterapkan menggunakan level dan kurva. Penyempurnaan awal untuk nada dan warna dapat diterapkan ke file RAW di perangkat lunak konversi RAW. Gambar disimpan sebagai TIFF, disalin dan salinan dibuka di aplikasi lain untuk diproses lebih lanjut. Setelah penyesuaian awal, gambar TIFF diubah dari RGB menjadi gambar skala abu-abu 8-bit (menggunakan ‘pencampur saluran ‘ untuk menyempurnakan konversi, bukan perubahan mode sederhana), sesuai dengan pedoman standar. Pemrosesan selanjutnya mungkin termasuk

pengurangan noise, dan penghapusan pola latar belakang, diikuti dengan peningkatan lokal ke area gambar yang dipilih. Gambar mungkin perlu diubah ukurannya agar sesuai dengan pedoman resolusi output. Ini biasanya dilakukan di ujung pipa pemrosesan untuk meminimalkan kehilangan kualitas dan dapat diikuti dengan penajaman atau pengaburan, tergantung pada gambar dan cara penggunaannya. Akhirnya, gambar disimpan sebagai ‘copy pekerjaan’ TIFF.

### **c) Output dan pengarsipan**

Gambar dapat di-output ke printer kelas atas seperti Fuji Pictography, atau mungkin disimpan ke database gambar untuk analisis lebih lanjut, mungkin sebagai file JPEG. File TIFF yang dioptimalkan, setelah penyesuaian awal, diarsipkan. Salinan pekerjaan keluaran juga dapat diarsipkan.

## **3. Penggambaran Medikal**

Contoh ini didasarkan pada praktik kerja untuk fotografer klinis di rumah sakit Inggris. Penekanan dalam alur kerja ini adalah pada kebutuhan akan kecepatan dalam pemrosesan dan pengiriman, dengan beberapa pengorbanan dalam kualitas, karena gambar dengan resolusi yang relatif rendah diperlukan pada keluaran. Jenis dan penggunaan gambar dapat bervariasi, tetapi secara umum sebagian besar gambar akan dikeluarkan sebagai cetakan berukuran 6x4 inci, untuk ditambahkan ke catatan pasien, atau untuk disimpan dalam database elektronik, dan dilihat di layar.

### **a) Akuisisi**

Perbesaran yang diperlukan bervariasi dan akan ditentukan untuk setiap departemen klinis. Gambar diambil pada resolusi asli sensor menggunakan SLR digital. Praktik saat ini bergerak menuju penggunaan sensor full-frame dan pengambilan RAW, meskipun pada saat penulisan ini masih cukup umum untuk menggunakan sensor yang lebih kecil dalam SLR semi-profesional dan menangkap JPEG berkualitas tinggi. Idealnya, white balance dilakukan dengan pengukuran dari kartu abu-abu. Gambar diambil ke dalam ruang warna sRGB. Jika rekomendasi untuk menangkap file RAW menjadi praktik standar, maka kemungkinan ruang warna gamut yang lebih luas dapat ditentukan selama konversi RAW untuk pengeditan gambar.

### **b) Pengolahan gambar**

Gambar yang diambil JPEG diarsipkan saat pengambilan sebelum penyesuaian apa pun diterapkan. Jika file tersebut hanya diperkecil untuk keluaran, file tersebut mungkin tetap sebagai file JPEG, tetapi jika pengeditan lebih lanjut diperlukan, file tersebut akan diubah ke format lossless seperti PSD atau TIFF. Penyesuaian mungkin termasuk koreksi warna dan nada global, penghilangan debu dan koreksi warna lokal. Gambar kemudian diubah ukurannya, dipertajam jika untuk hasil cetak dan disimpan kembali sebagai JPEG.

### **c) Output dan Pengarsipan**

File RAW awalnya diubah namanya menggunakan pengenal pasien yang unik dan kemudian disimpan kembali sebagai file RAW. Setelah ini, konversi RAW biasanya dilakukan dalam konverter RAW generik (seperti Camera RAW). Sebagian besar penyesuaian gambar dilakukan dalam aplikasi ini, karena sifat proses pengeditan yang tidak merusak, dengan Adobe Photoshop hanya digunakan untuk penyesuaian yang dipilih secara lokal. Sekali lagi, gambar diubah ukurannya pada tahap terakhir. Jika akan dibuka lagi untuk diedit, file tersebut dapat disimpan sebagai TIFF, tetapi secara umum file keluaran adalah JPEG berkualitas tinggi

# Reproduksi Warna Digital

## Pengantar

Ada banyak buku dan referensi yang sepenuhnya didedikasikan untuk pencitraan dan reproduksi warna digital; tidak mungkin untuk mencakup semua aspek subjek hanya dalam satu bab. terakhir membahas terminologi warna, model penglihatan warna, dasar-dasar kolorimetri dan pemodelan tampilan warna, serta tujuan reproduksi warna dan instrumen yang digunakan untuk pengukuran warna.

Reproduksi warna dalam sistem gambar digital adalah operasi yang kompleks. Pemahamannya bergantung pada pengetahuan tentang prinsip-prinsip yang mendasari fenomena fisik dan psikofisik yang terkait dengan persepsi warna, dan pengukuran dan definisi warna, serta pengetahuan tentang prinsip-prinsip fisik, kemampuan dan keterbatasan sistem perekaman, penyimpanan, transmisi, dan keluaran gambar.

Mari pertimbangkan ‘adegan warna ‘ sebagai distribusi spektral yang bervariasi secara spasial. Ketika pemandangan dicitrakan oleh perangkat akuisisi digital diam, gambar warna digital yang dihasilkan dibuat dari distribusi sampel spasial dan spektral yang telah diintegrasikan melalui sejumlah pita spektral dan selama interval waktu. Setiap integral pembobotan spektral digital sesuai dengan saluran warna dalam gambar digital:

Ekuasi 41

$$f(i, j, t, \lambda) \rightarrow f_n^l(x, y)$$

di mana  $f$  adalah distribusi spektral dari bidang fokus dua dimensi dalam pemandangan, pada lokasi spasial  $(i, j)$  dan interval waktu  $t$ , dan  $\lambda$  adalah panjang gelombang;  $f_n^l$  adalah intensitas yang dikodekan dari saluran ke- $n$  pada gambar di lokasi diskrit yang sesuai  $(x, y)$ . Jumlah pita spektrum di mana pemandangan diintegrasikan sesuai dengan jumlah saluran warna dan dengan demikian jumlah intensitas yang dikodekan yang sama (yaitu nilai piksel) digunakan untuk menggambarkan warna di lokasi gambar  $x, y$ .

Reproduksi gambar digital dari perangkat pencitraan keluaran pada dasarnya adalah rendering fisik dari intensitas yang dikodekan untuk menghasilkan ‘gambar berwarna’. Gambar yang dikodekan kemudian diubah kembali ke distribusi spektral yang bervariasi secara spasial: distribusi pancaran spektral/pencahayaan dalam gambar yang ditampilkan, atau distribusi pantulan spektral dalam gambar yang dicetak.

Intensitas gambar yang dikodekan mewakili koordinat warna gambar dalam ruang warna di mana warna dikodekan. Bagian awal dalam bagian ini berkaitan dengan definisi dan spesifikasi ruang warna digital dan akan memperkenalkan pengkodean ruang warna berbeda yang telah diusulkan, atau distandarisasi oleh berbagai organisasi standar untuk mengkomunikasikan gambar berwarna digital dengan cara yang konsisten dan tidak ambigu. Transformasi gambar dari satu ruang dan pengkodean ke yang lain membutuhkan pengetahuan tentang karakteristik ruang warna - misalnya, ruang warna primer, titik putih, fungsi transfer - serta spesifikasi metode dan jangkauan pengkodean. Jika ruang warna bergantung pada perangkat (yaitu ditentukan oleh karakteristik perangkat pencitraan tertentu), maka karakterisasi perangkat diperlukan untuk mengungkapkan karakteristik tersebut, yaitu, untuk menghubungkan koordinat warna yang bergantung perangkat dengan koordinat ruang warna CIE dan untuk

lebih mencapai transformasi seperti itu. Oleh karena itu, beberapa bagian dari pembahasan ini akan membahas karakterisasi perangkat dari sistem pengambilan, tampilan dan pencetakan.

Rentang warna yang dapat direproduksi oleh perangkat dan/atau media tertentu, atau dicakup oleh ruang warna tertentu, atau ditempati oleh pemandangan atau gambar tertentu, disebut sebagai nada warna perangkat, ruang, adegan atau gambar. Nada warna bervariasi antara sistem dan media dan sangat dipengaruhi oleh kondisi tampilan, yaitu iluminasi, sekeliling, dan latar belakang. Misalnya, tampilan beberapa warna cerah yang ditampilkan pada monitor komputer di lingkungan yang gelap tidak dapat direplikasi dalam majalah cetak yang dilihat di ruangan dengan pencahayaan redup di rumah, karena gamut media dalam kondisi tampilan ini sangat berbeda. Ketidakcocokan gamut seperti itu sangat umum dan tidak dapat dihindari dalam alur kerja gambar. Mereka ditangani dengan menggunakan teknik pemetaan gamut, yang mengubah koordinat warna gambar asli menjadi yang dapat direproduksi oleh media tertentu. Bagian terakhir dari pembahasan ini akan memperkenalkan prinsip di balik beberapa teknik pemetaan gamut yang umum.

## Colour Space dan pengkodean warna

Kita mendefinisikan ruang warna sebagai model geometris berdimensi- $n$ , di mana warna ditentukan oleh koordinat vektornya (yaitu koordinat warna). Koordinat ini menjelaskan posisi warna di dalam ruang warna tertentu saja. Menurut CIE, tiga dimensi sudah cukup untuk menggambarkan warna; jadi kebanyakan ruang warna adalah tiga dimensi. Contoh ruang warna termasuk ruang CIEXYZ, CIELAB dan CIELUV, dan ruang RGB kontinu (yaitu tidak terkuantisasi) dengan kumpulan primer aditif red, green, dan blue tertentu. Dalam aplikasi gambar digital, spesifikasi ruang warna memberikan informasi tentang representasi geometrisnya, yaitu 'volume' dan 'bentuk' ruang. Namun, ini tidak menentukan bagaimana koordinat warna digital (nilai piksel) dapat diinterpretasikan. Untuk alasan ini, ruang warna perlu dienkode.

Pengkodean ruang warna adalah pengkodean digital dari ruang warna. Spesifikasi pengkodean ruang warna mencakup informasi tentang metode pengkodean digital dan kisaran pengkodean yang tercakup dalam ruang. Metode pengkodean digital menentukan hubungan antara nilai ruang warna kontinu dan nilai pengkodean (piksel digital) yang sesuai. Dalam kebanyakan kasus, nilai pengkodean digital secara linier terkait dengan koordinat ruang warna kontinu dan merupakan nilai integer meskipun metode pengkodean non-linier dan/atau pengkodean digital floating-point digunakan dalam beberapa aplikasi. Rentang pengkodean pada dasarnya adalah kisaran nilai kode digital yang tersedia dan berhubungan langsung dengan karakteristik kedalaman bit. Oleh karena itu untuk pengkodean 8-bit kisaran pengkodeannya adalah 0-255, untuk pengkodean 12-bit adalah 0-4095 dan untuk pengkodean 16-bit adalah 0-65,535. Penting untuk diperhatikan bahwa beberapa pengkodean untuk satu ruang warna dapat ditentukan. Ruang warna RGB tambahan tertentu, seperti ruang warna sRGB, yang akan dibahas nanti, mungkin memiliki pengkodean ruang warna yang berbeda, misalnya, sRGB 8-bit dan sRGB yang diperluas 10-bit (e-sRGB).

Terakhir, pengkodean gambar berwarna adalah pengkodean nilai warna untuk gambar digital. Ini termasuk spesifikasi pengkodean ruang warna, yaitu pengkodean ruang warna dan ruang warna di mana gambar diwakili, bersama dengan informasi lebih lanjut untuk menafsirkan nilai piksel, seperti lingkungan display image referensi dan media pencitraan referensi. Pengkodean gambar beberapa warna dapat dikaitkan dengan satu pengkodean ruang warna. Menurut standar terkait ISO 220281: 2004 '*penting bahwa warna ditentukan oleh pengkodean gambar warna lengkap, daripada hanya menentukan pengkodean ruang warna*'. Standar menentukan

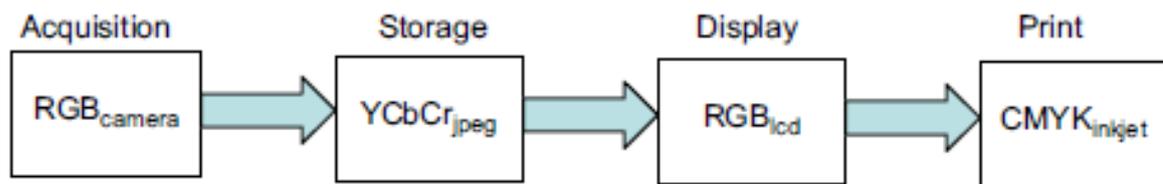
apa yang harus disertakan dalam definisi pengkodean gambar berwarna untuk mencapai representasi gambar berwarna yang tidak ambigu. Pembaca harus merujuknya untuk informasi lebih lanjut.

Pada bagian berikut kita akan membahas berbagai jenis ruang warna digital, memperkenalkan karakteristik beberapa ruang warna dan pengkodean ruang warna yang telah distandarisasi dari berbagai organisasi (misalnya ruang warna standar) untuk membantu komunikasi informasi warna melalui imaging chain.

## Klasifikasi Colour Space

Ada beragam ruang warna yang digunakan dalam gambar digital, karena ruang yang berbeda cocok untuk aplikasi yang berbeda. Gambar 41 mengilustrasikan contoh imaging chain, di mana berbagai komponen pencitraan terkait dengan ruang warna yang berbeda. Ada beberapa cara untuk mengklasifikasikannya.

Klasifikasi pertama berkaitan dengan sifat intrinsik dari ruang warna; khususnya apakah ruang warna didasarkan pada campuran aditif atau subtraktif dari pendahuluan terkait, atau berasal dari ruang warna aditif atau subtraktif. Menurut klasifikasi ini kita dapat mengelompokkan ruang warna sebagai berikut.



Gambar 41 Imaging chain tipikal dan ruang warna terkait.

### RGB (Red, green, Blue)

Ini adalah ruang berbasis aditif dan berhubungan langsung dengan teori trikromatik, yaitu pencampuran tiga primer untuk mendapatkan semua kemungkinan warna. Ruang RGB sangat umum karena digunakan oleh perangkat penangkap digital, seperti kamera dan scanner digital, dan layar lunak, seperti layar tabung sinar katoda (CRT) dan layar kristal cair (LCD). RGB primer dari ruang tersebut didasarkan pada perangkat input atau output nyata atau hipotetis. Ruang warna RGB secara non-linier terkait dengan persepsi visual (non-seragam), yang berarti bahwa langkah yang sama dalam ruang warna tidak dianggap sama oleh sistem visual manusia (HVS).

### CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Black)

Ini adalah ruang warna berbasis subtraktif; mereka terutama digunakan dalam pencetakan dan keluaran hard copy. Mereka menggunakan tiga primer subtraktif, CMY (pewarna pada saturasi penuh), untuk membuat semua kemungkinan warna dengan menyerap (mengurangi) berbagai panjang gelombang. Komponen keempat, hitam, disertakan untuk meningkatkan kisaran kerapatan dan kontras gambar, serta colour gamut yang tersedia. Transformasi antara nilai warna CMY (K) dan RGB sangat kompleks. Ini paling sering dilakukan melalui ruang perantara, yaitu ruang warna CIE. Ruang CMY (K) juga berhubungan non-linier dengan persepsi visual

## **HSL (Hue, Saturation, Lightness) dan yang serupa**

Terdapat berbagai ruang warna yang termasuk dalam kategori ini, seperti HSL (L berarti ringan), HSI (I berarti intensitas) dan HSV (V berarti nilai), dan lain-lain. Sebagian besar adalah transformasi linier dari ruang RGB dan dengan demikian non-linier sehubungan dengan penglihatan manusia. Mereka terutama digunakan dalam grafik komputer dan aplikasi pemrosesan gambar karena satu keuntungan utama: mereka memisahkan tiga atribut persepsi warna, yaitu hue, saturation dan lightness, sehingga masing-masing dapat diperlakukan secara individual.

## **YCC (Luminance, Chrominance 1, Chrominance 2) dan yang serupa**

Ada berbagai ruang warna yang termasuk dalam kategori ini, seperti: Foto YCC, digunakan dalam format file PhotoCD Kodak (sekarang usang); *YCbCr*, yang merupakan standar digital yang digunakan dalam skema kompresi JPEG; dan YIQ dan YUV, yang merupakan ruang berbasis analog untuk NTSC dan PAL TV. Mereka adalah transformasi linier dari ruang RGB dan non-linier dengan penglihatan manusia. Ruang seperti itu memisahkan luminansi (Y) dari komponen chrominance ( $C_1$ ,  $C_2$ ) dan banyak digunakan dalam transmisi gambar di mana kompresi penting, yaitu memungkinkan kompresi saluran pencahayaan diperlakukan secara terpisah dari saluran chrominance. Saluran chrominance biasanya lebih dikompresi karena ini lebih dapat ditoleransi oleh HVS daripada kompresi saluran pencahayaan.

## **CIE Colour Space**

Kami memperkenalkan sistem CIEXYZ, yang dalam konteks ini dapat dianggap sebagai ruang warna. Ini secara linier terkait dengan satu set tertentu dari RGB primer dan didasarkan pada 'pengamat kolorimetri standar'. Ruang CIEXYZ adalah non-linier tetapi menentukan warna dengan serangkaian koordinat yang berarti bagi HVS.

Dua ruang kolorimetri CIE lainnya, CIELAB dan CIELUV, digunakan dalam pencitraan warna, dengan CIELAB yang lebih umum digunakan sejauh ini. Kedua ruang tersebut merupakan transformasi non-linier dari sistem CIEXYZ dan hampir linier dengan persepsi manusia. Fitur terakhir adalah aset, karena koordinatnya menggambarkan warna dengan cara perseptual asalkan titik putihnya diketahui.

Terakhir, ruang tampilan warna CIE, seperti CIECAM97 dan CIECAM02, menentukan warna menggunakan koordinat tampilan. Nilai warna gambar untuk lightness, chroma dan hue, misalnya (J, c dan h masing-masing), berhubungan langsung dengan tampilan visual gambar. Mereka berasal dari ruang kolorimetrik tetapi memperhitungkan parameter tambahan yang berkaitan dengan lingkungan tampilan seperti iluminasi surround dan latar belakang.

Ruang warna CIE tidak digunakan oleh perangkat gambar digital apa pun, tetapi sebagai ruang perantara yang menghubungkan ruang warna digital yang bergantung pada perangkat (lihat di bawah). Mereka juga digunakan untuk definisi koordinat gambar dengan cara yang bermakna secara visual dan tidak bergantung perangkat. Mereka digunakan dalam alur kerja manajemen warna.

Klasifikasi kedua berkaitan dengan apakah ruang warna terkait dengan spesifikasi CIE. Menurut klasifikasi ini, ruang warna digital dapat dikelompokkan sebagai berikut.

## Colorimetric colour space

Ada hubungan tertentu antara koordinat ruang warna dari ruang-ruang ini dan nilai kolorimetrik CIE masing-masing dan karenanya dianggap tidak bergantung perangkat. Transformasi yang diketahui memungkinkan konversi koordinat warna perangkat ke dan dari ruang CIE kolorimetri. Ruang warna kolorimetri CIE standar, seperti CIEXYZ atau CIELAB, termasuk dalam kategori ini. Ruang warna selain ruang CIE juga dapat diklasifikasikan sebagai kolorimetri, seperti RGB aditif atau ruang warna luminance-chrominance, asalkan hubungannya dengan kolorimetri CIE ditentukan. Informasi yang diperlukan untuk mendefinisikan ruang kolorimetrik adalah:

- Ruang warna CIE:
  - nama ruang warna (misalnya CIEXYZ);
  - titik putih (misalnya D65).
- Ruang warna RGB:
  - chromaticities dari RGB primer;
  - titik putih;
  - fungsi transfer.
- Ruang warna Luminance-chroma:
  - informasi yang relevan tentang ruang warna aditif dari mana asalnya;
  - matriks transformasi yang menghubungkan YC1C2 dengan koordinat RGB.

## Colour appearance space

warna menggunakan koordinat tampilan, sekali lagi dengan cara yang tidak tergantung perangkat. Definisi ruang tampilan warna mencakup spesifikasi model tampilan warna tertentu yang menjadi dasar ruang warna, bersama dengan koordinat warna data gambar.

## Colour space yang tergantung pada perangkat/device

Sebagian besar perangkat pencitraan menghasilkan warna dengan cara yang bergantung pada perangkat, karena keluarannya terkait dengan perangkat primer individu, serta parameter khusus perangkat lainnya. Oleh karena itu, ruang warna yang bergantung pada perangkat terkait dengan karakteristik perangkat pencitraan yang nyata atau ideal dan tidak memiliki hubungan yang ditentukan dengan kolorimetri CIE. Ini berarti bahwa transformasi antara koordinat warna ruang dan ruang CIE tidak ditentukan. Beberapa ruang warna yang bergantung pada perangkat dapat dikarakterisasi, yaitu pengukuran dapat digunakan untuk mendefinisikan (atau mengkarakterisasi) hubungannya dengan kolorimetri CIE. Dalam kasus seperti itu, mereka dapat dianggap sebagai *ruang warna kolorimetrik*.

Ada dua kelas utama ruang warna yang bergantung pada perangkat. Ruang warna yang bergantung pada perangkat input (atau sensor) adalah ruang warna RGB khusus perangkat yang terpasang ke perangkat penangkap dan kondisi pengambilan. Mereka dapat ditentukan oleh:

- sensitivitas spektral kamera/scanner (lihat nanti);
- fungsi transfer;
- adegan/iluminasi asli.

*Ruang warna yang bergantung pada perangkat output* terkait dengan perangkat output tertentu, layar atau printer. Ruang RGB yang bergantung pada perangkat tampilan ditentukan oleh:

- chromaticity dari RGB primer;
- titik putih;
- fungsi transfer.

Ruang warna yang bergantung pada perangkat printer, seperti printer CMY (K), ditentukan oleh hubungan antara nilai input yang dikodekan dan nilai warna output yang sesuai.

## **Status Gambar**

Bagian ini menjelaskan status gambar dalam konteks alur kerja digital pencitraan tertentu. Ini menunjukkan pengkodean gambar berwarna (dalam ruang warna yang dikodekan tertentu) dalam aliran kerja, dan memberikan informasi tentang status rendering data gambar. Gambar 42 mengilustrasikan diagram umum yang menunjukkan hubungan antara penyandiaksaraan warna yang berbeda.

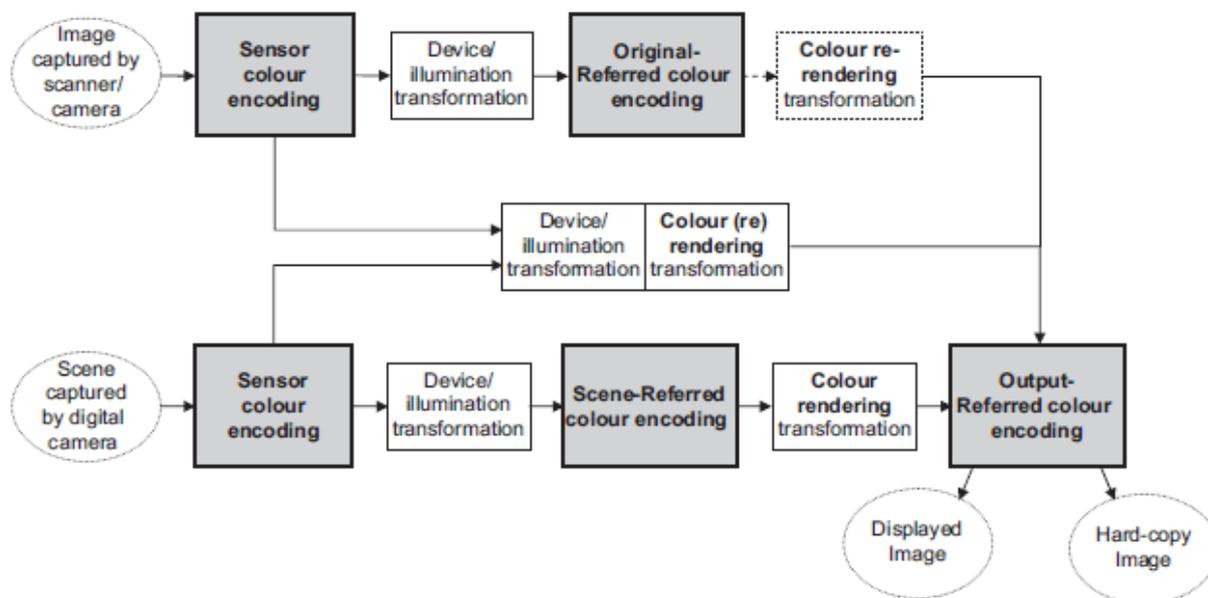
Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 42, data gambar dapat direpresentasikan dalam sensor, rujukan adegan, rujukan asli, dan keluaran yang diinginkan, pengkodean warna. Dua status terakhir juga disebut sebagai pengkodean yang dirujuk gambar.

## **Pengkodean warna sensor**

Saat pemandangan (atau gambar) ditangkap oleh kamera digital (atau scanner), status gambar pertama adalah status sensor, yang bergantung pada perangkat. Itu berarti bahwa itu dikodekan ke koordinat khusus perangkat RGB yang, seperti disebutkan di atas, bergantung pada karakteristik sensor (sensitivitas spektral, karakteristik transfer) dan iluminasi. Ketika gambar diarsipkan, atau berkembang melalui alur kerja pencitraan dalam pengkodean warna sensor, data gambar tidak memiliki koneksi dengan representasi warna pemandangan asli, kecuali sistem pengambilan dikarakterisasi sehingga karakteristik dan iluminasi sensor diketahui. Tidak ada sensor RGB standar yang menyandikan ruang warna, dan kecil kemungkinannya akan ada, karena pabrikan yang berbeda menggunakan filter milik mereka dan dengan demikian sensitivitas sensor berbeda. Selain itu, dengan kamera digital, iluminasi tergantung pemandangan.

## **Pengkodean warna yang mengacu pada pemandangan**

Data gambar yang berasal dari pengambilan adegan dapat diteruskan dari pengkodean warna sensor ke pengkodean warna yang mengacu pada pemandangan dengan menggunakan transformasi yang memperhitungkan karakterisasi sensor, keseimbangan putih, dan penyesuaian eksposur, yaitu perangkat dan/atau khusus gambar. Pengkodean warna yang mengacu pada pemandangan adalah representasi dari perkiraan koordinat kolorimetrik dari objek dalam pemandangan aslinya. Koordinat dapat direpresentasikan dalam berbagai cara, misalnya sebagai nilai warna pemandangan yang dikodekan dalam ruang CIE atau dalam hal respons perangkat penangkap ideal yang memiliki hubungan khusus dengan ruang CIE. Contoh yang terakhir adalah RIMM RGB standar (lihat nanti). Perhatikan bahwa kolorimetri gambar dari data gambar yang mengacu pada pemandangan mungkin berisi beberapa ketidakakuratan karena batasan dynamic range dari perangkat penangkap, noise, kuantisasi dan sumber kesalahan lainnya, dan juga karena modifikasi yang digunakan untuk tujuan ‘mengubah pemandangan’ kolorimetri (misalnya, simulasi pencahayaan pemandangan yang berbeda).



**Gambar 42** Diagram alir status gambar yang menunjukkan hubungan antara berbagai jenis pengkodean warna

Data gambar yang mengacu pada pemandangan tidak langsung ditampilkan oleh perangkat output dan inilah mengapa pengkodean ruang warna yang mengacu pada pemandangan disebut sebagai tidak dirender. Keuntungan menyimpan data gambar dalam pengkodean semacam itu adalah bahwa data berpotensi dirender untuk perangkat output apa pun dalam arti penuh, terutama ketika dikodekan dalam kedalaman bit yang tinggi. Pengodean semacam itu digunakan untuk tujuan pengarsipan dan transformasi.

### Pengkodean warna yang mengacu pada output

Transformasi rendering warna, termasuk pemetaan nada dan pemetaan gamut berdasarkan tujuan rendering, diperlukan untuk mengubah data gambar skenario yang dirujuk menjadi pengkodean yang mengacu pada keluaran. Pengkodean warna yang dirujuk keluaran ditautkan ke perangkat output dan kondisi tampilan nyata atau virtual tertentu. Keluaran data gambar yang diinginkan dapat diwakili oleh pengkodean warna yang berasal dari kolorimetri CIE dan menghasilkan tampilan warna yang diinginkan saat dilihat di lingkungan tampilan referensi. Contoh cara menampilkan data gambar yang diinginkan keluaran dapat diwakili termasuk pengkodean nilai warna menggunakan ruang kolorimetri CIE (dalam hal ini tidak dirender) atau pengkodean ruang warna standar yang diberikan berasal dari kolorimetri CIE (misalnya sRGB atau ROMM RGB dan lihat nanti), atau dengan sinyal kontrol yang tidak bergantung pada karakteristik untuk perangkat lunak salinan lunak (RGB) atau hard copy (CMYK) tertentu.

Penting untuk diperhatikan bahwa data gambar rujukan keluaran dapat diperoleh secara langsung dengan transformasi dari data sensor, tanpa melalui pengkodean warna rujukan pemandangan, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 42. Dalam kasus seperti itu, gambar ditujukan untuk perangkat output dan kondisi tampilan tertentu. Misalnya, data gambar rujukan keluaran standar sRGB sering disimpan oleh kamera digital untuk segera ditampilkan dalam kondisi sRGB rujukan. Dalam kasus pencetakan, sistem pencetakan umumnya akan melakukan transformasi rendering ulang warna untuk mengubah nilai warna sRGB menjadi nilai yang sesuai untuk perangkat output tertentu dan kondisi tampilan yang diasumsikan.

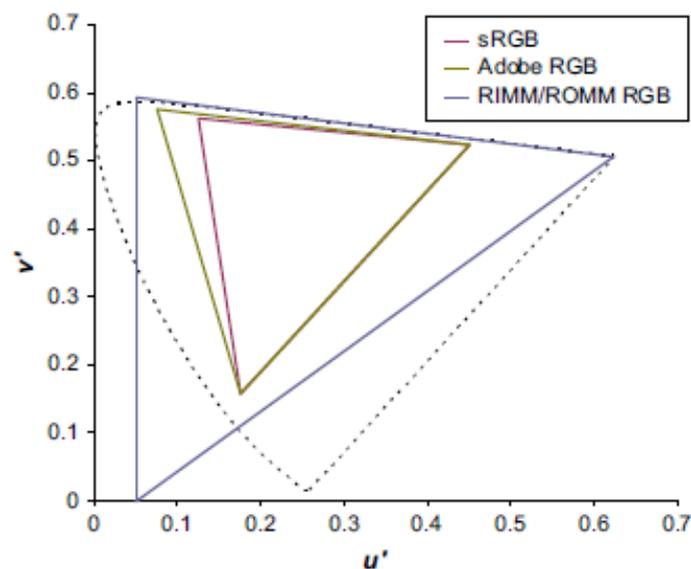
## Pengkodean warna yang mengacu pada keaslian

Gambar yang dikodekan ke pengkodean warna yang dirujuk asli memiliki koordinat yang mewakili koordinat warna dari gambar hard copy dua dimensi (cetakan fotografi, slide atau karya seni). Jadi, sumbernya bukanlah adegan melainkan gambar asli. Karakteristik data gambar yang disandikan dengan referensi asli secara langsung berkaitan dengan karakteristik kolorimetri gambar asli, dalam hal ruang warna CIE seperti CIEXYZ atau CIELAB, perangkat pengukuran ideal seperti densitometer Status A, atau dalam hal sinyal kontrol yang bergantung pada perangkat untuk perangkat penangkap tertentu (kamera atau scanner).

Karena gambar yang diencode mewakili gambar hard copy atau soft-copy dua dimensi, data gambar yang dihasilkan harus diperlakukan sebagai data gambar rujukan asli daripada data gambar rujukan pemandangan. Dalam kasus ini, biasanya tidak perlu menerapkan transformasi rendering warna ke data gambar untuk tujuan menentukan keluaran data gambar yang diinginkan karena gambar asli telah di-render dengan warna. Namun, mungkin diinginkan untuk menerapkan transformasi rendering ulang warna untuk memperhitungkan perbedaan antara karakteristik kondisi media/tampilan dari gambar asli dan gambar rujukan keluaran akhir. Seperti halnya dengan pengkodean warna yang mengacu pada pemandangan, gambar yang disimpan dalam pengkodean warna yang dirujuk asli dapat diakses untuk digunakan nanti tanpa perlu berkomitmen pada keluaran tertentu.

## Standar colour space dan pengkodean colour space

Ada sejumlah pengkodean ruang warna yang telah distandarisasi oleh organisasi internasional untuk memfasilitasi komunikasi gambar melalui imaging chain. Beberapa di antaranya secara de facto bukan standar resmi, dengan spesifikasinya tersedia di domain publik. Pengkodean ruang warna standar memiliki hubungan yang ditentukan dengan kolorimetri CIE (dapat diubah ke/dari koordinat CIE) dan didasarkan pada perangkat masukan atau keluaran yang nyata atau ideal (hipotetis). Yang paling terkenal diperkenalkan di bagian berikut. Gambar 43 membandingkan koordinat kromatisitas  $u'$ ,  $v'$  dari primernya, pada diagram kromatisitas CIE  $u'$  ( $v'$ ) seragam.



**Gambar 43**  $u'$ ,  $v'$  representasi ruang warna  $v'$  dari kelompok ruang warna sRGB, RIMM/ROMM RGB dan Adobe RGB 1998.

## RGB (standar RGB) dan Pengkodean colour space yang mengacu pada RGB

Encoding ruang warna RGB standar (sRGB) adalah standar IEC (IEC 61966-2-1: 1999). Awalnya dirancang oleh HP dan Microsoft sebagai pengkodean ruang warna default untuk Internet selama pertengahan 1990-an. Sejak itu, ia telah diterima secara luas dalam industri pencitraan konsumen. sRGB adalah pengkodean ruang warna yang mengacu pada keluaran, berdasarkan tampilan primer CRT tipikal (identik dengan ITU-R BT.709-3, digunakan dalam monitor TV Definisi Tinggi (HD)) dan fungsi transfer. Standar menentukan kode digital hitam 0 dan putih 255 untuk pengkodean 24-bit (8 bit/saluran). Kekuatan sRGB adalah kesederhanaannya, fakta bahwa sRGB didasarkan pada perangkat nyata, dan tidak mahal untuk diterapkan serta efisien secara komputasi. Ini tersedia di sebagian besar kamera digital konsumen dan juga diterapkan di sebagian besar LCD, yang memungkinkan pengaturan sRGB untuk mensimulasikan keluaran CRT yang khas.

bahwa gambar yang dikodekan menggunakan pengkodean ruang warna sRGB mempertahankan tampilan warnanya hanya di bawah tampilan referensi dan kondisi tampilan.

Fungsi transfer tampilan referensi dijelaskan oleh ekuasi di bawah ini, di mana  $V_{0RGB}$  adalah hitungan digital yang dinormalisasi dan  $V_{RGB}$  adalah luminansi keluaran yang dinormalisasi

Ekuasi 42

$$V_{RGB} = (V'_{RGB} + 0.0)^{2.2}$$

Transformasi pengkodean antara nilai sRGB 8-bit dan CIEXYZ melibatkan langkah-langkah berikut :

1. Penskalaan nilai piksel sRGB ke nilai ruang warna mulai dari 0,0 hingga 1,0.
2. Linearisasi nilai skala sRGB menggunakan fungsi transfer tampilan referensi.
3. Transformasi linier dari nilai skala sRGB linier ke nilai berskala CIE XYZ (berkisar dari 0,0 hingga 1,0) menggunakan matriks 3 x 3 sRGB.

Transformasi invers diperoleh dengan membalik langkah 1-3, dan menggunakan matriks sRGB invers (lihat nanti) untuk transformasi linier dari nilai CIE XYZ dan sRGB linier.

Meskipun sRGB sesuai untuk kebutuhan tampilan dan pencitraan warna Internet, colour gamut yang dapat dicapai yang diperoleh dari sRGB primer agak sempit dibandingkan dengan kisaran warna banyak aplikasi non-CRT, seperti pencetakan digital dan penyelesaian foto. Karakteristik transfer asli LCD tidak mematuhi hukum daya dan biasanya tidak kompatibel dengan sRGB; juga, beberapa LCD terlambat bekerja dengan input 12-bit yang dikodekan. Lebih lanjut, rentang warna yang dihasilkan oleh sensor yang tergabung dalam kamera dan scanner digital modern, yaitu colour gamut sensor, biasanya melebihi gamut sRGB, dan dengan demikian ketika data yang dikodekan sensor diberi warna menjadi sRGB, gamut asli dikurangi secara permanen. Gambar 44 mengilustrasikan contoh sejumlah warna ‘hilang’ dari bagan uji warna umum ketika nilai yang dikodekan sensor yang berasal dari scanner slide komersial diubah menjadi sRGB.

Batasan gamut, serta pengkodean sRGB 8-bit yang terbatas, telah menyebabkan berbagai ekstensi standar pengkodean sRGB. Berikut ringkasan singkatnya:

- e-sRGB (standar I3A, PIMA 7667: 2002) adalah kelompok pengkodean warna yang mengacu pada keluaran (e-sRGB10, e-sRGB12 dan e-sRGB16, masing-masing untuk 10, 12 dan 16 bit per saluran), berdasarkan a perangkat warna aditif virtual dengan

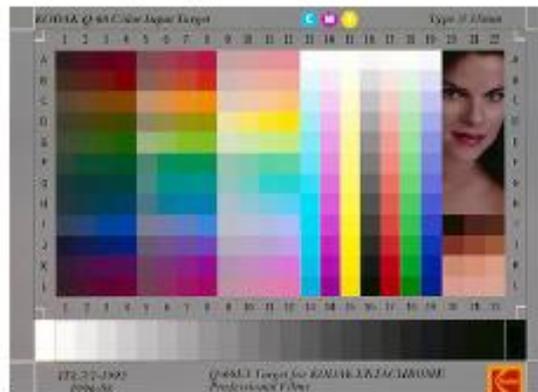
gamut RGB yang diperluas. Rangkaian primer sRGB, fungsi transfer, dan titik putih digunakan, tetapi standar memungkinkan rentang nilai ruang warna yang lebih besar, mulai dari -0,53 hingga 1,68 (bukan 0,0 hingga 1,0), sehingga memberikan gamut yang lebih besar dari sRGB gamut, bersama dengan minimum 10 bit per kuantisasi saluran. Kondisi menonton cocok dengan sRGB. Meskipun sRGB dan e-sRGB adalah rujukan keluaran, e-sRGB memberikan fleksibilitas tambahan untuk pencetakan berkualitas tinggi dibandingkan dengan sRGB.

- bg-sRGB (IEC 61966-2-1, amandemen 1) mirip dengan e-sRGB yang distandarisasi oleh IEC.
- scRGB (IEC 61966-2-2) adalah pengkodean warna gamut yang diperluas lainnya berdasarkan primer sRGB. Ini adalah pengkodean warna yang mengacu pada adegan, dengan karakteristik transfer linier. Karena ini adalah rujukan pemandangan, luminansi titik putih didasarkan pada luminansi titik putih absolut dari pemandangan, yaitu bergantung pada pemandangan. Kromatisitas titik putih sesuai dengan D65. Nilai kode digital didasarkan pada 16 bit per pengkodean saluran. Versi non-linier, scRGB-nl, juga dijelaskan dalam standar yang sama, dengan fungsi transfer daya berdasarkan sRGB.

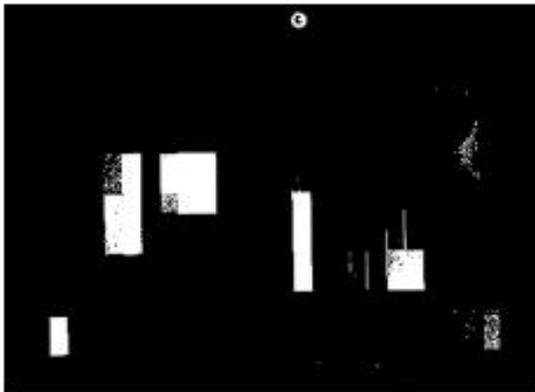
	<b>RED</b>	<b>GREEN</b>	<b>BLUE</b>	<b>WHITE (D65)</b>
X	0.6400	0.3000	0.1500	0.3127
Y	0.3300	0.6000	0.0600	0.3290
Z	0.0300	0.1000	0.7900	0.3583

Tampilan referensi RGB	80 cd m <sup>-2</sup>
Level luminance tampilan	D65 (x=0.317, y=0.3290)
Tampilan white point	0.0
Tampilan model offset (R, G, B)	
Karakteristik tampilan Input/Output (gamma; lihat ekuasi 42)	2.2
Kondisi tampilan referensi	
Referensi background - Bagian dari sekeliling display image	20% pada level luminance display (16 cd m <sup>-2</sup> ), D65
Referensi sekeliling - Area sekeliling tampilan	20% pada level referensi sekeliling (4.1 cd m <sup>-2</sup> ); D50
Referensi bidang proksimal	20% pada level luminance display (16 cd m <sup>-2</sup> ), D65
Referensi tingkat iluminance sekeliling	64 LUX
Referensi sekeliling white point	D50 (x=0.3457), y=0,3585)
Referensi veiling glare	0.2 cd m <sup>-2</sup>
Referensi Observer	CIE 2° standar kolometrik observer

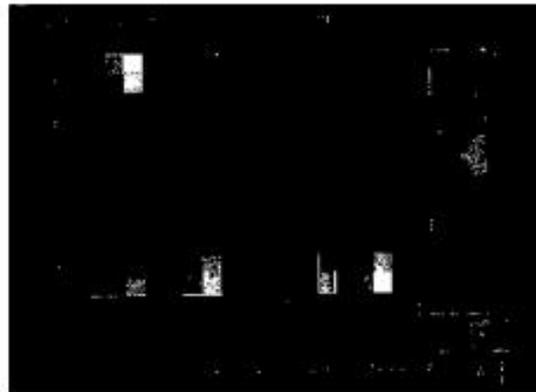
## IT8 – Kodak Q60



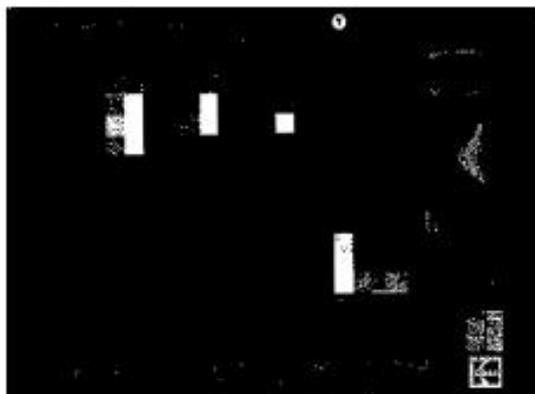
Red



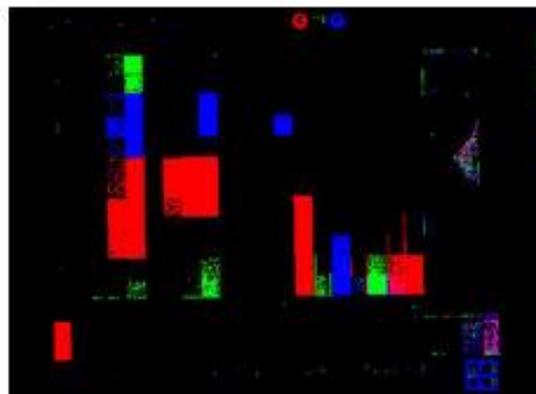
Green



Blue



RGB



**Gambar 44** Bagan uji warna Kodak Q60 (baris atas) dan warna pada saluran red, green, blue dan gabungan gambar RGB (dua baris terbawah) yang hilang selama transformasi dari sensor scanner RGB ke sRGB. Warna yang hilang ditunjukkan dengan piksel putih hitam pada gambar saluran individu dan dengan piksel warna pada gambar RGB gabungan

## YCC dan hal yang terkait dengan YCC

Pengkodean YCC standar, sYCC (IEC 61966-2-1, amandemen 1), adalah pengkodean standar ruang warna  $YCbCr$  yang digunakan dalam kompresi JPEG. Ini didasarkan pada primer sRGB dan juga merupakan pengkodean yang mengacu pada keluaran, tetapi dengan colour gamut hipotetis yang diperluas (lebih besar dari sRGB). Nilai kode sYCC diperoleh dari gambar yang dikodekan sRGB melalui transformasi linier lumaechroma (matriks  $3 \times 3$  lihat nanti). Dalam kompresi JPEG, data gambar sRGB diubah menjadi nilai sYCC sebelum transformasi diskrit

Warna jenuh yang berada di luar gamut sRGB dapat disimpan dalam file JPEG standar dengan langsung mengkodekan data gambar sebagai YCC, daripada memotong/memetakan gambar terlebih dahulu ke gamut sRGB. Aplikasi pencitraan yang mempertahankan data gambar gamut yang diperluas dapat memungkinkan perangkat output, seperti printer inkjet, untuk memanfaatkannya.

sc-YCC-nl (IEC 61966-2-2) didasarkan pada versi non-linier dari sc-RGB (sc-RGB-nl) dan terhubung dengannya melalui transformasi linier (yang sama digunakan untuk mengubah sRGB menjadi sYCC). Namun, seperti dengan scRGB-nl, ini adalah pengkodean warna yang disukai skenario dengan pencahayaan titik putih absolut yang bergantung pada pemandangan. Ini dikuantisasi hingga 12 bit per saluran, sehingga data 16-bit RGB sc-RGB-nl diturunkan sampelnya

## **ROMM RGB dan RIMM RGB**

ROMM RGB (ISO 22028-2-2006) adalah pengkodean warna yang merujuk pada keluaran. Ini mencapai gamut yang diperluas dengan menggunakan primer teoritis daripada fisik berdasarkan output hipotetis (cetak). Fungsi transfer nonlinier tetapi berbeda dengan encoding sRGB. Ada tiga opsi kuantisasi, pada 8, 12 atau 16 bit per saluran. Kromatisitas titik putih dan hitam media referensi adalah yang D50 (cocok untuk tampilan cetak dan seni grafis) dan pencahayaan titik putih dan hitam media referensi masing-masing sama dengan 142 dan 0,5  $\text{cdm}^{-2}$ . Transformasi linier dari ROMM RGB ke nilai tristimulus CIE XYZ dari gambar tersebut dicapai melalui matriks ROMM RGB.

RIMM RGB (ISO 22028-3-2006) adalah pengkodean warna yang mengacu pada adegan, memiliki warna primer yang sama dengan ROMMRGB dan juga mencapai colour gamut yang diperluas. Rentang ruang warna adalah dari 0,0 hingga 2,0 (bukan 0,0 hingga 1,0 untuk ROMM RGB) dan memiliki fungsi transfer non-linier berdasarkan sRGB. Titik putih ruang warna adalah D50, dengan pencahayaan 15.000  $\text{cdm}^{-2}$  untuk mengakomodasi pemandangan eksterior.

Penting untuk dicatat bahwa gamut ruang warna dengan primer yang diperluas memiliki keuntungan menutupi warna yang direproduksi oleh sebagian besar perangkat, tetapi juga menyebabkan potensi ketidakakuratan warna, karena nilai kode mungkin terbuang percuma untuk menyimpannya ke warna yang tidak perlu. Selain itu, mereka perlu dikuantisasi hingga kedalaman bit yang besar untuk menghindari efek kuantisasi seperti pembentukan kontur dan posterisasi.

## **Adobe RGB 1998**

Pengkodean ruang warna Adobe RGB dikembangkan oleh Adobe Systems pada tahun 1998. Ini adalah standar de facto, digunakan secara luas oleh industri fotografi terutama karena ini adalah ruang warna asli dari perangkat lunak pengedit gambar Adobe Photoshop-R. Ini adalah output yang dirujuk 8 bit per pengkodean warna saluran dengan primer (sama dengan yang digunakan oleh sistem TV NTSC - yang digunakan di AS dan negara lain) dan karakteristik transfer non-linear berdasarkan output CRT dengan gamma 2,2. Warna primer RGB tidak berbeda dengan yang ada di sRGB (lihat Gambar 43), meskipun mereka mencakup colour gamut yang sedikit lebih besar, terutama di wilayah cyanegreen. Ketidaksamaan ini sering ditonjolkan dengan merepresentasikan kromatisitas RGB pada diagram kromatisitas CIE x, y yang tidak seragam. Titik putih tampilan referensi sesuai dengan iluminasi D65 dan titik putih pencahayaan adalah 160  $\text{cdm}^{-2}$ . Kondisi tampilan referensi serupa (tetapi tidak persis sama) dengan kondisi sRGB. Spesifikasi Adobe RGB 1998, termasuk transformasi dari/ke koordinat CIE XYZ, tersedia dari Adobe Systems.

## Karakteristik warna perangkat

Kalibrasi dan karakterisasi warna perangkat pencitraan adalah proses penting dalam memastikan reproduksi warna yang konsisten dalam rantai gambar digital. Kalibrasi adalah proses pengaturan dan pemeliharaan perangkat pencitraan ke pengaturan tetap, yang sesuai dengan respons warna yang diketahui - misalnya, respons RGB scanner keseimbangan abu-abu, yaitu memastikan bahwa sinyal RGB yang sama sesuai dengan respons scanner netral ( $R = G = B = f(Y)$ ), atau mengatur titik putih tampilan ke pencahayaan D65, yaitu memastikan bahwa suhu warna titik putih tampilan kira-kira sama dengan 6504 K.

Karakterisasi warna berkaitan dengan mendefinisikan hubungan antara koordinat warna yang bergantung pada perangkat dan koordinat kolorimetri CIE yang tidak bergantung perangkat. Karakterisasi perangkat membantu mengangkut warna di antara perangkat pencitraan dengan cara yang bermakna. Ini digunakan untuk memprediksi keluaran warna dari sinyal masukan tertentu, atau untuk memprediksi sinyal masukan yang diperlukan untuk mendapatkan keluaran warna tertentu. Penting untuk diperhatikan bahwa, setelah perangkat dikalibrasi ke pengaturan tertentu, karakterisasi hanya berlaku untuk pengaturan ini.

Model karakterisasi dapat didefinisikan dalam dua arah: model maju dan model invers. Untuk perangkat input, model maju adalah pemetaan dari adegan asli, atau koordinat media yang tidak tergantung perangkat, ke sinyal output yang bergantung pada perangkat. Untuk perangkat output, ini adalah pemetaan dari sinyal masukan yang bergantung pada perangkat ke warna yang tidak bergantung perangkat yang diberikan yang dihasilkan oleh sinyal ini. Dalam kedua kasus, model invers digunakan untuk menentukan masukan yang diperlukan untuk mendapatkan respons yang diinginkan.

Berbagai macam model yang berbeda telah dikembangkan untuk tujuan karakterisasi warna, tetapi tidak ada yang memberikan hasil optimal untuk semua jenis perangkat. Sebagian besar model telah dikembangkan dengan pertama mengukur sejumlah warna pada perangkat/media untuk dikarakterisasi dan kemudian mendefinisikan hubungan matematis yang memungkinkan transformasi warna apa pun dari ruang perangkat ke ruang warna CIE, atau sebaliknya. Transformasi ini disebut sebagai transformasi warna.

Kami secara luas dapat mengklasifikasikan jenis model yang dikembangkan untuk karakterisasi perangkat sebagai berikut:

1. *Model fisik*, yang didasarkan pada berbagai sifat fisik perangkat, seperti sensitivitas spektral, absorbansi, reflektansi perangkat atau media.
2. *Model numerik*, di mana sekumpulan koefisien diturunkan dengan regresi, menggunakan sejumlah sampel warna yang direpresentasikan baik dalam koordinat yang bergantung perangkat dan dalam koordinat yang tidak bergantung perangkat.
3. *Tabel pencarian dengan interpolasi*, menghubungkan koordinat warna yang bergantung pada perangkat ke koordinat yang tidak tergantung perangkat untuk sejumlah besar sampel warna. Nilai diinterpolasi untuk membuat nilai yang hilang untuk semua koordinat warna perantara.
4. *Jaringan neural*, di mana data yang bergantung pada perangkat untuk sejumlah sampel warna adalah masukan ke jaringan dan data yang tidak tergantung perangkat adalah perkiraan jaringan saraf dari tanggapan perangkat, atau sebaliknya. Metode karakterisasi berdasarkan jaringan saraf tidak akan dijelaskan dalam bahasan ini. Namun demikian, mereka telah menjadi lebih dan lebih populer dalam beberapa tahun terakhir karena kecepatan komputasi sistem komputer kontemporer.

Transformasi warna mungkin melibatkan elemen dari lebih dari satu jenis di atas. Misalnya, entri pada tabel pencarian warna yang digunakan sebagai masukan untuk tampilan warna dapat dihasilkan secara langsung dari data terukur, atau dengan menggunakan fungsi yang diturunkan dari model numerik.

## Model Fisik

Model fisik seringkali didasarkan pada karakteristik spektral perangkat. Misalnya, di perangkat input, sensitivitas spektral sensor kamera atau scanner dapat digunakan untuk memprediksi sinyal respons perangkat. Fungsi sensitivitas spektral kamera digital dapat diukur dengan pencitraan cahaya monokromatik pada panjang gelombang tunggal yang berbeda, atau dari pita gelombang sempit dan merekam respon linierisasi dari setiap saluran. Fungsi-fungsi ini biasanya dinormalisasi ke nilai maksimumnya. Atau, mereka dapat diperoleh dari produsen perangkat. Namun, yang terakhir bersifat umum dan tidak memperhitungkan variasi dari perangkat ke perangkat, atau untuk perubahan temporal pada karakteristik perangkat.

Asalkan sensitivitas spektral (atau responsivitas),  $S_i(\lambda)$ , dari (biasanya tiga, yaitu red, green, dan blue) diketahui, sinyal respon saluran,  $D_i$ , diberikan oleh:

Ekuasi 43

$$D_i = k \int_{\lambda} p(\lambda)R(\lambda)S_i(\lambda)d\lambda + o$$

di mana  $P(\lambda)$  adalah pancaran spektral dari iluminan yang digunakan selama penangkapan,  $R(\lambda)$  adalah pantulan spektral atau transmitansi spektral dari stimulus warna masukan, dan  $k$  dan  $o$  masing-masing adalah parameter skala dan offset.  $\lambda$  adalah kisaran panjang gelombang yang sensitif perangkat. Dalam kamera digital, responsivitas spektral  $S(\lambda)$  itu sendiri bergantung pada berbagai parameter khusus perangkat, terutama pada:

- sensitivitas spektral dari detektor CCD atau CMOS;
- filter warna yang digunakan untuk pemisahan warna;
- transmisi spektral dari filter pemblokiran inframerah yang mungkin disertakan dalam kamera;
- transmisi spektral dari mikro-optik sensor;
- noise.

Kami menunjukkan bahwa distribusi spektral dari sampel dan iluminan berhubungan dengan nilai CIE XYZ kolorimetri melalui ekuasi yang mirip dengan Ekuasi 43 (lihat Ekuasi 5.8). Perbedaan utamanya adalah bahwa nilai kolorimetrik dalam Ekuasi 5.8 diperoleh dengan menggunakan, alih-alih sensitivitas saluran  $S_i(\lambda)$ , fungsi pencocokan warna yang sesuai. Dengan demikian, penting untuk dicatat bahwa, jika fungsi sensitivitas kamera sama dengan (atau transformasi linier) fungsi pencocokan warna CIE yang menggambarkan respons pengamat kolorimetri standar, respons kamera akan menjadi kolorimetri, dan dengan demikian tidak tergantung perangkat. Perangkat yang memenuhi apa yang disebut kondisi LuthereIves ini disebut sebagai perangkat kolorimetri. Dalam kasus seperti itu, dan jika tidak ada derau, matriks unik,  $M$ , dapat diturunkan yang menghubungkan sinyal yang bergantung perangkat  $D_1, D_2, D_3$  (yaitu R, G, B) dan sinyal yang tidak bergantung perangkat nilai tristimulus CIE X, Y, Z:

Ekuasi 44

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \text{ atau } \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Koefisien  $a_{1,1}$ ,  $a_{3,3}$  dari matriks M adalah konstan dan dapat digunakan untuk mengubah semua kemungkinan koordinat warna dari satu ruang warna ke ruang warna lainnya. Matriks M diperoleh dengan:

Ekuasi 45

$$M = (S^T S)^{-1} S^T A$$

di mana S adalah matriks 3 x n yang berisi tiga kolom dengan kepekaan spektral sampel perangkat (dari n jumlah sampel, biasanya diambil pada interval 5e10 nm) dan A adalah matriks 3xn yang berisi sampel fungsi pencocokan warna CIE 1931. T menunjukkan transpos dari matriks dan -1 kebalikan dari matriks.

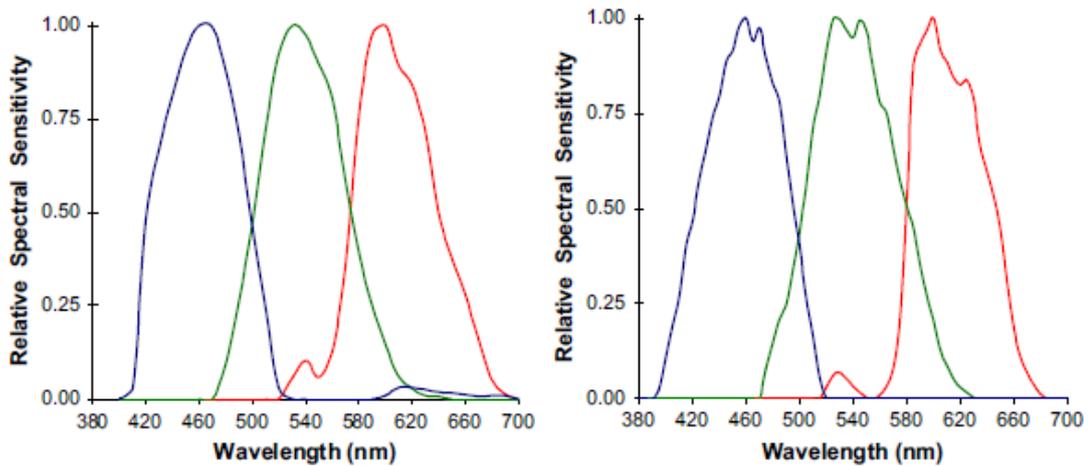
Ekuasi 46

$$S = \begin{bmatrix} S_r(\lambda_1) & S_g(\lambda_1) & S_b(\lambda_1) \\ S_r(\lambda_2) & S_g(\lambda_2) & S_b(\lambda_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_r(\lambda_n) & S_n(\lambda_n) & S_n(\lambda_n) \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} x(\lambda_1) & y(\lambda_1) & z(\lambda_1) \\ x(\lambda_2) & y(\lambda_2) & z(\lambda_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x(\lambda_n) & y(\lambda_n) & z(\lambda_n) \end{bmatrix}$$

$\lambda_1$ ,  $\lambda_n$  menunjukkan titik sampel dari data spektral.

Perhatikan bahwa, jika kamera dikarakterisasi untuk kondisi pencahayaan tertentu, atau perangkat pencitraan adalah scanner dengan iluminan tetap, S dalam Ekuasi 45 dan 46 harus diganti dengan produk sensitivitas spektral dan iluminan referensi spektral (yaitu  $S(\lambda) \times R(\lambda)$ ).



**Gambar 45** Sensitivitas spektral relatif dari dua kamera SRL digital komersial. Diadaptasi dari Fairchild et al. (2008); diperbanyak dengan izin M. D. Fairchild

Meskipun desain perangkat masukan kolorimetri telah dieksplorasi, dalam praktiknya hal ini sangat sulit dicapai karena memerlukan dynamic range yang besar dan rasio signal-to-noise yang tinggi, serta filter pita yang sangat sempit. Masalah potensial dengan penggunaan filter pita sempit adalah metamerisme, di mana rangsangan yang tampak identik dengan mata dapat menghasilkan respons perangkat yang berbeda, atau sebaliknya. Kepekaan spektral perangkat input tidak mungkin merupakan kombinasi linier dari fungsi pencocokan warna CIE 1931 dan oleh karena itu matriks yang berbeda  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$  menghubungkan setiap kumpulan koordinat perangkat ke nilai kolorimetri yang sesuai. Sebuah matriks tunggal,  $M$ , dapat diperkirakan dengan koefisien yang diperoleh dengan cara ‘menyesuaikan’ sensitivitas kamera dengan fungsi pencocokan warna (lihat bagian ‘Regresi’ di bawah). Ini hanya perkiraan, tetapi untuk banyak aplikasi mungkin sudah cukup. Sensitivitas spektral kamera digital komersial ditunjukkan pada Gambar 45.

Model karakterisasi fisik dari tampilan pancaran aditif menggunakan keluaran pancaran spektral dari setiap saluran warna. Pancaran spektral yang dipancarkan oleh tampilan,  $S_{rgb}(\lambda)$ , adalah fungsi dari jumlah digital input yang dilinierisasi:

Ekuasi 47

$$S_{rgb}(\lambda) = S_{r\_max}(\lambda)R' + S_{g\_max}(\lambda)G' + S_{b\_max}(\lambda)B'$$

di mana  $S_{r\_max}(\lambda)$ ,  $S_{g\_max}(\lambda)$  dan  $S_{b\_max}(\lambda)$  adalah pancaran spektral yang dipancarkan dari tampilan primer (yaitu masing-masing saluran red, green, dan blue) dan  $R'$ ,  $G'$ ,  $B'$  adalah jumlah input digital untuk saluran red, green, dan blue masing-masing dilinearisasi sehubungan dengan pencahayaan. Pancaran spektral khas dari tampilan CRT. Pancaran spektral dapat diukur dengan menggunakan spektrometri.

Ketika model karakterisasi tampilan didasarkan pada hubungan ini, ada tiga asumsi yang dibuat:

- Independensi saluran Setiap saluran tampilan beroperasi secara independen dari dua saluran lainnya dan dengan demikian ada kontribusi pancaran spektral yang terpisah untuk setiap saluran, yaitu tidak ada lintas-bicara.
- Keteguhan kromatisitas Kromatisitas fungsi pancaran spektral tidak tergantung pada intensitas sinyal input.

- Kemandirian spasial Keluaran dari satu lokasi spasial tampilan tidak mempengaruhi lokasi spasial lainnya.

Meskipun monitor mematuhi asumsi di atas pada tingkat yang berbeda-beda, model yang didasarkan pada properti spektral tampilan banyak digunakan untuk karakterisasi.

Dalam tampilan yang diatur dengan benar, pancaran spektral keluaran untuk setiap jumlah masukan digital R'. G'. B 'yang dilinierisasi, dapat ditentukan dari pancaran spektral maksimum setiap saluran dengan:

Ekuasi 28.3

$$\begin{bmatrix} S_{rgb}(\lambda_1) \\ \vdots \\ S_{rgb}(\lambda_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{r\_max}(\lambda_1) & S_{g\_max}(\lambda_1) & S_{b\_max}(\lambda_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{r\_max}(\lambda_n) & S_{g\_max}(\lambda_n) & S_{b\_max}(\lambda_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}$$

$\lambda_1 \dots \lambda_n$  menunjukkan titik sampel pancaran spektral.

Karena tampilan adalah perangkat aditif, nilai kolorimetri yang sesuai dapat diturunkan dengan menggunakan matriks transformasi 3x3, M, dengan koefisien yang sama dengan nilai tristimulus CIE dari tampilan primer:

Ekuasi 49

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} \text{ atau } \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r\_max} & X_{g\_max} & X_{b\_max} \\ Y_{r\_max} & Y_{g\_max} & Y_{b\_max} \\ Z_{r\_max} & Z_{g\_max} & Z_{b\_max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}$$

Transformasi terbalik, digunakan untuk memprediksi linier R'. G'. B 'yang dinormalisasi yang diperlukan dalam nilai RGB luminansi untuk setiap rangkaian nilai tristimulus tertentu diperoleh dengan:

Ekuasi 50

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

dimana  $M^{-1}$  adalah kebalikan dari matriks M yang dijelaskan pada Ekuasi 49.

Contoh karakterisasi tampilan menggunakan model fisik dijelaskan nanti di pembahasan ini

Ada sejumlah model fisik yang dikembangkan untuk memperkirakan colorimetri printer. Kebanyakan dari mereka agak rumit dan didasarkan pada pemodelan interaksi antara cahaya, pewarna dan media cetak pada tingkat mikroskopis atau makroskopik. Beberapa model fisik terkenal yang digunakan untuk karakterisasi printer adalah:

- *Model Beer-Bouguer* - digunakan untuk memprediksi transmisi cahaya melalui pewarna transparan dan media yang terkait dengan pencetakan warna kontinu pada media refleksi. Salah satu kelemahan dari model ini adalah bahwa model ini tidak memperhitungkan hamburan cahaya di dalam lapisan pewarna.

- *Model Kubelka-Mung* tidak berbeda dengan model Beer-Bouguer, model ini digunakan untuk memprediksi pantulan pewarna tembus cahaya atau buram dan memperhitungkan hamburan cahaya dalam media cetak.
- *Model Neugebauer* - digunakan untuk memodelkan pencetakan setengah warna di mana setiap pewarna utama dalam proses setengah warna adalah susunan titik spasial

Green dan MacDonald (2002), Sharma (2003) dan Kang (2006) - lihat Bibliografi - memberikan informasi tentang model fisik di atas dan contoh karakterisasi berbasis model dari printer.

## Model Numerik

Tujuan dari model numerik untuk karakterisasi perangkat adalah untuk menentukan matriks M yang digunakan untuk transformasi warna antara nilai warna yang bergantung perangkat dan tidak tergantung perangkat dengan mengukur sejumlah sampel warna dalam perangkat dan merekam koordinatnya di kedua perangkat dan CIE spasi. Untuk perangkat penangkap digital, sejumlah tambalan warna dengan nilai tristimulus terukur digunakan sebagai input ke perangkat dan nilai RGB perangkat yang sesuai dicatat. Untuk perangkat tampilan dan hard copy, contoh tambalan warna dibuat dengan memasukkan berbagai nilai perangkat dan mengukur koordinat tristimulus dari warna yang diberikan, menggunakan colorimeter, spektrofotometer, atau instrumen warna lainnya.

Setelah matriks diturunkan, transformasi warna dicapai dengan menggunakan Ekuasi 44. Seperti disebutkan di atas, jika distribusi daya spektral perangkat dan fungsi pencocokan warna CIE terkait secara linier, koefisien matriks non-singular M adalah konstan dan dapat digunakan untuk mengubah secara akurat semua kemungkinan koordinat warna dari satu ruang warna ke ruang warna lain. Dalam kasus seperti itu, koefisien dapat diturunkan dengan mengukur hanya tiga sampel warna yang diketahui dan menyelesaikan tiga ekuasi simultan. Dengan aljabar matriks, solusi untuk kumpulan ekuasi linier diberikan oleh (lihat bagian ‘Regresi ‘ di bawah):

Ekuasi 51

$$M_X = (D^T D)^{-1} (D^T X)$$

$$M_Y = (D^T D)^{-1} (D^T Y)$$

$$M_Z = (D^T D)^{-1} (D^T Z)$$

dengan D adalah matriks 3x3 dengan nilai kode yang bergantung pada perangkat (seperti R, G, dan B) untuk tiga sampel:

Ekuasi

$$\begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ R_2 & G_2 & B_2 \\ R_3 & G_3 & B_3 \end{bmatrix}$$

X adalah vektor dengan tiga nilai tristimulus X yang sesuai untuk tiga sampel:

Ekuasi

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}$$

Y adalah vektor dengan tiga nilai tristimulus Y yang sesuai untuk ketiga sampel:

Ekuasi

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix}$$

Z adalah vektor dengan tiga nilai tristimulus Z yang sesuai untuk tiga sampel:

Ekuasi

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix}$$

Kemudian, matriks transformasi M diberikan oleh:

Ekuasi 52

$$M = \begin{bmatrix} M_X \\ M_Y \\ M_Z \end{bmatrix}$$

Transformasi kebalikan dari transformasi yang dijelaskan oleh Ekuasi 44 sering diperlukan untuk memprediksi nilai kode yang diperlukan yang akan membuat warna yang memiliki kumpulan nilai tristimulus CIE XYZ yang diketahui. Ini dicapai dengan menggunakan invers dari matriks M:

Ekuasi 53

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Dalam kebanyakan kasus, distribusi daya spektral perangkat bukanlah kombinasi linier dari fungsi pencocokan warna CIE 1931 dan oleh karena itu matriks,  $M$ , dapat diperkirakan menggunakan metode regresi. Regresi digunakan untuk menghubungkan koordinat warna dari sampel warna yang dipilih di kedua perangkat dan ruang warna CIE.

Langkah-langkah untuk mendapatkan model numerik meliputi:

- Pemilihan sumber dan ruang warna tujuan yang digunakan untuk mendeskripsikan koordinat sampel warna. Misalnya, scanner RGB ke CIE XYZ, atau log RGB ke log CIE XYZ.
- Pemilihan jumlah dan lokasi (dalam hal kecerahan, corak dan kromanya) sampel warna pelatihan, yaitu sampel warna yang akan digunakan dalam regresi untuk memperkirakan  $M$ .
- Pilihan ekuasi regresi.
- Evaluasi hasil perkiraan.

## Regresi

Metode yang paling umum untuk mengestimasi koefisien dari matriks transformasi  $M_{\_}$  adalah metode kuadrat terkecil. Kesesuaian terbaik dalam metode kuadrat terkecil adalah model estimasi yang jumlah residu kuadratnya memiliki nilai terkecil. Residual adalah selisih antara nilai terukur dan nilai yang diestimasi oleh model.

Regresi dilakukan pada sejumlah sampel yang dipilih (sampel pelatihan),  $n$ , dengan spesifikasi warna terukur baik dalam ruang warna sumber (perangkat) dan tujuan (CIE). Hal ini didasarkan pada asumsi bahwa korelasi antara ruang warna dapat didekati dengan serangkaian ekuasi simultan. Untuk solusi unik ekuasi, jumlah sampel warna,  $n$ , harus lebih tinggi dari jumlah suku,  $m$ , dalam regresi ( $n > m$ ). Setelah koefisien dalam ekuasi diturunkan (yaitu koefisien yang membentuk matriks  $M_{\_}$ ), seseorang dapat menggunakan ekuasi simultan dengan variabel sumber (misalnya RGB) untuk menghitung koordinat tujuan (misalnya CIE XYZ). Data perangkat adalah variabel independen dalam regresi dan nilai tristimulus adalah variabel dependen.

Regresi bisa linier atau dengan urutan yang lebih tinggi, seperti polinomial, yang terakhir adalah penerapan regresi linier dengan variabel  $m$ , di mana  $m$  sebenarnya lebih besar dari jumlah variabel independen, yaitu tiga R, G dan  $b$ , dalam kasus Sistem RGB.

kasus sistem RGB. Bentuk umum dari regresi linier dengan variabel  $m$  diberikan oleh:

Ekuasi 54

$$d(q) = a_1q_1 + a_2q_2 + a_3q_3 + \dots + a_mq_m$$

Dan dalam notasi vektor:

Ekuasi 415

$$d = QA^T \text{ atau } d = Q^T A$$

dimana  $d$  adalah variabel terikat. Vektor  $Q$  memiliki elemen  $m$  yang menunjukkan jumlah suku polinomial: masing-masing adalah variabel independen (R, G, B), atau produk variabel independen (RG, GB, RB, R2, R2, G2, RGB, dll. ).  $A$  adalah vektor dengan koefisien yang sesuai. Banyaknya koefisien sama dengan banyaknya suku polinom,  $m$ .

Contoh penerapan regresi polinomial ke tiga variabel independen yang sesuai dengan koordinat perangkat, R, G dan  $b$ , dengan  $m = 4$  suku polinomial, adalah ketika  $q_1 = R$ ,  $q_2 = G$ ,  $q_3 = G$  dan  $q_4 = RGB$ . Oleh karena itu, nilai  $q$  diturunkan langsung dari tiga variabel independen, yaitu dari koordinat dependen perangkat yang diukur. Variabel dependen-keluaran  $d$  mewakili nilai warna yang sesuai di ruang tujuan (nilai tristimulus CIE X, Y atau Z).

Untuk nilai tristimulus X dan menggunakan  $n$  sampel yang diukur, Ekuasi 54 akan diwakili oleh:

Ekuasi 416

$$X_1 = a_{x1}R_n + a_{x2}G_1 + a_{x3}B_1 + a_{x4}RGB_1$$

$$X_2 = a_{x1}R_2 + a_{x2}G_2 + a_{x3}B_2 + a_{x4}RGB_2$$

...

$$\dots$$

$$\dots$$

$$X_n = a_{x1}R_n + a_{x2}G_n + a_{x3}B_n + a_{x4}RGB_n$$

Dalam bentuk matriks, Ekuasi 416 di atas menjadi:

Ekuasi 417

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 & RGB \\ R_2 & G_2 & B_2 & RGB \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_n & G_n & B_3 & RGB \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{x1} \\ a_{x2} \\ a_{x3} \\ a_{x4} \end{bmatrix}$$

Dan dalam notasi vektor:

Ekuasi 418

$$X = Q^T A_X$$

dengan X adalah vektor dengan nilai tristimulus X untuk n sampel, Q adalah matriks 4xn (empat suku untuk n jumlah sampel) dan AX adalah vektor dari empat koefisien yang sesuai.

Jika jumlah nilai tristimulus X dari vektor sampel warnakurang dari jumlah yang tidak diketahui pada vektor AX, tidak ada solusi unik untuk ekuasi simultan. Jadi, untuk contoh ini jumlah sampel n harus lebih besar dari atau sama dengan 4.

Dalam kasus kuadrat terkecil, kesalahan dalam menemukan fungsi yang paling cocok yang mengembalikan koefisien dalam matriks AX diminimalkan antara nilai taksiran dan nilai terukur dari X. Jika jumlah sampel memang lebih besar (atau sama) dengan jumlah koefisien, produk dari Q dengan transposenya (yaitu QQT) dapat dibalik (ini non-singular), dan koefisien yang diperlukan dapat diperoleh dengan:

Ekuasi 419

$$A_X = (Q^T Q)^{-1} (Q^T X)$$

Ekuasi 419 diulangi untuk ketiga nilai tristimulus sampel, X, Y dan Z. Akhirnya, matriks transformasi M \_ diperoleh dengan:

Ekuasi 420

$$M = \begin{bmatrix} A_X \\ A_Y \\ A_Z \end{bmatrix}$$

Ekuasi 421

$$M = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{x2} & a_{x3} & a_{x4} \\ a_{y1} & a_{y2} & a_{y3} & a_{y4} \\ a_{z1} & a_{z2} & a_{z3} & a_{z4} \end{bmatrix}$$

Perhatikan bahwa Berarti 419 dan 420 analog dengan Ekuasi 51 dan 52. Transformasi dari koordinat yang bergantung perangkat ke nilai tristimulus CIE untuk contoh di atas dicapai dengan:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ RGB \end{bmatrix} \text{ atau } \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{x2} & a_{x3} & a_{x4} \\ a_{y1} & a_{y2} & a_{y3} & a_{y4} \\ a_{z1} & a_{z2} & a_{z3} & a_{z4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ RGB \end{bmatrix}$$

Tabel 5 menunjukkan contoh ekuasi yang digunakan untuk konversi ruang warna. Umumnya, keakuratan pendekatan polinomial meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah suku polinom. Namun, polinomial tingkat tinggi mungkin menghasilkan hasil yang buruk dalam praktiknya (lihat bagian ‘Karakterisasi scanner ‘ di bawah).

Ketika konversi warna perlu bekerja secara terbalik (yaitu CIE XYZ ke RGB), matriks koefisien untuk transformasi terbalik harus dicari. Ini dicapai melalui Ekuasi 416e422, dengan menukar posisi data masukan dan keluaran dalam regresi. Artinya, regresi diterapkan pada nilai tristimulus CIE yang kini menjadi variabel independen, dan data RGB yang dalam hal ini variabel dependen. Contoh regresi polinomial untuk karakterisasi perangkat input diberikan nanti di akhir pembahasan ini.

<b>Tabel 5 Contoh ekuasi yang digunakan untuk konversi ruang warna (m adalah jumlah suku polinom)</b>		
<b>M</b>	<b>POLINOMINAL</b>	<b>TIPE</b>
3	$d(x, y, z) = a_1x + a_2y + a_3z$	Linier
4	$d(x, y, z) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z$	Linier
6	$d(x, y, z) = a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5xz + a_6yz$	Polinomial
8	$d(x, y, z) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5xz + a_6yz + a_7xyz$	Polinomial
9	$d(x, y, z) = a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5xz + a_6yz + a_7x^2 + a_8y^2 + a_9z^2$	Polinomial
14	$d(x, y, z) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5xz + a_6yz + a_7x^2 + a_8y^2 + a_9z^2 + a_{10}x^3 + a_{10}y^3 + a_{11}y^3 + a_{12}z^3 + a_{13}xyz$	Polinomial

### Tabel Look-up dengan interpolasi

Transformasi ruang warna dapat dicapai dengan menggunakan tabel pencarian multidimensi (LUT) yang memetakan perangkat bergantung pada koordinat warna yang tidak tergantung perangkat, dan sebaliknya. Umumnya, sejumlah besar sampel warna diukur (sampel pelatihan) di ruang yang bergantung pada perangkat dan tidak tergantung perangkat. Warna yang diukur merupakan bagian dari jumlah total warna yang tersedia di perangkat yang akan dikarakterisasi. Misalnya, dalam perangkat RGB, jumlah warna yang tersedia pada 8 bit per kuantisasi saluran adalah  $2^8 \times 2^8 \times 2^8 = 16.777.216$ . Ini jelas merupakan jumlah warna yang terlalu besar untuk dievaluasi dengan pengukuran manual langsung. Untuk mencakup semua warna yang mungkin, interpolasi antara titik terukur terdekat digunakan untuk menutupi semua warna yang dapat ditemui di salah satu ruang warna.

Berbagai algoritma matematika digunakan untuk interpolasi. Tujuan dari algoritme tersebut adalah untuk memperkirakan koordinat warna keluaran untuk koordinat masukan yang diketahui terkait, asalkan dua atau lebih koordinat warna diketahui baik dalam ruang warna masukan maupun keluaran. Jarak geometris relatif dari titik yang diketahui ke titik yang akan ditentukan digunakan sebagai bobot untuk memperkirakan nilai koordinat yang tidak diketahui. Dengan demikian, koordinat ruang warna diukur secara berkala untuk membuat kisi titik yang digunakan untuk mengevaluasi fungsi interpolasi. Kesalahan interpolasi adalah jarak

antara koordinat yang dihitung dengan interpolasi dan nilai fungsi interpolasi pada koordinat warna tersebut.

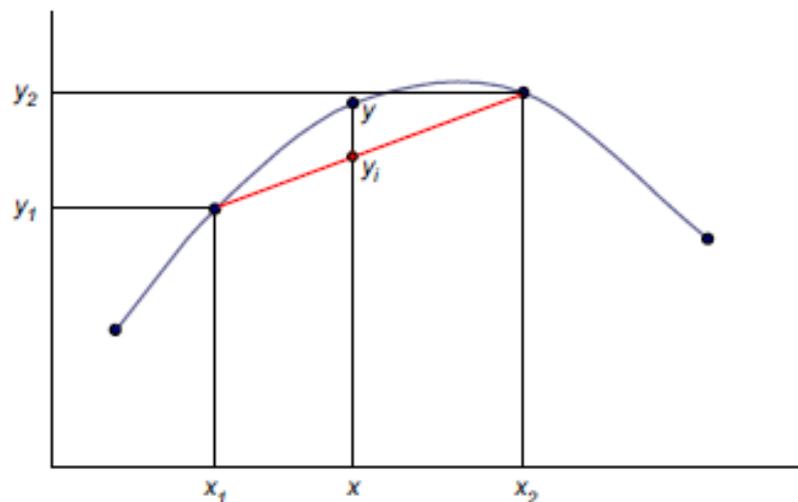
Karena ruang warna masukan dan keluaran biasanya berbentuk tiga dimensi (3D), diperlukan metode interpolasi yang memanfaatkan berbagai cara untuk membagi ruang 3D, seperti kubus yang mewakili ruang warna masukan. Contoh metode interpolasi 3D yang digunakan untuk karakterisasi perangkat meliputi interpolasi trilinear, prisma, piramida, dan tetrahedral. Dalam interpolasi trilinear kubus tidak tersegmentasi, sedangkan pada tiga yang terakhir kubus dibagi menjadi dua, tiga dan empat segmen masing-masing.

Umumnya, metode interpolasi 3D merupakan perpanjangan dari interpolasi linier (satu dimensi, 1D) dan bilinear (2D). Pada Gambar 46, interpolasi linier dalam satu dimensi digunakan untuk menentukan koordinat y sebuah titik dengan koordinat x, y dari dua titik dengan koordinat  $x_1, y_1$  dan  $x_2, y_2$  yang diketahui. Nilai  $y$ , orf (x), diberikan oleh:

Ekuasi 423

$$f(x) = y = y_1 + (y_2 - y_1) \left( \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right)$$

Kesalahan interpolasi diberikan oleh jarak antara nilai y dan nilai interpolasi  $y_i$ .

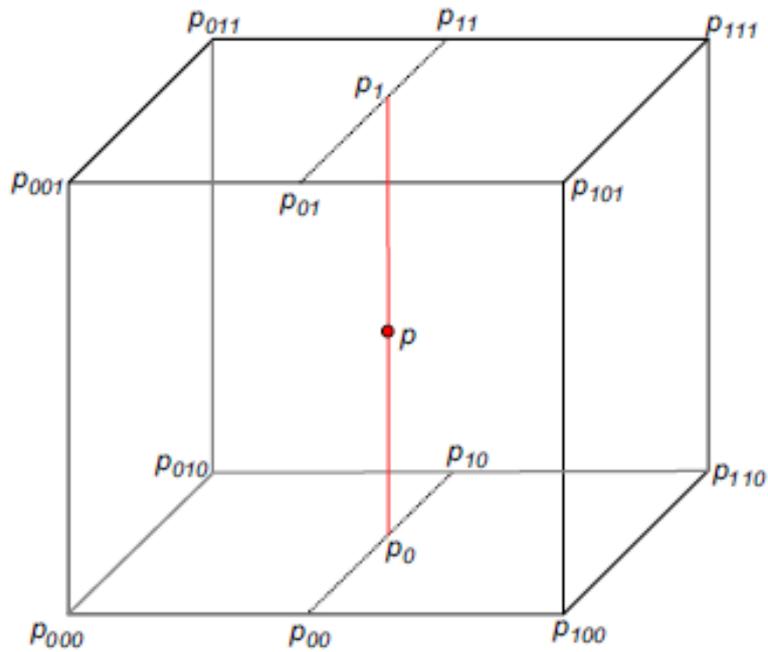


**Gambar 46** Interpolasi linier.

Dalam interpolasi bilinear yang dilakukan dalam dua dimensi, kita memiliki fungsi dari dua variabel,  $f(x, y)$ , dan karenanya kita membutuhkan empat titik yang diketahui. Selanjutnya, interpolasi atrilinear dicapai dengan menerapkan interpolasi linier tujuh kali. Ini mengulangi interpolasi bilinear (3xlinear) dua kali untuk menentukan dua titik pada dua sisi yang berlawanan dari kubus dan kemudian melakukannya sekali lagi untuk menentukan lokasi geometris dari titik tak diketahui bulan yang menghubungkan kedua titik ini (Ekuasi 44). Gambar 47 mengilustrasikan penerapan interpolasi trilinear untuk menentukan titik p dengan koordinat  $x, y, z$ , dari delapan titik kubus yang tersedia:  $p_{000}, p_{001}, p_{010}, p_{011}, p_{100}, p_{101}, p_{110}$  dan  $p_{111}$ . Lihat Kang (2006) untuk lebih jelasnya.

Ekuasi 424a

$$p = c_0 + c_1\Delta y + c_2\Delta y + c_3D\Delta z + c_4D\Delta x\Delta y + c_5\Delta y\Delta x + c_6\Delta z\Delta x + c_7\Delta x\Delta y\Delta z$$



Gambar 47 Interpolasi trilinear. Diadaptasi dari Kang (2006)

Dimana,

Ekuasi 424b

$$\Delta x = \frac{(x - x_0)}{(x - x_1)}, \Delta y = \frac{(y - y_0)}{(y - y_1)}, \Delta z = \frac{(z - z_0)}{(z - z_1)}$$

Dan,

Ekuasi 424c

$$C_0 = (p_{000})$$

$$C_1 = (p_{100} - p_{000})$$

$$C_2 = (p_{10} - p_{000})$$

$$C_3 = (p_{001} - p_{000})$$

$$C_4 = (p_{110} - p_{010} - p_{100} + p_{000})$$

$$C_5 = (p_{011} - p_{001} - p_{010} + p_{000})$$

$$C_6 = (p_{101} - p_{001} - p_{100} + p_{000})$$

$$C_7 = (p_{111} - p_{011} - p_{101} - p_{110} + p_{100} + p_{001} + p_{010} - p_{000})$$

Karakterisasi perangkat menggunakan LUT dengan interpolasi dilakukan sebagai berikut. Pertama, kisi dibuat dengan membagi ruang warna. Ini dicapai dengan mengukur sampel warna pelatihan secara berkala di ruang masukan dan memperoleh koordinat keluaran yang sesuai. Kisi pada dasarnya mempartisi ruang warna menjadi sub-volume. Ketika transformasi warna

dilakukan, warna masukan ditempatkan ke sub-volume dan kemudian interpolasi dijalankan untuk mendapatkan koordinat warna keluaran.

Dalam teknik karakterisasi menggunakan LUT dengan interpolasi, penting bahwa ruang warna masukan direpresentasikan dan dibagi dengan cara yang seragam secara persepsi sebelum dimasukkan ke dalam LUT, untuk menghindari kesalahan interpolasi yang penting secara persepsi. Ini dapat dicapai dengan mengubah data masukan menggunakan fungsi non-linier yang mendekati respons mata (misalnya logaritmik, atau dinaikkan ke eksponen 1/3), atau menggunakan data yang dikoreksi gamma secara langsung. Jumlah sampel yang diukur selama proses karakterisasi dapat berkisar dari 120 hingga 500. LUT yang lebih besar akan mengurangi kesalahan interpolasi pada tahap transformasi tetapi membutuhkan lebih banyak pengukuran (lebih banyak warna harus diukur untuk membuat kisi) dan lebih banyak memori komputer selama prosesnya. penerapan.

LUT yang menjelaskan model karakterisasi perangkat biasanya digunakan oleh profil warna ICC untuk transformasi warna, karena menerapkan transformasi warna melalui LUT biasanya lebih cepat daripada melalui fungsi model yang harus dijalankan untuk setiap piksel gambar. Namun, LUT ditetapkan dan tidak dapat diubah selama waktu proses.

## Evaluasi pada model karakteristik

Perbedaan warna, seperti CIELAB DE<sub>ab</sub>, serta CIE94 dan CIEDE2000, digunakan untuk mengevaluasi kesalahan dalam model karakterisasi. Perbedaan warna rata-rata, median, maksimum dan persentil ke-95 diperoleh, pertama untuk set sampel pelatihan dan juga untuk set sampel warna pengujian. Yang terakhir belum digunakan untuk membangun model tetapi digunakan untuk mengujinya, jadi biasanya mereka mengembalikan kesalahan lebih tinggi daripada yang dikembalikan dari set warna pelatihan. Ukuran kesalahan yang dipilih untuk mengevaluasi kinerja model harus seragam secara persepsi, oleh karena itu pertimbangan perlu diberikan pada rumus perbedaan warna yang digunakan untuk memperkirakannya.

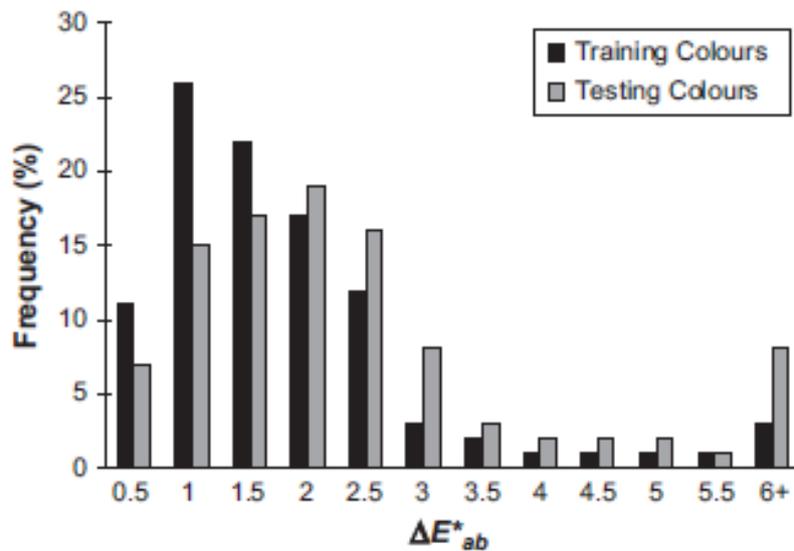
Meskipun perbedaan warna rata-rata sering kali merupakan nilai yang pertama kali dilaporkan, nilai ini dapat memimpin, karena biasanya tidak terdistribusi secara normal ke seluruh sampel. Perbedaan warna median adalah metrik yang lebih sesuai untuk mewakili kinerja model 'rata-rata'. Histogram frekuensi perbedaan warna versus besarnya perbedaan diplot untuk menggambarkan distribusi kesalahan (lihat contoh pada Gambar 48). Kesalahan kolorimetri sering dilaporkan dalam perbedaan dan plot  $\Delta L^*$ ,  $\Delta C^*_{ab}$  dan  $\Delta H^*_{ab}$  yang terpisah seperti  $\Delta E^*_{ab}$  versus  $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h^*$  atau versus  $\Delta L^*$ ,  $\Delta C^*_{ab}$  dan  $\Delta C_{ab}$  dapat mengungkapkan kecenderungan sistematis dalam distribusi kesalahan. Contoh diilustrasikan pada Gambar 49. Berdasarkan jenis analisis ini, koreksi untuk meningkatkan model karakterisasi sering dilakukan.

Kinerja model karakterisasi juga sering dievaluasi dengan menggunakan ukuran kesalahan statistik. Misalnya, kinerja matriks transformasi warna yang diperoleh dari regresi polinomial antara ketergantungan perangkat dan nilai tristimulus CIE XYZ dapat diuji dengan menghitung koefisien korelasi  $r$  regresi dengan:

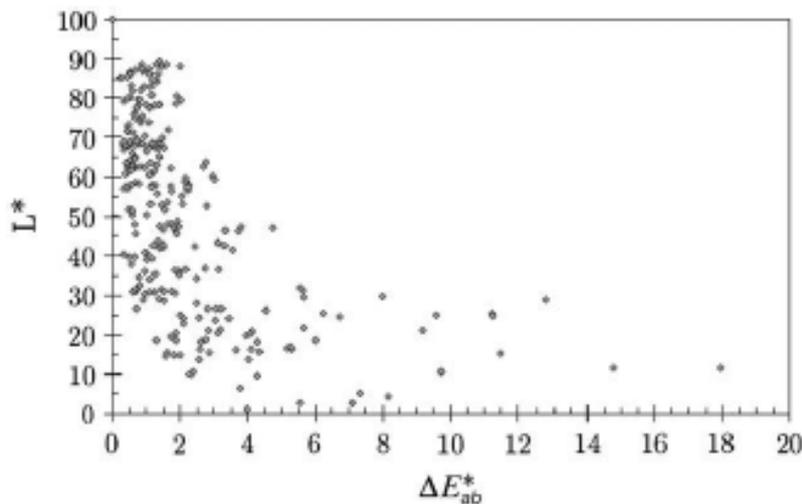
Ekuasi 425

$$r = \left[ \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n\sigma_x\sigma_y} \right]^2$$

di mana  $x_i$  dan  $y_i$  adalah masing-masing nilai taksiran dan asli untuk setiap nilai tristimulus,  $\bar{x}$  dan  $\bar{y}$  adalah nilai taksiran rata-rata dan nilai asli,  $n$  adalah jumlah sampel warna pelatihan, dan  $s_x$  dan  $s_y$  adalah deviasi standar dari taksiran dan asli nilai-nilai. Koefisien terpisah dihitung untuk setiap nilai tristimulus. Masalah dengan menggunakan koefisien korelasi untuk menguji model karakterisasi semacam itu adalah ketidakseragaman sistem warna CIE XYZ. Juga, kesalahan korelasi tidak memberikan penjelasan apapun tentang lokasi atau distribusi kesalahan; itu hanya penaksir keakuratan fungsi yang dipasang.



**Gambar 48** Distribusi  $\Delta E^*_{ab}$  dalam karakterisasi scanner



**Gambar 49** CIE  $L^*$  versus  $\Delta E^*_{ab}$  untuk semua warna pelatihan. Kesalahan kolorimetri yang besar dikaitkan dengan warna-warna dengan kecerahan rendah.

### Karakteristik Display

Dalam tampilan CRT, fosfor tereksitasi yang dimodulasi oleh tiga senjata elektron memancarkan campuran aditif lampu red, green, dan blue. Asumsi yang disebutkan

sebelumnya di bagian ‘Model fisik’. selain asumsi stabilitas temporal, harus dipegang untuk menggunakan prosedur sederhana berikut untuk mencirikan tampilan.

Kalibrasi dan karakterisasi tampilan dilakukan di lingkungan yang gelap dengan semua lampu sekitar mati. Layar harus melakukan pemanasan selama 30e60 menit untuk memungkinkan stabilisasi pencahayaan dan kromatisitas. Sebelum karakterisasi dimulai, suhu warna berkorelasi yang diinginkan harus dipilih. Kontrol kecerahan dan kontras tampilan harus disetel ke nilai tetap. Tujuannya adalah untuk mencapai rentang kontras maksimum, dengan titik hitam paling gelap dan tidak ada penurunan tingkat pencahayaan yang tersedia. Ini dilakukan secara visual, lebih disukai oleh pengamat yang berpengalaman dan dengan bantuan patch uji hitam-putih sederhana, atau dengan menampilkan beberapa gambar bergambar yang khas dan mencoba mencapai reproduksi nada yang menyenangkan.

Karakterisasi sistem tampilan adalah operasi dua langkah. Ini adalah:

- Evaluasi karakteristik transfer dari tampilan CRT, mis. definisi hubungan antara nilai piksel masukan dan pencahayaan keluaran, untuk saluran red, green, dan blue.
- Penurunan matriks, M, dari koefisien yang digunakan untuk mengubah linierisasi R'. G'. B '- sehubungan dengan menampilkan pencahayaan - nilai piksel ke nilai tristimulus CIE XYZ.

Evaluasi fungsi transfer R, G, dan B dari sistem tampilan dicapai dengan melakukan pengukuran luminansi dari serangkaian jalur landai yang ditampilkan untuk setiap warna primer. Hubungan ini biasanya dimodelkan oleh suatu fungsi yang mematuhi hukum kekuasaan. Rincian tentang mengukur karakteristik transfer CRT, bersama dengan model yang digunakan untuk menggambarkan hubungan transfer, Kolorimeter yang dikalibrasi dan dipanaskan dapat digunakan untuk tujuan tersebut.

Koefisien dari matriks transformasi warna, M, diperoleh dengan menggunakan colorimeter dan mengukur setiap kromatisitas keluaran puncak saluran, x, y dan luminansi, Y, dari bagian tengah tampilan, dengan bagian tengah pelat muka tampilan menampilkan warna yang diinginkan dan area sekitarnya diatur untuk menampilkan pelengkap. Koefisien yang diperlukan adalah nilai tristimulus dari tampilan primer yang dijelaskan dalam Ekuasi 49. Mereka diperoleh oleh:

Ekuasi 426

$$M = \begin{bmatrix} Xr\_max & Xg\_max & Xb\_max \\ Yr\_max & Yg\_max & Yb\_max \\ Zr\_max & Zg\_max & Zb\_max \end{bmatrix}$$

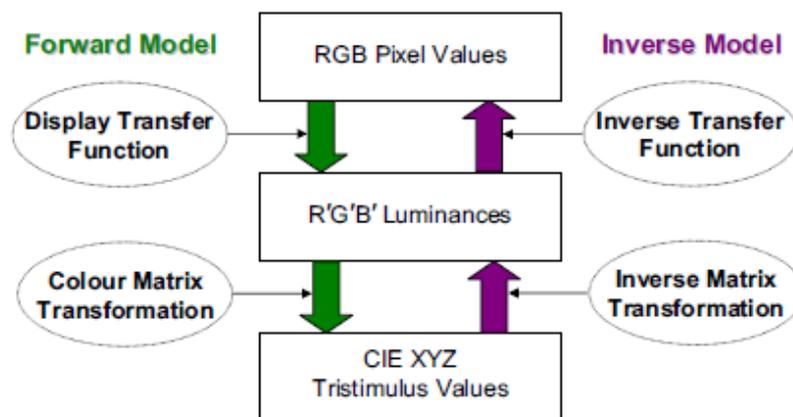
$$= \begin{bmatrix} (x_r/y_r) & (x_g/y_g) & (x_b/y_b) \\ 1 & 1 & 1 \\ (z_r/y_r) & (z_g/y_g) & (z_b/y_b) \end{bmatrix}$$

dimana  $x_r$ ,  $y_r$  dan  $z_r$  adalah kromatisitas primer merah,  $x_g$ ,  $y_g$  dan  $z_g$  adalah kromatisitas primer hijau,  $x_b$ ,  $y_b$  dan  $z_b$  adalah kromatisitas primer biru dan  $Lr\_max$ ,  $Lg\_max$  dan  $Lb\_max$  adalah pencahayaan maksimum saluran red, green, dan blue masing-masing. Koefisien dinormalisasi dalam kisaran 0,0-1,0, dicapai dengan penskalaan sehingga nilai Y berjumlah 1.

Kolorimetri satu set koordinat warna RGB yang dikirim ke CRT diprediksi oleh model maju yang melibatkan:

- Penerapan fungsi transfer tampilan ke masing-masing hitung digital input R, G dan B untuk mendapatkan nilai luminance R', G' dan B' linier. Ini dapat dicapai dengan menerapkan fungsi transfer tampilan model, atau dengan membuat tiga LUT dengan respons saluran terukur (dan interpolasi) aktual.
- Nilai tristimulus dari warna tampilan kemudian diperoleh dengan mengimplementasikan Ekuasi 49.

Keberhasilan karakterisasi dapat diuji dengan mengubah set uji patch warna dengan nilai tristimulus CIE XYZ yang diketahui untuk menampilkan RGB melalui model karakterisasi terbalik dan mengukur warna yang ditampilkan menggunakan colorimeter. Transformasi invers (Gambar 50) dicapai dengan membalik langkah-langkah yang tercantum di atas, yaitu menerapkan transformasi matriks invers yang dijelaskan dalam Ekuasi 50 dan kemudian menerapkan fungsi transfer tampilan terbalik ke linier dalam luminance nilai R', G', B' untuk mendapatkan masukan hitungan digital R, G, B.



**Gambar 50** tristimulus CIE XYZ

Terakhir, perbedaan antara warna tampilan asli dan terukur dihitung menggunakan rumus perbedaan warna, seperti yang ditunjukkan di awal. Karakterisasi CRT dapat menghasilkan perbedaan warna rata-rata yang besarnya serendah 1,0 CIE  $\Delta E_{ab}$ , yang dianggap sebagai ambang batas visibilitas dalam patch warna seragam. Dalam pencitraan, ambang batas ini meningkat untuk pemandangan yang kompleks, dengan batas visibilitas gambar yang ditampilkan antara 2,5 dan 3,5  $E_{ab}$  dan batas penerimaan sekitar 5,0 atau 6,0  $\Delta E_{ab}$ .

Dalam karakterisasi teknologi LCD, sebagian besar asumsi yang dibuat dengan CRT tetap pada tingkat tertentu dan dengan demikian model karakterisasi berdasarkan CRT yang dijelaskan di atas dapat digunakan. Dalam LCD matriks aktif dengan cahaya latar, polariser linier dan substrat kristal cair di antara keduanya digunakan untuk mempolarisasi cahaya yang berasal dari sumber di bagian belakang layar. Cahaya terpolarisasi melewati satu set filter RGB untuk membuat campuran warna aditif. Perbedaan utama antara karakteristik CRT dan LCD adalah LCD memiliki fungsi transfer asli yaitu sigmoid (hiperbolik). Namun, banyak LCD memiliki tabel koreksi internal untuk meniru respons CRT. Oleh karena itu, yang terbaik adalah mendapatkan karakteristik transfer tampilan dengan pengukuran langsung daripada mengadaptasi model CRT tanpa pengetahuan sistem sebelumnya. Perbedaan penting lainnya adalah luminansi titik hitam (luminansi minimum) relatif tinggi, karena sumber cahaya latar. Karena alasan ini, transformasi yang lebih akurat antara nilai piksel input garis dan nilai

tristimulus CIE dicapai jika nilai tristimulus titik hitam tampilan diperhitungkan. Transformasi dalam Ekuasi 49 diganti dengan:

Ekuasi 437

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xr_{\max} - Xk_{\min} & Xg_{\max} - Xk_{\min} & Xb_{\max} - Xk_{\min} & Xk_{\min} \\ Yr_{\max} - Yk_{\min} & Yg_{\max} - Yk_{\min} & Yb_{\max} - Yk_{\min} & Yk_{\min} \\ Zr_{\max} - Zk_{\min} & Zg_{\max} - Zk_{\min} & Zb_{\max} - Zk_{\min} & Zk_{\min} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \\ 1 \end{bmatrix}$$

di mana  $k_{\min}$  menunjukkan titik hitam.

Pertimbangan lain saat mengkarakterisasi sistem LCD adalah ketergantungan sudut pandang layar. Oleh karena itu, pengukuran bergantung pada sudut - diambil dari sumbu tegak lurus ke tampilan, tetapi juga untuk sudut lain secara terpisah - dan harus dilakukan dengan kolorimeter yang memiliki area baca (apertur) yang sangat kecil. Kolorimeter semacam itu biasanya dirancang khusus untuk pengukuran LCD. Terakhir, keseimbangan abu-abu LCD untuk input  $R = G = B$  relatif buruk, begitu juga dengan keteguhan kromatisitas tampilan. Model yang mengkompensasi kurangnya keteguhan kromatisitas memperkenalkan istilah silang dalam fungsi transfer non-linier untuk menggambarkan interaksi antara saluran R, G dan B.

## Karakterisasi perangkat input digital

Berbagai metode dapat digunakan untuk karakterisasi perangkat input, seperti desktop dan scanner film. Ini termasuk penggunaan regresi linier atau polinomial untuk mendapatkan matriks transformasi warna, pembuatan LUT dengan interpolasi antara titik yang diukur, pemodelan konsentrasi pewarna, dan jaringan saraf. Pada bagian ini karakterisasi menggunakan regresi dibahas. Metode ini membutuhkan peralatan yang relatif sederhana dan target warna masukan. Karakterisasi scanner menggunakan regresi terdiri dari:

- Abu-abu menyeimbangkan sinyal scanner red, green, dan blue, yaitu dengan mengatur  $R = G = B = f(Y)$  untuk tambalan netral; di sini Y adalah luminansi relatif patch. Langkah ini tidak wajib.
- Mendapatkan matriks 3 x m melalui regresi polinomial ke sampel yang dipilih dengan spesifikasi warna yang diketahui di kedua sumber (CIE XYZ) dan ruang warna tujuan (nilai  $R'$ ,  $G'$ ,  $B'$  seimbang abu-abu). Matriks diimplementasikan untuk transformasi warna antara respons perangkat dan koordinat CIE.

Metode regresi polinomial untuk karakterisasi perangkat dibatasi pada satu set pewarna (paling baik untuk dikarakterisasi untuk pewarna film/cetak tertentu), iluminan dan pengamat. Jadi, selama karakterisasi, disarankan untuk menggunakan bagan uji yang diproduksi pada media fotografi yang sama dengan media yang akan dipindai nanti. Seperti yang ditunjukkan sebelumnya di bagian 'Model numerik', jumlah sampel warna pelatihan, n, harus sama dengan atau lebih besar dari jumlah suku polinomial, m.

Target uji standar seperti ANSI IT8.7 (Gambar 51) dapat digunakan untuk tujuan tersebut. Target memberikan pemetaan seragam dalam ruang warna CIELAB dan mencakup ramp abu-abu 24 langkah. Jumlah serta letak sampel pelatihan pada sasaran penting dalam karakterisasi. Set pelatihan dapat terdiri dari setengah jumlah sampel warna pada target; ini harus menutupi ruang CIELAB media pemindaian secara seragam. Jadi, set pelatihan dapat terdiri dari setiap sampel lain yang sesuai dengan target. Pengukuran dari target dilakukan dengan spektrofotometer refleksi (atau transmisi untuk target film) untuk mendapatkan nilai tristimulus

CIE XYZ asli untuk set warna pelatihan. Pengukuran dilakukan untuk iluminan standar dan pengamat kolorimetri CIE pilihan.

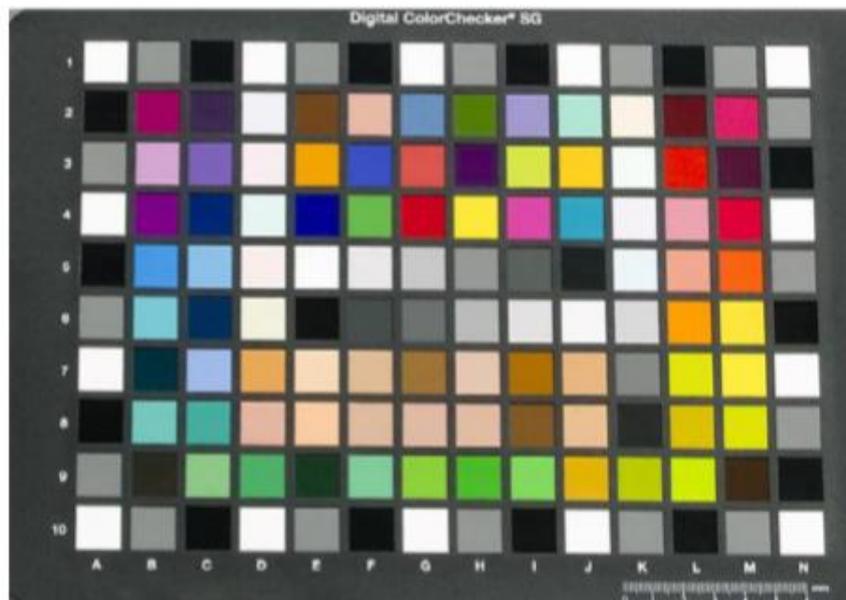
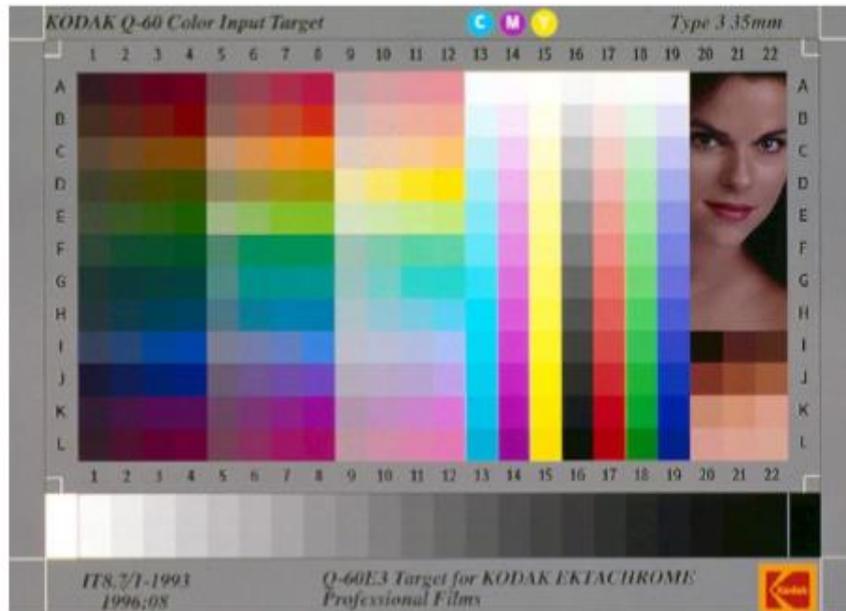
Target dipindai menggunakan pengaturan scanner yang berfungsi dengan baik (misalnya resolusi optik,  $\gamma = 1$ ). Pemilihan otomatis titik putih dan hitam serta eksposur otomatis harus dihindari. Ini harus disetel secara manual saat pra-pemindaian target dan dijaga agar tetap konstan selama pemindaian.

Nilai RGB seimbang abu-abu ( $R'$ ,  $G'$ ,  $B'$ ) diperoleh dengan:

1. Mengukur respons scanner RGB untuk patch netral target. Hubungan antara luminansi input relatif dan respons scanner dapat digunakan untuk membangun tiga LUT yang digunakan pada langkah berikutnya. Ini dapat dicapai dengan menggunakan interpolasi linier atau spline.
2. Menerapkan tiga LUT untuk melinierisasi sehubungan dengan masukan pencahayaan dan respons scanner RGB.

Target pengujian seimbang abu-abu kemudian diukur. Nilai  $R'$ ,  $G'$ ,  $B'$  untuk set sampel pelatihan diperoleh dengan merata-ratakan sejumlah piksel dari area pusat setiap sampel.

Matriks transformasi warna,  $3 \times m$ , dapat diturunkan dengan menerapkan Ekuasi 419 dan 420.  $Q$  dalam Ekuasi 419 adalah matriks variabel independen berukuran  $n \times m$  ( $m$  adalah jumlah suku polinomial, untuk  $n$  jumlah sampel pelatihan; lihat contoh pada Ekuasi 416-418 untuk  $m = 4$ ). Contoh polinomial dengan jumlah suku yang berbeda diberikan pada Tabel 43. Istilah  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , dll. Dalam tabel mewakili nilai piksel seimbang abu-abu ( $R'$ ,  $G'$ ,  $B'$ ) atau/dan produknya ( $R' \cdot G'$ ;  $R' \cdot B'$ ;  $G' \cdot B'$ ;  $R' \cdot G' \cdot B'$ , dll.).  $X$  dalam Ekuasi 418 dan 419 adalah vektor dengan ukuran  $n$  variabel dependen (baik  $X$ ,  $Y$ , atau  $Z$ ), yang berisi nilai tristimulus yang sesuai untuk  $n$  sampel pelatihan. Akhirnya,  $AX$ ,  $AY$  dan  $AZ$  adalah vektor koefisien turunan yang sesuai ( $1 \times m$ ) yang digunakan untuk membangun matriks koreksi warna  $3 \times m$ ,  $M$  (Lihat ekuasi 430 dan 421)



**Gambar 51** Target Kodak Q60 berdasarkan desain ANSI IT8.7 (atas) dan Digital Color Checker SD (bawah) yang digunakan untuk karakterisasi scanner dan kamera digital.

Implementasi matriks dicapai dengan menggunakan ekuasi dari Ekuasi 422. Dalam ekuasi ini matriks transformasi  $3 \times 4$  diturunkan menggunakan regresi polinomial dengan  $m = 4$ .

Performa matriks turunan dapat dinilai dengan memeriksa perbedaan warna antara yang asli dan yang diperkirakan dari nilai CIELAB transformasi, untuk set pelatihan dan satu set pengujian sampel warna. Yang terakhir mungkin berupa bercak warna di target pengujian yang tidak digunakan dalam regresi. Gambar 48 mengilustrasikan distribusi perbedaan warna  $\Delta E^*_{ab}$  untuk pelatihan dan serangkaian warna pengujian, ketika menerapkan matriks warna  $3 \times 14$  untuk mengkarakterisasi respons scanner film. Gambar 49 menunjukkan bagaimana perbedaan warna ini bervariasi menurut kecerahan masing-masing sampel warna

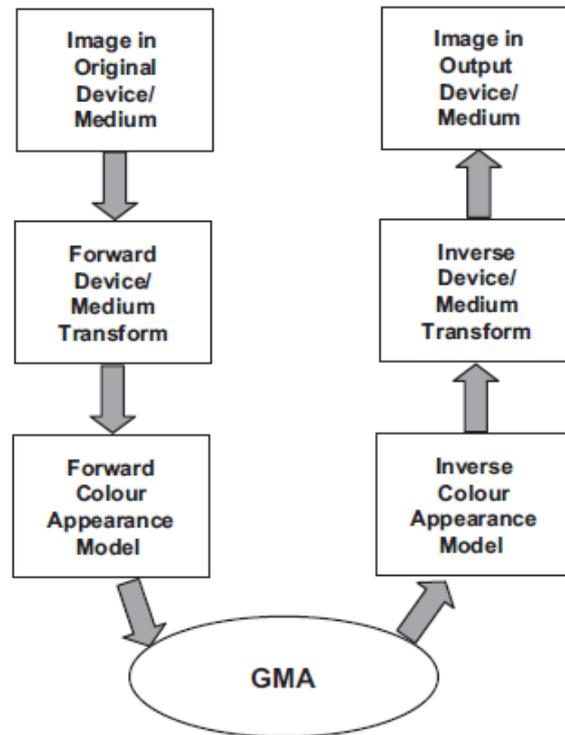
Polinomial terbaik yang digunakan untuk menandai perangkat input bervariasi dengan karakteristik perangkat dan keakuratan pengukuran. Seperti disebutkan sebelumnya, tanggapan perangkat masukan biasanya tidak terkait secara linier dengan kolorimetri CIE; sehingga polinomial yang lebih tinggi dari orde satu mungkin diperlukan dalam regresi untuk mendapatkan matriks yang sesuai untuk transformasi warna. Ekuasi transformasi orde tinggi dapat mengembalikan kesalahan kolorimetrik yang lebih rendah untuk set pelatihan sampel warna, tetapi dapat menyebabkan kinerja yang buruk saat diterapkan ke data independen seperti set warna pengujian atau data gambar yang dipindai. Ini adalah hasil dari penyesuaian derau yang ada dalam pengukuran selain tren sistematis yang diinginkan.

Untuk transformasi warna terbalik, yaitu dari CIE XYZ ke scanner RGB, regresi polinomial dapat digunakan untuk mendapatkan matriks koefisien baru. Regresi dalam hal ini diterapkan pada data tristimulus (variabel independen) dan (satu per satu) ke nilai R, G, B (variabel dependen) untuk menghitung sekumpulan koefisien baru. Polinomial turunan tidak akan memetakan titik sampel ke nilai aslinya yang tepat.

Kerangka karakterisasi kamera foto digital sama dengan kerangka kerja scanner. Karakterisasi kamera, bagaimanapun, lebih ambigu, terutama karena kondisi pencahayaan selama pengambilan gambar seringkali tidak terkontrol dan dapat sangat bervariasi. Dianjurkan untuk mengkarakterisasi kamera untuk satu set iluminan umum, atau mengkarakterisasi satu saja dan menggunakan pengaturan white balance kamera untuk mengatur titik putih yang sama dengan iluminan tersebut. Bagan uji serupa dengan yang digunakan untuk mengkarakterisasi scanner dapat digunakan. Iluminasi yang seragam harus dipastikan selama perekaman target, dengan menyetel geometri tampilan/penerangan dari 0/45. Karena lensa kamera tidak memancarkan cahaya secara seragam di seluruh frame pengambilan, kartu abu-abu mungkin direkam sebelum karakterisasi untuk melacak ketidakseragaman spasial, yang nantinya dapat dikoreksi. Berguna untuk mengambil sampel densitas kartu flash pada jarak yang ditentukan, karena kartunya sendiri mungkin tidak sepenuhnya seragam.

## **Mapping Gamut**

Kisaran warna sistem gambar digital yang dapat direproduksi bervariasi antara perangkat, media, dan kondisi tampilan. Oleh karena itu, pemetaan colour gamut merupakan langkah penting dari alur kerja pencitraan. Pemetaan gamut berhubungan dengan penyesuaian warna perangkat input, atau gambar yang disandikan, agar sesuai dengan rentang warna perangkat reproduksi dan media. Ini dilakukan melalui algoritma pemetaan gamut (GMA), yang tujuannya berbeda-beda sesuai aplikasi.



**Gambar 52 GMA**

Faktor utama yang mempengaruhi performa GMA adalah karakteristik sistem asli dan reproduksi, ruang warna tempat pemetaan gamut berlangsung, dan karakteristik gambar yang akan dipetakan.

Pemetaan gamut dilakukan pada gambar yang berasal dan direproduksi pada perangkat yang dikarakterisasi. Keberhasilan karakterisasi penting, karena kesalahan karakterisasi dapat terus berlanjut selama pemetaan. Gambar 52 mengilustrasikan di mana pemetaan gamut berlangsung dalam alur kerja pencitraan.

### **Tujuan mapping Gamut**

Ada banyak kemungkinan cara untuk memetakan warna dari suatu sistem ke sistem lainnya. Pilihan metode (dan GMA) didasarkan pada tujuan reproduksi warna. Cara untuk mempersempit tujuan ini adalah dengan membaginya menjadi dua kategori besar: reproduksi yang akurat dan menyenangkan. Tujuan dari reproduksi yang akurat adalah untuk mempertahankan tampilan warna dan membuatnya sedekat mungkin dengan warna gambar aslinya, sedangkan tujuan reproduksi yang menyenangkan adalah untuk mendapatkan gambar yang menyenangkan secara keseluruhan, apa pun aslinya. Untuk tujuan sistem manajemen warna ICC, empat maksud rendering telah ditentukan: persepsi, saturasi, kolorimetri relatif-media, dan kolorimetri absolut ICC. Untuk masing-masing, teknik pemetaan gamut yang berbeda digunakan. Singkatnya, untuk maksud rendering perseptual, GMA yang mempertahankan kontras gambar digunakan. Maksud rendering ini terutama dapat diterapkan pada gambar bergambar, di mana kesenangan keseluruhan dari reproduksi lebih penting daripada keakuratan kolorimetriknya. Tujuan rendering saturasi menggunakan algoritme yang menjaga kejelasan warna tetapi tidak secara wajib mempertahankan rona mereka. Dalam maksud rendering kolorimetrik relatif-media, pemetaan gamut bertujuan untuk mempertahankan kolorimetri warna dalam gamut asli tetapi menyesuaikannya dengan media white point referensi. Terakhir, untuk maksud kolorimetrik absolut, warna dalam gamut pada

keluaran diadaptasi secara kromatis sehubungan dengan masukan dan tetap tidak berubah. Dua maksud rendering pertama dapat diklasifikasikan sebagai ‘menyenangkan ‘ sedangkan dua yang kedua diklasifikasikan sebagai ‘akurat’.

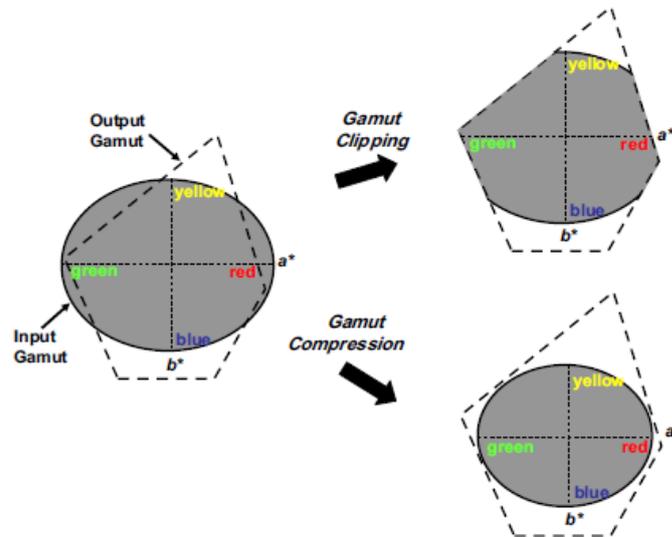
## **Teknik Mapping Gamut**

Ada dua kemungkinan untuk melakukan pemetaan gamut: perangkat-ke-perangkat, yang merupakan pemetaan tidak tergantung gambar antara gamut asli dan perangkat reproduksi; dan image-to-device, yang merupakan pemetaan yang bergantung pada gambar, menghasilkan kemungkinan distorsi sekecil mungkin pada gambar.

Implementasi pemetaan gamut membutuhkan informasi tentang gamut asli dan sistem reproduksi. Oleh karena itu, sebelum diimplementasikan, perlu dilakukan komputasi terlebih dahulu dari gamut boundary deskriptor (GBD). Ini dapat dicapai melalui model karakterisasi perangkat. Metode khusus untuk mendefinisikan gamut gambar serta gamut media tersedia. Kemudian, antar bagian antara batas nada dan garis tertentu di mana pemetaan akan dilakukan, batas nada garis, harus diidentifikasi.

Mayoritas GMA ditujukan untuk bekerja dengan atribut persepsi warna, seperti lightness, chroma, colourfulness, saturation, dan hue. Kebanyakan algoritma yang diusulkan bekerja dengan ruang warna CIELAB atau CIELUV dan dengan demikian pemetaan dilakukan dalam dimensi ruang tersebut. Namun, representasi rona pada ruang-ruang ini tidak selalu berkorelasi baik dengan rona yang dirasakan, terutama di wilayah biru. Baru-baru ini, ruang tampilan warna CIE dan koordinatnya telah digunakan untuk pemetaan.

GMA secara luas dapat dibagi menjadi dua jenis: klipung gamut dan kompresi gamut. Algoritme klipung gamut hanya mengubah warna yang terletak di luar gamut reproduksi (Gambar 53). Pemotongan gamut dapat dilakukan sebelum atau setelah kompresi ringan (lihat nanti). Metode ini meminimalkan pergeseran warna dan mempertahankan (sebanyak mungkin) saturasi gambar, tetapi beberapa detail gambar dapat hilang karena banyak warna mungkin dipetakan ke titik yang sama pada batas reproduksi. Algoritme kompresi gamut mengubah posisi semua warna dari gamut asli, sehingga dapat mendistribusikan perbedaan yang disebabkan oleh ketidakcocokan gamut di seluruh rentang warna. Metode ini bertujuan untuk menjaga hubungan relatif antar warna. Oleh karena itu, detail gambar tidak selalu hilang di batas gamut. Namun, artefak yang tidak diinginkan lainnya dapat disebabkan karena perubahan warna dalam gamut (misalnya penurunan saturasi yang tidak diinginkan).



**Gambar 53** Pemotongan gamut vs. kompresi gamut.

Sebagian besar GMA yang ada dimulai dengan pemetaan cahaya. Reproduksi yang baik harus mempertahankan nada bagian utama dalam gambar, sedangkan nada bagian yang kurang penting harus dikompresi. Ada berbagai jenis teknik pemetaan kecerahan, seperti pemotongan, pemotongan lembut, kompresi linier, dan penggunaan fungsi sigmoid (mirip dengan kurva karakteristik), yang tidak hanya mempertahankan kontras secara keseluruhan tetapi juga bayangan di area gambar yang gelap. Gambar 54 menunjukkan berbagai jenis kompresi ringan.

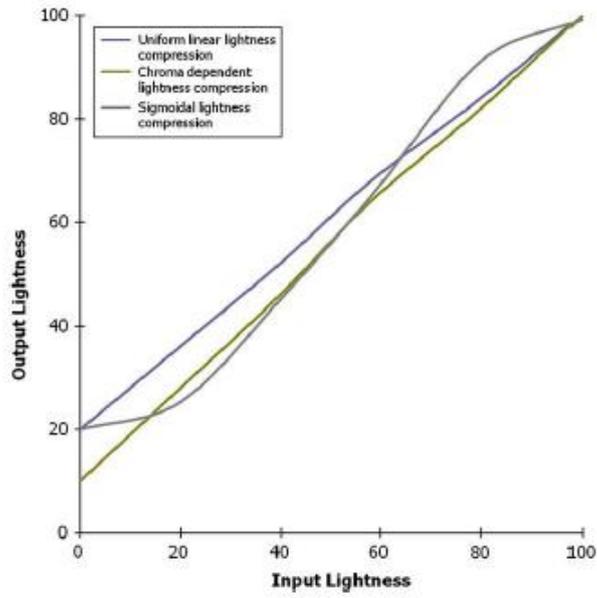
Pemetaan kroma dapat dicapai melalui fungsi linier atau nonlinier (seperti fungsi sigmoid dan lutut). Fungsi penskalaan non-linier sigmoid memetakan chroma di tiga wilayah: untuk wilayah chroma yang lebih rendah, kolorimetri dan kontras low-end dipertahankan dengan mengatur nilai input ke nilai output secara langsung; untuk wilayah tengah, kroma dinaikkan untuk mengatasi hilangnya kontras kromatik yang terkait dengan GMA; untuk wilayah kromatik tinggi, chroma out-of-gamut dikompresi menjadi gamut tujuan.

Akhirnya, karena toleransi sistem visual manusia terhadap perubahan warna sangat kecil, kebanyakan GMA bertujuan untuk mempertahankan warna sebanyak mungkin, tetapi ada beberapa yang memprioritaskan pengurangan kehilangan kroma.

CIE (TC8-3) merekomendasikan pedoman yang mencakup berbagai aspek evaluasi GMA, termasuk gambar uji, media, kondisi tampilan, pengukuran, penghitungan batas nada, ruang warna, dan metode eksperimental. Dua GMA saat ini direkomendasikan oleh CIE:

1. HPMDE (hue mempertahankan minimum  $\Delta E^*_{ab}$ ) menjaga warna pada perpotongan aslinya dan gamut reproduksi tidak berubah dan memodifikasi warna out-of-gamut original dengan memotongnya ke titik dalam gamut reproduksi yang menghasilkan  $\Delta E^*$  terkecil ab dalam bidang sudut rona konstan.
2. SGCK juga melestarikan warna; ia menggunakan kompresi ringan sigmoid yang bergantung pada kroma dan kompresi linier sedikit demi sedikit menuju titik puncak ringan dari gamut reproduksi.

Detail tentang algoritme ini dapat ditemukan di green dan MacDonald (2002) dan Sharma (2003).



**Gambar 54** Berbagai jenis kompresi ringan. Diagram diadaptasi dari green dan MacDonald (2002)

# Reproduksi Tone

## Teori pada Reproduksi Tone

Reproduksi nada berkaitan dengan reproduksi intensitas asli dan perbedaan intensitas, serta dengan kesan pengamat dari kuantitas ini, yaitu reproduksi kecerahan (atau kecerahan) dan kontras masing-masing. Intensitas digunakan dalam konteks ini sebagai istilah umum untuk besaran fisik yang terkait dengan sinyal atau keluaran pencitraan, seperti luminansi dan iluminasi, transmitansi, pantulan dan kerapatan, serta nilai piksel. Reproduksi nada adalah dimensi kualitas gambar yang paling penting, menjadi komponen penting dari kesan subjektif dari kesempurnaan gambar dan ketepatan reproduksi. Aspek penting lainnya dari kualitas gambar, seperti warna dan sharpness yang dirasakan, sangat dipengaruhi oleh kontras gambar dan evaluasi subjektifnya bergantung pada reproduksi nada yang optimal.

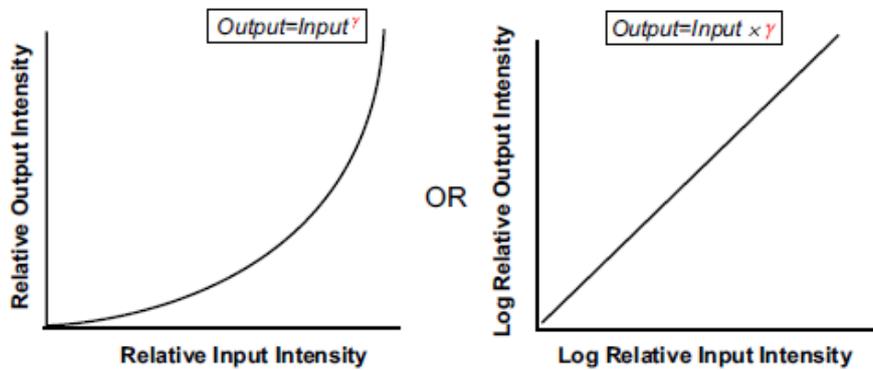
Teori reproduksi nada didirikan oleh L.A. Jones (fisikawan Amerika yang berspesialisasi dalam sensitometri) pada 1920-an dan 1930-an, yang pertama kali membedakan antara reproduksi nada obyektif dan subyektif. Istilah tersebut kemudian diresmikan oleh C.N. Nelson. Reproduksi nada obyektif mengacu pada hubungan yang diukur atau dimodelkan antara intensitas input dan output dari perangkat atau sistem pencitraan individu, atau imaging chain yang terdiri dari sejumlah sistem. Reproduksi nada subjektif, tentu saja, bergantung pada reproduksi nada obyektif tetapi juga mempertimbangkan kondisi tampilan (tingkat pencahayaan, pencahayaan latar belakang, suar, dll.) Yang sangat memengaruhi persepsi nada gambar.

## Fungsi transfer dan gamma

Hubungan antara intensitas input-ke-output dalam perangkat pencitraan atau sistem dijelaskan oleh satu atau sekumpulan fungsi transfer. Hubungan luminance-brightness dapat dianggap sebagai fungsi transfer dari sistem visual manusia (HVS). Fungsi transfer fotografi, yang dikenal sebagai kurva karakteristik, menjelaskan hubungan sigmoid antara logaritma umum keterpaparan relatif dan kerapatan yang direproduksi pada film atau kertas foto. Perhatikan bahwa kerapatan juga merupakan kuantitas logaritmik, yang didefinisikan sebagai log<sub>10</sub> dari kebalikan dari transmisi film atau reflektansi cetak (Ekuasi 8.4 dan 8.7). didedikasikan untuk sensitometri dan kurva karakteristik. Nanti kita membahas secara rinci fungsi transfer perangkat pencitraan input dan output yang digunakan dalam gambar digital serta fungsi transfer, seperti fungsi konversi opto-elektronik (OECF), dari berbagai sistem pengkodean.

Fungsi transfer biasanya diplot dalam unit lineare linear, logelog atau linear-log (sehubungan dengan luminansi). Kurva karakteristik fotografi - fungsi transfer pencitraan paling awal - diplot dalam unit logelog, seperti disebutkan di atas. Kemiringan (atau gradien) dari bagian garis lurus dari kurva karakteristik disebut gamma (dilambangkan dengan huruf Yunani  $\gamma$ ) dan ini adalah deskripsi kontras bahan fotografi di bawah serangkaian kondisi perkembangan tertentu. Fungsi transfer perangkat penangkap gambar digital dan sistem tampilan biasanya diplot dalam satu baris adalah unit linier (misalnya, luminansi vs. nilai piksel dalam tampilan), tetapi tidak secara eksklusif. Seperti yang akan kita lihat nanti, hubungan input-output sistem semacam itu sering dijelaskan oleh fungsi transfer daya, yaitu  $\text{output} = \text{input}^{\text{eksponen}}$ , di mana 'eksponen' mewakili gamma, deskripsi kontras pencitraan dengan arti yang mirip dengan gamma fotografis. Penting untuk dicatat bahwa hubungan daya tampak linier ketika diplot dalam unit  $\log_{10}$  vs.  $\log_{10}$ . Ini menyiratkan bahwa *kemiringan garis lurus dari fungsi transfer*

yang direpresentasikan dalam satuan log-log sama dengan eksponen dari fungsi transfer yang direpresentasikan dalam garis adalah satuan linier. Oleh karena itu, secara matematis, gamma memiliki arti yang sama baik dihitung dari kemiringan fungsi transfer yang diplot dalam logelog, atau dari eksponen fungsi transfer yang diplot dalam satuan linier. Konsep ini diilustrasikan pada Gambar 55.



**Gambar 55** Gamma sebagai eksponen dalam fungsi transfer diplot dalam ruang linier linier (kiri) atau sebagai kemiringan fungsi transfer diplot dalam ruang log-log (kanan).

### Fungsi transfer keseluruhan dan gamma keseluruhan

Hubungan antara intensitas pemandangan asli dan intensitas gambar yang direproduksi mencirikan reproduksi nada imaging chain dan dipengaruhi oleh karakteristik nada setiap komponen dalam rantai tersebut. Fungsi transfer keseluruhan dari imaging chain yang terdiri dari lebih dari satu komponen pencitraan adalah produk dari fungsi transfer individu dari komponen yang terpisah, seperti yang diilustrasikan dalam contoh pada Gambar 56. Ini benar asalkan semua fungsi transfer individu diplot dalam ruang matematika yang sama (yaitu log-log, lineare linear) dan diekspresikan menggunakan intensitas relatif. Gamma keseluruhan dari imaging chain dalam contoh ini karena itu dapat diturunkan dengan menghitung produk dari komponen gamma (Ekuasi 55), atau sama-sama dengan menurunkan gamma dari fungsi transfer keseluruhan.

Ekuasi 55

$$\gamma_O = \gamma_P \times \gamma_S \times \gamma_C \times \gamma_D$$

di mana subskrip O, P, S, dan D merujuk ke sistem keseluruhan, cetakan fotografis, scanner, dan tampilan masing-masing.  $\gamma_C$  adalah jumlah koreksi gamma, yang dapat diterapkan untuk menyesuaikan keseluruhan gamma ke nilai yang diinginkan. Koreksi gamma dapat dilakukan dalam perangkat lunak pencitraan, diterapkan selama pemindaian atau dapat menjadi fungsi bawaan pada kamera video dan digital.

Istilah koreksi gamma dipicu oleh industri televisi dan awalnya mengacu pada modifikasi sinyal kamera video yang diperlukan untuk mengkompensasi distorsi nada yang diperkenalkan oleh sistem tampilan tabung sinar katoda (CRT) non-linearitas. Dalam kasus khusus ini, koreksi gamma dicapai dengan menerapkan fungsi transfer invers (tampilan) ke sinyal asli untuk mendapatkan gamma sistem keseluruhan yang sama dengan satu:

Ekuasi 56

$$V' = V^{1/\gamma_D}$$

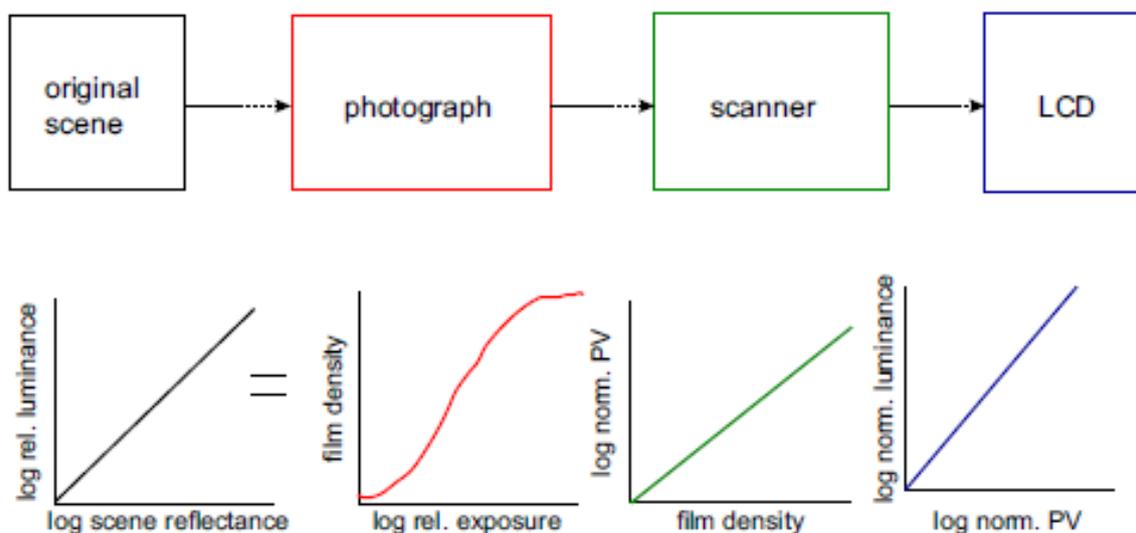
di mana  $V'$  adalah sinyal video yang dikoreksi,  $V$  adalah sinyal video asli dan  $\lambda D$  adalah eksponen fungsi daya yang memodelkan karakteristik transfer tampilan.

Ekuasi 56 adalah penyederhanaan dari kasus sistem nyata, karena mengasumsikan bahwa tampilan CRT diatur dengan sempurna dan dengan demikian dapat dimodelkan dengan fungsi daya tunggal - seperti yang akan kita lihat nanti, secara tegas ini tidak benar. Selain itu, gamma untuk transmisi sinyal televisi lebih besar dari  $1/\gamma D$  dan dengan demikian keseluruhan gamma lebih besar dari satu untuk mengimbangi lingkungan tampilan redup yang umum untuk menonton televisi (lihat bagian reproduksi nada subjektif di bawah). Misalnya, jika  $\gamma D$  adalah 2,5 seperti dalam kasus sistem televisi Definisi Tinggi (HDTV), koreksi gamma efektif mendekati 0,5 (sedangkan  $1/2,5 = 0,4$ ) dan secara keseluruhan gamma sama dengan 1,25.

Seperti yang akan kita lihat nanti, pada kenyataannya fungsi transfer pencitraan jarang merupakan fungsi daya murni atau linier sempurna. Koreksi gamma efektif mengacu pada eksponen fungsi daya yang mendekati fungsi transfer sistem secara keseluruhan dan biasanya sedikit berbeda dengan eksponen aktual yang diterapkan dalam koreksi gamma.

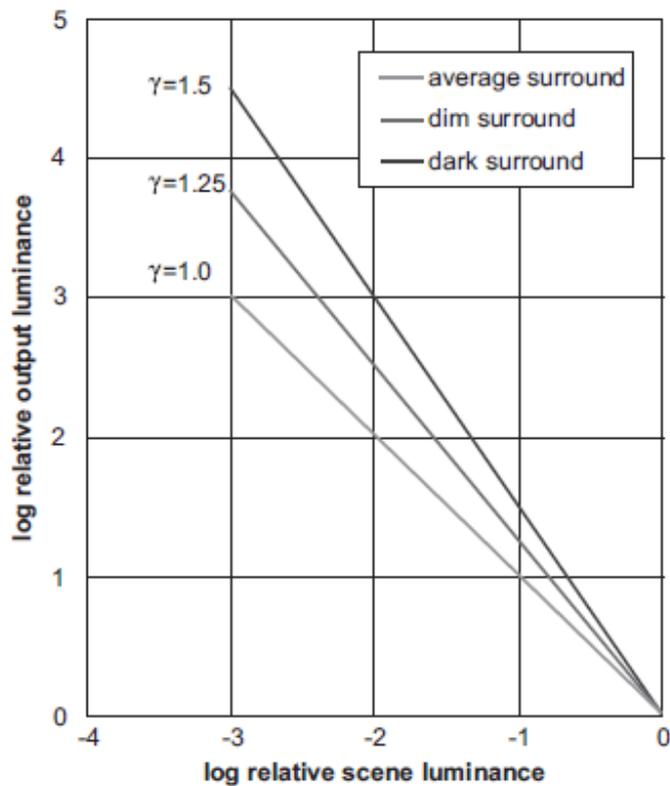
### Reproduksi Tone subjektif, gamma optimal dan kondisi tampilan

Dalam reproduksi nada objektif, nilai gamma terukur yang lebih tinggi dari 1,0 menunjukkan kontras yang lebih tinggi dalam reproduksi daripada pemandangan aslinya; nilai gamma yang lebih rendah dari 1,0 menunjukkan lebih rendah dari kontras aslinya; gamma sama dengan 1.0 menunjukkan pemandangan dan kontras reproduksi yang sama. Sementara tujuan reproduksi nada objektif adalah reproduksi satu-ke-satu dari intensitas input relatif, yaitu reproduksi luminansi relatif, tujuan reproduksi nada subjektif adalah untuk memiliki reproduksi kecerahan linier relatif terhadap putih, yaitu reproduksi kecerahan linier persepsi cahaya bergantung pada intensitas relatif dari stimulus dan kondisi penglihatan. Lebih khusus lagi, kontras yang dirasakan menurun ketika intensitas stimulus, latar belakang beradaptasi dan lingkungan berkurang. Dengan demikian, reproduksi nada optimal hanya dapat dipertimbangkan jika kondisi tampilan diketahui. Selain itu, proyeksi, pencetakan atau dan tampilan flare menurunkan kontras gambar (dan juga keseluruhan tampilan gamma), terutama di daerah gambar yang gelap. Untuk mengimbangi 'efek suar'. sistem pencitraan yang ideal harus memiliki gamma yang secara bertahap menurun pada ujung cahaya dari fungsi transfernya.



**Gambar 56** Reproduksi nada imaging chain.

Nilai gamma optimal untuk reproduksi nada subjektif bervariasi antara 1.0 dan 1.5 (Gambar 57). Misalnya, cetakan refleksi yang biasanya dilihat dalam kondisi tampilan terang memerlukan gamma tampilan keseluruhan sekitar 1,0, tetapi gamma objektif keseluruhan mendekati 1,1 untuk mengimbangi suar. Ini dicapai dengan memiliki, misalnya, gamma negatif mendekati 0,90 dan gamma cetak 1,2. Gamma kira-kira 1,25 adalah optimal untuk transparansi televisi dan lembar potong yang dilihat di lingkungan redup, sedangkan gamma kira-kira 1,5 adalah optimal untuk transparansi yang diproyeksikan dalam gelap dan gambar bergerak. Jadi, slide dan film gambar bergerak dirancang untuk memiliki kontras tinggi, biasanya sebuah gamma 1,6 untuk mengkompensasi juga flare. Perhatikan bahwa nilai gamma keseluruhan 1,25 dan 1,5 untuk lingkungan redup dan gelap adalah optimal untuk intensitas pencitraan yang cukup tinggi dalam kasus film dan densitas cetak. Untuk densitas yang lebih rendah, nilai gamma yang sedikit lebih rendah mungkin lebih sesuai. Gambar komputer dilihat lebih terang daripada pengaturan kantor pengaturan televisi - dan oleh karena itu target gamma keseluruhan untuk melihat gambar digital yang ditampilkan adalah antara 1,1 dan 1,15.

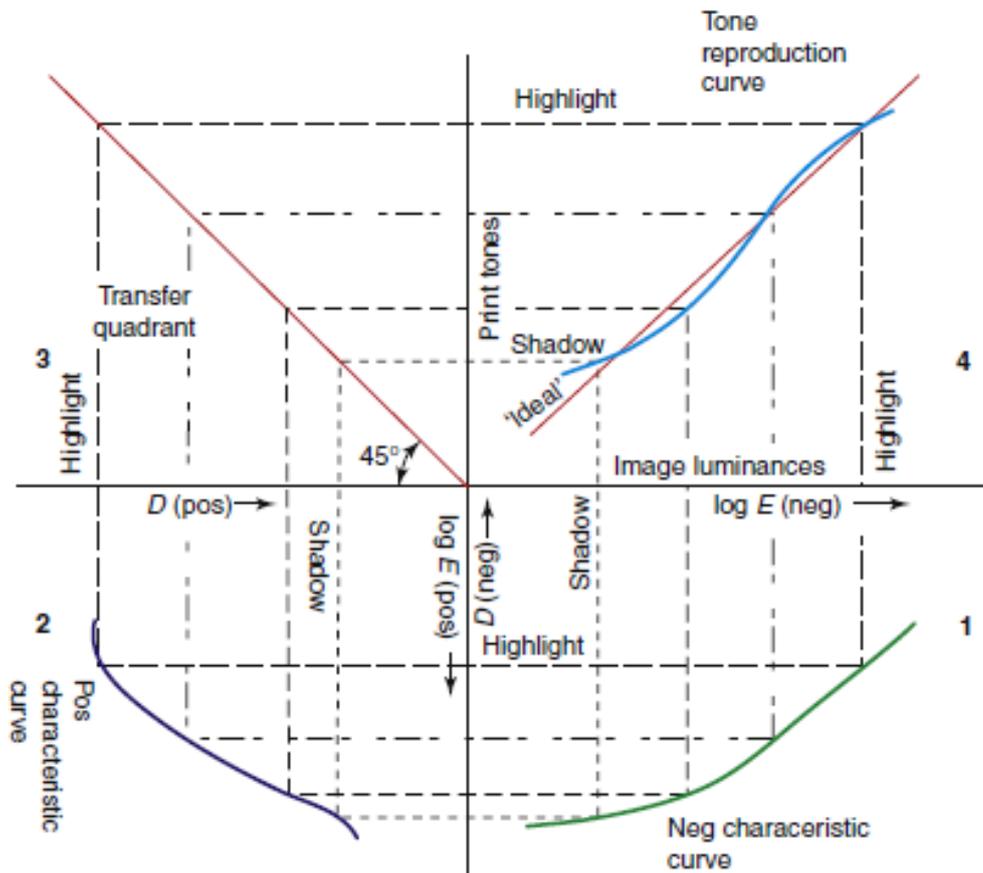


**Gambar 57** Hubungan antara pencahayaan relatif log dan pencahayaan keluaran relatif log yang diperlukan untuk mencapai reproduksi nada yang optimal.

### Diagram Kuadran

Kondisi tampilan dapat dimodelkan dengan fungsi transfer terpisah yang termasuk dalam imaging chain. Ide ini pertama kali diwakili dalam *diagram reproduksi nada fotografi* atau *diagram kuadran*, yang diperkenalkan oleh L.A. Jones, yang bertujuan untuk memodelkan reproduksi nada dari semua tahapan dalam imaging chain dalam satu diagram. Diagram ini terdiri dari empat kuadran, yang merupakan grafik yang saling terkait mewakili setiap tahap proses fotografi, yang berjalan searah jarum jam. Keluaran data dari grafik pada kuadran pertama dipindahkan sebagai input pada grafik pada kuadran berikutnya, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 58. Grafik representatif di kuadran pada diagram adalah:

1. Kurva karakteristik material dan perkembangan negatif
2. Kurva karakteristik material positif
3. Jalur transfer
4. Karakteristik reproduksi nada keseluruhan dicapai dengan langkah 1, 2 dan 3.



**Gambar 58** Diagram kuadran yang menjelaskan reproduksi nada dari imaging chain berbasis film. Dari Bilissi (2003)

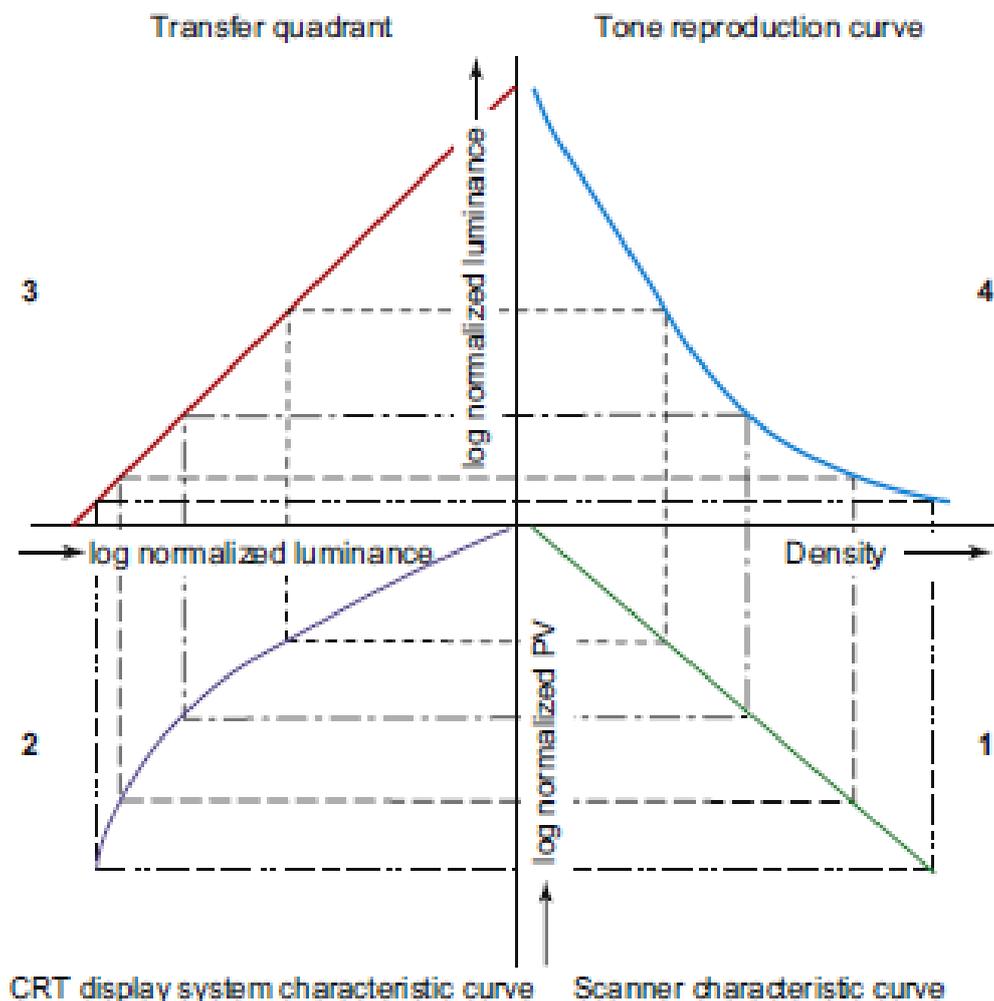
Garis transfer di kuadran ketiga dapat digunakan untuk merepresentasikan kondisi menonton. Garis lurus sederhana pada 45 (kemiringan = 1.0) dapat mewakili tampilan cetakan dalam kondisi yang mirip dengan yang digunakan saat mengukur cetakan dengan densitometer refleksi. Pengaturan tampilan yang berbeda akan menghasilkan garis yang berbeda, tergantung pada bagaimana densitas cetakan akhir dilihat oleh pengamat.

Pada diagram kuadran, titik-titik dari kurva karakteristik pertama dalam proses reproduksi dipindahkan dari kuadran ke kuadran melalui kurva karakteristik setiap tahap dalam proses tersebut untuk menghasilkan kurva reproduksi nada secara keseluruhan. Jadi, idenya pada dasarnya sama dengan yang disajikan pada Gambar 56. Diagram kuadran juga dapat digunakan untuk merepresentasikan karakteristik nada dari rantai gambar digital (seperti yang diilustrasikan pada Gambar 59), misalnya sistem koreksi/tampilan kamera/gamma. Untuk mendapatkan kurva reproduksi nada yang diinginkan, koreksi gamma yang diperlukan untuk kompensasi nada dalam rantai digital dapat diturunkan dari garis transfer.

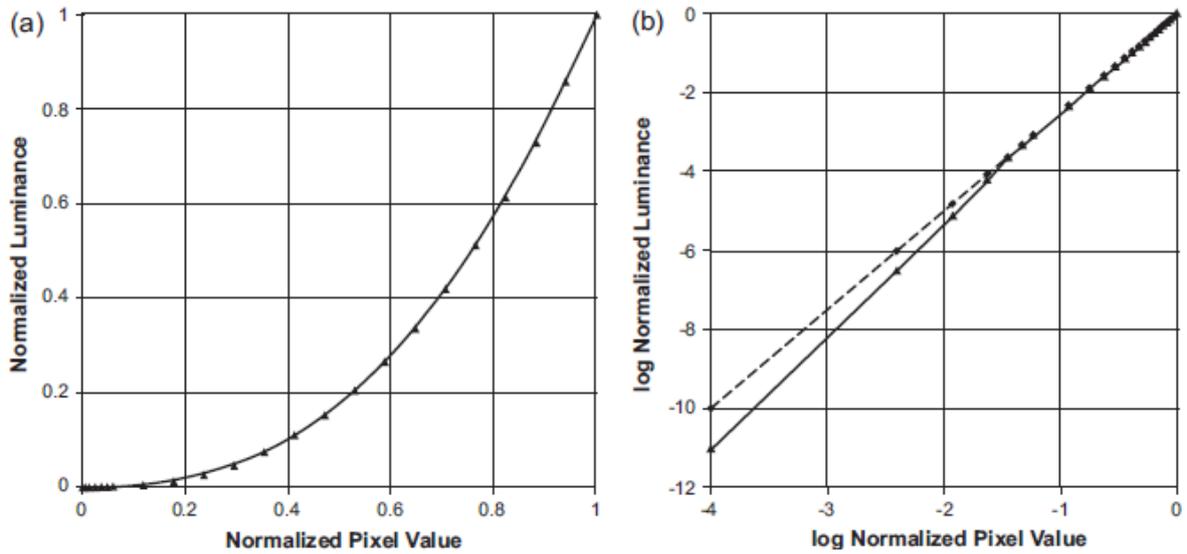
# Reproduksi tone perangkat pencitraan dan sistem pengkodean gambar

## 1. Fungsi transfer display CRT

Evaluasi reproduksi nada sistem tampilan CRT didasarkan pada hubungan antara tegangan input dalam mV (atau nilai piksel input dalam buffer frame, asalkan berhubungan secara linier dengan tegangan) dan luminansi keluaran dalam  $\text{cdm}^{-2}$  yang diproduksi pada CRT pelat muka. CRT secara inheren non-linier: luminansi keluaran adalah fungsi nonlinier dari tegangan masukan. Fungsi transfer CRT secara kasar dapat dijelaskan oleh fungsi kekuatan yang mematuhi apa yang oleh fisikawan disebut hukum pangkat 5/2 (lihat Gambar 60). Kebanyakan CRT memiliki nilai numerik gamma - yang dijelaskan oleh eksponen fungsi daya - mendekati 2,5.



**Gambar 59** Diagram kuadran yang menjelaskan reproduksi nada dari rantai gambar digital. Dari Bilissi (2003)



**Gambar 60** Fungsi transfer terukur dari tampilan CRT dalam ruang linier - linier (a) dan log-log (b) yang direpresentasikan dengan garis padat. Garis putus-putus di (b) mewakili fungsi transfer dengan  $\gamma = 2.5$ ,  $offset = 0$  dan  $gain = 1$ .

Paling umum, fungsi transfer CRT dijelaskan oleh model gamma yang dijelaskan di bawah ini:

Ekuasi 57

$$L = o + gV^{\gamma D}$$

di mana:  $L$  adalah luminansi yang dinormalisasi (diperoleh dengan menghitung  $(L_n - L_{min}) / (L_{max} - L_{min})$ , dengan  $L_n$  mewakili tingkat luminansi  $n$ );  $V$  adalah tegangan yang dinormalisasi (atau nilai piksel yang dinormalisasi dalam kasus sistem digital);  $o$  adalah sistem offset, yang dikontrol oleh pengaturan kecerahan pada layar;  $g$  adalah penguatan sistem, dikontrol oleh pengaturan kontras pada tampilan; dan  $\gamma D$  adalah deskriptor nonlinier dalam kontras gambar yang ditampilkan.

Secara teoritis, pada tampilan yang disesuaikan dengan benar, offset dan penguatan diatur sedemikian rupa sehingga masing-masing memiliki nilai 0 dan 1. Hal ini membuat luminansi keluaran sama dengan tegangan masukan yang dinaikkan ke daya  $\gamma D$ , yang pada gilirannya menjadi satu-satunya penjelas dari reproduksi nada tampilan.

Pada kenyataannya, offset hampir tidak pernah tepat 0 dan penguatan tidak pernah sama persis dengan 1, sehingga fungsi transfer tampilan yang diukur tidak dapat dimodelkan hanya dengan fungsi daya lurus. Ini terbukti pada Gambar 60, di mana kita melihat dalam ruang log-log (di mana pencahayaan yang sangat rendah lebih baik dijelaskan) penyimpangan respons CRT yang diukur dari kurva daya lurus.

Apa yang Poynton (2003) sebut sebagai ‘kebetulan yang luar biasa ‘ adalah bahwa fungsi pencahayaan - pencahayaan yang menggambarkan sensitivitas kecerahan sistem visual manusia hampir kebalikan dari fungsi transfer CRT: kecerahan kira-kira pencahayaan yang dinaikkan ke pangkat 0,33. Kebetulan ini memiliki implikasi dalam pencitraan : fungsi yang dikoreksi gamma diimplementasikan dalam kamera video, sistem pengkodean gambar digital dan perangkat input digital pada dasarnya meniru fungsi transfer visual. Ini menguntungkan dalam hal kualitas gambar, karena untuk meminimalkan persepsi noise gambar, disarankan

untuk menggunakan kode yang seragam secara persepsi. (Hal ini terutama berlaku jika pengkodean dilakukan dalam kedalaman bit yang lebih rendah dari 9 bit per piksel.) Tegangan kamera video yang dikoreksi gamma (Ekuasi 56), serta sinyal yang dikoreksi di sebagian besar sistem pengkodean (lihat nanti), adalah input yang seragam secara persepsi.

Model yang lebih rumit daripada fungsi gamma digunakan untuk menggambarkan non-linearitas CRT dengan lebih akurat. Penerapannya umumnya lebih kompleks. Salah satu yang diimplementasikan secara luas adalah model GOG (gain, offset, gamma), yang dijelaskan dalam Ekuasi 58 untuk saluran merah, di mana gambar CRT dijelaskan dalam kaitannya dengan pancaran spektralnya. Ekspresi serupa menggambarkan saluran hijau dan biru.

Ekuasi 58

$$L_{\lambda,r} = \begin{cases} L_{\lambda,r,max} \left( k_{g,r} \left( \frac{LUT_r(d_r)}{2^N - 1} \right) + k_{o,r} \right)^{\gamma_r} \\ \left( k_{g,r} \left( \frac{LUT_r(d_r)}{2^N - 1} \right) + k_{o,r} \right) \geq 0 \\ \left( k_{g,r} \left( \frac{LUT_r(d_r)}{2^N - 1} \right) + k_{o,r} \right) < 0 \end{cases}$$

$L_{\lambda, r, max}$  mendefinisikan pancaran spektral maksimum dari saluran merah (r) untuk pengaturan CRT tertentu, LUT mewakili tabel pencarian video dan N adalah jumlah bit dalam konverter digital-ke-analog (DAC). Konstanta  $k_{g,r}$  dan  $k_{o,r}$  dirujuk sebagai penguatan sistem dan offset masing-masing, dan  $\gamma_r$  adalah eksponen yang menjelaskan non-linearitas bawaan CRT antara tegangan video dan arus berkas elektron yang mengenai pelat muka.  $L_{\lambda,r}$  adalah pancaran spektral yang dihasilkan pada pelat muka CRT. Karena pancaran spektral bergantung pada pengontrol tampilan grafis dan CRT aktual, Ekuasi 58 mencakup komponen umum untuk semua tampilan CRT yang dikontrol komputer, seperti DAC dan video LUT, dan dengan demikian mencirikan ‘sistem tampilan’ secara keseluruhan.

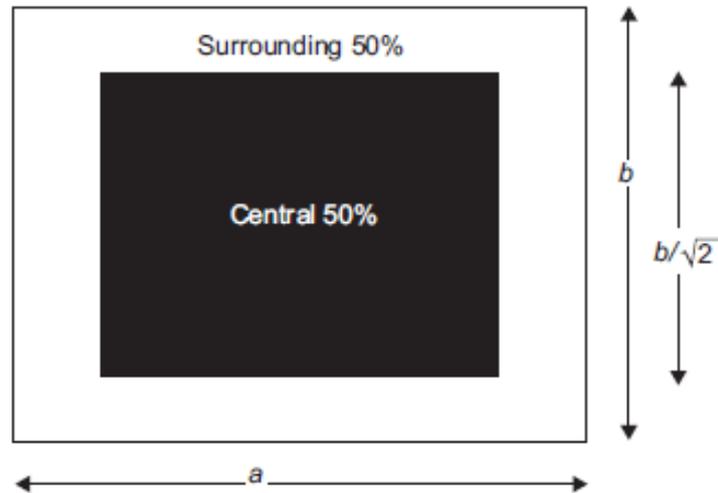
## 2. Fungsi transfer LCD (Liquid crystal display)

Teknologi tampilan yang lebih modern daripada CRT, termasuk LCD, memiliki fungsi transfer yang berbeda dengan CRT. Mereka pada dasarnya adalah perangkat linier, yaitu luminans keluaran yang dihasilkan pada pelat muka secara linier berhubungan dengan nilai piksel masukan, setidaknya untuk bagian terbesar dari rentang pencahayaan sistem. Fungsi transfer asli LCD bergantung pada struktur sel tertentu dan mode operasinya. Karena ‘kebetulan yang menakjubkan’ yang dijelaskan di atas, bagaimanapun, penting untuk kualitas gambar bahwa pengkodean data gambar dilakukan dalam non- ruang linier. Oleh karena itu, LCD menggabungkan beberapa koreksi internal (lokal) untuk menyesuaikan fungsi transfer intrinsiknya, yang sering dimodelkan dengan fungsi hiperbolik (yaitu sigmoid), untuk mentransfer fungsi yang telah distandarisasi untuk transmisi video dan pertukaran gambar. Pemetaan kembali sinyal ini dicapai melalui modifikasi tegangan atau LUT internal. Banyak LCD modern memiliki fungsi transfer yang meniru CRT dan oleh karena itu model yang dijelaskan dalam Ekuasi 57 dapat digunakan untuk mendekati karakteristik transfer dari tampilan tersebut; namun, ini tidak menggambarkannya secara akurat.

## 3. Mengukur fungsi transfer Display

Fungsi transfer tampilan diukur dalam kegelapan total, di mana layar adalah satu-satunya perangkat yang memancarkan cahaya. Layar harus dihidupkan dalam waktu yang cukup sebelum pengukuran untuk memastikan stabilisasi. CRT membutuhkan sekitar 45 menit hingga

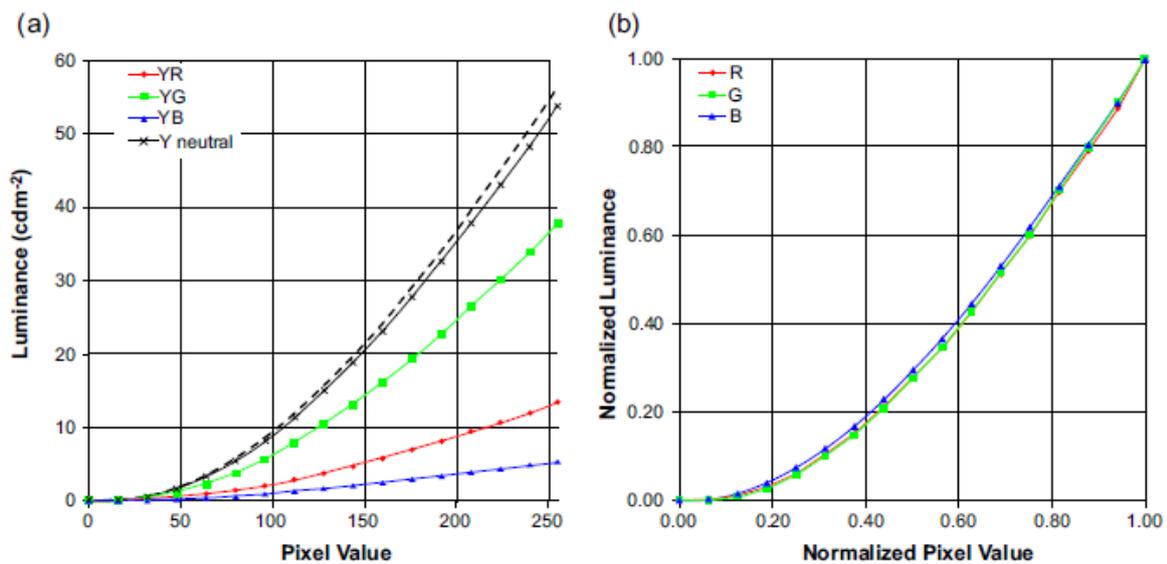
1 jam untuk menjadi stabil; LCD stabil dalam waktu maksimal 10 menit. Fotometer, fotometer spektral dan kolorimeter dapat digunakan untuk mengukur keluaran luminansi tampilan (Y) dalam candelas per meter persegi ( $\text{cdm}^{-2}$ ) dari saluran red, green, dan blue, serta respons tampilan monokrom. Spektroradiometer juga dapat digunakan untuk merekam pancaran spektral. Saat mengukur LCD, diperlukan instrumen dengan apertur yang sangat kecil; juga, pengukuran dilakukan dari sumbu yang persis tegak lurus dengan pelat muka tampilan untuk menghindari ketergantungan sudut pandang.



Gambar 61 Mengukur dan area sekitarnya pada pelat muka tampilan.

Metode pengukuran melibatkan tampilan tambalan seragam di area 50% tengah dari tampilan tempat pengukuran pencahayaan (Gambar 61). Untuk pengukuran CRT, area tampilan yang tersisa sering kali diatur untuk menampilkan warna komplementer atau luminansi tampilan rata-rata, yaitu abu-abu rata-rata untuk menghindari muatan elektron yang berlebihan. Untuk pengukuran LCD, sisa tampilan disetel ke hitam. Patch yang ditampilkan berkisar dari tampilan hitam (nilai piksel input  $d = 0$ ) hingga warna maksimum dari setiap saluran ( $\text{inputpixelvalued} = 2^N - 1$ , di mana  $N$  adalah jumlah bit per piksel yang dikirim ke kartu grafis - biasanya 8), dengan langkah yang sama di antaranya. Tujuh belas hingga dua puluh dua langkah per saluran biasanya cukup untuk mengevaluasi karakteristik transfer tampilan. Untuk mengukur respon skala abu-abu, atur input  $d_r = d_g = d_b$ , dimana  $d_r$  adalah merah,  $d_g$  hijau dan  $d_b$  saluran biru dihitung. Untuk memvariasikan respons saluran tunggal,  $d$  diatur ke nilai piksel input yang diinginkan dan nilai piksel dari dua saluran lainnya selalu disetel ke nol. Interpolasi linier atau non-linier antara titik-titik yang diukur dapat digunakan untuk memperkirakan nilai yang hilang dan membuat LUT yang cukup mewakili respons sistem untuk semua hitungan digital

input.



**Gambar 62** Fungsi transfer terukur dari sistem LCD: (a) dalam jumlah absolut; (b) dalam jumlah yang dinormalisasi. Garis putus-putus di (a) menunjukkan jumlah dari tiga tanggapan saluran warna.

Dalam tampilan aditif sempurna, respons saluran red, green, dan blue yang diukur dan dinormalisasi harus cocok. Pada kenyataannya, ini jarang terjadi. Namun, penyimpangan penting apa pun, menunjukkan masalah dengan pelacakan skala abu-abu pada tampilan, yang mengakibatkan munculnya warna di area tempat penyimpangan terjadi. Gambar 62 menunjukkan respons saluran red, green, blue dan abu-abu yang diukur dari sistem LCD sebelum (Gambar 62a) dan setelah (Gambar 62b) normalisasi. Bentuk dari fungsi transfer mirip dengan CRT. Pada Gambar 62a kita melihat bahwa respon netral tidak identik dengan jumlah dari tiga respon saluran warna, sebuah indikasi kurangnya aditif total yang juga terlihat pada respon saluran biru normalisasi yang sedikit tidak cocok.

Dalam evaluasi fungsi transfer tampilan, sering kali terdapat masalah dalam ketepatan numerik saat mengukur warna luminansi rendah - terutama pada nilai input digital nol. Hal ini disebabkan oleh dynamic range rendah pada beberapa tampilan, atau ketepatan alat ukur yang tidak memadai pada tingkat pencahayaan rendah, atau keduanya.

#### 4. Fungsi transfer perangkat akuisisi digital

Karakteristik nada dari perangkat akuisisi digital biasanya dijelaskan oleh hubungan antara pencahayaan adegan asli (sering dinyatakan dengan rasio pencahayaan seperti pantulan adegan atau cetak, atau transmisi film) dan hitungan digital yang dihasilkan. Meskipun sensor perangkat berpasangan-muatan (CCD) dan sensor semikonduktor oksida logam komplementer (CMOS) yang tergabung dalam sistem tersebut umumnya merespons secara linier untuk sebagian besar pencahayaan input, pemetaan non-linier (koreksi gamma) dari sinyal keluaran terjadi di firmware sistem atau perangkat lunak untuk meniru respons mata dan pada saat yang sama mengakomodasi non-linearitas tampilan dan membawa keseluruhan sistem gamma mendekati satu. Perhatikan bahwa file RAW digital, bagaimanapun, direproduksi dengan reproduksi nada linier (gamma 1.0) - tetapi juga dengan kedalaman bit yang cukup tinggi untuk mengkompensasi masalah yang menyertai kuantisasi linier (lihat nanti). Konverter RAW menerapkan koreksi gamma untuk mendistribusikan ulang informasi nada warna saat gambar ditampilkan.

Fungsi transfer perangkat akuisisi, juga dikenal sebagai *fungsi konversi opto-elektronik* (OECF), menjelaskan karakteristik transfer keseluruhan dari kamera atau sistem scanner (yaitu sensor, firmware, perangkat lunak) dan dapat dimodelkan secara kasar dengan kebalikan dari Fungsi transfer CRT diberikan dalam Ekuasi 57:

Ekuasi 59

$$PV = +gL^{\lambda A}$$

PV adalah nilai piksel yang dihasilkan, sering dinormalisasi dengan jumlah maksimum (yaitu  $2^N-1$ , di mana N adalah jumlah bit output/saluran), L adalah rasio pencahayaan masukan, o adalah offset sistem, g adalah penguatan sistem dan  $\gamma A$  adalah ukuran kontras gambar digital.

Offset dalam arah positif dapat disebabkan oleh pergeseran elektronik atau cahaya yang menyimpang dalam sistem. Sementara offset elektronik dapat disetel sama dengan nol dan offset dari cahaya nyasar seragam dapat disetel secara elektronik, sinyal yang datang dari cahaya flare (yaitu cahaya menyimpang yang datang ke lensa) sering kali bergantung pada pemandangan.

Dalam kamera digital, akuisisi gamma,  $\gamma A$ , biasanya dekat  $1/\gamma D$  (yaitu kebalikan dari gamma tampilan,  $\cong 1/2.2$  hingga  $1/2.5$  atau  $0.45$  hingga  $0.40$ ), atau  $1.0$  - tergantung pada pilihan ruang warna keluaran ( atau encoding) dan/atau format file. Saat memindai,  $\gamma A$  dapat disesuaikan oleh pengguna melalui perangkat lunak pemindaian sehingga koreksi gamma yang diinginkan diterapkan selama akuisisi gambar digital. Saat menangkap menggunakan pengkodean warna yang dipilih seperti sRGB,  $\gamma A = \gamma E$ , gamma dari sistem pengkodean.

## 5. Mengukur fungsi transfer perangkat akuisisi

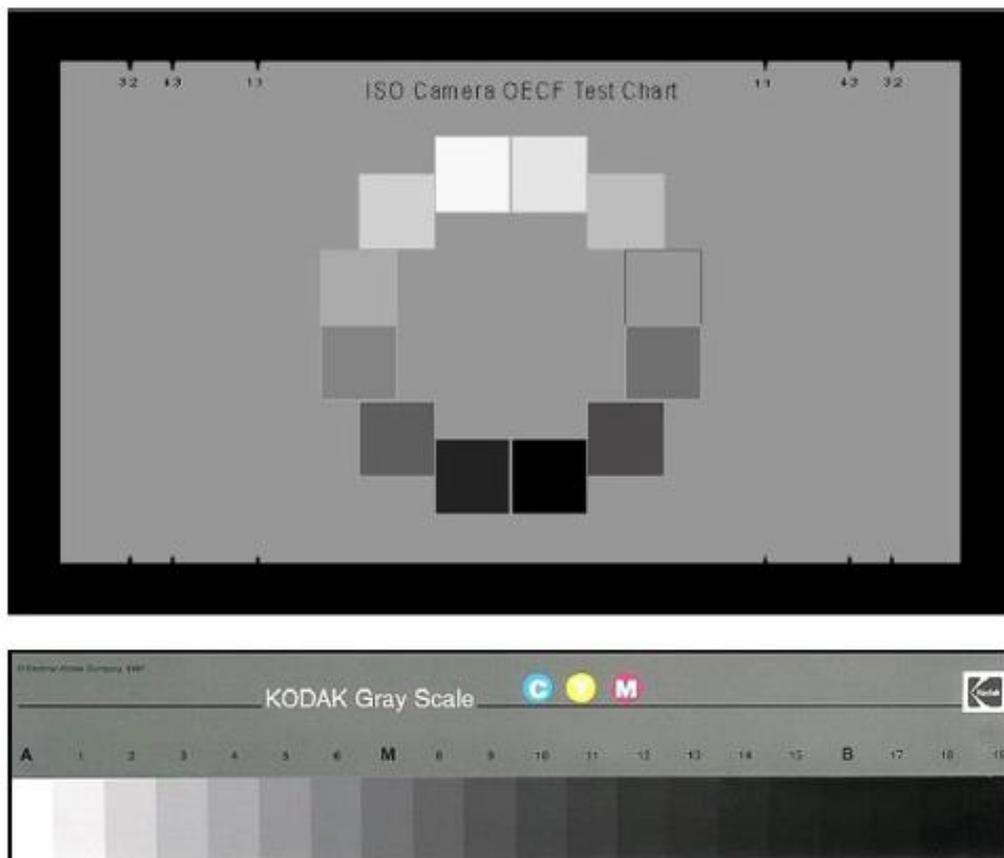
Fungsi transfer perangkat akuisisi digital dapat diukur dengan rata-rata respons perangkat terhadap transmitansi seragam atau langkah refleksi dari diagram uji konvensional (lihat Gambar 63). Contoh bagan tersebut adalah: bagan uji OECF kamera ISO (metode ISO 14524: 1999 untuk mengukur kamera OECF - lihat Bibliografi), yang mencakup 12 tambalan abu-abu netral seragam reflektif dengan peningkatan kerapatan visual yang sama sehubungan dengan akar pangkat tiga dari luminansi menerangi target; dan skala abu-abu Kodak Q-13, termasuk 20 langkah abu-abu seragam dalam peningkatan densitas  $0,10$  antara hampir  $0,0$  (putih) dan pencetakan hitam praktis dengan densitas  $1,90$ . Densitas visual dalam bagan tersebut diukur dengan densitometer konvensional. Nilai reflektansi (atau transmitansi dalam target transmisi) dapat dihitung dengan menggunakan invers dari Ekuasi 8.4. Sebagai alternatif, untuk grafik refleksi dan pengukuran kamera, pencahayaan grafik dapat diukur dengan fotometer teleskopik yang ditempatkan di lokasi kamera, atau pencahayaan relatif grafik dapat diukur menggunakan spektrofotometer. Sebenarnya, kurva yang dihasilkan dari pengukuran tersebut adalah respons rata-rata terhadap target tertentu, pemosisian target, dan iluminasi. Berbagai ketidakseragaman mempengaruhi respons sistem, termasuk respons dari elemen sensor individu dalam sensor kamera/scanner dan variasi lampu selama penerangan atau pemindaian.

OECF sering diplot dalam ruang linier-linier (misalnya, nilai piksel (dinormalisasi) vs. pencahayaan relatif adegan - atau pantulan diagram uji, atau transmisi) atau ruang log-log (misalnya, nilai piksel  $\log_{10}$  (dinormalisasi) vs. . grafik densitas).  $\gamma A$  dapat didekati dengan mengekstraksi eksponen fungsi pangkat dalam kasus sebelumnya, atau kemiringan garis lurus dalam kasus terakhir. Metode ISO 14524: 1999 menyarankan untuk memplot nilai piksel keluaran, atau  $\log_2$  dari nilai piksel keluaran, vs. eksposur log masukan atau pencahayaan log masukan. Nilai pencahayaan log dihitung dari pengukuran kerapatan grafik.

OECF juga dapat dibangun dengan mengekstrapolasi antara titik-titik yang diukur secara dekat dan membuat LUT yang mewakili respons dari nilai piksel yang sangat sistematis. Gambar 64 menunjukkan dua contoh RGB OECF yang diplot dalam ruang linier-linier (a, c) dan log-log (b, d). Fungsi tumpang tindih pada Gambar 64a dan b menunjukkan respon skala abu-abu yang baik, di mana  $\gamma_{Ar} \cong \gamma_{Ag} \cong \gamma_{Ab}$  (subskrip r, g dan b menunjukkan red, green, dan blue). Perhatikan bahwa tanggapan ini hampir kebalikan dari tanggapan CRT. Namun, jika OECF diplot dalam ruang logeloge, OECF tidak muncul sebagai fungsi linier tetapi hiperbolik, mirip dengan kurva karakteristik fotografis, di mana nada dikompresi di daerah bahu dan kaki. Faktanya, pabrikan kamera digital sering menggunakan LUT berbentuk S untuk meniru respons bahan silver halida, yang dikenal menghasilkan reproduksi nada yang menyenangkan. Pada Gambar 64c dan d, OECF menunjukkan respons skala abu-abu yang buruk, dengan respons saluran biru yang berbeda dengan saluran merah dan biru, menunjukkan corak warna pada nada tengah dan gelap dari gambar yang diperoleh.

### Image encoding (Pengkodean gambar) : Fungsi transfer RGB, Adobe RGB dan JPEG

sRGB (standar Red, green, blue) adalah pengkodean gambar berwarna yang dibuat untuk komputer pribadi dan untuk pertukaran gambar di Internet. Kebanyakan kamera digital komersial menggunakan sRGB sebagai ruang warna keluaran standarnya, atau setidaknya memberikan pilihan untuk memilih pengkodean sRGB. Ruang pengkodean sRGB, tetapi di sini kami menyajikan fungsi transfernya.



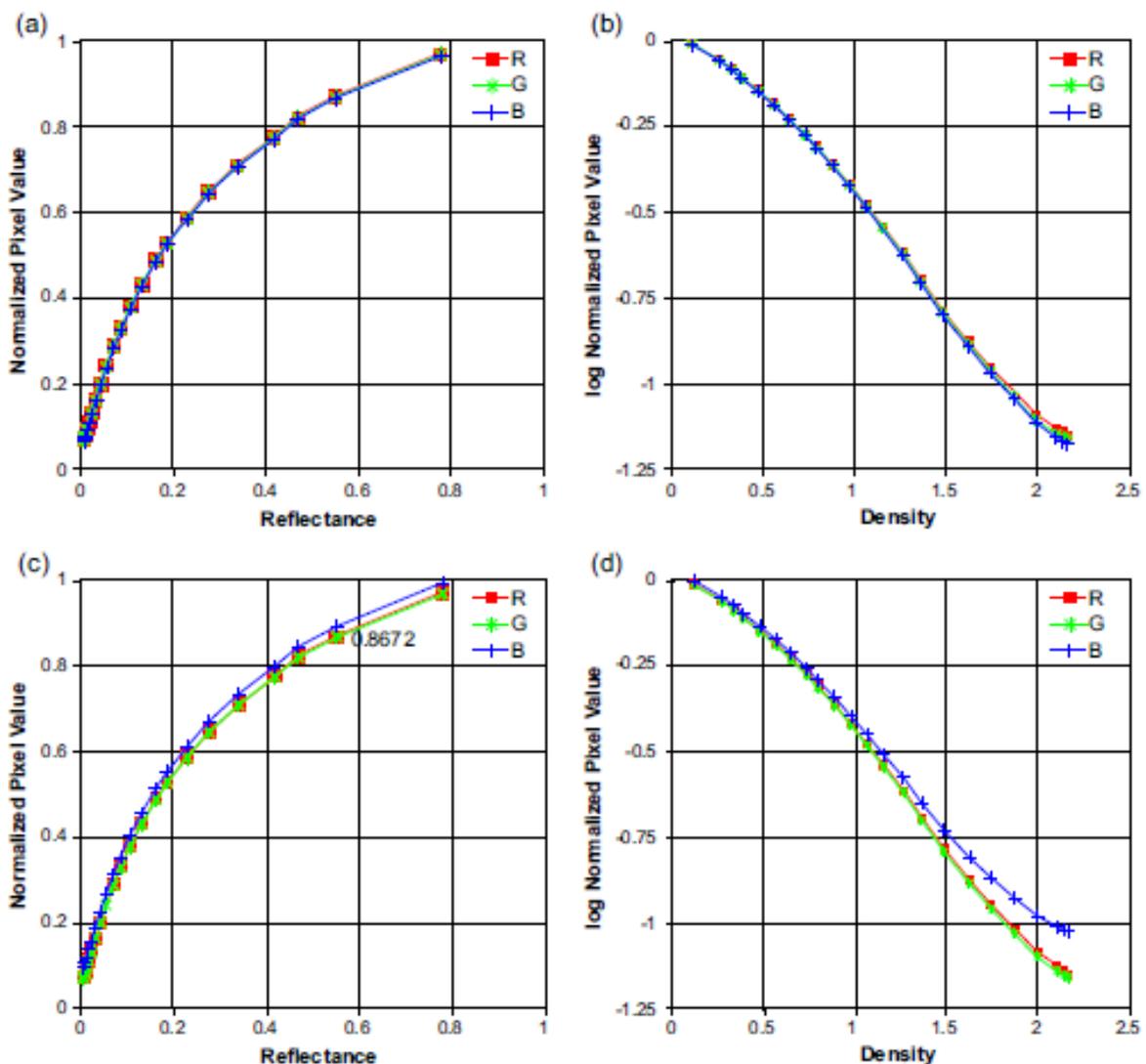
**Gambar 63** Dua diagram uji yang berbeda untuk mengukur fungsi transfer perangkat akuisisi digital. Atas: Bagan uji OECF kamera ISO. Bawah: Kodak Q-13 abu-abu.

sRGB dikalibrasi secara kolorimetri untuk output tampilan referensi, kondisi tampilan, dan pengamat. Ini mengasumsikan bahwa sinyal yang dikodekan akan dikeluarkan pada sistem tampilan CRT standar dengan nilai gamma nominal 2,5. sRGB memiliki fungsi daya efektif dengan gamma 1/2.2 (0.45), menghasilkan keseluruhan sistem (encoding x tampilan) gamma sebesar 7825, sesuai untuk kondisi iluminasi redup dan suar. Keseluruhan gamma sRGB mirip (tapi tidak identik) dengan Rec. 709 pengkodean standar untuk HDTV. Fungsi transfer encoding diberikan oleh:

Ekuasi 60

$$sR'G'B' = \left\{ \begin{array}{ll} 772 \times sRGB; & 0 \leq sRGB \leq 0.0031308 \\ 1.055 \times sRGB^{1/2.4} - 0.055; & 0.0031308 < sRGB \leq 1.0 \end{array} \right\}$$

di mana sR 'G 'B 'adalah sinyal yang dikodekan dengan koreksi gamma (baik merah, hijau atau biru - antara 0 dan 1.0) dan sRGB adalah sinyal input linier sebelum koreksi gamma (baik merah, hijau atau biru - antara 0 dan 1.0).



**Gambar 64** Kamera OECF diplot dalam ruang linier-linier (a, c) dan dalam ruang loglog (b, d).

Perhatikan bahwa fungsi transfer sRGB bukanlah fungsi daya murni. Pada pencahayaan relatif yang sangat rendah, fungsi transfer adalah linier (bagian atas Ekuasi 60). Pada pencahayaan relatif lebih besar dari 0,003130 gamma pengkodean,  $\lambda E$ , sama dengan eksponen  $1/2,4$ , offset  $-0,055$  dan penguatan  $1,055$ . Pengaruh Ekuasi 60 adalah untuk menyesuaikan kurva gamma  $1/2,2$  ( $0,45$ ) efektif lurus ke depan, dengan  $o = 0$  dan  $g = 1,0$ . Koreksi gamma dan offset  $-0,055$  disertakan untuk mengkompensasi rasio kontras yang terjadi saat nilai mendekati nol dan untuk efek cahaya sekitar.

Pengkodean gambar lain yang umum digunakan adalah sistem pengkodean Adobe RGB 1998. Ini memiliki fungsi transfer daya murni yang mirip dengan yang dijelaskan dalam Ekuasi 60 dengan gamma pengkodean lurus ke depan,  $gE$ , kira-kira sama dengan eksponen  $1/2,2$ . Seperti disebutkan di atas, jika kita memodelkan fungsi sRGB sebagai fungsi daya murni, eksponen efektifnya adalah  $1/2,2$ . Fakta ini membuat fungsi encoding sRGB dan Adobe sangat mirip satu sama lain. Gambar 65 mengilustrasikan fungsi transfer sRGB dan Adobe RGB 1998.

Dalam standar pengkodean JPEG tidak ada referensi ke fungsi transfer, tetapi fungsi transfer non-linier, mirip dengan pengkodean video atau sistem pengkodean warna RGB standar (ketika sistem seperti itu digunakan untuk pengkodean gambar), disematkan. Hasil kualitas yang jauh lebih rendah diperoleh ketika JPEG diterapkan pada data linier, karena visibilitas artefak kuantisasi JPEG yang lebih besar.

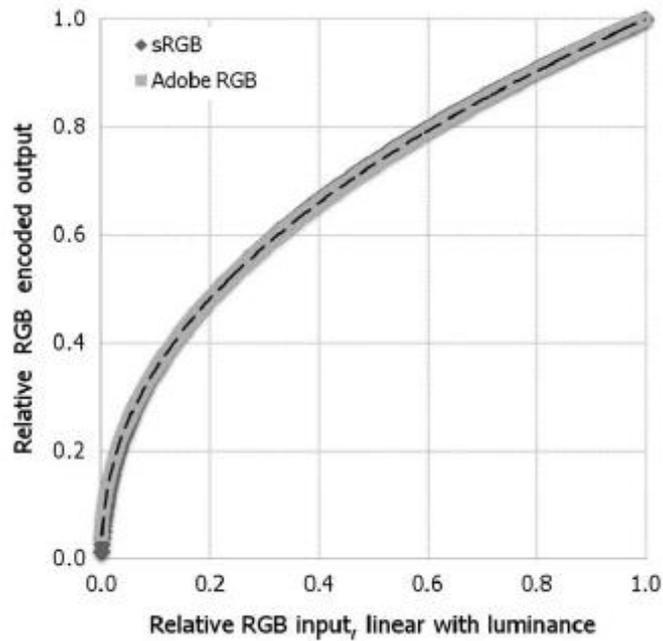
## **Fungsi transfer pada printer**

Karakteristik tonal printer desktop dijelaskan oleh hubungan antara jumlah digital input dan densitas yang dihasilkan (atau refleksi) yang dihasilkan di atas kertas. Fungsi transfer printer tidak mengikuti model tertentu dan bergantung pada banyak variabel, seperti teknologi printer, pengaturan ukuran titik dan penguatan titik, konsentrasi tinta, jumlah tinta, driver printer, dan pengaturan. Untuk menandai hubungan ini sejumlah langkah dicetak dari putih ke kerapatan maksimum untuk netral (K) dan untuk saluran warna printer (CMY, misalnya). Interpolasi linier digunakan di antara titik-titik yang diukur untuk mendapatkan kurva yang mencirikan respons perangkat untuk set tinta, kertas, dan pengaturan printer tertentu.

## **Pengukuran lainnya terkait Tone dan Kontras**

### **1. Dynamic range dan rasio kontras**

Dua ukuran objektif lain yang terkait dengan nada adalah dynamic range dan rasio kontras. Ada beberapa definisi dynamic range. Secara umum, ini mengacu pada kisaran intensitas dalam suatu pemandangan (kisaran pencahayaan subjek), medium atau gambar, yaitu perbedaan antara intensitas maksimum dan minimum. Rasio kontras adalah rasio sinyal maksimum ke minimum, atau intensitas cahaya keluaran.



**Gambar 65** sRGB dan fungsi transfer Adobe RGB 1998. Garis putus-putus hitam menunjukkan fungsi daya murni dengan eksponen 1/2.2.

Dynamic range sering dinyatakan dalam densitas (yang diukur pada skala log basis 10; dengan demikian nilai mewakili eksponen puluhan densitas relatif, misalnya rasio kontras 3,0D = 1000) atau dalam perhentian fotografi. Pijar fotografi mungkin mengubah kisaran pencahayaan subjek. ISO 2164: 2004 menetapkan metode untuk mengukur dan melaporkan dynamic range scanner elektronik untuk media fotografi warna kontinu. Ini berlaku untuk scanner untuk media reflektif dan transmisi.

Dynamic range dalam pemandangan nyata dapat berkisar dari sinar matahari langsung hingga bayangan gelap dan karenanya terkadang jauh lebih tinggi daripada sistem pencitraan. Pencitraan Highdynamic-range (HDR) berkaitan dengan serangkaian teknik yang memungkinkan reproduksi realistis dari pemandangan dengan jangkauan dinamis tinggi tersebut. Biasanya ini melibatkan beberapa pengambilan dari pemandangan yang sama dengan kisaran eksposur dan kombinasinya untuk menghasilkan satu gambar. Masalah dengan HDR adalah melihat gambar yang direproduksi. Metode khas untuk menampilkan dan mencetak gambar memiliki dynamic range terbatas dan dengan demikian berbagai metode untuk mengubah gambar HDR menjadi format yang dapat dilihat telah dikembangkan. Ini umumnya disebut sebagai 'pemetaan nada'. Sejumlah algoritme pemetaan nada ada tetapi semuanya bergantung pada pemandangan, yang berarti bahwa tidak ada algoritme tunggal yang sesuai untuk rendering terbaik dari semua jenis pemandangan HDR.

Rasio kontras tinggi adalah fitur yang diinginkan dari perangkat apa pun; rasio yang lebih tinggi menghasilkan perbedaan rona dan warna yang halus. Rasio kontras perangkat sangat dipengaruhi oleh kondisi tampilan: semakin cerah lingkungan sekitar, semakin rendah rasio kontras efektif. Rasio kontras tipikal diberikan dan kisaran luminansi tipikal pada Tabel 5.

<b>Tabel 5 Rasio kontras khas perangkat bercahaya sendiri dalam unit aritmatika</b>	
<b>PERANGKAT</b>	<b>RASIO KONTRAS</b>
Layar komputer kristal cair	200:1 hingga 20,000:1
Komputer tabung sinar katoda ditampilkan	300:1 hingga 1,500:1

Proyektor data digital	600:1 hingga 2,000:1
Proyektor geser	500:1 hingga 1,000:1

Pemetaan non-linear dari luminansi input (yaitu logaritmik atau akar kubik) yang meniru respons perseptual diperlukan untuk memaksimalkan rasio kontras terbatas dalam sistem pencitraan. Banyak faktor, seperti flare proyeksi dan cahaya latar pada perangkat LCD, meningkatkan luminansi hitam dan karena itu mengurangi rasio kontras dalam sistem pencitraan, yang mengakibatkan penurunan kualitas gambar.

Karena sifatnya yang berbeda, gambar digital memungkinkan beberapa tindakan langsung lebih lanjut terkait dengan masalah tonal. Salah satunya adalah histogram tingkat abu-abu, yang merangkum frekuensi kemunculan tingkat intensitas yang tersedia dalam sebuah gambar. Normalisasi histogram tingkat abu-abu dengan membaginya dengan jumlah piksel pada gambar menghasilkan fungsi densitas probabilitas (PDF). PDF dari tiga gambar skala abu-abu yang berbeda ditampilkan pada Gambar 66. Beberapa karakteristik gambar dapat dipahami dari PDF-nya, seperti eksposur dan jangkauan, apakah gambar tersebut low key (PDF condong ke nilai piksel lebih rendah) atau high key (PDF condong ke nilai piksel lebih tinggi). Lebih lanjut, beberapa pengukuran statistik yang memberikan informasi yang berkaitan dengan nada gambar dapat dihitung dari PDF gambar. Contohnya termasuk mean dan median PDF, baik yang berkaitan dengan intensitas gambar global, deviasi standar yang berkaitan dengan kontras gambar global (lihat di bawah), dan entropi yang terkait dengan konten informasi dan perubahan warna acak pada gambar, dll.

## 2. Kontras di area seragam, target uji, dan gambar

Dua definisi berikut mewakili kontras sebagai rasio perubahan luminansi terhadap luminansi latar rata-rata. Mereka biasanya digunakan untuk mengukur kontras bidang seragam sederhana dan target pengujian. Salah satunya adalah fraksi Weber atau definisi kontras Weber, yang digunakan untuk mengukur kontras lokal suatu area dengan pencahayaan seragam dengan latar belakang seragam:

Ekuasi 61

$$C = \frac{\Delta L}{L}$$

dengan  $\Delta L$  adalah kenaikan atau penurunan pencahayaan area dari pencahayaan latar belakang seragam.

Yang kedua, rumus Michelson, mengukur kontras pola periodik spasial, seperti kisi sinusoidal frekuensi tunggal:

Ekuasi 62

$$C = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$

di mana  $L_{max}$  dan  $L_{min}$  adalah nilai pencahayaan maksimum dan minimum masing-masing di kisi.

<b>Tabel 6 Dynamic range khas dari pemandangan dan media pencitraan dalam unit logaritmik</b>	
<b>MEDIUM/SCENE</b>	<b>DYNAMIC RANGE (UNIT LOG)</b>
Outdoor scene (luminance range)	Khasnya 1.25 - 1.50 hingga 3.3
Transparansi warna film	3.0 hingga 3.7
Transparansi yang diproyeksikan	2.1 (dikurangi menjadi 1,4 pencahayaan pemandangan yang terlihat, karena lingkungan sekitar yang gelap mengurangi kontras yang tampak)
Film negatif hitam dan putih	2.1
Warna film negatif	2.1
Kertas fotografi hitam dan putih	1.9
Kertas fotografi berwarna	2.4
Cetakan pantulan warna, dalam kondisi penerangan ruangan biasa	2.1 (dikurangi menjadi 1,25 terlihat, karena flare dari permukaan cetakan paling atas)
Sensor CCD dan CMOS pada kamera dan scanner komersial	2.5 - 3.6

Ekuisasi 61 dan 62 tidak dapat digunakan untuk menentukan kontras dalam gambar digital dengan konten pemandangan yang kompleks (yaitu tidak seragam dalam pencahayaan dan interms kompleks dari konten frekuensi spasial). Karena kesulitan dalam mendefinisikan kontras dalam gambar, banyak definisi kontras dapat ditemukan dalam literatur. Cara umum untuk mendefinisikan kontras global dalam gambar sehingga kontras dua gambar yang berbeda dapat dibandingkan adalah dengan mengukur kontras root mean square (rms), yang didefinisikan sebagai deviasi standar dari nilai piksel (level abu-abu):

Ekuisasi 63a

$$C_{rms} = \frac{1}{N-1} \left[ \sum_{i=1}^N (x_i - x)^2 \right]^{1/2}$$

di mana N adalah jumlah total piksel gambar,  $x_i$  adalah nilai tingkat abu-abu yang dinormalisasi dari gambar digital (berkisar antara 0 dan 1) dan  $x$  adalah tingkat abu-abu rata-rata yang dinormalisasi, diberikan oleh:

Ekuisasi 63b

$$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i)$$

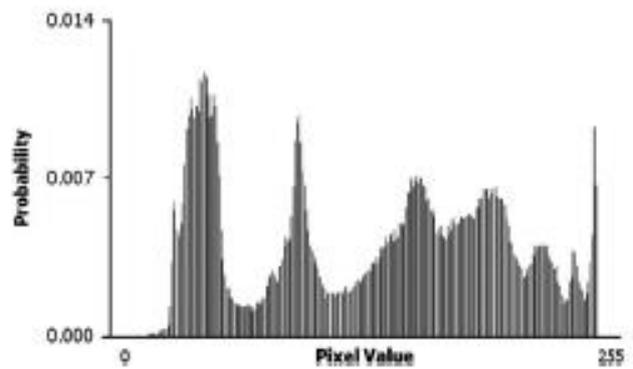
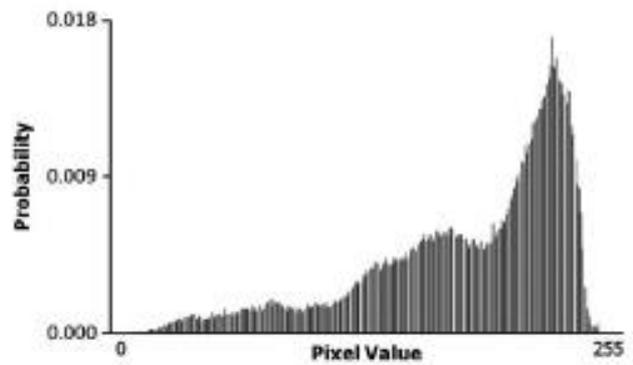
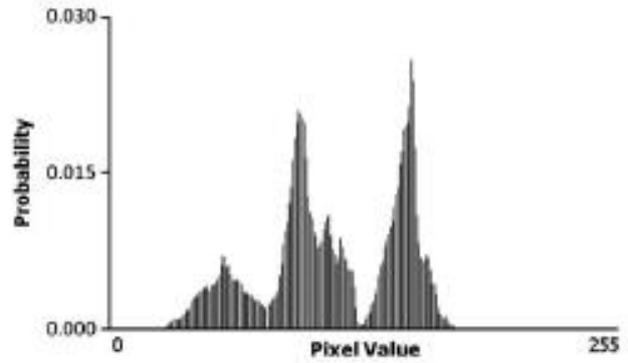
Kontras rms tidak tergantung pada konten frekuensi spasial gambar atau distribusi spasial kontras pada gambar.

### 3. Kuantisasi non-linier, persyaratan bit-depth, dan koreksi gamma

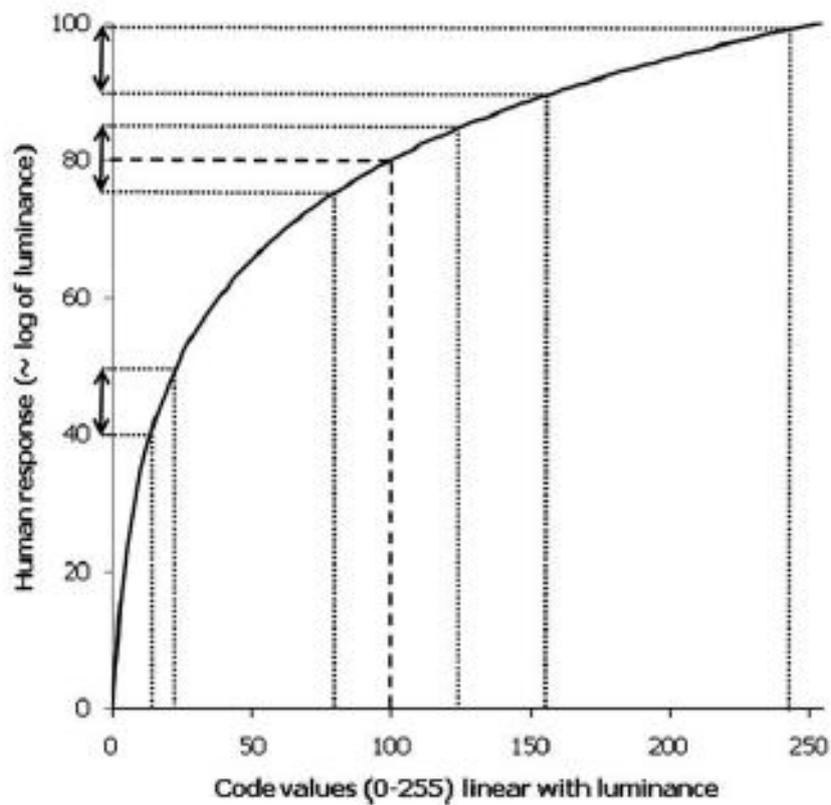
Kita telah melihat sebelumnya bahwa respons manusia terhadap luminansi hampir logaritmik (atau akar pangkat tiga dari luminansi), bahwa rasio kontras penglihatan manusia pada sebagian besar tingkat adaptasi adalah sekitar 100: 1 dan rasio kontras dua tingkat pencahayaan yang dapat dibedakan adalah sekitar 1% pencahayaan - untuk sebagian besar tingkat pencahayaan.

Apa yang terjadi jika kuantisasi linier diterapkan pada sinyal luminansi (yaitu ketika nilai piksel keluaran sebanding dengan pencahayaan masukan) menggunakan 256 tingkat abu-abu? Poynton (2003) menunjukkan bahwa dalam sinyal pencahayaan terkuantisasi 8-bit, nilai kode 100 adalah di mana rasio kontras antara tingkat pencahayaan yang berdekatan kira-kira 1%, sehingga sama dengan ambang visual. Tingkat pencahayaan yang berdekatan di bawah nilai kode 100 (di area gambar paling gelap) menjadi semakin terlihat, sedangkan tingkat yang berdekatan di atas titik ini menjadi semakin tidak bisa dibedakan satu sama lain dan dengan demikian banyak nilai kode yang terbuang percuma. Akibatnya, area gelap yang memvariasikan halus dalam gambar, di mana rasio kontras setinggi 4%, akan mengalami kontur, artefak yang memiliki tampilan langkah-langkah (atau pita) yang terlihat di area yang seharusnya terlihat terus menerus. Jadi, kuantisasi linier dalam 8 bit per saluran tidak cocok. Inilah salah satu alasan mengapa sebagian besar perangkat akuisisi digital yang menggunakan kuantisasi linier menggunakan kedalaman bit lebih tinggi dari 8 bit. Faktanya, bahkan jika kuantisasi logaritmik digunakan, kedalaman bit 9 bit per piksel akan diperlukan untuk menghasilkan langkah-langkah yang tidak terlihat di seluruh rentang pencahayaan terkuantisasi. Gambar 67 menunjukkan bahwa dalam skala persepsi dari 1 hingga 100 yang secara logaritmik terkait dengan pencahayaan, langkah yang sama dalam respons visual (diwakili oleh panah ganda pada sumbu y) memerlukan langkah yang berbeda dalam sinyal luminansi terkuantisasi linier. Ini juga menunjukkan bahwa di sekitar nilai kode 100, keseimbangan bergeser dari kebutuhan untuk kuantisasi halus dari nilai-nilai gelap ke kuantisasi yang lebih kasar dari nilai-nilai terang.

Alasan lain mengapa perangkat akuisisi digital mengukur gambar pada kedalaman bit yang lebih tinggi dari 8 bit adalah untuk meminimalkan efek kesalahan pembulatan yang disebabkan selama modifikasi gambar. Ketepatan terbatas dari matematika integer yang digunakan oleh perangkat gambar digital dan komputer menghadirkan masalah pada kedalaman bit yang rendah. Salah satu contohnya adalah koreksi gamma yang, seperti dijelaskan sebelumnya, diterapkan pada sinyal perolehan untuk menyesuaikan keseluruhan gamma dalam imaging chain ke nilai optimal. Masalah dengan koreksi nada dalam sistem diskrit adalah hal itu menyebabkan hilangnya jumlah asli tingkat intensitas yang tersedia. Dalam sinyal koreksi gamma, batas rentang intensitas (nilai piksel mewakili hitam dan putih) tetap sama seperti pada sinyal diskrit asli, tetapi beberapa tingkat intensitas asli yang tersedia hilang sedangkan beberapa lainnya diulangi karena kesalahan pembulatan (lihat contoh di Tabel 3). Kerugian tampak lebih signifikan ketika tingkat kuantisasi kasar dan koreksi gamma dalam ruang 8-bit dapat mengakibatkan hilangnya hingga 30% tingkat intensitas yang tersedia. Hilangnya tingkat intensitas dengan koreksi gamma diilustrasikan pada Gambar 68, yang menyajikan berbagai koreksi gamma dalam sinyal terkuantisasi 8-bit per saluran. Tingkat abu-abu yang hilang pada gambar dapat menyebabkan posterisasi, artefak yang mirip dengan kontur, yang disebutkan di atas, di mana gradasi warna gambar yang berkelanjutan diganti dengan langkah-langkah yang terlihat dengan nada yang lebih sedikit.



**Gambar 66** Histogram normalisasi skala abu-abu (PDF) dari gambar dengan rentang warna yang lebih sempit (atas), gambar dengan nada terkonsentrasi di bagian terang skala warna (tengah), dan gambar dengan kisaran nada yang luas (bawah). Gambar asli dari CD Foto Master Kodak.



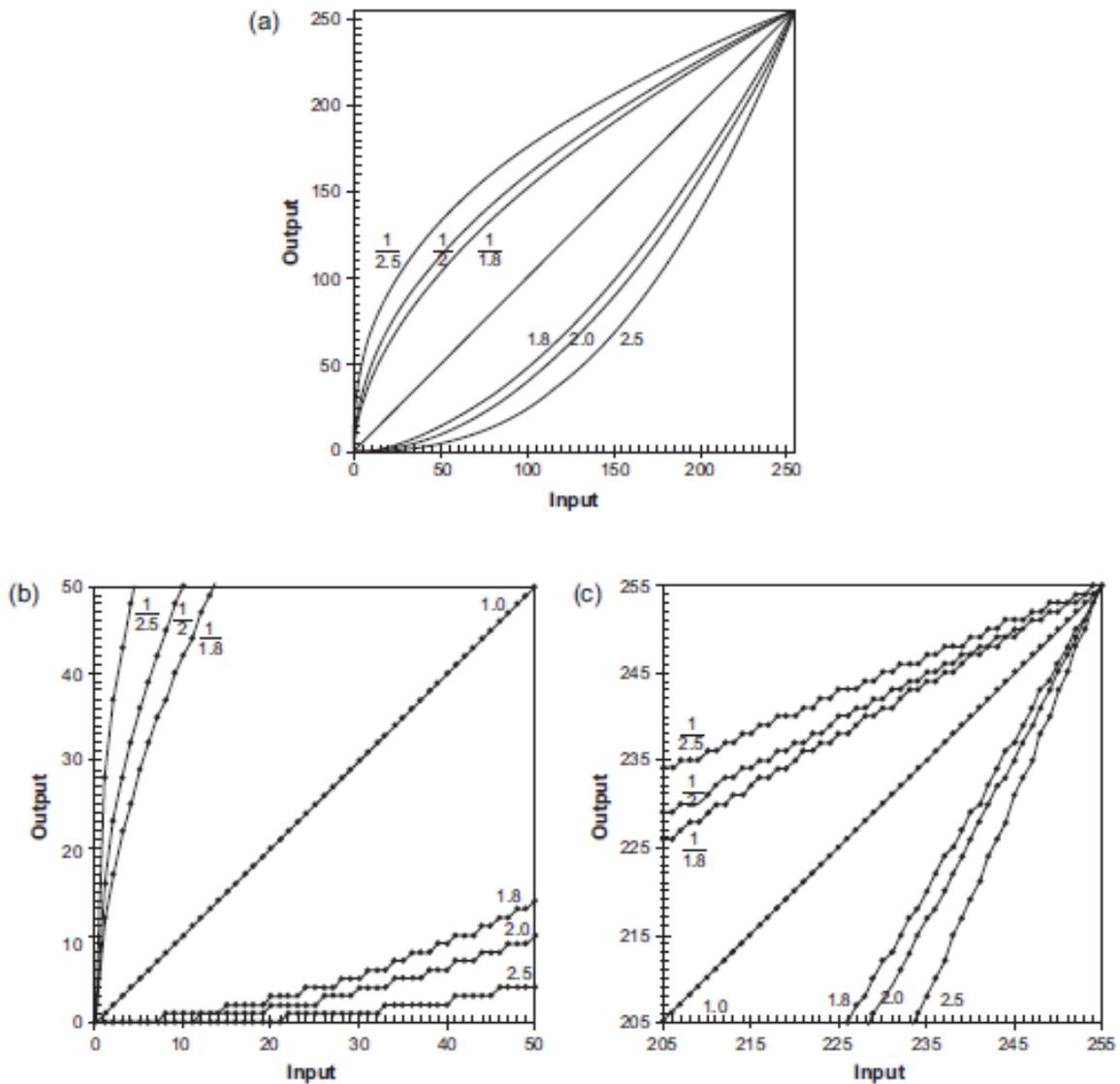
**Gambar 67** Respon manusia versus sinyal 8-bit terkuantisasi linier.

**Tabel 7** Tingkat intensitas asli dalam ruang kuantisasi 8-bit dan tingkat yang dimodifikasi dengan koreksi gamma 1/2.2 sebelum dan sesudah pembulatan

<b>NILAI INTENSITAS ORIGINAL</b>	<b>INTENSITAS YANG DIPERBAIKI GAMMA SEBELUM PUTARAN</b>	<b>INTENSITAS YANG DIPERBAIKI GAMMA SETELAH PUTARAN</b>
0	0.00	0
1	20.54	21
2	28.15	28
3	33.85	34
4	38.69	39
5	42.69	43
.	.	.
.	.	.
.	.	.
250	252.71	253
251	253.17	253
252	253.63	254
253	254.09	254
254	254.54	255
255	255.00	255

Solusi untuk ini adalah memulai dengan tingkat intensitas yang lebih tersedia, yaitu kedalaman bit yang lebih tinggi, sehingga kerugiannya tidak terlalu signifikan. Melakukan modifikasi

nada dalam 12 atau bahkan 16 bit per saluran dan mengambil sampel sinyal yang dioptimalkan ke 8 bit per saluran untuk keluaran berarti bahwa tingkat yang tersisa setelah koreksi gamma cukup untuk dipetakan ke 256 nilai kode keluaran. Ini adalah implementasi yang sangat umum pada kamera dan scanner digital. Subjek pencitraan kedalaman 8-bit versus 16-bit.



**Gambar 68** Berbagai fungsi transfer dengan nilai gamma sama dengan  $1/2.5$ ,  $1/2.0$ ,  $1/1.8$ ,  $1.8$ ,  $2.0$  dan  $2.5$  direpresentasikan dalam ruang 8-bit. (a) Seluruh fungsi. (b) Diperbesar, bagian bawah (bayangan). (c) Diperbesar, bagian atas (sorotan) fungsi.

# Eksposur dan Kontrol Gambar

## Eksposur Kamera

Istilah eksposur dalam fotografi menggambarkan kuantitas total insiden energi cahaya pada material sensitif, yang secara umum adalah eksposur fotografis. Ini dapat menggambarkan proses pengendalian energi cahaya yang mencapai materi sensitif di kamera, yang lebih spesifik adalah eksposur kamera.

Dua parameter digunakan untuk mengontrol eksposur fotografi: jumlah insiden cahaya pada sensor pencitraan dan durasi eksposur sensor. Ini dijelaskan oleh Ekuasi 8.1, ekuasi timbal balik:

*Ekuasi 69*

$$H = E_t$$

di mana H adalah eksposur, - adalah iluminansi subjek dan t adalah durasi eksposur.

di kamera, jumlah cahaya, yaitu iluminansi subjek (E), dikontrol melalui diafragma iris lensa. Diafragma iris dikalibrasi dalam unit aperture relatif (N) - Durasi eksposur (t) dikontrol oleh shutter speed. Karena sifat timbal balik dari Ekuasi 69, kisaran kombinasi yang berbeda dari aperture dan shutter speed (disebut 'eksposur ekuivalen') akan memberikan kuantitas insiden radiasi yang sama pada material sensitif.

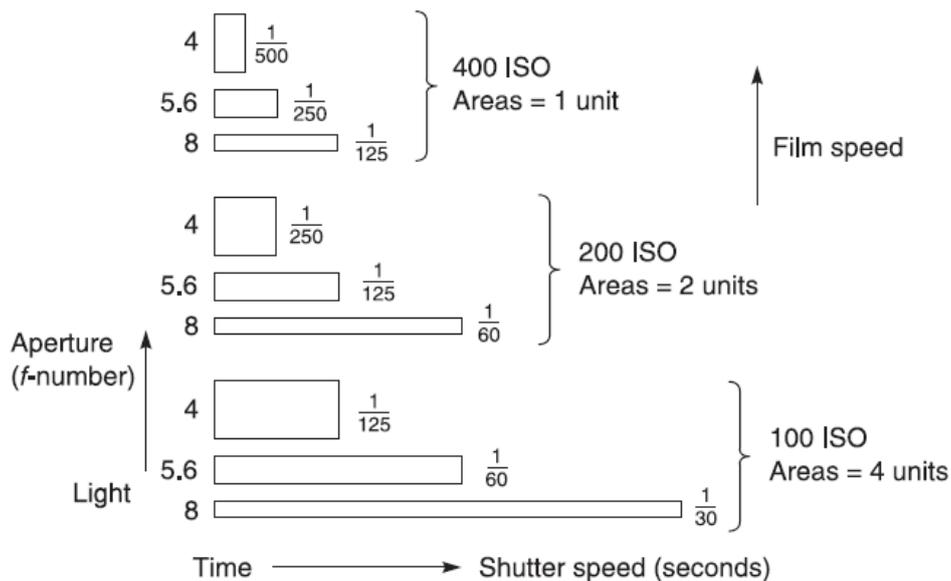
Sejumlah faktor mempengaruhi eksposur kamera yang optimal untuk segala situasi pencitraan dan kualitas gambar yang dihasilkan. Pada dasarnya, hasil dari setiap eksposur bergantung pada hubungan antara empat faktor: radiasi yang berasal dari tempat kejadian, transmisi radiasi itu melalui sistem optik, eksposur pada sensor, dan sensitivitas dan respons karakteristik sensor terhadapnya. Kami memperkenalkan parameter yang mempengaruhi aspek keterpaparan di bawah ini.

Dalam pemandangan tertentu, akan ada kisaran area pencahayaan berbeda yang, dapat dicirikan oleh rasio pencahayaan subjek atau kisaran pencahayaan subjek. Ini akan memberikan rentang eksposur ke sensor. Berbagai aspek pemandangan dan kondisi pencahayaan akan memengaruhi kisaran pencahayaan subjek. Semua cahaya yang tersebar menghasilkan pengurangan kontras pemandangan. Kisaran luminansi dikurangi oleh flare dan, sebagai hasilnya, peningkatan tonal dalam bayangan dikompresi. Warna subjek dan sifat pantulan permukaannya akan memengaruhi jumlah cahaya yang diarahkan ke sensor. Faktor tambahan termasuk jenis sumber cahaya, arah dan intensitas cahaya, dan jarak antara sumber cahaya dan subjek, yang mengikuti hukum kuadrat terbalik. Semakin jauh jarak antara subjek dan sumber cahaya, semakin rendah intensitas cahaya yang mencapai subjek. Preferensi subjektif juga memengaruhi pilihan fotografer untuk eksposur yang optimal.

Seperti yang telah dijelaskan, jumlah cahaya dari pemandangan yang mencapai sensor dikendalikan oleh kombinasi apertur dan shutter speed, tetapi juga dipengaruhi oleh variabel lain yang dirangkum oleh Ekuasi 6.61. Ini mendefinisikan iluminansi gambar sebagai hasil dari efek gabungan dari pencahayaan subjek, transmisi (yang mencakup transmisi lensa, efek filter di depan lensa, dan dalam sistem digital, transmisi filter anti-aliasing, filter inframerah dan lensa mikrolensa sensor), apertur lensa, pembesaran dan sketsa alami.

Sensitivitas sensor (ISO speed) ditentukan oleh jenis dan karakteristik sensor, serta pemrosesan selanjutnya: kondisi pengembangan film dan pemrosesan analog dan digital selanjutnya dari sinyal dari sensor gambar. dalam kaitannya dengan reproduksi kontras dan dynamic range, dijelaskan oleh kurva karakteristik film dan fungsi transfer sensor gambar, pada akhirnya akan menentukan hubungan antara pencahayaan pemandangan asli dan reproduksinya dalam gambar.

Oleh karena itu, kisaran pencahayaan subjek, ISO speed, aperture lensa, dan shutter speed adalah empat jumlah penting dari eksposur kamera; mereka juga merupakan orang-orang yang, pada tingkat yang lebih besar atau lebih kecil, paling mudah untuk diubah (faktor-faktor lain yang dirinci di atas seringkali merupakan properti yang melekat pada sistem). Pemilihan kombinasi yang sesuai antara aperture dan shutter speed pada ISO speed tertentu merupakan kontrol kreatif utama dalam fotografi dan dapat ditentukan oleh subjeknya sendiri atau perawatan yang diperlukan (lihat Gambar 69). Bersama-sama mereka mempengaruhi sejumlah atribut gambar yang penting, seperti depth of field, blur, sharpness gambar, kontras dan noise. Kemampuan untuk memvariasikan iluminasi pada subjek, jika memungkinkan, memberikan lebih banyak pilihan untuk memvariasikan faktor lainnya. Eksposur kamera dapat ditentukan dengan uji coba praktis, misalnya dengan perkiraan berdasarkan pengalaman sebelumnya, diikuti dengan penilaian gambar yang dihasilkan, tetapi pengukuran dengan beberapa bentuk pengukur cahaya lebih cepat dan biasanya lebih disukai.



**Gambar 69** Hubungan eksposur. Diagram menunjukkan hubungan antara ISO speed, durasi eksposur, dan pengaturan aperture untuk memberikan eksposur yang setara (ditunjukkan di sini sebagai area persegi panjang). Durasi eksposur yang lama menyiratkan aperture yang dikurangi dan pengaturan ISO speed rendah, persegi panjang yang lebih besar, untuk subjek pencahayaan yang diberikan.

### Hubungan antara Eksposur dan Logaritma

Sistem visual manusia (HVS) memiliki kira-kira respons logaritmik terhadap cahaya. Ini berarti bahwa intensitas cahaya harus berubah dengan perkiraan faktor 2 agar dapat dianggap oleh HVS sebagai perbedaan yang terlihat (JND) dalam kecerahan. Ini telah dibuktikan oleh studi fisiologis dan psikofisik tentang persepsi kontras. Eksperimen psikofisika membawa

psikolog Jerman Ernst Heinrich Weber pada kesimpulan bahwa perbedaan yang terlihat dalam persepsi rangsangan adalah pecahan konstan dari besaran rangsangan asli. Psikofisikawan Jerman Gustav Theodor Fechner memperluas penelitian ini dan menjelaskan hubungan matematis antara intensitas sensasi subjektif dan intensitas stimulus. Hubungan ini terbukti logaritmik. Fechner bernama ini 'Hukum Weber' tetapi kemudian diubah namanya menjadi 'Hukum Weber-Fechner'.

Berdasarkan Hukum Weber-Fechner, ekuasi berikut menggambarkan respon HVS:

*Ekuasi 70*

$$S = C \log R$$

dimana S adalah besarnya sensasi, C adalah konstanta dan R adalah besarnya stimulus.

Eksposur kamera juga dikontrol menurut skala logaritmik. Perubahan pada skala eksposur kamera dijelaskan dalam istilah berhenti. Perubahan one stop menghasilkan penggandaan atau separuh jumlah cahaya yang mencapai bidang gambar. Hasilnya, saat apertur diubah satu stop, area apertur digandakan atau dibelah dua (lihat di bawah), sedangkan saat shutter speed diubah satu stop, waktu pencahayaan digandakan atau dibelah dua. ISO speed juga didasarkan pada skala logaritmik (basis 2), dengan perubahan antara ISO yang berurutan kira-kira sesuai dengan peningkatan atau penurunan sensitivitas sensor dengan faktor 2. Ini berarti, untuk pemandangan yang sama, eksposur keseluruhan yang diperlukan pada 100 ISO akan menjadi dua kali lipat dari yang diperlukan pada 200 ISO, perubahan satu stop.

## **Apertur Relatif**

Nilai f-stop apertur merepresentasikan apertur relatif yang dihitung dari panjang fokus lensa dibagi dengan diameter pupil masuk untuk lensa yang difokuskan pada ketidajelasan

*Ekuasi 71*

$$N = \frac{f}{d}$$

dengan N adalah apertur relatif, f adalah panjang fokus lensa dan d adalah diameter pupil masuk. F-number, ditulis sebagai f/, adalah nilai N, dan menyatakan rasio panjang fokus dengan nilai diameter pupil pintu masuk: f-number 5.6, misalnya, menunjukkan bahwa panjang fokus adalah 5,6 kali diameter pupil.

Dapat dilihat dari Ekuasi 71 bahwa ketika diameter pupil masuk meningkat untuk panjang fokus konstan, f-number berkurang. Seperti disebutkan sebelumnya, perubahan one stop menghasilkan penggandaan atau separuh jumlah cahaya yang melewati lensa, karena area aperture digandakan atau dibelah dua. Untuk menggandakan area apertur, diameter harus ditingkatkan dengan faktor  $\sqrt{2}$  (kira-kira 1,4). Ini menghasilkan serangkaian f/angka dengan perbedaan satu stop: f/1, f/1.4, f/2, f/2.8, f/4, f/5.6, f/8, f/11, f/16, f/22, f/32, f/45, f/64, dll.

## **Shutter speed**

Shutter speed diukur dalam sepersekian detik. Seperti dijelaskan sebelumnya, ada kisaran kombinasi f-number dan shutter speed yang menghasilkan eksposur yang setara pada ISO speed tertentu (lihat Gambar 69). Pemilihan kombinasi yang cocok bergantung pada pemandangan dan kondisi pencahayaan tertentu. Misalnya, apertur diafragma yang lebih besar

memungkinkan shutter speed yang lebih tinggi, tetapi menghasilkan pengurangan depth of field. Gerakan subjek membutuhkan shutter speed minimum, yang ditentukan oleh kecepatan subjek, untuk menghasilkan gambar yang tajam. Namun, shutter speed lambat dapat digunakan dalam kasus ini, jika efek buram gerakan diinginkan pada gambar akhir. Shutter speed yang lambat dapat menyebabkan keburaman pada gambar karena goyangan kamera, terutama saat menggunakan lensa dengan panjang fokus yang panjang. Dalam banyak kasus, ketika kombinasi spesifik dari f-number dan shutter speed diinginkan, perubahan iluminasi mungkin diperlukan.

Pilihan shutter speed dibatasi saat menggunakan flash elektronik dengan kamera yang dilengkapi shutter bidang fokus. shutter harus dibuka cukup lama agar seluruh area sensor gambar diekspos secara bersamaan oleh blitz. Batasan ini tidak berlaku untuk kamera dengan penutup daun, karena flash menyala saat penutup terbuka penuh. Kecepatan sinkronisasi flash (shutter speed tercepat yang dapat digunakan dengan lampu kilat) bergantung pada model kamera. Pada saat penulisan, kamera SLR berkualitas tinggi memberikan kecepatan sinkronisasi flash secepat 1/250 detik, sedangkan kamera lama menyinkronkan flash pada shutter speed yang lebih rendah, misalnya 1/60 detik. Perlu diperhatikan bahwa saat menggunakan shutter speed lambat, cahaya sekitar memengaruhi eksposur selain iluminasi dari flash.

## **Subject luminance ratio**

Klasifikasi utama pemandangan adalah dengan rasio pencahayaan subjeknya, kadang-kadang disebut rentang pencahayaan subjek. Ini adalah rasio antara pencahayaan maksimum dan minimum dalam pemandangan dan secara numerik sama dengan produk rasio pantulan subjek (rasio antara pantulan maksimum dan minimum, bergantung pada karakteristik permukaan dalam pemandangan) dan rasio pencahayaan (rasio antara tingkat iluminasi maksimum dan minimum, bergantung pada karakteristik dan posisi sumber cahaya). Bersama-sama, variasi yang jelas dalam pencahayaan subjek dan oleh karena itu kontras subjek

Misalnya, subjek yang zona paling terang dan paling gelap memiliki reflektansi masing-masing 0.9 dan 0.09, yaitu rasio reflektansi 10: 1, saat disinari sedemikian rupa sehingga ada rasio pencahayaan 5: 1 antara tingkat iluminasi maksimum dan minimum, memiliki subjek kisaran luminansi ( $10 \times 5$ ): 1, yaitu 50: 1. Rasio pencahayaan yang tinggi menunjukkan subjek dengan kontras tinggi. Rasio pencahayaan dari serendah 2: 1 hingga 1.000.000: 1 ( $10^6$ : 1) dapat ditemukan.

Dalam praktiknya, rentang pencahayaan adalah perbedaan perhentian antara sorotan paling terang dan bayangan paling dalam. Rasio pencahayaan rata-rata berdasarkan pengukuran dari sejumlah besar pemandangan di dalam dan luar ruangan adalah 160: 1. Sebagian besar pemandangan normal akan memiliki rasio pencahayaan subjek antara  $2^7$ : 1 dan 760: 1. Karena setiap kenaikan satu stop dalam eksposur menghasilkan peningkatan luminansi dengan faktor 2, maksimum ini sesuai dengan rentang eksposur dari bayangan hingga sorotan antara 9 dan 10 stop ( $2^9 = 512$  dan  $2^{10} = 1024$ ).

Berdasarkan pengukuran pemandangan yang sesuai, biasanya diasumsikan bahwa subjek luar ruangan rata-rata memiliki rasio pencahayaan 128: 1 atau 27: 1, sesuai dengan rentang tujuh stop (atau 7EV, nilai eksposur dan lihat nanti). Mata pelajaran seperti itu juga diasumsikan memiliki rata-rata refleksi 18-20%.

## Rentang sensor yang dinamis

Integrasi tingkat pencahayaan individu memberikan nilai untuk pantulan rata-rata pemandangan, yang bergantung pada rasio pencahayaan subjek dan digunakan dalam pengukuran cahaya pantulan. Seperti yang dijelaskan nanti, ada sejumlah metode pengukuran pantulan yang berbeda, menggunakan area pemandangan yang berbeda. Namun, saat menggunakan pembacaan cahaya pantulan dengan pengukur pencahayaan genggam, integrasi seluruh pemandangan untuk menghasilkan pantulan rata-rata adalah metode yang lebih umum. Sebagian besar meter dikalibrasi ke pantulan rata-rata 18% abu-abu, yang dapat menyebabkan masalah pencahayaan untuk pemandangan dengan rasio pencahayaan yang sangat tinggi atau sangat rendah, karena pantulan rata-rata pemandangan akan berbeda secara signifikan dari nilai ini (diilustrasikan nanti di Tabel 69). Dalam kasus seperti itu, pengukuran incamera menggunakan salah satu dari berbagai metering mode matriks khusus, atau pengukuran titik dari sorotan dan bayangan, dan mengambil rata-rata, terbukti lebih berhasil. Faktor koreksi eksposur, juga dijelaskan nanti, dapat diterapkan untuk jenis subjek tertentu.

Masalah yang lebih mendasar muncul ketika kisaran pencahayaan subjek melebihi kisaran dinamis sensor (dijelaskan di bagian selanjutnya). Dalam kasus ini, detail akan hilang dari area sorotan atau bayangan gambar, tergantung di mana eksposur ditempatkan. Efek ini pada kualitas gambar bergantung pada berbagai faktor, seperti seberapa banyak area gambar terpengaruh (detail yang hilang dari sorotan specular kecil, misalnya, mungkin bukan masalah) dan pada jenis sensor (kliping sorotan gambar digital umumnya jauh lebih terlihat daripada pemotongan bayangan, atau hilangnya sorotan dalam film). Strategi untuk mengubah kontras gambar mungkin lebih disukai, seperti pengurangan rasio pencahayaan subjek dengan menggunakan iluminasi tambahan.

## Eksposur optimal dan fungsi transfer

Ada beberapa definisi dynamic range. Dynamic range paling sering menggambarkan rasio antara nilai sinyal terbesar dan terkecil dari intensitas cahaya. Dynamic range dapat berupa rujukan masukan (rasio intensitas cahaya pemandangan, rentang pencahayaan pemandangan atau subjek yang dijelaskan di atas, dengan pencahayaan yang diukur dalam  $\text{cdm}^{-2}$ ) atau rujukan keluaran (rasio sinyal respons yang dikirim oleh sensor pencitraan). Dynamic range dari sensor pencitraan silver halida dan elektronik (dynamic range rujukan keluaran) mengacu pada rasio dari tingkat radiasi tertinggi hingga terendah (dalam cahaya pencitraan tampak) yang dirasakan oleh sensor. Ini umumnya berkaitan dengan kemampuan pencitraan untuk merekam objek terang dan gelap dalam sebuah pemandangan dengan pengaturan eksposur yang sama.

Dynamic range kamera digital diam yang menggabungkan sensor CCD atau CMOS didefinisikan sebagai rasio antara muatan maksimum yang dapat dikumpulkan oleh sensor dan muatan minimum yang berada tepat di atas tingkat noise sensor. Deteksi intensitas cahaya sekecil mungkin dibatasi oleh rantai derau, karena sinyal apa pun di bawahnya tidak dapat dideteksi. Intensitas tangkapan terbesar yang mungkin dibatasi oleh saturasi. Dynamic range biasanya dinyatakan dalam satuan logaritmik:

*Ekuisi 72*

$$DR = \log \left( \frac{I_{max}}{I_{min}} \right) = \log \left( \frac{FWC}{NF} \right)$$

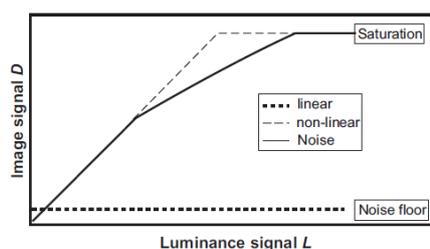
di mana  $I_{max}$  dan  $I_{min}$  masing-masing adalah intensitas maksimum dan minimum; FWC dan NF masing-masing mewakili kapasitas sumur penuh dan lantai noise.

Jika sensor gambar memiliki kurva respons linier, hanya saturasi dan tingkat noise yang membatasi dynamic range. Memperluas dynamic range memerlukan pergeseran saturasi ke level sinyal input yang lebih tinggi dengan memberikan kurva respons non-linier pada sensor. Dalam kasus seperti itu, kemiringan lokal kurva respons (disebut penguatan tambahan) menurun sehingga saturasi tercapai pada tingkat pencahayaan yang jauh lebih tinggi daripada pencitraan linier (lihat Gambar 70). Namun, menurunkan penguatan tambahan pada gilirannya akan menurunkan rasio sinyal-ke-noise tambahan (iSNR; didefinisikan sebagai rasio sinyal luminans input ke noise ekuivalen pencahayaan yang sama atau lebih besar hingga 1.0, juga dikenal sebagai kontras ekuivalen noise, digunakan sebagai kriteria untuk deteksi), yang berarti bahwa ada pertukaran signal-to-noise tambahan saat meningkatkan jangkauan dinamis. Definisi yang lebih umum dari dynamic range yang juga berlaku untuk sensor non-linier dinyatakan sebagai rentang pencahayaan antara  $I_{max}$  dan  $I_{min}$  di mana sinyal-ke-derau tambahan memenuhi kriteria ambang minimum dari intensitas sinyal yang dapat didaftarkan. Dalam kasus seperti itu, dynamic range diberikan oleh Ekuasi 9.1, yang menyatakan dynamic range dalam desibel (dB) dan menggunakan faktor skala 20. Kriteria ambang adalah spesifikasi aplikasi: 1.0 adalah batas deteksi teoretis dan 10 persyaratan untuk fotografi 'yang dapat diterima' kualitas gambar.

Definisi jangkauan dinamis sensor elektronik yang mengacu pada keluaran dapat menghasilkan nomor dynamic range yang dibangun hanya pada spesifikasi teknis, seperti

Kedalaman bit dari konverter analog-ke-digital (A/D) dan memiliki nilai terbatas dalam memprediksi dynamic range. Hubungan antara sinyal input dan output ditetapkan oleh kurva respons pencitra. Dynamic range dan kuantisasi terbatas dalam perangkat penangkap digital sehingga menyebabkan representasi data dan artefak yang tidak memadai seperti kontur dan kompresi nada.

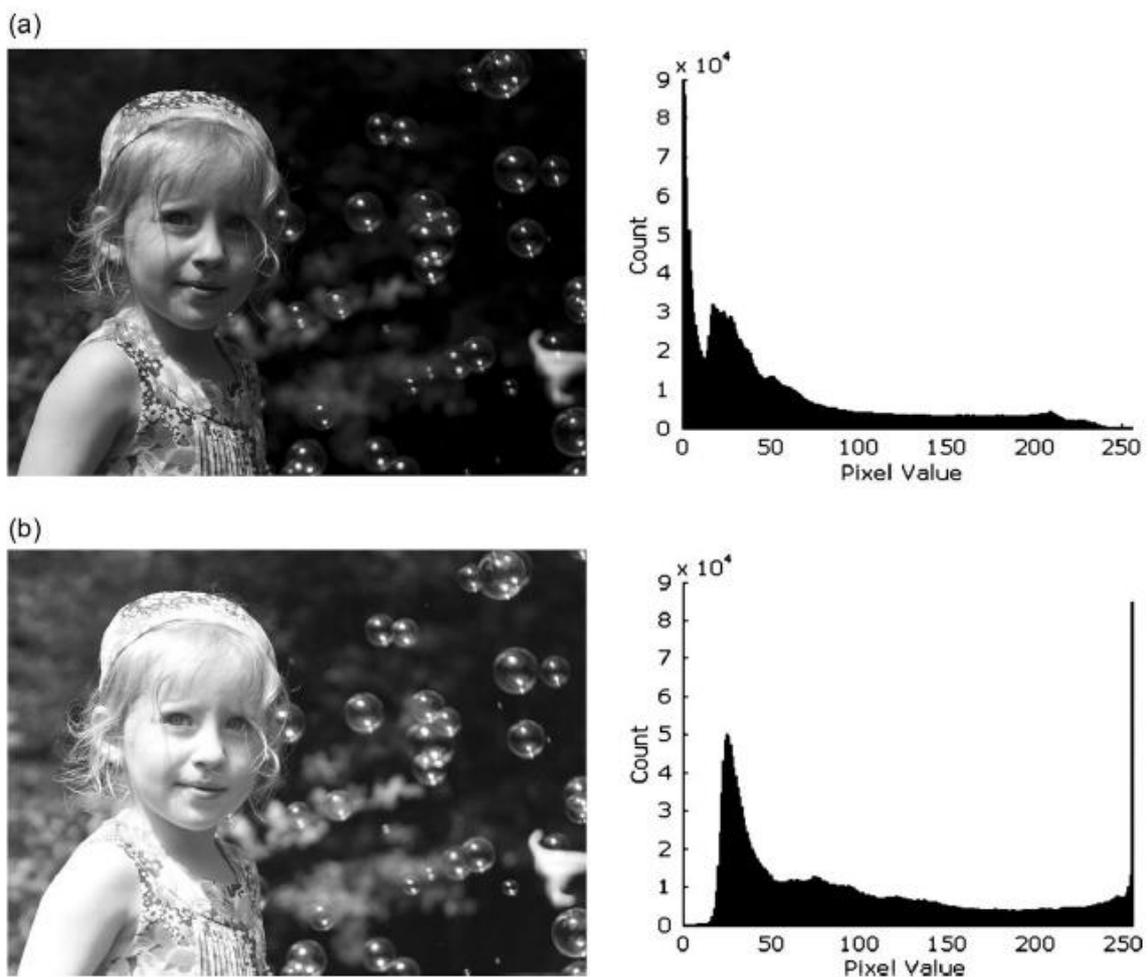
Rentang pencahayaan pemandangan sering kali lebih besar daripada dynamic range sensor pencitraan dan karenanya eksposur tunggal sering kali mengakibatkan hilangnya bayangan atau sorotan. Bagian dari rentang pencahayaan pemandangan di mana kerugian terjadi bergantung pada pilihan pengaturan eksposur. Pencahayaan yang lebih rendah (yaitu di bawah pencahayaan) memungkinkan pengambilan sorotan dengan menghindari saturasi sensor tetapi menghasilkan pemotongan bayangan dan dengan demikian kehilangan detail bayangan. Di sisi lain, eksposur yang lebih tinggi (yaitu eksposur berlebih) memungkinkan representasi bayangan yang baik, tetapi sorotan terpotong ('terbakar'). Gambar 71 menunjukkan gambar yang sedikit kurang terpapar (a) dan berlebih (b) dari adegan rentang pencahayaan tinggi (relatif terhadap sensor) dan histogram yang sesuai, menunjukkan pemotongan bayangan (a) dan sorotan (b).



**Gambar 70** Memperluas dynamic range dengan kurva respons non-linier. Diadaptasi dari Hertel (2009).

Gambar digital yang diambil menggunakan serangkaian pengaturan eksposur yang berbeda memungkinkan cakupan dari rentang pencahayaan pemandangan yang lebih luas, mengungkapkan lebih banyak detail daripada yang mungkin dilakukan dengan satu bidikan. Prosesnya adalah cara paling umum untuk mencapai pencitraan dynamic range tinggi dan biasanya dicapai dengan langkah-langkah berikut: (i) menangkap beberapa eksposur dari subjek yang sama, (ii) estimasi fungsi respons kamera, (iii) dinamis tinggi konstruksi -range dengan melapiskan semua eksposur subjek, dan (iv) pemetaan nada ke tampilan atau media cetak.

Hubungan antara rentang pencahayaan subjek dan kerapatan film, serta faktor-faktor berbeda yang memengaruhi garis lintang eksposur media berbasis perak (didefinisikan sebagai eksposur kamera minimum yang diperlukan untuk menghasilkan detail bayangan yang memadai tanpa kehilangan detail sorotan).



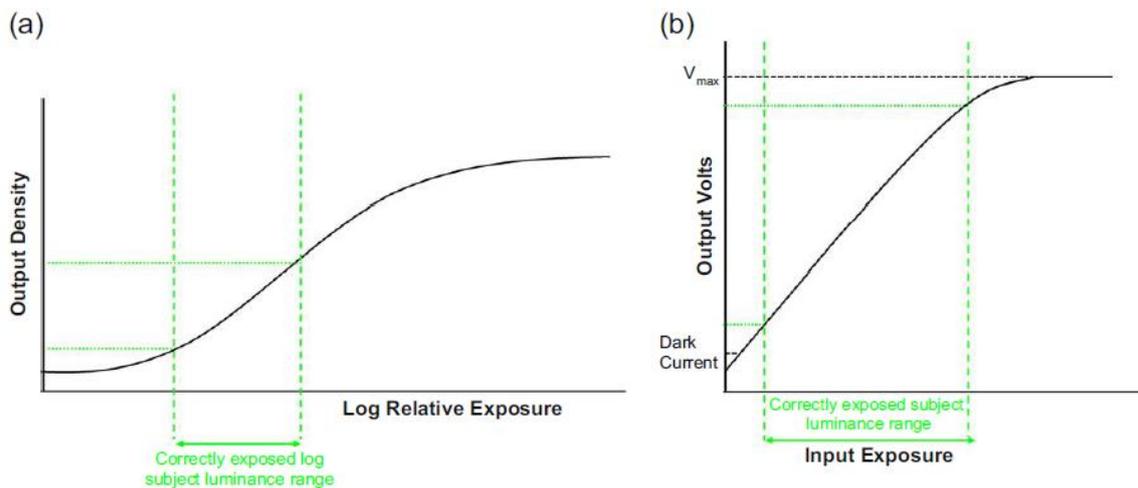
**Gambar 71** Efek pencahayaan berlebih dan kurang pada gambar dengan kisaran luminansi tinggi. (a) Gambar dan histogram kurang terang. (b) Gambar dan histogram yang terlalu terang. Gambar asli Elizabeth Allen

### Exposure meters

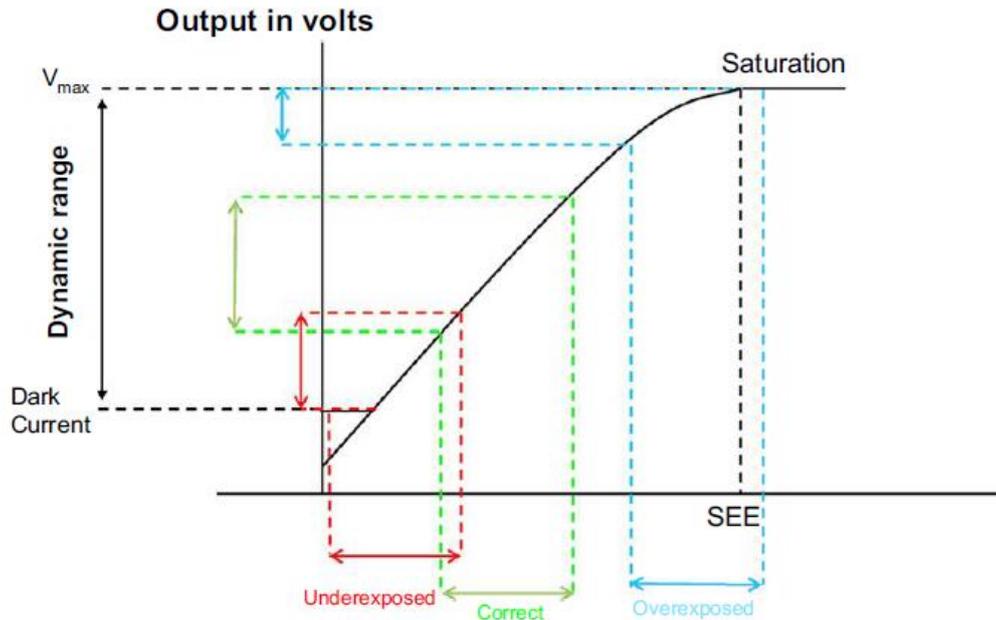
Gambar 72 mengilustrasikan kurva respons dari film negatif hitam-putih konvensional (a) dan dari CCD khas, sebelum pengkodean (b). Di kedua media, eksposur yang ‘benar ‘ dari rentang pencahayaan subjek harus merekam sebagian besar pencahayaan pemandangan di bagian linier

kurva respons. Namun, kurva karakteristik material negatif memiliki ujung yang panjang. Bagian kurva yang digunakan oleh negatif yang 'terekspose dengan benar' mencakup bagian dari jari kaki ini dan bagian bawah dari bagian garis lurus. Lebih lanjut, karena bentuk yang menguntungkan dari kurva karakteristik film fotografis, penggunaan bahu dalam pencahayaan adegan pada film tidak merugikan seperti pada sensor elektronik, karena kemiringan kurva pada titik ini relatif rendah, memungkinkan gradasi yang lebih halus. dalam rekaman sorotan. Kurva respons sensor gambar digital sering dipetakan (biasanya selama encoding) ke respons yang mirip dengan respons dari media film karena alasan ini.

Gambar 73 menunjukkan pemosisian rentang pencahayaan pemandangan khas pada bagian berbeda dari kurva respons CCD, tergantung pada eksposur. Di sini sekali lagi, kisaran pencahayaan pemandangan yang terekspose dengan benar sepenuhnya jatuh pada bagian linier kurva dan dengan demikian direproduksi tanpa kompresi. Kurangnya eksposur menyebabkan kliping karena eksposur jatuh di lantai noise, sedangkan eksposur berlebihan menyebabkan kliping karena saturasi sensor. Dalam kedua kasus, kisaran pencahayaan yang direproduksi berkurang, menghasilkan pengurangan kontras gambar yang diilustrasikan oleh kisaran output yang dipadatkan dalam gambar.



**Gambar 72** Hasil pencahayaan pemandangan yang benar dalam penggunaan bagian garis kurva respons baik (a) analog dan (b) sensor elektronik.



**Gambar 73** Efek kekurangan dan kelebihan eksposur pada posisi kisaran pencahayaan subjek pada kurva respons sensor CCD.

Pengukur pencahayaan (atau pengukur cahaya) adalah perangkat yang mengukur cahaya yang dipantulkan dari subjek, atau cahaya insiden ke subjek, dan mengekspresikan hubungannya dengan sensitivitas film atau pengaturan sensor ISO yang digunakan, dalam hal pengaturan f-number dan shutter speed.

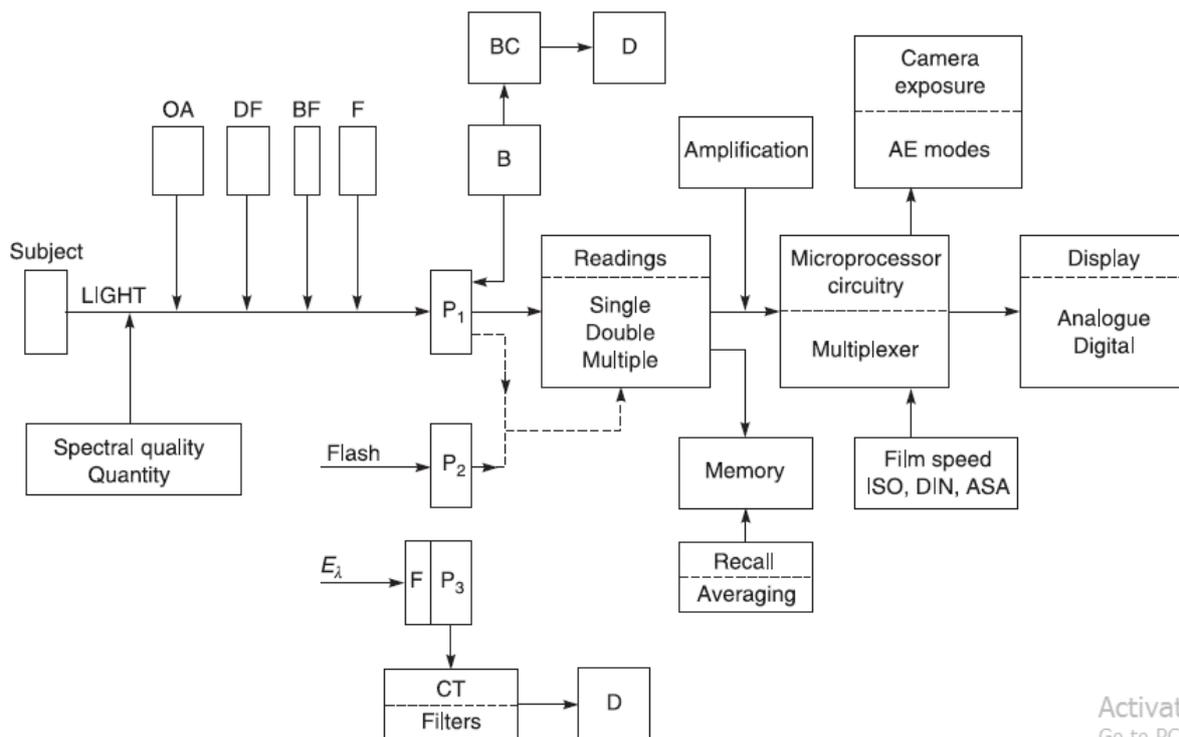
Pengukur eksposur genggam memungkinkan penggunaan pengukuran cahaya yang terjadi dan yang dipantulkan dan masih digunakan sampai batas tertentu dalam pengaturan studio. Pengukuran cahaya insiden khususnya dapat mengatasi masalah eksposur yang disebabkan oleh pemandangan yang berisi area warna terang atau gelap yang luas, yang dapat menghasilkan pengukuran cahaya yang dipantulkan secara anomali. Namun, sebagian karena rentang karakteristik sensor digital yang jauh lebih besar dibandingkan dengan film, dan banyak perkembangan dalam sistem pengukuran dalam kamera yang kompleks, di samping kemampuan untuk segera meninjau gambar dan menyesuaikan eksposur, penggunaan pengukuran eksternal dengan sistem digital kurang tersebar dibandingkan ketika film mendominasi.

Sistem pengukuran dalam kamera, meskipun hanya mampu mengukur cahaya yang dipantulkan, menawarkan banyak metering mode yang canggih dan secara langsung menghubungkan cahaya yang mencapai sensor dengan responsnya; oleh karena itu mereka menemukan adopsi yang lebih luas dalam banyak jenis gambar digital. Juga harus diperhatikan bahwa penggunaan histogram gambar untuk menetapkan eksposur yang benar dengan kamera digital adalah praktik umum (lihat nanti di bab ini). Hal ini menyebabkan sedikit perbedaan dalam fungsi pengukur eksposur dengan kamera digital. Pengukuran pencahayaan sering kali memberikan titik awal dari mana pencahayaan disesuaikan untuk menghasilkan distribusi nada yang diinginkan, daripada keputusan akhir untuk shutter speed dan aperture.

Struktur dan operasi pengukur eksposur genggam dijelaskan di bawah ini. Mencakup sistem pengukuran dalam kamera secara mendetail, meskipun berbagai metering mode akan dibahas nanti dalam bab ini.

## Hand-held exposure meter

Pengukur eksposur terdiri dari sel peka cahaya, beberapa cara untuk membatasi sudut penerimaannya, sakelar oneoff dan sakelar pengubah rentang, sumber daya (jika perlu), skala dalam nilai cahaya, sekumpulan tombol putar kalkulator atau pembacaan data keterpaparan, yang dapat berupa pasangan yang cocok antara f-number dan shutter speed atau EV, dan diffuser untuk pembacaan cahaya insiden. Diffuser berbentuk kubah dan ditempatkan di atas fotosel (lihat Gambar 74).



**Gambar 74** Diagram blok dari komponen utama dan fitur pengukur eksposur. Cahaya sekitar, flash abu, dan suhu warna semuanya dapat diukur. *b*, baterai; BC, pemeriksaan baterai; BF, baffle; CT, suhu warna; D, tampilan; DF, diffusers;  $E_{\lambda}$ , iluminasi spektral; F, filter; OA, lampiran optik; P1, P2, P3, fotosel.

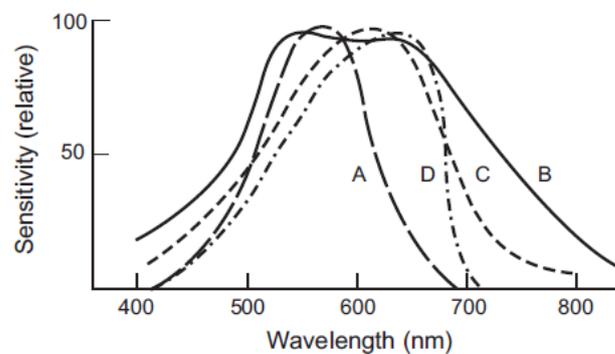
Berbagai jenis fotosel digunakan, termasuk sel fotovoltaik ‘lapisan penghalang’ awal selenium, fotoresistor kadmium sulfida (CdS), fotodiode silikon (SPD) dan fotodiode fosfida galium arsenida (GPD). Properti yang relevan dari jenis CdS dan SPD tercantum.

<b>Tabel 8 Properti fotosel yang digunakan dalam sistem penentuan eksposur</b>		
<b>TIPE FOTOSEL</b>	<b>CdS</b>	<b>SPD</b>
Membutuhkan baterai	Ya	Ya
Membutuhkan penguat	Tidak	Ya
Kecepatan respon	Lambat	Cepat
Efek memori	Ya	Tidak
Sensitivitas	Medium hingga tinggi	Tinggi hingga sangat tinggi
Respon linier	Lemah	Ya
Sensitivitas spektral (warna)	Red bias	Membutuhkan filter blue
Ukuran	Kecil	Kecil

Membutuhkan perangkat pengubah range	Ya	Tidak
Properti Elektrik	Fotokonduktor atau fotoresistor	Photovoltaic

Sel selenium adalah sel paling awal yang digunakan dalam pengukur paparan dan sekarang sudah usang. Mereka tidak membutuhkan baterai tetapi memiliki area sel yang besar. Respon sel selenium terhadap cahaya bergantung pada luas sel. Sel penguat plug-in dapat meningkatkan sensitivitas sekitar 2EV. CdS yang dioperasikan dengan baterai adalah jenis sel yang lebih baru, dengan kepekaan lebih tinggi daripada sel selenium. Sensitivitas yang lebih tinggi berarti ukuran sel dikurangi, faktor penting untuk pengukur eksposur kamera internal. Pengukur fotosel CdS mungkin memiliki jaringan resistor untuk mengubah rentang responsnya; sebagai alternatif dapat menggunakan filter densitas netral atau lubang kecil di depan sel. Responsnya mungkin dipengaruhi oleh paparan sebelumnya terhadap cahaya terang dan mungkin perlu beberapa menit sampai efek ‘memori ‘ ini menghilang. Saat ini sel yang paling umum adalah SPD. Beberapa kamera menggabungkan sel GPD dalam sistem pengukuran eksposurnya. Baik SPD dan GPD memiliki respons yang sangat cepat terhadap perubahan cahaya dan karena alasan ini, keduanya juga digunakan dalam perangkat pengukur flash.

Sensitivitas spektral dari berbagai jenis sangat berbeda (lihat Gambar 75). Jenis CdS dan SPD memiliki sensitivitas inframerah (IR) yang tinggi. SPD biasanya dienkapsulasi dengan filter biru untuk menyerap IR untuk mengurangi sensitivitas ini dan disebut sebagai sel ‘silikon biru’. Sebuah sel selenium juga biasanya disaring untuk mencocokkan respon spektralnya dengan kurva respon visual fotopik CIE standar. Sel GPD tidak sensitif terhadap radiasi IR.



Gambar 75 Sensitivitas spektral fotosel. Grafik sensitivitas spektral relatif terhadap panjang gelombang menunjukkan perkiraan respons spektral atau sensitivitas fotosel yang berbeda yang digunakan dalam sistem pengukuran eksposur. (A) Sensitivitas spektral visual dan sel selenium yang tersaring. (B) Fotoresistor CdS. (C) Siliconphotodiode (SPD) dilengkapi dengan filter biru (sel ‘siliconblue’). (D) Gallium arsenide phosphide photodiode (GPD).

### Penerimaan Angle

Fotosel CdS dan SpD adalah perangkat kecil dengan respons yang tidak bergantung pada area sel, tetapi memerlukan pengaturan optik khusus saat digunakan dalam pengukur pencahayaan. Semua fotosel adalah perangkat non-pencitraan, yang mengintegrasikan aliran insiden. Respons terbatas pada area subjek yang dicakup oleh lensa kamera, atau area yang lebih kecil. Teknik alternatif pembacaan terpadu, area kecil dan spot digunakan.

Secara tradisional, pengukur sel selenium dibatasi untuk memiliki sudut penerimaan sekitar  $50^\circ$ , sesuai dengan bidang pandang lensa standar format kamera, tetapi dengan rasio aspek yang jauh lebih persegi, untuk mengurangi efek langit yang cerah daerah. Pelepasan penyekat meningkatkan sudut penerimaan menjadi sekitar  $75^\circ$ , untuk membantu kepekaan. Sel CdS dan SPD yang jauh lebih kecil mungkin hanya terletak di bagian bawah sumur silindris bergaris hitam atau memiliki lensa positif yang terikat pada permukaan reseptor. Pengaturan ini memberikan sudut penerimaan sekitar  $25-30^\circ$ , memungkinkan pembacaan zona area subjek yang lebih selektif. Viewfinder kecil dapat membantu mengarahkan sel meteran ke area yang diinginkan. Perangkat aksesori dapat mengurangi sudut ini lebih jauh hingga  $15^\circ$  atau bahkan  $5^\circ$ . Pengukur titik adalah pengukur khusus dengan sudut penerimaan 1 atau kurang. Pengukur tempat genggam mencakup sistem tampilan. Pengukuran titik sering kali tersedia di kamera SLR sebagai salah satu dari dua atau tiga cara alternatif pengukuran gambar selektif (lihat nanti).

Pengukuran yang dihasilkan oleh pengukur eksposur didasarkan pada asumsi bahwa pemandangan yang diukur terintegrasi ke abu-abu pertengahan. Nilai abu-abu untuk pengukur eksposur yang dikalibrasi adalah abu-abu tengah pada skala geometris dari putih ke hitam (reflektansi 18%). Oleh karena itu, pengukur tidak dapat menilai apakah subjek terang atau gelap, yang dapat menyebabkan kesalahan dalam pembacaan eksposur untuk pemandangan yang mengandung persentase area terang atau gelap yang substansial. Pengukuran yang dikembalikan oleh pengukur pencahayaan juga didasarkan pada asumsi bahwa jarak antara lensa dan bidang fokus sama dengan panjang fokus lensa. Oleh karena itu, koreksi eksposur diperlukan saat menggunakan bellow ekstensi (lihat bagian selanjutnya tentang faktor eksposur).

Ada dua jenis pengukur pencahayaan tergantung pada metode yang digunakan untuk mengukur cahaya: pengukur pencahayaan datang dan pengukur pencahayaan pantulan. Pengukur eksposur genggam dapat mengukur cahaya insiden dan pantulan. Pengukur pencahayaan internal di kamera SLR mengukur intensitas cahaya yang dipantulkan dari subjek dan melewati lensa (TTL). Kamera non-SLR memiliki fotosel di depan bodi atau lensa kamera.

## Nilai Eksposur

Sistem nilai eksposur (EV) berasal dari Jerman pada tahun 1950-an dan dimaksudkan sebagai pengganti yang mudah dikuasai untuk kombinasi shutter speed/apertur, memberikan satu angka kecil, bukan dua (salah satunya adalah pecahan). Sistem EV didasarkan pada perkembangan geometris dari rasio umum 2, dan dengan demikian terkait dengan urutan penggandaan skala shutter dan apertur. Hubungan yang digunakan adalah:

*Ekuasi 73*

$$EV = \log_2(N^2/t)$$

dengan N adalah aperture relatif dan t adalah shutter speed.

Perubahan basis logaritma memberikan:

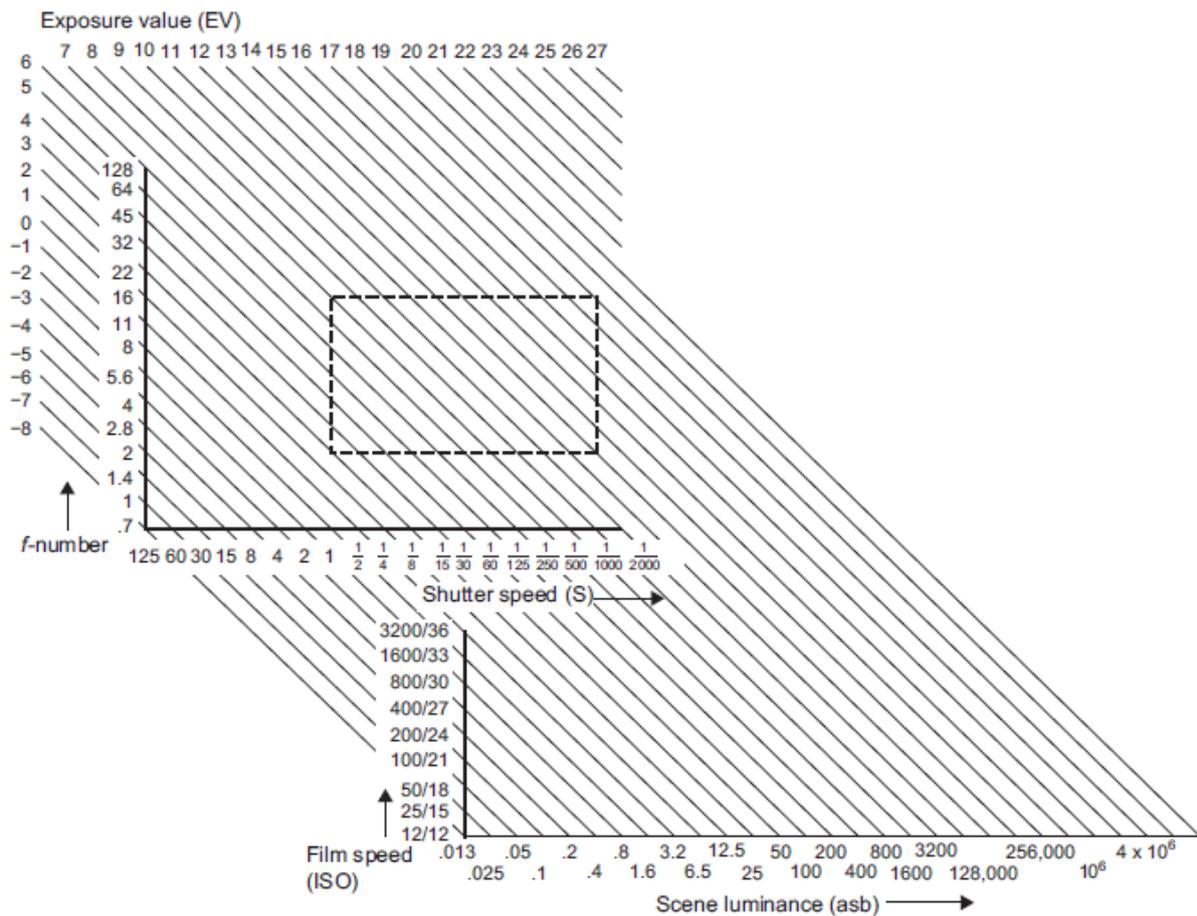
*Ekuasi 74*

$$EV = (1/\log_2) \log(N^2/t)$$

atau

$$EV = 3.32 \log N^2/t$$

Misalnya, kombinasi 1/125 detik pada  $f/11$  dari Ekuasi 74 menghasilkan EV 14. Demikian pula, semua eksposur yang setara dengan pasangan ini akan memberikan EV 14.



**Gambar 76** Nilai eksposur (EV). Hubungan antara pencahayaan pemandangan dan ISO speed dapat dinyatakan dalam nilai eksposur, yang merupakan kombinasi dari apertur dan shutter speed. Persegi panjang menunjukkan kisaran pengoperasian umum dari kamera yang dilengkapi dengan lensa  $f/2$ .

Meskipun tidak lagi digunakan untuk tujuan tersebut, gagasan tentang skala EV berguna dalam praktik pengukuran pencahayaan, mengingat bahwa kenaikan 1 dalam skala EV menunjukkan faktor 2 dalam pencahayaan, atau perubahan satu stop. Kegunaan utama adalah memberikan ukuran kuantitatif dari sensitivitas sistem pengukuran dengan mengutip EV minimum yang dapat diukur untuk ISO speed 100. Misalnya, pengukur eksposur genggam yang menggunakan sel SPD mungkin memiliki sensitivitas pengukuran antara EV-2 dan sekitar EV 23. Sensitivitas EV-2 dapat memungkinkan pengukuran dalam cahaya bulan. Penggunaan berbagai attachment seperti pengaturan spot meter atau probe serat optik mengurangi sensitivitas secara signifikan; Oleh karena itu, nilai awal yang tinggi diperlukan untuk meteran yang ditujukan untuk aksesori tersebut.

Pengukur dalam kamera dibatasi dalam kepekaannya oleh kehilangan cahaya yang terlibat dalam sistem optiknya, dan oleh apertur maksimum lensa untuk pengukuran TTL apertur

penyempitan. Untuk perbandingan, aperture ini harus dikotip: untuk lensa  $f/1.4$ , sensitivitas EV 1 pada ISO 100 adalah tipikal. Batas pengoperasian sistem fokus otomatis dalam kamera dikotip serupa. Penggunaan lain dari sistem EV adalah grafik EV (lihat Gambar 76), di mana skala pada sumbu perseg panjang adalah shutter speed dan apertur. Serangkaian garis diagonal yang menghubungkan pasangan nilai eksposur ekuivalen mewakili angka EV. Lokus EV ini dapat diperluas ke grafik ISO speed dan pencahayaan subjek yang berdekatan. Pada grafik seperti itu, dimungkinkan untuk menunjukkan perilaku kamera tertentu, misalnya dalam hal kinerja dengan kisaran pengaturan yang tersedia. Selain itu, dalam kasus kamera otomatis, mode eksposur yang berbeda dan bentuk eksposur terprogram dapat dibandingkan.

Akhirnya, skala EV ‘plus ‘ dan ‘minus ‘ biasanya digunakan pada kompensasi eksposur dan kontrol pelacakan otomatis dari kamera otomatis, baik kamera film maupun kamera SLR digital, dan untuk menunjukkan faktor filter dan kompensasi eksposur untuk layar pemfokusan yang dapat dipertukarkan.

## Faktor eksposur

Faktor eksposur adalah angka perkalian yang digunakan untuk mengoreksi eksposur saat menggunakan filter pada lensa (faktor filter), atau bellow untuk memperpanjang jarak antara lensa dan bidang fokus (faktor ekstensi bellow). Mereka digunakan dengan pengukur eksposur non-TTL. Koreksi eksposur menggunakan faktor eksposur dicapai dengan mengalikan waktu eksposur dengan faktor eksposur, atau dengan mengubahnya menjadi stop dan mengoreksi f-number pada lensa yang sesuai. Konversi faktor eksposur menjadi stop didasarkan pada fakta bahwa perubahan satu stop menggandakan atau membagi eksposur. Jadi faktor 1 berarti tidak ada perubahan dalam eksposur, faktor 2 berarti perubahan satu stop dalam eksposur (karena setiap perhentian menggandakan atau membagi perhentian sebelumnya), faktor 4 perubahan dua perhentian, dan sebagai aturan umum:

*Ekuasi 76*

$$2^n = CF$$

dimana CF adalah faktor koreksi dan n adalah jumlah perhentian.

Faktor filter direkomendasikan oleh pabrikan dan digunakan untuk mengkompensasi setiap kehilangan cahaya yang terjadi saat melewati filter, sebelum mencapai sensor. Ada cara praktis untuk menentukan faktor filter. Faktor ekstensi bellow mengkompensasi setiap kehilangan cahaya yang terjadi karena peningkatan jarak antara lensa dan bidang fokus. Ini dihitung sebagai berikut:

*Ekuasi 77*

$$\text{Faktor below extension} = \frac{2(\text{Below Extension})}{(\text{Focal length})^2}$$

Faktor bellow extension

## Kegagalan hukum timbal balik

Hukum timbal balik mengacu pada eksposur fotografi dan memperhitungkan jumlah cahaya yang mencapai sensor dan durasi eksposur (Ekuasi 69). Dengan bahan silver halida, ada kasus, di mana hubungan eksposur rusak dan hukum tidak lagi berlaku. Ini dikenal sebagai kegagalan hukum timbal balik (RLF). Kegagalan hukum timbal balik bergantung pada durasi dan

intensitas pemaparan. Oleh karena itu, ada dua jenis RLF: RLF intensitas rendah dan RLF intensitas tinggi. RLF intensitas rendah, yang merupakan kasus yang paling sering ditemui, terjadi dengan eksposur dengan intensitas cahaya rendah, membutuhkan waktu eksposur yang sangat lama. Kecepatan efektif film dikurangi pada tingkat cahaya yang sangat rendah, dengan kehilangan kecepatan yang lebih besar di area bayangan gambar dibandingkan dengan sorotan. Hal ini dapat dijelaskan karena intensitas cahaya yang rendah menyebabkan foton mencapai materi sensitif dalam jumlah yang jauh lebih sedikit selama periode waktu tertentu. Menurut teori GurneyMott, di bawah sejumlah foton yang diserap, gambar laten tidak stabil dan ada kemungkinan besar rekombinasi elektron ke dalam kisi silver halida. Oleh karena itu, di area bayangan gambar, kemungkinan rekombinasi ini meningkat. Hasilnya adalah penurunan densitas di area film dengan densitas rendah dibandingkan dengan area dengan densitas tinggi. Ini menghasilkan kontras yang lebih tinggi dan kemungkinan perubahan dalam keseimbangan warna. Kontras tinggi yang dihasilkan dapat dikurangi dengan mengurangi waktu pengembangan.

RLF intensitas tinggi terjadi bila intensitas cahaya sangat tinggi, membutuhkan shutter speed yang sangat tinggi untuk pencahayaan yang benar dan menurunkan kecepatan film efektif. Penurunan nilai densitas tinggi mengakibatkan hilangnya kontras, yang dapat dikompensasikan dengan meningkatkan waktu pengembangan. Perubahan keseimbangan warna juga dapat muncul karena lapisan film warna terpengaruh secara berbeda. Dalam kedua kasus RLF, perubahan warna ini dapat dikoreksi dengan penggunaan filter.

Karena respons film yang berbeda saat digunakan di bawah intensitas cahaya yang sangat tinggi atau rendah, pabrikan merancang emulsi sehingga memiliki kinerja optimal pada intensitas cahaya yang biasanya digunakan untuk film itu. Plat astronomi adalah contohnya, dengan emulsi yang dirancang khusus untuk eksposur yang sangat lama pada intensitas cahaya rendah.

## **Jenis pengukuran cahaya**

### **1. Pengukuran cahaya insiden**

Seperti yang disebutkan sebelumnya, pengukur eksposur genggam dapat memberikan pengukuran cahaya insiden dan pantulan. Dalam pengukuran cahaya insiden, pengukur eksposur mengukur jumlah cahaya yang menerangi subjek. Pengukuran diambil dari posisi subjek, dengan sensor pengukur eksposur mengarah ke kamera. Ini cocok untuk kasus di mana pencahayaannya seragam atau saat pencahayaan terkontrol digunakan. Ini juga berguna jika latar belakangnya dominan. Saat subjek adalah koreksi cahaya latar mungkin diperlukan pada eksposur. Namun, dengan jenis pengukuran ini, sifat reflektif subjek tidak diperhitungkan. Batasan lainnya adalah, jika akan digunakan untuk menentukan eksposur dari pemandangan yang jauh, pengukur eksposur harus diposisikan dengan tepat sehingga cahaya yang jatuh di atasnya sama dengan cahaya yang jatuh pada tempat kejadian. Dalam kebanyakan kasus, ini mungkin tidak praktis.

Pengukur flash adalah pengukur cahaya insiden yang dirancang untuk memiliki waktu respons yang sangat cepat terhadap perubahan kondisi cahaya. Pengukuran cahaya insiden mudah dilakukan dengan pengukur cahaya genggam, tetapi tidak cocok untuk sistem pengukuran dalam kamera.

## **2. Pengukuran cahaya yang dipantulkan**

Pengukur eksposur cahaya yang dipantulkan mengukur cahaya yang dipantulkan dari berbagai permukaan yang berbeda dalam pemandangan. Saat menggunakan pengukur genggam, bergantung pada pengukur pencahayaan, pengukuran cahaya dapat dilakukan dengan menggunakan sudut lebar (kira-kira  $30^\circ$ ) atau sudut sempit, juga dikenal sebagai titik (kira-kira  $1-2^\circ$ ). Dengan pengukur eksposur cahaya yang dipantulkan, pembacaan dilakukan dari posisi kamera, pada sumbu lensa, dengan sensor mengarah ke subjek. Perhatian harus diberikan untuk menghindari cahaya insiden pada sel pengukur eksposur karena hamburan cahaya akan mempengaruhi pembacaan. Pengukur eksposur tempat genggam mencakup penampil yang digunakan untuk memilih area tertentu dari subjek atau pemandangan dengan presisi. Pengukuran cahaya yang dipantulkan dengan pengukur eksposur sudut lebar cocok untuk pemandangan dengan sorotan yang seimbang, rona tengah, dan bayangan karena rata-rata pencahayaan di seluruh pemandangan yang diukur (‘integrasikan togrey’). Karena alasan ini, pemandangan dengan sorotan dominan atau area bayangan dapat menghasilkan masing-masing kekurangan atau kelebihan eksposur. Properti reflektif subjek mungkin juga berpengaruh pada pengukuran meter eksposur. Area yang diukur juga memainkan peran penting dalam menentukan eksposur yang benar, seperti yang dijelaskan di bagian selanjutnya.

## **3. Mode metering dalam kamera**

Pengukur eksposur kamera internal mengukur cahaya yang dipantulkan menggunakan berbagai metering mode yang berbeda.

## **4. Spot Metering**

Sedangkan untuk pengukur titik genggam, pengukur titik dalam kamera mengukur sudut sempit, sesuai dengan kira-kira 4% dari area pemandangan. Pengukuran mungkin dari tengah frame atau dari titik off-center yang dipilih pengguna, dengan beberapa model mendukung mode multi-titik dari berbagai area dalam pemandangan. Pengukuran titik berguna dalam pemandangan kontras tinggi dan cahaya latar, di mana subjek yang diminati secara signifikan lebih gelap daripada latar belakang, dan memungkinkan area yang diperlukan diukur dengan benar, tanpa pengukuran yang secara signifikan dipengaruhi oleh area besar yang lebih terang di sekitarnya, meskipun sorotan detail akan dikorbankan. Pengukuran titik juga berguna saat mengambil rata-rata sorotan dan bayangan, yang akan dijelaskan nanti.

## **5. Partial area metering**

Pengukuran area parsial mengambil pengukuran dari area yang lebih luas daripada pengukuran spot, sekitar 10-15% frame, yang biasanya berada di tengah frame, meskipun seperti pengukuran spot dalam kamera, beberapa model memungkinkan pemilihan pengguna untuk alternatif off-center Titik AF di tempat kejadian. Seperti halnya pengukuran titik, pengukuran area parsial dapat berguna untuk subjek dengan cahaya latar dan dapat memberikan keseimbangan pencahayaan yang lebih baik antara latar depan dan latar belakang, yang khususnya penting saat mencoba menghindari sorotan yang terpotong dalam pencahayaan dengan kamera digital.

## **6. Centre-weighted average metering**

Seringkali metode default dari pengukuran eksposur dalam kamera, pengukuran rata-rata center-weighted mengukur keseluruhan pemandangan, tetapi memberikan persentase yang lebih besar dari pengukuran ke arah tengah pemandangan, dengan pinggiran memiliki pengaruh yang jauh lebih sedikit pada pembacaan. Penggunaannya secara luas sebagian karena

menghasilkan hasil yang wajar saat menangani pemandangan dengan rasio pencahayaan tinggi seperti langit yang terang benderang di atas lanskap yang lebih gelap, tanpa memerlukan koreksi eksposur yang signifikan. Inilah alasannya, dalam kamera, bahwa pembacaan rata-rata pembobotan tengah telah sepenuhnya menggantikan pengukuran rata-rata seluruh adegan, yang sekarang sudah usang di semua kamera kecuali film klasik (lihat bagian selanjutnya tentang pengukuran pencahayaan total adegan).

## **7. Matriks Metering atau multi-zona Metering**

Juga disebut pengukuran tersegmentasi, sarang lebah, atau evaluatif, seperti yang dijelaskan, jenis sistem pengukuran. membagi pemandangan menjadi beberapa segmen dan mengambil bacaan keterpaparan individu dari masing-masing area yang berbeda. Hasilnya dianalisis dalam hal luminansi rata-rata dan perbedaan luminansi antar zona, serta pencahayaan pemandangan keseluruhan, dan dibandingkan dengan data dari berbagai jenis pemandangan yang telah disimpan sebelumnya di kamera untuk memutuskan jenis pemandangan yang akan difoto dan ditetapkan. eksposur yang optimal. Zona sering kali diberi bobot sesuai dengan titik fokus otomatis yang dipilih, untuk memastikan bahwa wilayah yang diinginkan terpapar dengan benar, tetapi faktor lain juga dapat dipertimbangkan, seperti jarak subjek, depth of field, dan pencahayaan belakang atau sekeliling. Meskipun tujuan dari sistem tersebut adalah untuk mengurangi kebutuhan kompensasi pencahayaan, dan secara umum sistem tersebut sangat berhasil dalam memberikan hasil yang baik untuk sebagian besar pemandangan, hasil dapat menjadi tidak konsisten untuk jenis pemandangan tertentu, dan bergantung pada kecanggihan metode pengukuran dari pabrikan tertentu dan pada titik fokus otomatis.

## **8. Eksposur flash elektronik**

Pencahayaan dengan flash elektronik bisa menjadi tugas yang menantang, terutama karena fakta bahwa flash elektronik tidak menyertakan lampu pemodelan dan oleh karena itu pramvisualisasi gambar akhir sulit. Keuntungan saat menggunakan kamera digital dengan flash elektronik adalah gambarnya hampir segera tersedia untuk dilihat. Ini memungkinkan fotografer membuat perubahan yang sesuai pada pencahayaan jika perlu. Namun, karena kesulitan dalam prakiraan, fotografer mungkin harus mengambil beberapa foto sebelum mencapai hasil yang diinginkan. Hal ini dapat dilakukan dengan still life, tetapi dengan adegan aksi atau pemandangan dengan subjek bergerak, mungkin tidak dapat mengulang pemotretan dengan pengaturan flash yang berbeda.

Flash elektronik dapat digunakan baik dalam mode manual atau otomatis. Dalam mode manual, fotografer menetapkan f-number yang sesuai pada lensa kamera menurut jarak antara flash dan subjek dan nomor panduan flash, yang dijelaskan di bawah ini secara lebih rinci. Pengaturan ini juga bergantung pada pengaturan ISO pada kamera. Perhatikan bahwa shutter speed diatur ke kecepatan sinkronisasi blitz untuk kamera dengan shutter bidang fokus. Dalam mode otomatis, flash dapat menggabungkan sensor cahaya yang mengukur cahaya yang dipantulkan dari tempat kejadian dan menyela flash saat cahaya yang dipantulkan dari subjek memadai untuk eksposur yang benar. Sebagai alternatif, unit flash dapat menggunakan informasi pencahayaan pemandangan dari pengukuran TTL.

kecepatan sinkronisasi untuk kamera dengan shutter bidang fokus. Dalam mode otomatis, flash dapat menggabungkan sensor cahaya yang mengukur cahaya yang dipantulkan dari tempat kejadian dan menyela flash saat cahaya yang dipantulkan dari subjek memadai untuk eksposur yang benar. Sebagai alternatif, unit flash dapat menggunakan informasi pencahayaan pemandangan dari pengukuran TTL.

## 9. Guide Number

Output cahaya dan eksposur kamera yang diperlukan untuk unit flash tertentu dapat dengan mudah diekspresikan dengan nomor panduan eksposur, atau faktor flash. Untuk ISO speed 100 dan jarak subjek (dalam meter), f-number N yang diperlukan diberikan dari nomor panduan G dengan hubungan  $G = Nd$ .

Nomor panduan ini sering kali disertakan dalam penunjukan kode alfa numerik unit flash. Misalnya, penyertaan angka 45 biasanya akan menunjukkan nomor panduan dasar 45 dalam meter untuk ISO speed 100. Nomor panduan hanya panduan, dan tes praktis diperlukan untuk menetapkan keakuratannya, yang tergantung sampai batas tertentu pada efek dari lingkungan sekitar, tingkat cahaya ambient dan shutter speed yang digunakan. Nomor panduan juga berubah dengan pilihan keluaran daya pecahan seperti yang ditawarkan oleh banyak unit, beberapa di antaranya dapat memilih daya penuh, setengah, seperempat, seperdelapan dan satu belas atau kurang, atau, jika pengaturan penggerak motor kamera dipilih, memberikan daya yang berkurang dan daur ulang yang cepat. Demikian pula, perubahan pada daya penutup flash agar sesuai dengan lensa yang berbeda juga akan memengaruhi nomor panduan.

Nomor panduan dibuat dengan asumsi sumber titik dekat dan didasarkan pada hukum kuadrat terbalik. Penggandaan output flash atau penggandaan ISO speed yang digunakan akan meningkatkan nomor panduan dengan faktor 1,4. Keluaran empat kali lipat atau ISO speed menggandakan nomor panduan. Menggandakan jarak antara sumber flash dan jarak subjek membutuhkan perubahan + 2EV dalam eksposur (faktor x4).

Meskipun kalkulasi seperti itu cukup sederhana untuk dilakukan untuk satu sumber flash, akan semakin sulit untuk melakukannya untuk dua atau lebih sumber, terutama jika mereka berada pada jarak yang berbeda dan kekuatan yang berbeda. Penempatan kepala flash tanpa bantuan lampu pemodelan adalah tugas yang membutuhkan pengalaman dan keterampilan. Tetapi sebagai panduan flash kepala kembar sederhana, menggunakan satu flash off-camera sebagai lampu utama dan satu lagi on-camera sebagai cahaya pengisi, cahaya fill-in harus menyediakan kira-kira seperempat hingga setengah output dari lampu utama.

Sistem nomor panduan telah diganti dalam unit flash otomatis dengan menggunakan output flash variabel dan karenanya durasi sebagai cara untuk mengontrol eksposur, tetapi masih berlaku dalam situasi seperti penggunaan unit flash cincin atau dalam lensa di mana panduan mungkin diatur dan ditautkan ke kontrol pemfokusan untuk memberikan pembacaan f-number yang diperlukan untuk jarak subjek tertentu. Demikian pula, ini digunakan dalam kamera fokus otomatis di mana output flash ditetapkan, dan f-number yang sesuai diatur oleh pengaturan jarak dari sistem fokus otomatis.

### **Teknik pengukuran cahaya pantulan**

Seperti dijelaskan di atas, eksposur optimal dapat ditentukan dengan pengukuran luminansi subjek (atau zonanya) atau, sebagai alternatif, dengan mengukur iluminasi pada subjek (cahaya datang), diikuti dengan lokasi rasio pencahayaan log di tempat yang sesuai. posisi pada kurva karakteristik material. Idealnya, rasio pencahayaan itu sendiri harus ditentukan, tetapi ini membutuhkan pengalaman dalam menemukan zona yang sesuai dan mudah diukur secara akurat oleh orang lain. Cara ini biasanya terlalu rumit untuk digunakan sehari-hari. Metode yang lebih sederhana lebih disukai dalam praktiknya, meskipun secara teori mungkin kurang akurat.

## 1. Pengukuran luminasi pemandangan total

Metode 'integrasi' ini menerima semua fluks cahaya dari area subjek yang dipilih untuk difoto. Pengukuran cahaya pantulan seperti itu mudah dilakukan dan membutuhkan sedikit penilaian selektif. Ini digunakan dalam meter genggam dan meteran abu, tapi sekarang sudah usang dalam sistem meteran incamera, yang telah diganti dengan meteran rata-rata centrewighted. Seperti dijelaskan sebelumnya, metode seperti itu hanya akan akurat untuk pemandangan dengan sorotan yang seimbang, rona sedang, dan bayangan.

Biasanya diperlukan koreksi untuk nilai yang ditunjukkan dari pengaturan eksposur untuk subjek dengan kontras sangat tinggi atau sangat rendah, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 70, atau untuk subjek dengan distribusi nada nontypical, seperti subjek dengan kunci tinggi atau kunci rendah. Kebanyakan kamera dengan mode eksposur otomatis memiliki kontrol kompensasi eksposur terkait yang menawarkan peningkatan atau penurunan yang diatur secara manual hingga  $\pm 3\text{EV}$  atau lebih dengan peningkatan  $1/2$  atau  $1/3$  EV untuk mengatasi subjek atipikal atau distribusi pencahayaan.

<b>Tabel 9 Luminance Range dan koreksi eksposur</b>				
<b>KLASIFIKASI RASIO LUMINANCE SUBJECT</b>	<b>RASIO LUMINANCE</b>	<b>RANGE EV (STOP)</b>	<b>REFLEKSI MEAN (%)</b>	<b>FAKTOR KOREKSI EKSPOSUR YANG PERKIRAAN</b>
Sangat tinggi	2048:1 ( $2^{11}$ :1)	11	11	+1 EV
Tinggi	512:1 ( $2^9$ :1)	9	14	+0.5 EV
Rata-rata	128:1 ( $2^7$ :1)	7	18	0 EV
Rendah	32:1 ( $2^5$ :1)	5	25	-0.5 EV
Sangat rendah	8:1 ( $2^3$ :1)	3	41	-1 EV

## 2. Mengukur middle-grey-surface

Seperti disebutkan sebelumnya, pengukur pencahayaan dikalibrasi untuk memberikan kombinasi pengaturan apertur dan shutter speed untuk ISO speed tertentu sehingga permukaan yang diukur akan direproduksi dalam cetakan sebagai abu-abu tengah. Teknik pengukuran cahaya, cocok untuk pemandangan dengan pencahayaan seragam, adalah memilih dan mengukur area subjek yang sesuai dengan luminansi tengah (nada kunci). Nada warna Kaukasia (sekitar 25% reflektansi) dapat digunakan sebagai nada kunci. Teknik ini mirip dengan pengukuran cahaya datang. Namun, penting untuk dicatat bahwa ini tidak memberikan informasi apa pun tentang kisaran nada pencahayaan pemandangan.

Jika sorotan dan bayangan berada di luar jangkauan dinamis sensor gambar atau film, kontrol iluminasi pemandangan mungkin diperlukan untuk memastikan bahwa sorotan dan bayangan ditempatkan secara tepat pada kurva karakteristik (film) atau fungsi transfer (sensor gambar). Area pencahayaan tengah subjek dapat diganti dengan kartu abu-abu tengah (reflektansi 18%) seperti kartu netral reflektansi Kodak 18%, yang dikalibrasi ke nilai abu-abu tengah yang sama dengan pengukur pencahayaan. Kartu ini digunakan untuk melakukan pengukuran cahaya dalam pemandangan dengan pencahayaan variabel. Kartu ditempatkan di dalam pemandangan di bawah cahaya kejadian yang sama, sehingga menerima penerangan yang sama seperti subjeknya. Pengukuran diambil dengan pengukur eksposur cukup dekat sehingga kartu

tersebut memenuhi sudut penerimaan fotosel. Ini memastikan bahwa pembacaan tidak dipengaruhi oleh variasi pencahayaan pemandangan.

Banyak kamera menawarkan fitur ‘kunci memori eksposur ‘ untuk memungkinkan sistem pengukuran mengukur dan mengatur eksposur untuk kunci atau nada pengganti, setelah gambar dikomposisi ulang dan eksposur yang disimpan diberikan. Memori ini mungkin membatalkan sendiri setelah terpapar, atau mungkin memerlukan pembatalan manual.

### **3. Pengukuran luminansi bayangan tergelap**

Metode ini menempatkan nada ini pada titik tetap di ujung kurva karakteristik film, memberikan kerapatan yang benar ke bayangan terdalam yang akan direkam. Namun, dengan fotografi digital, teknik ini dapat menghasilkan sorotan yang terpotong, jadi dalam banyak kasus teknik ini tidak digunakan. Kesulitan praktis termasuk sensitivitas pengukuran yang diperlukan, efek cahaya pada pengukuran, dan efek sorotan di bidang pandang meteran.

### **4. Pengukuran luminansi sorotan paling ringan**

Metode ini mirip dengan metode sorotan buatan, yang bekerja dengan baik untuk bahan slide warna. Dengan metode highlight buatan, pengukuran eksposur diambil dari kartu putih matt, dengan reflektansi sekitar 90%. Eksposur yang ditunjukkan pada pengukur eksposur kemudian dibagi dengan 5 (90% atau 18%) untuk mereproduksi rentang nada suasana dengan benar. Metode pengukuran pencahayaan sorotan uji light menempatkan sorotan pada titik tetap dari kurva karakteristik dengan detail sorotan dan nada lain sebagai kerapatan yang berbeda. Eksposur pada pengukur eksposur kemudian dibagi dengan 5. Detail bayangan biasanya direkam secara memadai, tetapi subjek dengan kontras rata-rata dapat menerima eksposur lebih dari yang diperlukan. Perhatikan bahwa saat menggunakan metode ini, pengukuran tidak boleh dilakukan pada sorotan specular.

### **Nilai rata-rata**

Metode ini menentukan eksposur dengan mengukur area paling terang dan paling gelap di layar yang perlu direkam. Kombinasi keluaran dari apertur lensa dan shutter speed untuk kedua pengukuran kemudian dirata-ratakan. Untuk metode ini, pengukur eksposur titik lebih cocok daripada pengukur eksposur sudut lebar, yang membutuhkan area luas dengan pencahayaan yang kira-kira seragam. Perlu dicatat bahwa area yang tampak memiliki pencahayaan yang seragam mungkin tampak memiliki variasi pencahayaan saat diamati atau diukur pada jarak yang lebih dekat. Meskipun metode ini memberikan informasi tentang area paling terang dan paling gelap dalam pemandangan dan perbedaan perhentian di antara keduanya, metode ini tidak memberikan informasi tentang bagaimana nilai nada menengah didistribusikan.

### **Teknik eksposur dan kamera digital**

Seperti dijelaskan di bagian sebelumnya, beberapa teknik pengukuran eksposur tradisional sama-sama dapat diterapkan untuk penangkapan digital; Namun, karakteristik sensor gambar dan batasan yang diberlakukan sebagai hasil dari proses konversi analog-ke-digital (A/D) berarti bahwa aspek-aspek tertentu memerlukan pertimbangan dan penekanan yang cermat saat menetapkan eksposur yang benar. Perhatian mendasar adalah batasan dynamic range gabungan dari sensor dan konversi A/D berikutnya. Selain itu, pemotongan sorotan dan karakteristik gangguan digital di daerah bayangan gambar memiliki efek merugikan yang signifikan pada kualitas gambar. Lebih lanjut, jika gambar diambil ke format file JPEG, maka batasan dynamic range lebih jelas, karena gambar dikoreksi gamma dan dikuantisasi menjadi 8 bit. Untungnya,

pemrosesan gambar dan opsi untuk menangkap gambar RAW, bersama dengan kemampuan untuk melihat histogram gambar saat pengambilan, memberikan peluang untuk mengoptimalkan eksposur. Pemrosesan dalam kamera dan pengambilan RAW. dan karakteristik serta mekanisme algoritme kompresi JPEG.

## Menggunakan histogram gambar

Tangkapan digital memiliki keunggulan mendasar dibandingkan tangkapan pada film: kemampuan untuk segera meninjau gambar. Ini berarti bahwa eksposur dapat diperiksa dan, jika salah, penyesuaian dapat dilakukan untuk eksposur ulang yang cepat. Seperti pada film, bracketing eksposur meningkatkan kemungkinan memperoleh eksposur yang optimal.

Namun, salah satu masalah dengan meninjau gambar adalah bahwa kecuali kamera ditambahkan ke komputer dan gambar diambil dari jarak jauh untuk ditampilkan pada monitor besar dan terkalibrasi, maka penilaian eksposur harus dicapai pada layar LCD kecil di bagian belakang kamera. . Meskipun ukuran, resolusi, dan reproduksi warna tampilan LCD kamera terus meningkat, kualitas gambar, kurangnya kalibrasi, dan kondisi tampilan yang sangat bervariasi membuat penilaian eksposur yang optimal tidak dapat diandalkan hanya dari gambar layar.

Banyak kamera digital (hampir semua SLR dan banyak kamera kompak) menawarkan opsi untuk menampilkan histogram gambar di sepanjang sisi gambar dan ini memberikan penilaian eksposur yang jauh lebih akurat. Pemangkasan sorotan atau bayangan langsung terlihat (lihat Gambar 71), dan posisi serta penyebaran nilai dalam histogram memberikan penilaian keterpaparan dan kontras secara keseluruhan. Distribusi nada di sebagian besar histogram menunjukkan gambar dengan kontras tinggi. Eksposur berlebih atau kurang, seperti dijelaskan sebelumnya, akan menggeser semua nilai dalam histogram ke kanan atau kiri masing-masing dan akan mengurangi penyebaran nilai, yang menandakan penurunan kontras gambar. Pilihan lain termasuk kemampuan untuk menampilkan terpotong adalah gambar dengan overlay piksel dengan warna jenuh, yang dapat membantu untuk menentukan seberapa bermasalah secara visual klip akan dan tampilan histogram saluran red, green, dan blue terpisah.

### ‘Exposing to the right ‘

Sebuah konsep yang cukup baru, gagasan mengekspos ke kanan adalah teknik yang digunakan dengan pengambilan RAW, untuk mendistribusikan level yang tersedia dengan lebih baik setelah kuantisasi, sekaligus bertujuan untuk menghindari sorotan yang terpotong dan untuk mengurangi noise dan kontur di area bayangan gambar.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, sensor gambar memiliki respon linier, artinya terdapat hubungan yang berbanding lurus antara jumlah foton yang terekam pada sebuah photosite dengan nilai yang dihasilkan. Pemetaan nada atau koreksi gamma harus diterapkan saat data diubah ke status rujukan keluaran untuk dilihat. di sebagian besar kamera SLR digital, data sensor biasanya dikuantisasi menjadi 10, 12, atau 14 bit. Dengan asumsi kuantisasi 12bit, ini setara dengan 4096 (212) tingkat nada diskrit. Namun demikian, dynamic range kamera yang dapat digunakan biasanya antara lima dan sembilan stop eksposur, karena keterbatasan dari noise, penguatan sinyal, dan berbagai pemetaan tonal non-linear.

Karena setiap perubahan dalam eksposur satu stop merepresentasikan perubahan alog (base2) dalam luminansi terekam, dan sensor merekam peningkatan luminansi secara linier, ini berarti bahwa setengah dari level yang tersedia (2048) akan direkam untuk zona paling terang dari gambar (eksposur tertinggi berhenti). Untuk setiap stop down skala rentang luminansi yang

direkam, jumlah level akan dibelah dua (1024 level akan dialokasikan ke pemberhentian berikutnya, 512 ke yang setelah itu, dll.). Area bayangan gambar akan dialokasikan tingkat yang sangat sedikit, yang dapat menghasilkan kontur yang terlihat di wilayah ini.

Istilah eksposur ke kanan mengacu pada pemilihan pengaturan eksposur sedemikian rupa sehingga histogram gambar miring ke kanan (sebagai akibat dari sedikit over eksposur) tetapi tanpa meniup sorotan; pemandangan secara efektif diekspos untuk sorotan. Ini menggeser setiap zona gambar ke atas skala dalam hal jumlah level yang dialokasikan masing-masing (meskipun mengompresi rentang yang dialokasikan ke zona paling terang) dan umumnya mewakili distribusi level yang tersedia yang lebih efisien.

Eksposur kemudian disesuaikan selama konversi RAW, untuk memindahkan rona tengah dan bayangan ke kiri histogram. Oleh karena itu, area gambar ini awalnya dialokasikan lebih banyak level daripada pada eksposur normal, mengurangi kemungkinan pembentukan kontur dan lebih baik memanfaatkan kisaran level yang tersedia. Selain itu, eksposur berlebih meningkatkan rasio signal-to-noise di area gambar yang lebih gelap. Oleh karena itu, jumlah noise dalam bayangan lebih rendah menggunakan metode ini daripada pada eksposur ‘benar’.

Perhatian harus diberikan pada eksposur, mengingat bahwa meteran biasanya dikalibrasi ke abu-abu pertengahan; Oleh karena itu, mencapai jumlah overexposure yang tepat akan menjadi proses trial and error dengan penilaian histogram yang cermat. Lebih lanjut, keberhasilan metode ini sangat bergantung pada kisaran pencahayaan subjek. Pemandangan kontras yang sangat tinggi mungkin tidak memungkinkan banyak ‘mendorong ‘ ke kanan histogram, atau selanjutnya ‘menarik keluar ‘ bayangan

## **Sistem zona**

Sistem zona dirancang oleh fotografer lanskap Amerika Ansel Adams untuk fotografi hitam-putih, meskipun prinsip-prinsipnya juga diterapkan untuk pemaparan film warna dan sensor digital. Sistem ini memungkinkan fotografer untuk mengontrol hasil secara akurat, sesuai dengan kondisi kerja pribadi dan kebutuhan subjek serta interpretasi. Nada dapat diperluas dan dikontrak untuk menghasilkan kontras terkontrol yang spesifik.

Dalam sistem zona kisaran nada gambar dikontrol dengan eksposur dan pengembangan film, bukan dengan mengubah kontras dalam proses pencetakan. Itu dibuat untuk fotografi hitam-putih dengan menggunakan kamera film lembar big format, di mana hal-hal negatif dapat diproses secara individual.

Saat menggunakan sistem zona, penting untuk mengamati subjek dan ‘melakukan pra-visualisasi ‘ bagaimana nilai nada subjek warna dapat direkam pada cetakan hitam-putih terakhir. Seluruh proses, pemaparan film dan pengembangan, kemudian diimplementasikan untuk mencapai hasil ini. Hasil yang diinginkan tergantung pada aplikasi pencitraan dan konteksnya. Misalnya, mungkin penting untuk mereproduksi representasi yang dekat dari kisaran tonal subjek, atau untuk mengontrol kontras untuk menciptakan suasana hati yang spesifik.

## **Zona**

Dalam sistem zona, rangkaian kecerahan subjek yang divisualisasikan sebelumnya meluas dari bayangan terdalam ke sorotan paling terang, dan kemudian terkait dengan serangkaian zona yang sesuai dengan pencahayaan pada cetakan. Zona ini mulai dari zona0 hingga zonaX. Zona0 merepresentasikan hitam total (hitam maksimum yang dihasilkan dari kertas) dan zona X mewakili putih total (putih kertas). Di zona skala ekstrem ini, 0 dan X, tidak ada detail yang

dicatat. Detail muncul dari zona II dan hingga zona IIX. Abu-abu tengah, nilainya setara dengan kartu refleksi 18%, diwakili oleh zona V. Perubahan satu zona sesuai dengan perubahan satu perhentian. Misalnya, bagian pemandangan dengan setengah penerangan yang sesuai dengan zona V akan jatuh ke zona IV. Jika iluminasi dua kali lebih tinggi, itu akan jatuh di zona VI. Ketika eksposur diubah dengan satu stop, semua iluminansi subjek dialokasikan kembali satu zona ke atas atau ke bawah skala. Pra-visualisasi cetakan akhir memungkinkan fotografer untuk memutuskan area subjek mana yang diinginkan untuk diekspos sebagai zona IV, zona V, zona VI, dll. Fotografer, misalnya, mungkin menginginkan area subjek tertentu yang sesuai ke zona IV. Setelah mengukur area dengan pengukur eksposur, subjek kemudian akan kekurangan eksposur satu stop.

Perbedaan perhentian antara bayangan dan sorotan juga harus diperhitungkan. Rentang pencahayaan subjek yang dicakup oleh 10 zona dari I hingga IX lebih dari 1: 500. Namun, hal ini terjadi dalam kasus seperti subjek dengan cahaya latar dengan sumber cahaya intensitas tinggi yang menghasilkan pencahayaan tajam. Kisaran pencahayaan yang khas adalah sekitar 1: 128 (perbedaan tujuh perhentian) yang mencakup kisaran delapan zona sistem zona. Selain itu, untuk merekam detail dalam kedua bayangan dan sorotan, kisaran nada warna subjek harus berada di antara zona II dan VIII. Dengan film hitam-putih, nada dikontrol dengan pengembangan sehingga saat menggunakan sistem zona, film ini diekspos untuk bayangan dan dikembangkan untuk sorotan. Penggunaan sistem zona dengan film berwarna lebih dibatasi, karena waktu pemrosesan tidak dapat diubah untuk mengontrol kontras. Dalam kasus ini, hanya eksposur yang digunakan untuk mengontrol zona yang akan mewakili setiap nada pada cetakan. Film negatif warna diekspos untuk bayangan sementara transparansi warna diekspos untuk sorotan.

### **Sistem zona dan kamera digital**

Seperti disebutkan sebelumnya, ada batasan dalam menggunakan sistem zona dengan kamera digital. Salah satu alasannya adalah dynamic range yang lebih rendah dari sensor gambar digital dibandingkan dengan dynamic range film. Selain itu, sorotan yang terlalu terang kehilangan detail karena kliping. Dalam sistem zona ini akan sesuai dengan sorotan yang melebihi zona VIII. Saat pemotongan terjadi, detail tidak dapat dipulihkan dan hilang secara permanen. Untuk mempertahankan detail sorotan, pengukuran diambil dari sorotan dan eksposur diatur sedemikian rupa sehingga termasuk dalam zona VII atau VIII.

### **Gambar HDR (High-dynamic-range)**

Kisaran luminansi subjek sering kali melebihi kisaran dinamis sensor gambar. Dalam kasus seperti itu, satu tangkapan menghasilkan kliping baik area sorotan atau bayangan dalam pemandangan. Solusi untuk pengambilan gambar HDR telah diperkenalkan dan menjadi sangat populer dalam dekade terakhir. Ini termasuk: (i) beberapa eksposur dari pemandangan yang sama menggunakan kamera digital dengan kemampuan jangkauan dinamis rendah dan (ii) sensor dengan kemampuan menangkap jangkauan dinamis yang diperluas (lebih tinggi dari biasanya).

Pengambilan beberapa eksposur kurung dari pemandangan yang sama melibatkan sejumlah eksposur berbeda dari subjek, untuk menangkap bayangan, rona tengah, dan sorotan yang sesuai. Beberapa eksposur kemudian digabungkan menjadi satu gambar dengan beberapa langkah:

1. *Penurunan fungsi konversi opto-elektronik (OECF)* digunakan untuk memperkirakan bagaimana sensor kamera bereaksi terhadap perubahan eksposur.

2. *Konstruksi gambar HDR.* Gambar HDR terdiri dari nilai titik mengambang (disimpan dalam 32 bit per saluran), yang memiliki resolusi tonal lebih tinggi daripada data dynamic range rendah biasa. Prinsip dalam langkah ini adalah bahwa setiap piksel di setiap gambar terpisah memberikan perkiraan nilai pancaran dari titik tertentu dalam pemandangan. Perkiraan yang berbeda dikumpulkan dengan menggunakan rata-rata tertimbang dan dengan mempertimbangkan keandalan piksel itu sendiri. Misalnya, nilai piksel yang sangat rendah yang berasal dari eksposur rendah sering kali berisik dan bobotnya akan berkurang, sedangkan piksel yang sama terpapar dengan baik dalam gambar yang diperoleh dengan pengaturan eksposur lebih tinggi dan akan lebih berbobot.
3. *Pemetaan nada untuk ditampilkan atau media cetak.* Perangkat output memiliki jangkauan dinamis yang lebih rendah dari gambar HDR, dengan pengecualian tampilan HDR terbaru. Hasilnya, gambar tampak gelap saat ditampilkan pada tampilan dengan kisaran dinamis rendah. Pengurangan kedalaman bit gambar akhir (menjadi 8 atau 16 bit per saluran warna) oleh karena itu dilakukan untuk memetakan dynamic range gambar ke perangkat output umum. Rendering ke kedalaman bit yang lebih rendah dicapai dengan pemetaan tonal. Kuang dkk. (2007) telah memberikan gambaran umum tentang algoritma rendering gambar HDR yang berbeda. Ini termasuk: fungsi peningkatan kontras sigmoidal; penyesuaian histogram menggunakan tingkat adaptasi luminansi lokal; Retinex (model HVS yang mensimulasikan adaptasi lokal mata); filter adaptif berbasis Retinex; iCAM (model display image yang menggabungkan tampilan warna dengan metrik visi spasial); iCAM yang dimodifikasi (termasuk operator pemetaan nada Reinhard dan Devlin); teknik penyaringan bilateral (gambar diuraikan menjadi lapisan dasar dan lapisan detail dan kontras lapisan dasar dikompresi); dan adaptasi mata lokal (kompresi dynamic range saluran pencahayaan dengan meniru respons fotoreseptor retina). Pemetaan HDRtonal yang diterapkan secara langsung pada color filter array (CFA) sensor alih-alih gambar setelah demosaicing juga telah diusulkan oleh Alleysson et al. (2006)

Pengambilan beberapa frame dicapai dengan memvariasikan shutter speed daripada aperture untuk memastikan bahwa depth of field tetap konstan di semua eksposur. Dengan metode ini, penting agar subjek berada dalam keadaan statis dan goyangan kamera dicegah untuk menghindari subjek menjadi buram; jadi penggunaan tripod sangat penting. Perangkat lunak pencitraan yang digunakan untuk konstruksi gambar HDR dan pemetaan tonal ke output sering kali menyediakan fitur untuk meminimalkan kemungkinan keburaman akibat goyangan kamera dengan menyelaraskan eksposur yang berbeda. Perangkat lunak yang digunakan untuk pencitraan HDR menyediakan opsi untuk implementasi pemetaan tonal menggunakan berbagai algoritme berbeda.



**Gambar 77** Gambar HDR dibuat dengan tiga eksposur. [iStockphoto.com/photo75](https://www.iStockphoto.com/photo75)

# Pengantar proses Pencitraan (Imaging)

## Pengantar

Melihat perkembangan dari eksperimen awal dengan senyawa peka cahaya ke kamera pertama dan film fotografi pada paruh kedua abad kesembilan belas telah tersedia untuk populasi umum. Ini berkembang dari penggunaan minoritas kamera obscura sebagai alat pelukis, melalui sekilas pertama dari gambar fotografi dalam gelas kimia yang mengandung senyawa perak setelah terpapar cahaya, hingga rendering gambar permanen, dan kemudian ke penemuan Proses fotografi negatif - positif yang saat ini digunakan untuk menghasilkan gambar arsip. Sebuah kamera yang menggunakan film roll, Kodak, tersedia untuk umum pada tahun 1887 dan membawa media fotografi kepada massa-nya. Pada awal abad kedua puluh, bahan silver halida yang peka terhadap semua panjang gelombang dan terlihat dalam spektrum elektromagnetik diproduksi, ini menghasilkan gambar yang diterima secara tonally, dan membuka jalan bagi proses colour imaging yang praktis, dimulai dengan pelat Autochrome pada tahun 1907, hingga dikembangkan pada periode selanjutnya.

Sejak periode ini, kemampuan untuk menangkap, memanipulasi, dan melihat gambar akurat dunia di sekitar kita telah menjadi sesuatu yang kita anggap remeh. Ada beberapa tempat di dunia di mana gambar bukan bagian dari kehidupan sehari-hari. Kami menggunakannya untuk merekam, mengekspresikan, mewakili, memanipulasi, dan mengkomunikasikan ide dan informasi. Beragam aplikasi pencitraan mengarah pada banyak fungsi gambar: sebagai alat pemaksaan dalam periklanan, alat untuk menyampaikan bahasa visual atau estetika dalam seni, metode visualisasi dan analisis dalam sains, untuk berkomunikasi dan lambang dalam jurnalisme, atau hanya sebagai alat untuk merekam dan menangkap, yang terkadang meningkatkan pengalaman hidup sehari-hari. Industri manufaktur bergantung pada gambar untuk banyak tujuan, mulai dari visualisasi untuk desain dan pengembangan prototipe hingga pemeriksaan komponen yang diproduksi sebagai bagian dari proses kontrol industri. Fotografi dan teknik pencitraan terapan menggunakan radiasi yang terlihat dan tidak terlihat, hal ini menjadi sangat penting untuk beberapa bidang: pengobatan; yakni untuk diagnosis dan pemantauan kemajuan penyakit; dan dalam ilmu forensik, untuk memberikan catatan objektif dalam proses hukum dan untuk analisis selanjutnya.

Seni, ilmu fotografi dan pencitraan telah dikembangkan melalui berbagai disiplin ilmu, sebagai hasil dari kebutuhan, penelitian, dan praktik. Proses pencitraan menghasilkan gambar yang akan diamati; Oleh karena itu, imaging chain dalam praktik atau teori, harus mencakup pengamat. Banyaknya fungsi gambar memiliki arti bahwa pendekatan dan persyaratan dari proses pencitraan adalah berbeda. Jika terlibat dalam praktik pencitraan, bagaimanapun, atau apa pun fungsi gambarnya, tidak mungkin untuk menghindari kebutuhan untuk memperoleh keterampilan teknis dan pengetahuan serta pemahaman tentang teori di balik proses pencitraan.

Pengetahuan tentang faktor-faktor yang mempengaruhi semua tahapan imaging chain memungkinkan manipulasi gambar akhir melalui pemilihan bahan dan proses. Studi yang lebih mendalam tentang ilmu dasar pencitraan, serta menarik dan beragam, berfungsi untuk meningkatkan proses pencitraan praktis, karena pemahaman dapat diperoleh tentang mekanisme yang terlibat, dan proses serta sistem dapat dikarakterisasi dan dikendalikan untuk menghasilkan yang diperlukan saja dan hasil yang dapat diprediksi. Kajian ilmu pencitraan meliputi sifat cahaya, radiometri dan fotometri, ilmu penglihatan dan persepsi visual, optik,

ilmu warna, kimia, psikofisika, dan masih banyak lagi. Ini memberikan metodologi untuk penilaian sistem pencitraan dan menangani masalah kompleks dari evaluasi kualitas gambar

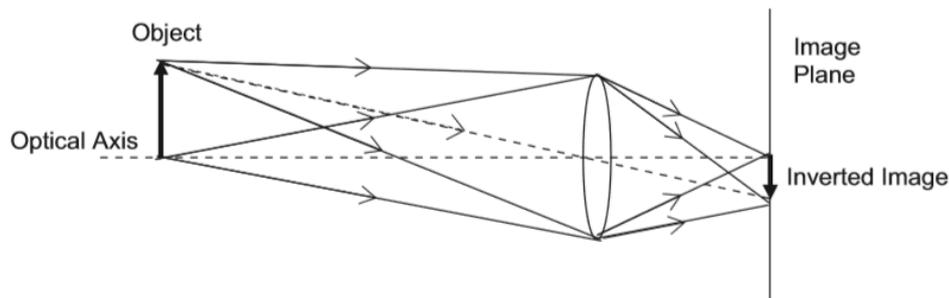
Perubahan terbesar dalam pendekatan pencitraan sejak perkembangan proses warna telah terjadi dalam 25 tahun terakhir, dengan pertumbuhan teknologi gambar digital yang terus berkembang. Sistem kamera elektronik konsumen, adalah yang pertama kali diperkenalkan ke publik pada tahun 1981, tetapi membutuhkan pengembangan komputer pribadi untuk digunakan secara luas, sebelum gambar digital menjadi praktis. Internet telah menyebabkan dan memfasilitasi peningkatan eksponensial dalam produksi dan penyebaran gambar. Pencitraan telah berkembang merangkul ilmu komputer dan grafik komputer dalam hubungan simbiosis di mana masing-masing disiplin ilmu menggunakan elemen yang lain. Pemrosesan gambar digital menemukan aplikasinya di banyak bidang mulai dari peningkatan estetika gambar hingga analisis dalam aplikasi medis. Kecepatan gambar digital telah meningkatkan harapan kami; Hal ini kemungkinan besar, bersama dengan efisiensi proses gambar digital dan kemudahan manipulasi gambar digital yang bagaimanapun, hanyalah kumpulan angka, akan berarti bahwa proses fotografi tradisional pada akhirnya dapat diganti seluruhnya.

Mengikuti perubahan teknologi karenanya membutuhkan perolehan berbagai jenis pengetahuan: keterampilan teknis dalam komputasi misalnya, dan pemahaman tentang kualitas unik informasi yang diwakili oleh data diskrit, dalam gambar digital, dibandingkan dengan representasi informasi yang berkelanjutan, seperti yang digunakan dalam pencitraan analog (silver halide). Jelas bahwa kebutuhan akan praktik baru dan pendekatan alternatif akan terus berlanjut seiring dengan perkembangan teknologi. Namun, penting untuk mencoba memahami teknologi baru, untuk tidak melupakan di mana semuanya dimulai. Meskipun teknologi telah mengubah cara kita menghasilkan dan melihat gambar, sebagian besar ilmu inti yang menjadi dasar fotografi dibangun tetap penting dan relevan. Memang, beberapa ilmu menjadi hampir lebih penting dalam pemahaman kita tentang sistem digital

## **Proses Pencitraan**

Kata ‘fotografi’ secara etimologis berasal dari frase ‘menggambar dengan cahaya’. Teknik pencitraan elektronik modern umumnya digolongkan di bawah istilah ‘gambar digital’ untuk membedakan antara teknik tersebut dan fotografi halida perak yang lebih tradisional; namun, keduanya mencakup prinsip inti yang sama: penggunaan cahaya untuk menghasilkan respons dalam bahan peka cahaya, yang kemudian dapat dibuat permanen dan dipandang sebagai gambar pemandangan aslinya. Perbandingan terperinci akan ditarik antara proses analog dan digital di seluruh buku ini. Jadi, gambarannya disajikan di bawah ini.

Selama pengambilan gambar, cahaya dari pemandangan dibiaskan oleh lensa dan difokuskan ke bidang gambar yang berisi bahan sensitif cahaya. Refraksi adalah penyimpangan sinar cahaya saat melewati satu bahan ke bahan lain dengan sifat optik berbeda, dan merupakan hasil dari perubahan kecepatannya saat bergerak di antara bahan dengan massa jenis yang berbeda. Efek pembiasan dapat dilihat pada distorsi suatu benda jika dilihat dari balik segelas air. mengilustrasikan pembiasan sinar cahaya melalui lensa positif sederhana untuk menghasilkan bayangan terbalik dengan fokus tajam pada bidang bayangan.



**Gambar 78** Pembentukan gambar menggunakan lensa sederhana.

Jumlah cahaya yang jatuh pada sensor gambar dikontrol pada eksposur melalui kombinasi apertur (area lensa yang dilalui cahaya) dan shutter speed (jumlah waktu shutter di depan bidang fokus terbuka). Hubungan ini dijelaskan dengan ekuasi timbal balik:  $H = Et$ , di mana  $E$  adalah iluminasi dalam lux,  $t$  adalah waktu pemaparan dan  $H$  adalah pemaparan dalam lux-detik. Pada setiap level eksposur, kisaran kemungkinan aperture ( $f$ -number) dan kombinasi shutter speed akan menghasilkan eksposur keseluruhan yang sama. Pilihan kombinasi tertentu akan mempengaruhi (DOF) depth of field dan sharpness/keburaman gerakan pada gambar akhir. Biasanya, peningkatan tunggal dalam skala nilai yang mungkin untuk shutter speed dan apertur di istilahkan sebagai 'stop' (meskipun banyak kamera menawarkan interval setengah stop). Setiap perubahan satu stop baik dalam skala aperture atau shutter speed mewakili separuh atau dua kali lipat jumlah cahaya yang jatuh pada sensor.

Pembentukan gambar terjadi ketika materi berubah atau menghasilkan respons di area yang terpapar, yang dalam beberapa hal sebanding dengan jumlah radiasi yang jatuh di atasnya. Dalam bahan fotografi tradisional, kristal silver halida peka cahaya yang terbuka (silver chloride, bromida atau iodida) membentuk gambar laten. Laten dalam konteks ini berarti 'belum terlihat'. Gambar laten sebenarnya adalah perubahan kecil di permukaan kristal yang terpapar, di mana sejumlah kecil ion perak telah diubah menjadi atom perak, dan tidak terlihat dengan mata telanjang. Itu juga belum permanen. Dalam sebuah sensor gambar, radiasi elektromagnetik jatuh ke piksel (kontraksi 'elemen gambar'), yang merupakan sensor cahaya terpisah yang disusun dalam kisi. Setiap piksel mengakumulasi muatan sebanding dengan jumlah cahaya yang jatuh di atasnya.

Setelah eksposur, maka gambar diproses. Sederhananya, kami mempertimbangkan proses monokrom, karena warna akan dibahas lebih detail. Dalam pemrosesan kimia fotografi, gambar laten dikembangkan. Selama proses pengembangan kristal silver halida yang mengandung gambar laten direduksi menjadi perak metalik. Perak membentuk bintik-bintik kecil, yang dikenal sebagai butiran fotografi, dan ini tampak hitam pada gambar akhir. Kisaran penuh warna yang dihasilkan dalam gambar skala abu-abu adalah hasil dari densitas kelompok butiran yang berbeda, dan densitas gambar di area mana pun sebanding dengan jumlah cahaya yang jatuh di atasnya. Corak warna gambar pada tahap ini akan menjadi negatif dibandingkan dengan pemandangan aslinya. Setelah waktu pengembangan selesai, material ditempatkan dalam bak yang airnya tidak bergerak untuk mencegah perkembangan lebih lanjut sebelum gambar diperbaiki.

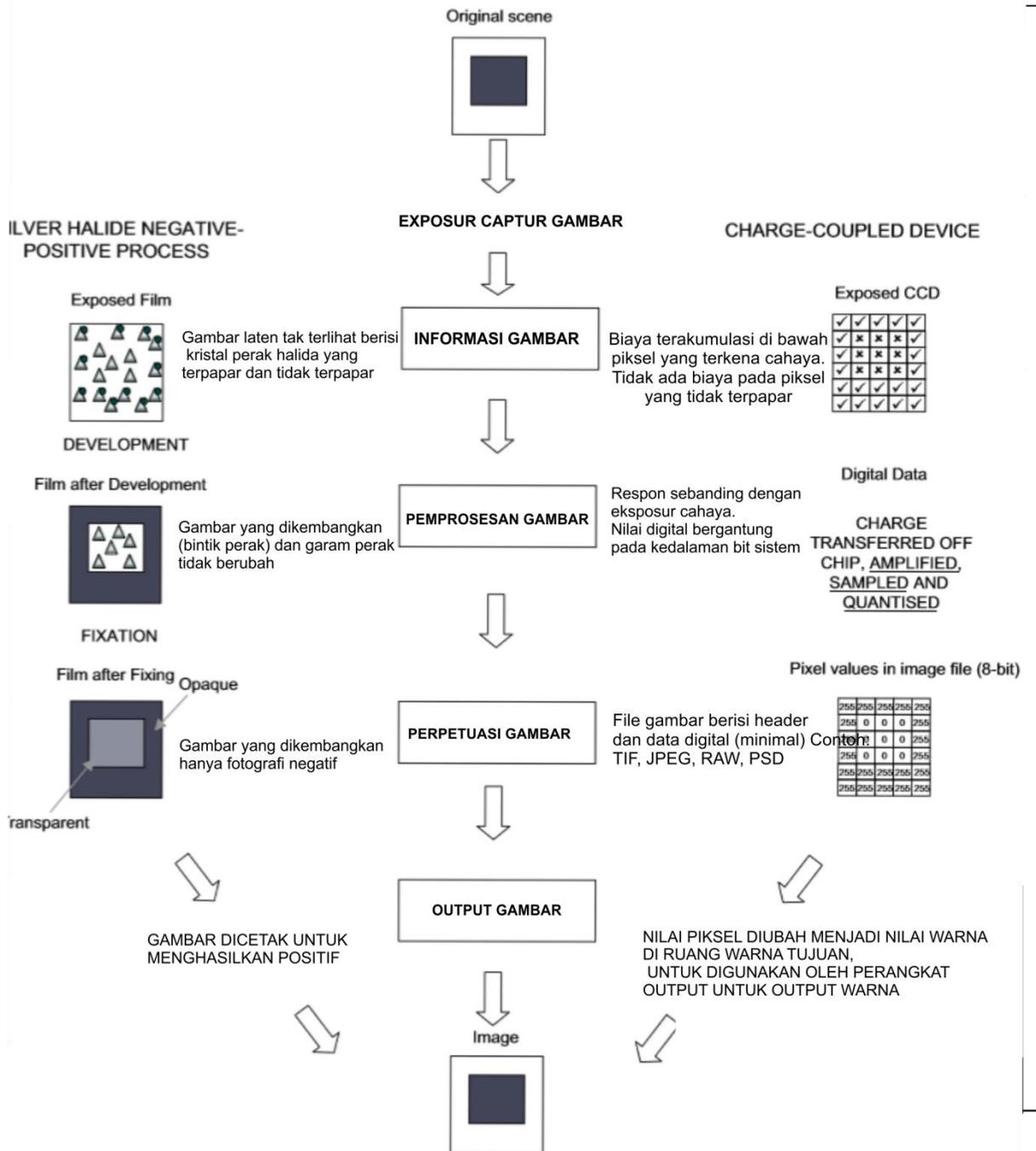
Dalam gambar digital, pemrosesan akan bervariasi bergantung pada jenis sensor yang digunakan. Dalam perangkat berpasangan-muatan (CCD), muatan dipindahkan dari sensor ('sambungan muatan'), diperkuat dan dikirim ke konverter analog-ke-digital. Di sana itu diambil sampel pada interval diskrit yang sesuai dengan piksel individu dan terkuantisasi. Kuantisasi berarti bahwa ia dialokasikan nilai integer diskrit, kemudian untuk mendefinisikan

nilai pikselnya. Sensor gambar semikonduktor oksida logam pelengkap (CMOS) yang lebih baru melakukan pemrosesan gambar ini pada chip dan nilai digital keluaran.

<b>Proses</b>	<b>Hasil</b>
Exposur	Format gambar laten
Proses Pengembangan	Gambar laten diperkuat dan dibuat terlihat
Stop bath	Menghentikan Pengembangan
Fixing	Silver halida yang tidak terpakai diubah menjadi senyawa larut yang larut dalam zat pengikat
Pencucian	Menghilangkan bahan kimia yang larut
Pengeringan	Menghilangkan air

Pada tahap ini, sifat gambar yang diwakili oleh kedua sistem tersebut cukup berbeda. Dalam bahan silver halida, susunan acak kristal silver halida dalam emulsi fotografis berarti bahwa kisaran tone yang kontinu dapat diwakili dan metode silver halida yang sering disebut sebagai pencitraan analog. Bagaimanapun Gambar digital adalah grid piksel yang tidak tumpang tindih, yang masing-masing diwakili oleh bilangan bulat yang sesuai dengan intensitasnya. Itu tidak dapat mewakili tone kontinu dengan cara yang sama seperti bahan silver halida karena datanya diskrit. Berbagai teknik, digunakan untuk mensimulasikan penampilan tone kontinu.

Langkah terakhir dalam proses pencitraan adalah pengabadian gambar, di mana gambar tersebut dibuat permanen. gambar silver halida dibuat permanen dengan fiksasi, sebuah proses dimana semua kristal silver halida yang tersisa dibuat larut dan dicuci. Gambar digital dibuat permanen dengan menyimpannya sebagai file gambar digital yang unik. Gambar kemudian dikeluarkan dengan cara tertentu untuk dilihat, baik sebagai cetakan, transparansi, atau sebagai gambar digital pada layar komputer. Dalam proses silver halida, ini melibatkan pemaparan negatif ke bahan cetakan dan sekali lagi memproses dan memperbaiki gambar.



**Gambar 80** Proses analog dan pencitraan digital.

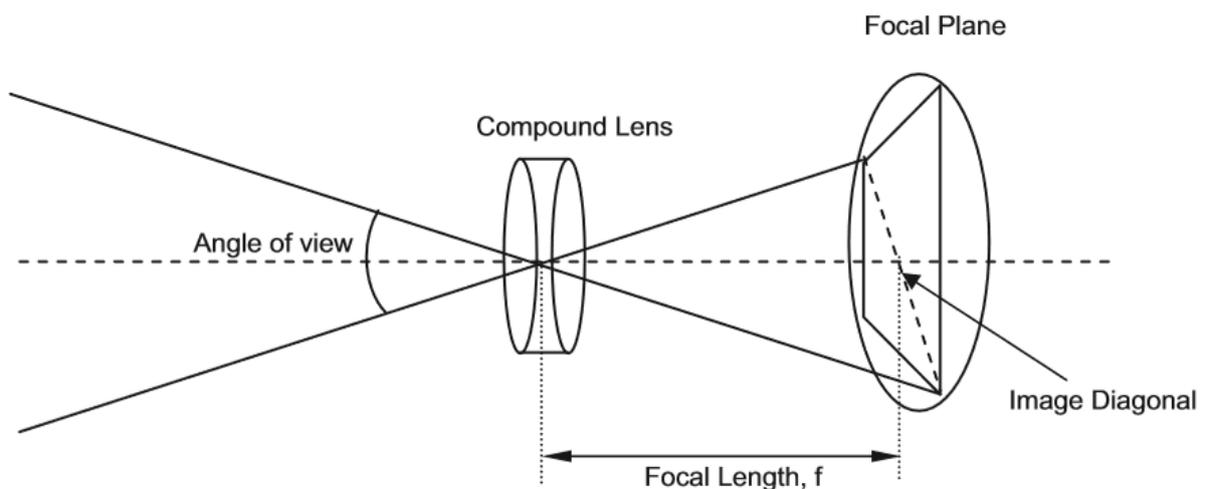
## Kontrol gambar

Dengan kontrol yang cermat dari setiap tahap proses pencitraan, fotografer dapat memanipulasi gambar akhir yang dihasilkan. Pengendalian gambar memerlukan pemahaman tentang karakteristik bahan dan sistem pencitraan, komposisi, perilaku dan manipulasi cahaya, tone dan warna, serta keterampilan teknis dan kemampuan untuk menggabungkan semua faktor ini untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. Keterampilan semacam itu dapat diperoleh dengan praktik dan eksperimen, tetapi memiliki pemahaman tentang teori dan sains di balik sistem dan teknik memungkinkan penguasaan proses yang sebenarnya.

## Kontrol bentuk gambar

Saat menangkap pemandangan asli, fotografer mengontrol komposisi gambar yang akan diproyeksikan ke bidang fokus kamera dengan berbagai cara. Format kamera yang dipilih (ukuran area penginderaan gambar) akan menentukan tidak hanya desain kamera dan kemampuan sistem, tetapi juga ukuran, kualitas, dan rasio aspek gambar akhir. Kamera big format (juga dikenal sebagai kamera teknis atau tampilan, dengan format gambar 5 x 4") dirancang untuk memungkinkan pergerakan kamera, manipulasi fisik dari dua bidang yang berisi lensa dan sensor gambar secara terpisah, memungkinkan fotografer untuk mengubah ukuran, perbesaran dan perspektif elemen pada bidang fokus yang tajam. Sudut pandang gambar adalah salah satu faktor kunci yang memengaruhi komposisi, karena ini mengontrol tidak hanya posisi subjek yang berbeda dan perspektif dalam pemandangan (hubungan antara ukuran relatif dan posisi objek), tetapi juga apakah gambar dalam format potret atau lanskap (jika menggunakan format gambar persegi panjang).

Bentuk gambar juga dikontrol oleh panjang fokus lensa yang digunakan. Dalam lensa positif sederhana, panjang fokus adalah jarak dari lensa ke fokus utama belakang, yang didefinisikan sebagai titik pada sumbu optik tempat lensa membawa objek yang jauh ke fokus yang tajam. Panjang fokus ditentukan oleh kelengkungan, ketebalan, dan indeks bias komponen optik, dan ini pada gilirannya menentukan sudut penyimpangan sinar cahaya (dibiaskan) saat melewatinya. Ini menentukan sudut pandang bidang, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 81.



**Gambar 81** Sudut pandang sebuah lensa.

Sudut pandang menentukan jumlah pemandangan asli yang tercakup oleh lensa. Lensa standar untuk setiap format memiliki sudut pandang sekitar  $50^\circ$ . Lensa sudut yang lebih lebar memiliki panjang fokus yang lebih pendek dan mencakup lebih banyak pemandangan aslinya, karenanya sering kali menampilkan distorsi di sekeliling gambar. Panjang fokus yang lebih panjang mencakup area yang jauh lebih kecil dari pemandangan aslinya dan oleh karena itu akan lebih mungkin untuk menunjukkan lebih sedikit distorsi lengkung sumbu-off.

## Depth of Field (DOF)

Bergantung pada panjang fokus lensa, ada titik fokus optimal dalam pemandangan yang berada pada jarak tertentu (kedalaman) dari kamera dan akan menghasilkan gambar yang tajam persis pada bidang fokus. Ada juga zona di depan dan di belakang titik ini yang akan menghasilkan

gambar yang cukup tajam. Zona fokus tajam ini disebut sebagai *depth of field* dan dapat menjadi aspek komposisi yang penting. *Depth of field* yang dangkal akan berisi kisaran kecil bidang fokus tajam, semua bidang lain berada di luar fokus, sehingga mengisolasi dan menekankan subjek yang diminati. *Depth of field* dipengaruhi oleh panjang fokus lensa, jarak ke objek fokus, dan juga apertur lensa.

## **Tone (Nada) dan kontras**

Selain posisi dan ukuran elemen pemandangan, fotografer juga dapat memengaruhi komposisi dengan mengontrol nada dan warna elemen secara relatif satu sama lain. Nada dalam pemandangan asli ditentukan oleh intensitas cahaya yang dipantulkan dari suatu objek. Nada dan kontras pemandangan dan gambar yang direproduksi dapat dimanipulasi dengan berbagai cara, untuk tujuan estetika, atau untuk bekerja dalam batasan perangkat atau sistem.

## **Kontrol pencahayaan dalam scene aslinya**

Ketika cahaya putih mencapai suatu permukaan, beberapa panjang gelombang diserap dan beberapa dipantulkan atau ditransmisikan. Rona dikendalikan oleh properti permukaan subjek dan sifat serta intensitas sumber cahaya yang menerangi itu. Kontras pemandangan adalah rasio antara nada paling terang dan paling gelap dalam pemandangan dan kisaran tingkat intensitas yang memungkinkan di antaranya, dan dapat dikontrol atau dimanipulasi pada sejumlah tahapan dalam *imaging chain*. Sekali lagi, hal ini dipengaruhi oleh karakteristik penyerapan permukaan yang diterangi, tetapi juga oleh posisinya relatif terhadap iluminasi pemandangan. Oleh karena itu fotografer dapat menggunakan teknik pencahayaan untuk mengubah kontras gambar. Dengan menambahkan sumber cahaya atau mengubah sudut atau jarak subjek relatif terhadap iluminasi, perbedaan antara sorotan dan bayangan dapat dikompresi atau diperluas.

Reproduksi nada perangkat atau materi menjelaskan bagaimana kisaran intensitas dalam pemandangan asli dipetakan ke yang ada di gambar akhir. Reproduksi nada dibatasi oleh banyak faktor dalam *imaging chain*, termasuk *dynamic range* (dynamic range) dari sensor gambar - yaitu, kemampuannya untuk merekam dan mewakili rentang densitas atau intensitas. *Dynamic range* pada bahan silver halida juga tergantung pada tingkat eksposur. Pemilihan jenis film atau sensor gambar tertentu akan memengaruhi kisaran kemungkinan nada pada pengambilan. Karena proses pencitraan fotografi dan digital melibatkan *imaging chain* yang berisi beberapa tahapan dan perangkat, ada sejumlah titik setelah pengambilan gambar di mana reproduksi nada dapat dimanipulasi. Agen pengembang yang digunakan dalam pemrosesan fotografi, pengaturan dan kalibrasi perangkat output, dan pemilihan bahan dan proses pencetakan semuanya membantu untuk menentukan kisaran nada yang memungkinkan dalam gambar keluaran. Perangkat lunak pengolah gambar digital membuat penyesuaian tonal menjadi sederhana dan interaktif melalui manipulasi kurva warna gambar atau histogram.

## **Warna**

Colour *imaging* melibatkan tahap analisis di mana respons sensor terhadap pita sempit panjang gelombang direkam; diikuti oleh tahap sintesis, di mana nilai yang diukur diubah menjadi respons dalam perangkat output, untuk menghasilkan warna yang sesuai dengan tingkat tertentu tampilan visual aslinya. Penyajian warna dalam gambar, baik digital atau analog, bergantung pada berbagai faktor. Mekanisme rumit yang digunakan sistem visual manusia untuk melihat warna berarti bahwa tidak ada reproduksi warna yang akan identik dengan warna yang terlihat dalam pemandangan aslinya. Tujuan dalam reproduksi warna adalah untuk menghasilkan warna yang konsisten dan dapat diterima, dan dipengaruhi oleh preferensi warna dan 'warna memori'. yang seringkali sangat berbeda dengan kualitas warna sebenarnya dari

Warna yang direkam dari pemandangan asli adalah kombinasi dari panjang gelombang yang ada di iluminasi (distribusi daya spektral) dan karakteristik pantulan spektral dari permukaan tempat cahaya jatuh, ditambah dengan respons spektral sensor. Pilihan sumber cahaya dan sensor yang sesuai merupakan faktor penting dalam menentukan kualitas warna akhir gambar. Panjang gelombang yang mencapai sensor dapat diubah dengan menyaring sumber cahaya menggunakan 'gel' berwarna atau menggunakan filter optik di atas lensa.

Reproduksi warna melalui imaging chain diatur dengan pemilihan bahan dan perangkat reproduksi yang sesuai. Dalam pencitraan fotografi, warna dimanipulasi dengan penyaringan pada tahap penangkapan (melalui penggunaan lapisan sensitif warna yang berbeda dalam emulsi) dan juga pada tahap keluaran (melalui penyaringan selama pencetakan). Pemrosesan gambar digital menyediakan alat yang ampuh dalam memproses warna dalam gambar digital, memungkinkan manipulasi sederhana keseimbangan warna global, rentang warna tertentu, atau area lokal di dalam gambar. Banyaknya tahapan berbeda dalam rantai gambar digital dan beragam perangkat serta teknologi yang tersedia berarti bahwa terjemahan warna antar perangkat menjadi rumit. *Colour gamut* perangkat input dan output sangat bergantung pada perangkat, artinya nilai piksel yang sama dapat menghasilkan warna yang berbeda pada perangkat yang berbeda, bergantung pada karakteristik dan usianya, serta cara penyetelan dan kalibrasi.

Masalah ini mengarah pada pengembangan sistem manajemen warna, yang mengatur proses perubahan nilai piksel menjadi nilai warna keluaran perangkat yang berbeda. Untuk mendapatkan pemahaman yang tepat tentang manajemen warna digital, disiplin yang terus berkembang, membutuhkan beberapa pengetahuan tentang ilmu warna, sifat cahaya dan sistem visual manusia. Manajemen warna bergantung pada spesifikasi warna yang absolut sebagaimana yang dilihat oleh sistem visual manusia. Spesifikasi ini (kolorimetri CIE) didasarkan pada eksperimen yang dilakukan dengan menggunakan pengamat manusia pada tahun 1931, bertahun-tahun sebelum sejauh mana gambar digital saat ini dapat benar-benar dibayangkan. Sementara manajemen warna dalam sistem fotografi melibatkan pemahaman tentang filtrasi warna dan karakteristik reproduksi warna dari film slide atau kombinasi film/kertas tertentu, manajemen warna digital melibatkan kalibrasi dan karakterisasi yang cermat dari semua perangkat input dan output digabungkan dengan pemahaman tentang representasi digital warna yang berbeda melalui imaging chain, dan perangkat lunak untuk melakukan pemrosesan warna.

## **Asal muasal fotografi**

### **1. Kamera obscura**

Sejak perkembangan sekolah filsafat sistematis di Yunani Kuno sekitar 500 tahun SM, manusia telah menemukan daya tarik abadi dalam upaya untuk memahami sifat cahaya dan perilakunya. Di Cina sekitar waktu itu, Mo Tzu, yang dianggap sebagai salah satu filsuf besar Cina pertama, menekankan pentingnya pragmatisme dalam pemikiran filosofis. Para pengikutnya mulai mengukur dan mengamati perilaku cahaya menggunakan cermin datar dan melengkung. Diyakini bahwa mereka juga menemukan kamera obscura, yang kemudian dikembangkan lebih lanjut oleh Alhazen (AD965), seorang ahli matematika dan fisikawan yang lahir di Basra, Irak. Kamera obscura menghasilkan gambar proyeksi pertama dari dunia nyata dan oleh karena itu dapat dilihat sebagai titik awal fotografi. Camera obscura secara harfiah berarti 'ruang gelap'. Ketika cahaya lewat dari luar ruang atau kotak ke arah cahaya melalui lubang jarum (pinhole), gambar terbalik terbentuk di permukaan yang berlawanan. Pada abad ketujuh belas,

camera obscura telah diadaptasi dengan menempatkan lensa di depan aperture dan versi portabel menjadi alat bagi pelukis yang memungkinkan mereka melacak lanskap secara akurat.

## **2. Eksperimen awal**

Wajar jika penekanan pada perkembangan sains dan teknologi di Eropa selama masa Revolusi Industri (dimulai di Inggris pada paruh akhir abad kedelapan belas) ini akan mengarah pada upaya untuk mencoba ‘menangkap’ cahaya dan mendapatkan gambar permanen menggunakan kamera obscura. Pada 1727, Johann Heinrich Schulze, seorang profesor universitas Jerman, telah menemukan bahwa paparan cahaya menyebabkan silver nitrate menjadi gelap; ini adalah langkah maju yang penting dalam mencari bahan peka cahaya. Pada 1777, kimiawan Swedia Karl Wilhelm Scheele mengamati efek yang sama menggunakan silver chloride. Thomas Wedgwood (1771-1805), putra Josiah, pembuat tembikar terkenal, dan Sir Humphrey Davy bereksperimen dengan penggunaan kertas yang dibasahi silver nitrate yang ditempatkan di kamera obscura. Namun, gambar-gambar itu tidak permanen, dan bahan pengikat tidak ditemukan selama masa hidup Wedgwood.

## **3. Menuju proses pengembangan – Daguerreotype**

Pada tahun 1822, fisikawan Prancis, Joseph Nicéphore Niépce, memperoleh gambar fotografis lanskap pertama yang permanen. Dia tertarik untuk mencoba menyalin gambar ke kertas transparan dengan mereproduksi menggunakan semacam bahan peka cahaya. Dia melapisi pelat timah dengan asphaltum (zat yang mengeras saat terkena cahaya), mengekspos pelat, dan kemudian membuang sisa aspal yang tidak terpapar dan tidak mengeras dalam pelarut. Meski kasar, ini adalah foto permanen pertama; Dia kemudian menggunakan teknik yang sama dan kemudian mengetsa gambar timah menggunakan asam untuk menghasilkan pelat cetak.

Niépce bertemu Louis-Jacques-Mandé Daguerre pada tahun 1826. Daguerre adalah seorang seniman, yang kehidupan kerjanya dimulai sebagai pelukis pemandangan teater hingga berkembang menjadi pelukis pemandangan panorama yang luas. Dia menjadi tertarik pada perpaduan seni dan sains dalam eksperimen Niépce. Sudah sejak lama dia mencoba untuk menyalin gambar yang dihasilkan oleh kamera obscura dan mereka sekarang melanjutkan kerjasama untuk penyelidikan hingga Niépce meninggal pada tahun 1833. Daguerre melanjutkan eksperimennya, tetapi menemukan proses aspal lambat, gambar membutuhkan eksposur kira-kira 8 jam dan oleh karena itu dia berkonsentrasi lagi pada penggunaan garam perak. Dengan lapisan garam perak pada alas perak, eksposur dikurangi menjadi hanya setengah jam. Eksposur ini menghasilkan gambar laten yang tidak terlihat, yang kemudian ‘dikembangkan’ di atas nampan merkuri yang dipanaskan sebelum difiksasi menggunakan garam biasa. Dia mempresentasikan proses ini pada pertemuan bersama Akademi Sains dan Akademi Seni pada tahun 1839 sebagai Daguerreotype, dan dengan cepat menjadi sukses komersial. Proses ini dikembangkan lebih lanjut dengan penggunaan sodium hiposulfit, sebagai bahan pengikat. Sodium hiposulfit, yang merupakan nama populer untuk sodium tiosulfat, ditemukan oleh Sir John Herschel pada tahun 1819 sebagai pelarut silver halida dan masih menjadi dasar ‘hipo’ yang digunakan sampai sekarang).

Lamanya pencahayaan membuat proses ini lebih sesuai untuk subjek kehidupan dan lanskap; namun, potret fotografi paling awal yang diketahui diambil oleh seorang Amerika, Samuel Morse, pada sekitar waktu ini menggunakan teknik Daguerre. Meskipun eksposur lama, studio potret mulai dibuka di seluruh Eropa dan Amerika, dan panjang eksposur dikurangi menjadi kurang dari satu menit pada tahun 1840 dengan penggunaan lensa ‘potret’ baru dan perubahan dari garam perak menjadi bromoidode perak yang lebih sensitif.

#### **4. Proses positif-negatif**

Selama periode yang sama, di Inggris, William Henry Fox Talbot juga bereksperimen dengan camera obscura berdasarkan karya Schulze, Davy, dan Wedgwood. Investigasi baik silver nitrate dan silver chloride, ia menemukan bahwa eksposur dapat dikurangi secara dramatis dengan menggunakan aplikasi silver nitrate dan natrium klorida terpisah dan mengekspos kertas saat masih basah. Dia menyebut metodenya pencetakan fotogenik dan mendeskripsikannya dalam sebuah makalah yang disajikan kepada Royal Society tak lama setelah Daguerre meluncurkan Daguerreotype di Paris. Hal ini diikuti oleh perkembangan proses Calotype, yang dipatenkan Fox-Talbot pada tahun 1840. Calotype menggunakan kertas peka dalam garam perak dan asam galat untuk mengembangkan gambar. Kombinasi ini mengurangi waktu pencahayaan yang diperlukan menjadi kira-kira satu menit di bawah sinar matahari yang cerah. Perbedaan utama antara ini dan Daguerrotype adalah bahwa di mana Daguerre telah menghasilkan gambar positif, Fox-Talbot menghasilkan negatif kertas pertama, yang kemudian dicetak kontak untuk menghasilkan gambar positif. Gambar yang dihasilkan oleh proses awal negatif-positif ini, yang berasal dari kertas negatif, tidak setajam Daguerreotype dan oleh karena itu tidak mendapatkan kesuksesan komersial yang sama dalam potret profesional. Keuntungan nyata dari proses negatif-positif adalah dimungkinkan untuk memperoleh banyak reproduksi dari satu negatif, dan bila dibandingkan dengan hasil 'satu jepretan' dari Daguerrotype, berarti proses itu dengan cepat menjadi dasar fotografi modern.

Upaya dilakukan untuk menggunakan teknik yang sama menggunakan dasar transparan untuk menghasilkan lebih negatif. Niépce de St Victor, juga keturunan dari Nicéphore, memperoleh hasil yang baik, tetapi tidak dapat diandalkan, menggunakan albumen (putih telur) untuk menahan silver halida di atas kaca, tetapi ini digantikan oleh perkembangan proses kolodion basah oleh Frederick Scott Archer pada tahun 1851 Collodion yang mengandung kalium bromida dan kalium iodida dilapisi di atas piring kaca dan dibiarkan mengeras. Pelat kemudian direndam dalam larutan silver nitrate, menghasilkan perak bromida peka cahaya dan garam perak. Itu kemudian ditempatkan di dudukan, dimasukkan ke dalam kamera dan diekspos. Itu dikembangkan segera setelah pemaparan menggunakan larutan pirogallol, cuka dan air, sebelum difiksasi dalam kondisi hipo, dicuci dan dikeringkan. Teknik ini bergantung pada collodion yang basah dan karenanya memerlukan pemrosesan pelat segera sebelum pelat menguap. Ini berarti bahwa fotografi lokasi memerlukan kamar gelap portabel yang dekat dengan kamera dan, dengan berat pelat kaca, membuat fotografi menjadi proses yang tidak praktis. Negatif kolodion basah awal dicetak pada kertas albumen, tetapi kertas collodion segera diproduksi sebelum penggunaan pertama gelatin dalam kertas cetak pada tahun 1885.

#### **5. Bahan modern**

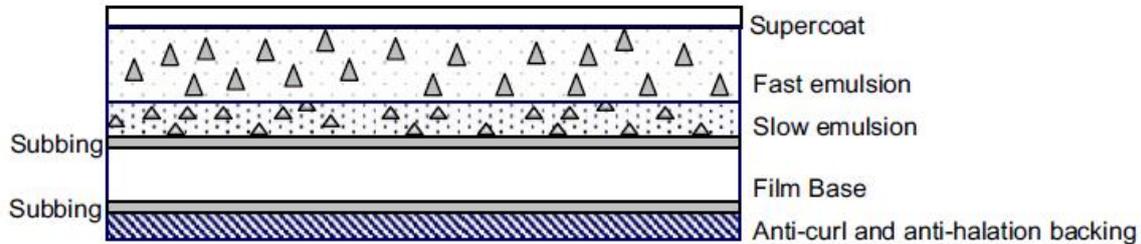
Penggunaan gelatin dalam bahan fotografi pertama kali dicoba pada tahun 1868, dan pada tahun 1873 gelatin peka tersedia untuk fotografer. Gelatin tetap menjadi konstituen penting dari bahan fotografi saat ini. Selain menciptakan suspensi halus kristal silver halida di seluruh emulsi, gelatin memiliki karakteristik khusus tertentu yang memungkinkan dan meningkatkan proses fotografi dan hingga saat ini belum ada alternatif yang ditemukan. Emulsi gelatin dibuat lebih sensitif terhadap cahaya dengan pemanasan, yang berarti waktu pemaparan dapat dikurangi secara dramatis. Selain itu, karakteristik fisik gelatin berarti bahwa saat larut dalam air hangat, membuat larutan mudah untuk dilukis pada lapisan dasar seperti piring kaca, gelatin saat mendingin, menjadi keras jika air dihilangkan. Penggunaan gelatin berarti bahan sensitif dapat mengering saat terpapar dan tidak perlu segera dikembangkan jika dijaga agar tidak terlalu ketat. Bahan fotografi berbasis gelatin dengan cepat mengambil alih proses kolodion basah yang kurang nyaman, dan memang masih digunakan dalam fotografi kontemporer.

Pada tahun 1885, Carbutt, dari Philadelphia, memproduksi lembaran film pertama menggunakan lembaran seluloid yang dilapisi dengan emulsi berbasis gelatin. Film gulungan dengan cepat diikuti dengan menggunakan dasar nitroselulosa cor, yang dikembangkan oleh George Eastman dan Henry Reichenbach, dan di sampingnya ada kamera baru, Kodak, pada tahun 1888. Ini menghasilkan gambar melingkar dengan diameter 2½ inci dan 100 gambar. Kedua perkembangan ini memungkinkan fotografi menjadi tidak hanya lebih portabel tetapi juga sesuatu yang dapat menarik massa. Bepergian ke luar negeri menjadi pencarian populer bagi mereka yang mampu dan wajar jika para wisatawan pertama ini ingin merekam berbagai pemandangan yang mereka temui.

Bahan-bahan ini adalah dasar dari bahan-bahan modern, dan struktur serta sifat-sifatnya telah disempurnakan daripada diubah secara dramatis. Selulosa triasetat atau asetat-butirat sekarang umum digunakan sebagai bahan dasar film, meskipun beberapa produsen menggunakan polimer sintetik yang lebih baru, seperti poliester. Format film telah berubah sebagai akibat dari perkembangan desain kamera, tetapi strukturnya tetap sama.

## 6. Photographic Today

Bahan fotografi modern terdiri dari emulsi yang mengandung suspensi kristal silver halida peka cahaya (klorida, bromida, atau iodida) dalam gelatin, dilapisi pada alas kertas atau plastik transparan yang fleksibel dan stabil. Pengendalian oleh produsen emulsi terhadap karakteristik fisik material, seperti ukuran, bentuk dan luas permukaan kristal, sifat halida perak yang digunakan, susunan dan jumlah relatif halida dalam kristal, akan mempengaruhi sifat fotografis dari kristal. emulsi dalam hal kontras, kecepatan, resolving power (resolusi), sharpness dan graininess.



**Gambar 82** Struktur film fotografi monokrom.

## 7. Karakteristik bahan fotografi

Kecepatan bahan fotografi menentukan pencahayaan yang diperlukan untuk memperoleh kerapatan perak tertentu, dan karenanya diperlukan dalam pengukuran pencahayaan. Kristal silver halida yang lebih besar memiliki kemungkinan lebih tinggi untuk menyerap energi elektromagnetik yang cukup untuk membentuk gambar laten; oleh karena itu, film berkecepatan lebih tinggi cenderung memiliki grain yang lebih besar. Sejumlah sistem telah dikembangkan untuk pengukuran film; namun, yang paling umum digunakan adalah sistem standar kecepatan aritmatika dan logaritmik dari ISO (eInternational Organization for Standardization/Organisasi Internasional untuk Standardisasi). Bahan fotografi hitam putih biasanya tersedia dengan kecepatan aritmatika dari ISO 50 hingga ISO 3200, dengan peningkatan kecepatan menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi. Setiap kali ISO speed digandakan, ini mewakili penurunan satu stop dalam eksposur yang diperlukan. Film monokrom sering kali mengandung dua lapisan emulsi. Kristal silver halida yang berbeda akan digunakan dalam dua lapisan, kristal yang lebih besar bereaksi lebih cepat dan karena itu

meningkatkan kecepatan film. Kristal yang lebih halus dalam emulsi yang lebih lambat meningkatkan rentang nada dan mampu merekam detail yang lebih halus.

Kontras gambar menjelaskan kisaran dan distribusi nada yang dihasilkan pada gambar akhir dan akan bergantung pada rasio kontras pemandangan asli, tetapi juga dibatasi oleh kisaran kerapatan yang dapat dihasilkan material. Bahan kontras tinggi akan menghasilkan gambar yang sebagian besar berisi sorotan dan bayangan dengan rona tengah yang lebih sedikit. Bahan kontras yang lebih rendah akan merekam lebih banyak informasi pada rona tengah dan akan memiliki rentang kerapatan yang lebih kecil dari minimum hingga maksimum ( '*dynamic range*' ). Kristal silver halida dalam satu emulsi umumnya bervariasi dalam ukuran dan distribusi ukuran ( '*polidispersi*' ). Penyebaran acak kristal, dan jumlah, ukuran dan bentuknya, berarti bahwa rentang nada yang terus berubah-ubah dapat dihasilkan, karena kristal dengan ukuran berbeda akan membentuk gambar laten pada tingkat pencahayaan yang berbeda. Ini pada akhirnya akan menentukan kontras material. Kontras material, bagaimanapun, dapat diubah selama pemrosesan fotografi, dengan pemilihan agen pengembangan yang sesuai. Studi tentang karakteristik reproduksi nada bahan dan sistem merupakan bagian penting dari evaluasi kinerja.

Bintik perak yang berkembang dalam emulsi fotografi cenderung membentuk gumpalan acak sebagai hasil dari distribusinya dan ini mengarah pada efek visual butiran fotografi. Ini menyebabkan sensasi visual ketidakseragaman di area dengan nada seragam yang mirip dengan efek noise, dan persepsi subjektif ini disebut sebagai '*graininess*'. Butir tergantung pada tingkat densitas. Pada densitas rendah, penggumpalan jauh lebih sedikit dan pada densitas tinggi sistem visual tidak dapat membedakan antara butir individu; oleh karena itu, bintik jauh lebih terlihat pada rona sedang. Butir negatif lebih penting dari pada kertas cetak karena pembesaran yang diperlukan untuk pencetakan. Granularitas adalah ukuran objektif dari minute uktuasi menit densitas dalam gambar. Faktor-faktor selama proses pengembangan seperti agen pengembangan dan tingkat pengembangan juga mempengaruhi granularitas gambar

Resolusi bahan pencitraan menentukan kemampuannya untuk merepresentasikan detail halus. Dalam istilah praktis, ini dapat diukur secara tradisional menggunakan kekuatan penyelesaian. Daya penyelesaian seluruh sistem dipengaruhi oleh karakteristik bahan pencitraan dan batasan optik lensa, dan dalam praktiknya diukur dengan pencitraan bagan uji yang berisi batang-batang hitam dan putih horizontal dan vertikal yang berjarak dekat yang menghasilkan pola frekuensi yang berbeda. Pola terkecil yang dapat diselesaikan secara akurat, yaitu di mana strip terang dan gelap masih dapat dibedakan, mendefinisikan frekuensi spasial tertinggi yang dapat diwakili oleh sensor dan sering dinyatakan dalam siklus per milimeter. Daya pecahkan material dipengaruhi oleh kontras, butiran, dan kekeruhan emulsi (tingkat dan area difusi cahaya melalui emulsi fotografis karena disebarkan oleh kristal silver halida). Ini ditentukan oleh fungsi penyebaran titik material, yang menggambarkan ukuran rata-rata dan bentuk gambar terdispersi dari titik cahaya dalam emulsi.

Sharpness gambar mengacu pada kesan subjektif yang dihasilkan oleh gambar tepi pada pengamat dan ukuran gambar yang objektif. Pada dasarnya kami menilai sharpness gambar di tepinya, yang merupakan area lokal dengan kontras tinggi, yang secara tiba-tiba mengalami penurunan atau peningkatan densitas. Namun, kekeruhan emulsi fotografi berarti bahwa tidak ada perubahan mendadak tetapi perubahan bertahap sebagai akibat dari difusi cahaya melalui material. Ukuran obyektif yang setara dengan sharpness disebut sharpness dan dievaluasi dengan mendapatkan profil densitas melalui tepi. Sharpness tergantung pada bentuk dan penyebaran tepi. Dalam bahan fotografi, sharpness sering ditingkatkan sebagai hasil dari efek '*kedekatan*' kimiawi di kedua sisi tepi yang menyebabkan sisi gelap tepi menjadi terlalu

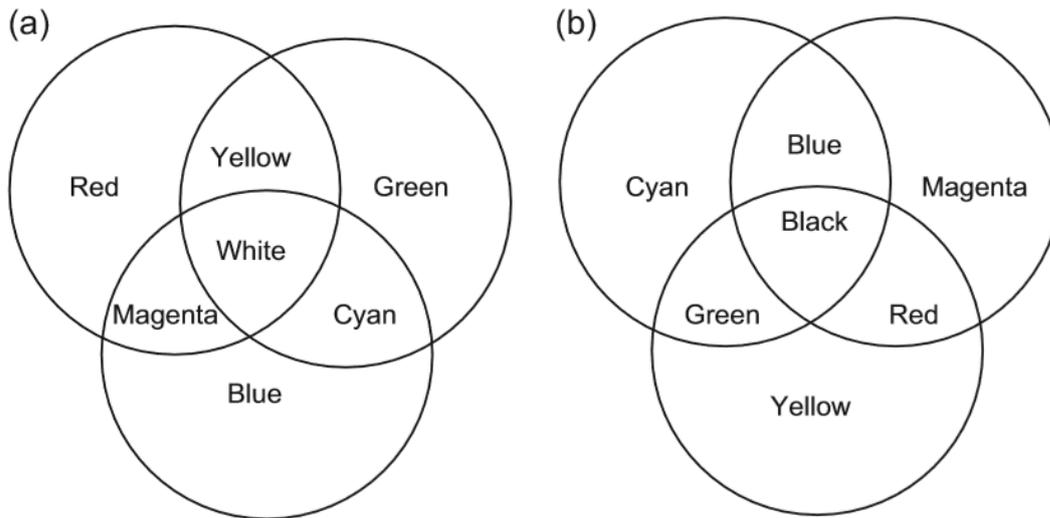
berkembang dan sisi terang kurang berkembang. Akutansi dipengaruhi oleh sejumlah faktor, termasuk jenis pengembang, tingkat perkembangan, dan jenis emulsi.

Perbedaan utama antara film pertama yang dikembangkan menjelang akhir abad kesembilan belas dan yang tersedia saat ini adalah kepekaannya terhadap panjang gelombang radiasi yang berbeda (sensitivitas spektral). Bahan silver halida memiliki kepekaan alami terhadap ujung panjang gelombang pendek dari spektrum visual, termasuk ultraviolet, violet, dan biru. Oleh karena itu, bahan fotografi awal ini hanya mampu merekam sebagian cahaya dari pencahayaan dan tidak akan merekam panjang gelombang hijau atau merah yang lebih panjang. Gambar yang dihasilkan pada bahan-bahan ini akan merepresentasikan objek biru sebagai nada yang sangat terang dan objek yang mengandung hijau atau merah sebagai sangat gelap atau hitam. Hermann Wilhelm Vogel, seorang ahli kimia yang bekerja dengan proses collodion di Berlin pada tahun 1873, menemukan bahwa dengan menambahkan sedikit pewarna ke collodion, dia dapat membuat peka terhadap cahaya kuning, menghasilkan rendisi tonal yang lebih baik. Bahan-bahan ini dikenal sebagai ortokromatik. Pada tahun 1905 bahan pankromatik yang peka terhadap seluruh spektrum yang terlihat tersedia. Saat ini, bahan hitam dan putih yang peka terhadap daerah merah jauh dan inframerah dari spektrum elektromagnetik tersedia.

## **Menangkap warna**

Isaac Newton pertama kali berhipotesis bahwa cahaya putih terdiri dari campuran panjang gelombang setelah mengamati, pada tahun 1664, cara prisma kaca dapat membagi berkas sinar matahari menjadi spektrum cahaya berwarna. Dengan menggunakan prisma kedua, dia menemukan bahwa dia dapat menggabungkan kembali cahaya yang tersebar menjadi satu berkas cahaya putih. Dia juga menemukan bahwa itu mungkin untuk mendapatkan cahaya satu warna dengan menutupi sisa spektrum.

Pada tahun 1802, Thomas Young menunjukkan bahwa cahaya putih dapat dicocokkan dengan campuran yang tepat dari tiga lampu yang mengandung pita sempit panjang gelombang dari bagian spektrum red, green, dan blue. Dia menyarankan bahwa alih-alih mata yang mengandung reseptor untuk setiap rona, itu hanya berisi tiga jenis fotoreseptor, yang masing-masing sensitif terhadap panjang gelombang cahaya yang berbeda. Ide-idenya dikembangkan lebih lanjut oleh Hermann Von Helmholtz 50 tahun kemudian, yang menunjukkan, dengan menggunakan eksperimen pencocokan warna, bahwa pada orang dengan penglihatan warna normal, memang mungkin untuk menggunakan hanya tiga panjang gelombang untuk menciptakan semua warna lain dalam kisaran normal terlihat. Helmholtz mengusulkan bahwa reseptor peka terhadap pita lebar panjang gelombang pendek (blue), sedang (green) dan panjang (red). Kombinasi respons dari ketiga jenis reseptor akan diinterpretasikan oleh otak sebagai satu warna, yang sifatnya akan ditentukan oleh kekuatan relatif respons masing-masing. Ini dikenal sebagai teori penglihatan warna Young-Helmholtz. Fotoreseptor dikenal sebagai reseptor kerucut dan memang sensitif terhadap cahaya dari tiga bagian berbeda dari spektrum tampak seperti yang diusulkan (meskipun ini adalah versi yang agak disederhanakan dari mekanisme sebenarnya dari penglihatan warna, dan sekarang dikenali hanya sebagai satu tahap; untuk detail teori lawan dari penglihatan warna). Red, green, dan blue dikenal sebagai warna primer. Proses pencocokan warna dikenal sebagai trichromacy dan merupakan prinsip dasar yang mendasari pencitraan warna fotografi dan digital.



**Gambar 83** (a) Pencampuran aditif cahaya red, green, dan blue. (b) Sintesis warna subtraktif menggunakan pewarna cyan, magenta dan yellow.

Seorang pria Skotlandia, James Clerk Maxwell, pada tahun 1861 mendemonstrasikan bahwa teori ini dapat digunakan sebagai dasar untuk menghasilkan foto berwarna. Dia menghasilkan tiga gambar fotografi terpisah dari beberapa pita tartan dengan eksposur melalui filter red, green, dan blue, yang kemudian dia cetak untuk menghasilkan slide lentera positif. Filter dengan warna yang sama seperti yang digunakan pada pengambilan gambar kemudian ditempatkan di depan masing-masing sisi positifnya dan ketika cahaya diproyeksikan melaluinya dan ketiga gambar yang terdaftar, menghasilkan foto berwarna dari pemandangan aslinya. Ini adalah proses aditif pencampuran warna, menggunakan penambahan cahaya dari tiga primer untuk menghasilkan semua warna lainnya. Jika jumlah yang sama dari ketiga primer dijumlahkan maka akan menghasilkan cahaya putih. Gambar 83a mengilustrasikan sistem aditif dari reproduksi warna.

Tiga warna yang dibuat dengan mencampurkan dua warna primer, cyan, magenta dan yellow, adalah warna pelengkap, kadang-kadang disebut warna sekunder, atau warna primer subtraktif. Menumpuk jumlah yang berbeda dari ketiga pewarna ini di atas kertas dikenal sebagai pencampuran warna subtraktif. Metode subtraktif didasarkan pada penyerapan cahaya, masing-masing warna sekunder menyerap (atau mengurangi) cahaya dari warna yang berlawanan dengan itu dalam diagram pada Gambar 83b, yaitu kuning menyerap biru, dll. Saat cyan, magenta dan yellow digabungkan, mereka mengurangi ketiga primer aditif dan menghasilkan hitam.

Setelah pengembangan film hitam-putih pankromatik, dimungkinkan untuk menghasilkan emulsi yang peka terhadap panjang gelombang cahaya yang berbeda. Diusulkan agar bahan warna multilayer dapat diproduksi dengan menambahkan zat ke emulsi yang akan menghasilkan pewarna berwarna pada perkembangannya. Dengan menambahkan tahap ekstra pada proses fotografis sebelum fiksasi, di mana perak yang dikembangkan dihilangkan, lapisan fotografis berwarna transparan tertinggal. Pada tahun 1935, Eastman-Kodak memproduksi Kodachrome, film multilayer praktis pertama, menggunakan proses ini.

Saat ini sebagian besar dari bahan fotografi film dan kertas berwarna didasarkan pada struktur tripack integral, di mana emulsi silver halida sensitif red, green, dan blue menghasilkan lapisan pewarna cyan, magenta dan yellow. Lapisan ini bergabung untuk mengurangi panjang

gelombang cahaya dari cahaya putih saat diproyeksikan melalui selebar film, baik saat melihat transparansi atau mencetak dari negatif warna. Dalam bahan cetak, lapisan pewarna pelengkap mengurangi panjang gelombang dari cahaya putih yang dipantulkan dari lapisan belakang kertas putih.

## **Gambar Digital**

### **1. Gambar digital Pertama**

Gambar digital pertama digunakan dalam industri surat kabar. Gambar dikirim dengan kabel bawah laut melintasi Atlantik antara London dan New York pada 1920-an, direproduksi di ujung lain menggunakan printer telegraf yang diadaptasi secara khusus. S di mana gambar dikodekan menjadi nilai-nilai diskrit dan direkonstruksi menggunakan lima tingkat abu-abu. Perkembangan gambar digital menjadi proses yang dengan mudah dapat digunakan sebagai alternatif dari proses fotografi tradisional, bagaimanapun, telah bergantung pada perkembangan komputer. Pada akhir tahun 1970-an, kamera yang didasarkan pada CCD sebagai sensor gambar telah dikembangkan untuk digunakan dalam penelitian tetapi belum muncul di domain publik. Kamera elektronik pertama yang tersedia untuk umum adalah Mavica, yang diumumkan oleh Sony pada Agustus 1981.

Perkembangan komputer digital dimulai pada tahun 1103-an dengan ide-ide yang nantinya akan dimasukkan ke dalam desain central processing unit (CPU). Perkembangan transistor yang progresif, bahasa pemrograman tingkat tinggi, sirkuit terintegrasi, sistem operasi dan mikroprosesor mengarah pada pengenalan komputer pribadi pertama pada tahun 1981 (IBM). Perkembangan perangkat keras dan perangkat lunak berarti bahwa sekarang sebagian besar penduduk di negara-negara Barat memiliki akses ke komputer, dan dapat menangkap, melihat, memanipulasi, dan mengirimkan gambar secara digital.

Sejalan dengan perkembangan teknologi komputer, menghasilkan komponen yang lebih kecil dan sistem yang lebih ramping, canggih tetapi ramah pengguna, kamera digital menjadi lebih kecil dan array area tunggal menjadi lebih besar. Sensor gambar pada awalnya lebih kecil dari frame penuh format fotografi 'setara'. karena mahal dan sulit dibuat dalam ukuran yang lebih besar. Oleh karena itu, masalah awal adalah resolusi, yang dibatasi oleh ukuran piksel tetapi juga oleh ukuran array area CCD. Namun, proses manufaktur telah meningkat secara dramatis, memungkinkan setara full-frame untuk format film dalam beberapa tahun terakhir. Di pasar konsumen, format gambar yang lebih kecil berarti bahwa diagonal gambar berkurang, dan lensa dapat ditempatkan lebih dekat ke sensor, menghasilkan bodi kamera yang secara progresif menjadi lebih kompak. Karena komponen elektronik menjadi lebih miniatur, pemrosesan pada kamera menjadi lebih kompleks, memungkinkan pengguna untuk memilih zona spesifik dalam gambar untuk diukur, metering mode yang berbeda, peringkat ISO speed, white balance netral, resolusi, format file dan kompresi. Kamera digital yang tidak terlalu rumit tetapi bahkan lebih kecil sekarang menjadi fitur otomatis pada kebanyakan telepon seluler.

### **2. Sensor CMOS**

Dalam beberapa tahun terakhir kelas baru sensor gambar telah dikembangkan. Meskipun masih teknologi berbasis silikon, sensor CMOS berbeda dari CCD dalam hal muatan diperkuat dan analog-ke-digital (AD) diubah di lokasi piksel. Data digital kemudian diangkut dari chip. Keuntungannya adalah bahwa setiap piksel dapat dibaca dari chip satu per satu. Sensor CMOS juga lebih murah dari pada pembuatan CCD, lebih kecil kemungkinannya untuk mengandung cacat dan mengkonsumsi lebih sedikit daya, yang sangat penting dalam kamera digital dalam hal shutter lag dan waktu refresh.

Karena sirkuit ekstra di setiap lokasi piksel, area penginderaan gambar dari piksel tersebut lebih kecil daripada area piksel CCD yang setara. Ini berarti bahwa rasio sinyal gambar terhadap noise yang dihasilkan oleh komponen elektronik lebih rendah, dan oleh karena itu gambar dari sensor CMOS awal lebih berisik dan kualitasnya lebih rendah daripada CCD. Hingga beberapa tahun yang lalu, sensor gambar CMOS umum digunakan di ponsel tetapi lebih jarang digunakan di kamera digital. Peningkatan dalam teknologi dan penggunaan teknik pemrosesan gambar yang canggih pada sensor berarti bahwa CMOS sekarang menjadi pilihan di sejumlah kamera profesional kelas atas, dengan larik area frame penuh yang setara dengan format film 35mm (misalnya, Canon EOS 1DS Mark III, yang memiliki sensor 24 x 36mm yang berisi sekitar 21,1 juta piksel efektif).

### **3. Colour digital capture**

Kamera digital awal menghasilkan gambar digital monokrom, intensitas pengambilan sampel sensor dari pemandangan aslinya. Trikromasi digunakan untuk menghasilkan warna dalam kamera digital menggunakan penangkapan aditif dari tiga gambar terpisah yang sesuai dengan konten red, green, dan blue dari pemandangan aslinya. Ini dicapai dengan menempatkan filter dichroic di depan tiga sensor terpisah yang diekspos menggunakan beamsplitter. Ini memberi nilai piksel red, green, dan blue, yang kemudian digabungkan untuk mewakili warna dalam pemandangan. Kamera yang didasarkan pada sistem ini berukuran besar, karena bodi kamera membutuhkan ruang yang cukup untuk menampung beamsplitter dan tiga sensor. Sistem ini secara virtual telah diganti di sebagian besar kamera digital dengan menggunakan sensor tunggal yang melapisi filter berwarna. Mereka biasanya disusun dalam pola Bayer, diilustrasikan pada Gambar 84, dan masing-masing sensitif terhadap pita panjang gelombang cahaya merah, hijau atau biru.

Setelah menangkap satu nilai di setiap situs piksel, nilai untuk dua saluran warna lainnya dibuat dengan menginterpolasi antara nilai untuk setiap saluran dari piksel sekitarnya. Proses interpolasi menghasilkan perkiraan nilai yang akan dihasilkan jika benar-benar dijadikan sampel; ini tidak meningkatkan resolusi dan karena interpolasi adalah rata-rata dan oleh karena itu proses pengaburan, dapat mengakibatkan penurunan kualitas gambar. Hal yang perlu diperhatikan dalam larik Bayer adalah bahwa ada dua kali jumlah piksel hijau-sensitif dibandingkan yang berwarna merah atau biru. Fitur ini sebagian disebabkan oleh fakta bahwa sensitivitas puncak sistem visual manusia adalah terhadap lampu hijau, sekitar 68 nanometer dalam kondisi siang hari normal, yang berarti bahwa kesalahan di saluran hijau lebih terlihat bagi kita daripada di saluran biru atau merah.

R	G	R	G	R	G	R
G	B	G	B	G	B	G
R	G	R	G	R	G	R
G	B	G	B	G	B	G
R	G	R	G	R	G	R
G	B	G	B	G	B	G
R	G	R	G	R	G	R

**Gambar 84** Pengaturan sensor RGB dalam array filter warna Bayer.

Perkembangan terbaru dalam teknologi penangkapan warna terjadi dalam sepuluh tahun terakhir dengan penemuan sensor Foveon™, yang pada tahun 2002 tersedia di kamera Sigma SD9. Sensor Foveon™ memiliki susunan yang lebih mirip dengan bahan tripack silver halida integral, memanfaatkan fakta bahwa panjang gelombang cahaya red, green, dan blue menembus ke kedalaman yang berbeda dalam substrat silikon. Nilai ditangkap untuk ketiga saluran di setiap situs piksel, yang berarti menghasilkan gambar berwarna dengan resolusi penuh berkualitas tinggi.

### Perangkat digital lainnya

Rantai gambar digital terdiri dari sejumlah perangkat selain kamera digital. Teknologi individual dan alternatif yang tersedia di setiap tahap imaging chain. Sejauh ini kami menganggap kamera digital sebagai alat penangkap; Namun, perangkat alternatif untuk digital capture adalah scanner, yang digunakan untuk mendigitalkan gambar foto. Scanner alas datar pada awalnya dikembangkan untuk pemindaian refleksi materi cetak, meskipun sekarang banyak yang menggunakan tudung transparansi untuk memindai materi film. Scanner film khusus memberikan pindaian berkualitas lebih tinggi dari media transparan, karena scanner tersebut dirancang untuk merekam data gambar dengan dynamic range yang lebih besar (kisaran densitas dari bayangan hingga sorotan) daripada yang ditemui dalam materi cetak. Film pemindaian akan selalu menghasilkan pindaian dengan kualitas yang lebih baik daripada cetakan pemindaian, karena cetakan itu adalah reproduksi generasi kedua dari adegan aslinya. Scanner drum berada di ujung pasar profesional, dengan resolusi tertinggi dan jangkauan dinamis. Seperti kamera digital, scanner menggunakan sistem representasi warna aditif RGB, dengan sensor gambar individu yang disaring untuk panjang gelombang cahaya red, green, dan blue.

Perangkat utama dalam imaging chain adalah monitor komputer. Hingga baru-baru ini, teknologi ini didasarkan pada teknologi tabung sinar katoda (CRT) yang dikembangkan dari sistem televisi, di mana piksel dihasilkan oleh intensitas gabungan yang berbeda dari fosfor red, green, dan blue. Saat ini tampilan CRT telah banyak digantikan oleh teknologi alternatif,

yang saat ini paling umum adalah teknologi Liquid Crystal Display (LCD). Dalam perangkat LCD, gambar dibentuk dari kombinasi piksel berfilter RGB yang diterangi oleh lampu latar. Monitor adalah perangkat output dan, seperti kamera digital dan scanner, mewakili warna menggunakan kombinasi aditif dari nilai piksel RGB. Setiap piksel di layar terdiri dari kelompok tiga warna, kadang-kadang disebut tiga serangkai. Karena monitor digunakan untuk melihat dan mengedit gambar, sangat penting untuk mengatur dan mengkalibrasi untuk menghasilkan warna yang akurat dan berulang.

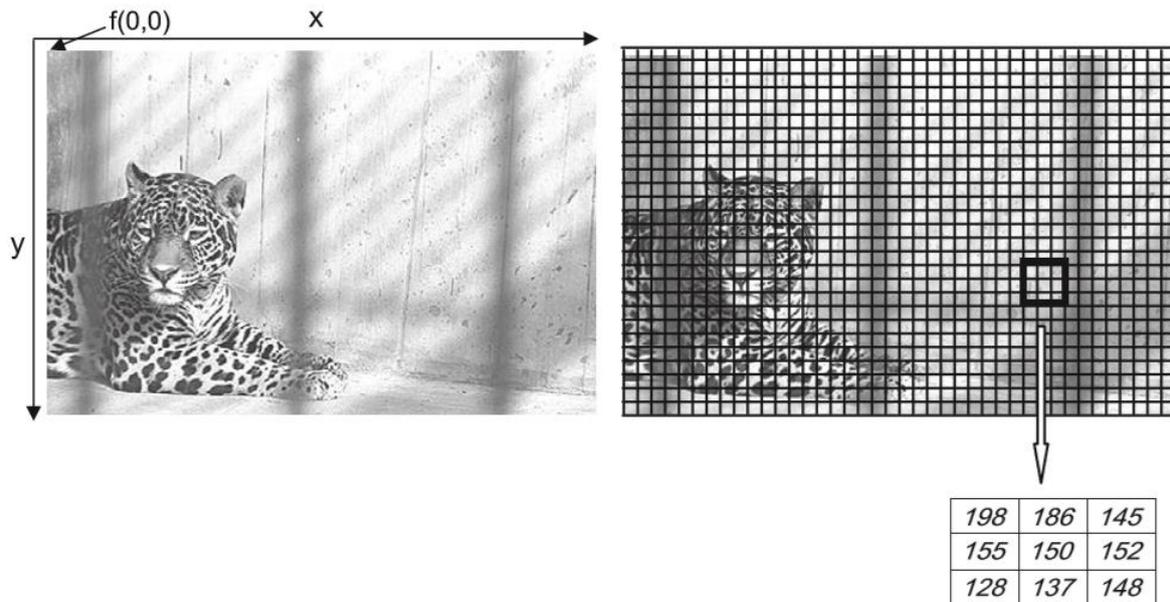
Teknologi yang tersedia untuk produksi cetak digital beragam; namun, semua menggunakan sistem reproduksi warna subtraktif, menggabungkan jumlah pewarna cyan, magenta, dan kuning yang berbeda yang disimpan di lokasi piksel. Dalam banyak hal, pewarna hitam juga digunakan untuk menghasilkan nada yang akurat, bukan warna netral yang dibuat dengan jumlah maksimum dari tiga warna lainnya. Dalam beberapa tahun terakhir kisaran kemungkinan warna yang dapat dicetak (nada warna) telah diperluas dengan menggunakan tinta ekstra, biasanya versi yang lebih ringan dari tinta lainnya, seperti yang digunakan, misalnya, dalam proses Hexachrome™ enam warna.

## **Representasi gambar digital**

Menemukan metode untuk mendeskripsikan dan mengevaluasi gambar dan karakteristik gambar merupakan inti dari ilmu citra. Dengan demikian, kami telah mempertimbangkan perkembangan dan perbedaan dalam proses pencitraan analog dan digital. Untuk memahami implikasi dari perbedaan-perbedaan ini, perlu untuk melihat cara kedua jenis gambar tersebut direpresentasikan. Pemandangan asli dapat dijelaskan dengan fungsi dua dimensi  $f(x, y)$ , di mana koordinat  $(x, y)$  menggambarkan posisi spasial dalam frame gambar dan nilai fungsinya sebanding dengan intensitas dalam posisi tersebut dalam aslinya. tempat kejadian.

Dalam proses pencitraan fotografi, nilai off  $(x, y)$  dapat diwakili oleh nilai terukur dari densitas perak di lokasi manapun dalam gambar. Posisi pengukuran dapat diambil dari mana saja pada gambar, dan nilai densitas juga terus berubah. Rentang nada yang diwakili secara terus menerus ini adalah hasil dari distribusi acak melalui kedalaman emulsi butiran fotografi kecil yang saling bertumpuk. Untuk alasan ini, gambar fotografis disebut sebagai gambar warna-kontinu.

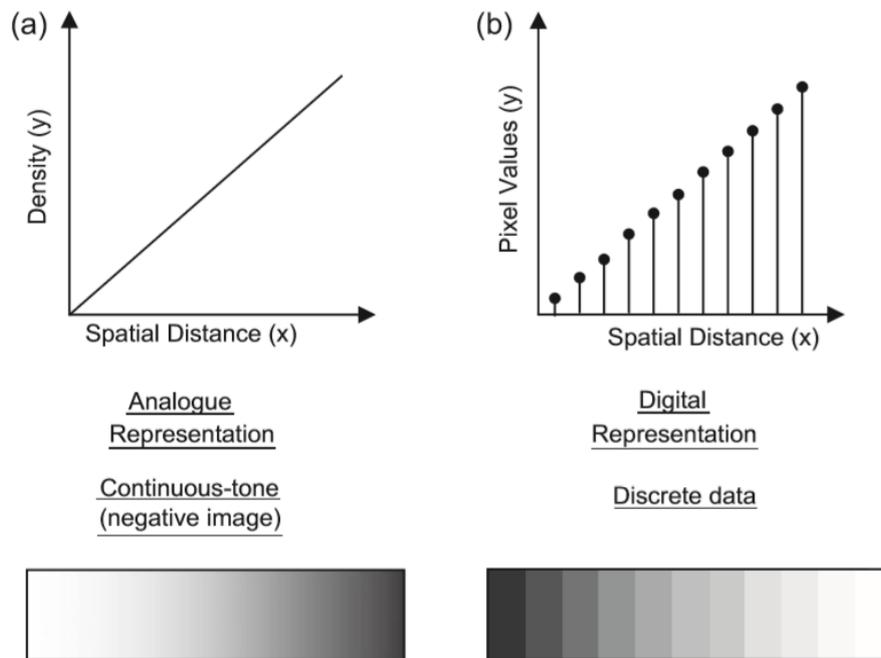
Dalam gambar digital, gambar diwakili oleh kisi piksel berbeda yang tidak tumpang tindih. Setiap piksel individu ditangani oleh koordinat spasial dalam hal baris dan kolom. Fungsi bayangan  $f(x, y)$  sering diganti dengan fungsi  $p(i, j)$ , di mana  $i$  dan  $j$  adalah nomor baris dan kolom dan  $p$  adalah nilai piksel. Piksel hanya dapat mengambil nilai tertentu dan biasanya direpresentasikan sebagai skala bilangan bulat. Gambar berwarna akan memiliki beberapa nilai (biasanya triplet seperti RGB) yang mewakili setiap warna sebagai kombinasi intensitas tiga saluran. Nilai piksel memiliki arti yang berbeda untuk perangkat yang berbeda, misalnya intensitas fosfor berwarna RGB pada CRT, atau jumlah tinta berwarna CMYK yang dibuat oleh printer inkjet. Gambar 85 menunjukkan perbedaan dalam representasi antara metode fotografi dan digital.



**Gambar 85** Representasi gambar analog dan digital. Gambar asli dari Master Kodak PhotoCD.

Jika area kecil dengan warna yang berubah secara halus pada gambar diwakili oleh fungsi di mana sumbu  $x$  mewakili lokasi spasial di satu dimensi gambar dan sumbu  $y$  mewakili densitas, seolah-olah potongan melintang telah diambil.

Perhatikan bahwa tone warna terbalik di sisi kanan dibandingkan dengan representasi diskrit di sebelahnya, karena nilai densitas yang tinggi berhubungan dengan area gelap pada gambar, sedangkan nilai piksel yang tinggi dalam gambar digital menunjukkan nilai yang lebih terang. Jarak diskrit sampel gambar dalam gambar digital menghasilkan nada tunggal di setiap lokasi piksel dan nilai-nilai ini juga pada tingkat diskrit. Efeknya telah dibesar-besarkan dengan rendahnya jumlah tingkat abu-abu yang ditunjukkan. Posisi spasial diskrit dan nilai nada mendefinisikan dua karakteristik gambar digital, resolusi spasial dan kedalaman bit atau resolusi tingkat abu-abu



**Gambar 86** Fungsi gambar kontinu dan diskrit

## Resolusi spasial

Dalam gambar digital, resolusi spasial merupakan masalah yang kompleks. Kemampuan untuk merepresentasikan detail halus adalah kombinasi dari jumlah piksel dan ukuran piksel relatif terhadap ukuran area pencitraan. Resolusi gambar adalah jumlah piksel secara horizontal dan vertikal, dan pada awal proses pencitraan ditentukan oleh jumlah piksel pada perangkat penangkap asli, tetapi dapat diubah dengan up-sampling (interpolasi) atau downsampling ke ubah ukuran gambar. Selain resolusi gambar yang melekat, setiap perangkat digital memiliki resolusinya sendiri. Sekali lagi, resolusi input atau output di printer dan scanner dapat diubah dengan interpolasi. Resolusi perangkat input dan output biasanya dijelaskan dalam pixels per inch (ppi) atau ukuran yang setara seperti dot per inch (dpi). PPI perangkat masukan adalah salah satu faktor yang membatasi kemampuannya untuk mereproduksi detail halus atau frekuensi spasial yang tinggi.

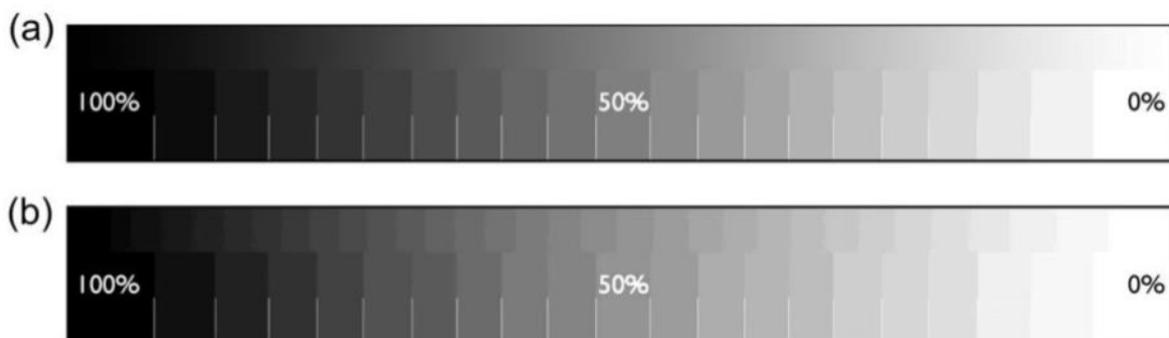
Resolusi output yang diperlukan tergantung pada perangkat yang digunakan. Jika gambar ditampilkan pada monitor komputer dengan kelompok fosfor RGB yang mewakili setiap piksel pada resolusi spasial 72 ppi atau lebih, maka mata akan melihat gambar dengan nada kontinu. Untuk gambar yang dicetak, resolusi yang lebih tinggi diperlukan. Dalam banyak teknologi pencetakan ‘half-tones’ atau ‘digitalhalf-tones’ digunakan untuk menciptakan ilusi nada kontinu, dengan menggunakan kelompok titik tinta untuk mewakili satu piksel; ini dijelaskan nanti di buku. Dalam hal ini jumlah piksel sebenarnya yang dicetak per inci dapat didefinisikan dalam ‘baris per inci’. garis adalah sekelompok titik tinta yang berhubungan dengan satu piksel, terminologi yang berasal dari industri pers. Resolusi pencetakan yang diperlukan untuk industri cetak biasanya dikutip 300 dpi. Telah ditemukan bahwa resolusi sekitar 240 dpi memadai untuk pencetakan menggunakan printer inkjet desktop.

Resolusi spasial telah lama dianggap sebagai salah satu batasan utama gambar digital dibandingkan dengan proses analog; Namun, seiring dengan peningkatan teknologi sensor, ukuran piksel semakin mendekati titik gambar fotografi dan resolusi sensor digital sekarang dianggap memadai untuk banyak aplikasi fotografi profesional

## Bit depth (Kedalaman Bit)

Gambar digital dikodekan sebagai data biner, dengan string digit biner mewakili satu piksel. Sebuah digit biner (bit) hanya dapat mengambil nilai 0 atau 1 dan susunan digit akan menentukan nilai piksel. Jumlah digit biner yang digunakan untuk setiap piksel akan menentukan berapa banyak kode unik yang dapat dibuat dan oleh karena itu, berapa banyak nilai piksel yang berbeda dapat direpresentasikan. Misalnya, tepat 2 bit dapat menghasilkan empat kode unik berikut dan tidak lebih dari - 00, 01, 10 dan 11 - oleh karena itu dapat digunakan untuk mewakili empat nilai.

Kepentingan visual dari jumlah tingkat abu-abu yang memadai dalam gambar digital dapat dengan jelas dilihat pada Gambar 87.



**Gambar 87** Kedalaman bit dan reproduksi nada dalam gambar digital. (a) Gambar delapan-bit = 256 tingkat abu-abu. (b) Gambar lima-bit = 32 tingkat abu-abu.

Gambar di Gambar 87a, menunjukkan skala abu-abu 21 langkah, menggambarkan fenomena visual yang menarik. Di bagian atas skala abu-abu, abu-abu berubah terus-menerus, memberikan gradasi warna yang halus dari hitam ke putih. Setengah bagian bawah skala abu-abu menunjukkan serangkaian langkah dalam nilai nada, perbedaan visual antara setiap pasangan semuanya tampak sama. Langkah-langkah ini dihasilkan dari gambar digital dan nilai piksel pada setiap langkah di garis tengah dan bawah skala abu-abu adalah sama. Di wilayah horizontal di tengah gambar, anak tangga nilai tunggal tidak memiliki batas putih di antara mereka. Namun gambar tampak ‘bergigi ‘ seolah-olah tepi berada di antara setiap langkah, dengan area di sisi yang lebih gelap dari tepinya tampak lebih gelap daripada langkahnya yang lain dan area di sisi kanan, sisi yang lebih terang tampak lebih terang daripada langkahnya. Hal ini diyakini disebabkan oleh proses ‘penajaman ‘ yang dilakukan selama pemrosesan sinyal visual oleh otak dan efek visual tersebut dikenal sebagai pita Mach. Dalam Gambar 87b, yang diwakili oleh 5 bit per piksel (bpp), lompatan yang terlihat muncul sebagai kontur di seluruh gambar. Karena sistem visual manusia sangat sensitif terhadap lompatan nada, khususnya di area yang relatif seragam, nilai gambar harus dikuantisasi ke tingkat yang cukup baik untuk menghasilkan tampilan nada yang berkelanjutan.

Jumlah level atau nilai piksel yang berbeda yang mungkin direpresentasikan ditentukan oleh ekspresi  $Levels = 2^b$ , di mana  $b$  adalah jumlah bit yang dialokasikan per piksel. Jumlah maksimum tingkat intensitas yang dapat dibedakan oleh tingkat sistem visual manusiawi dan tingkat pencahayaan telah diperkirakan menjadi 180; oleh karena itu, gambar digital skala abu-abu memerlukan minimal jumlah nilai nada individu ini agar tampak seolah-olah merupakan nada kontinu. Piksel 8-bit dapat mengambil  $2^8 = 256$  nilai yang berbeda dan ini membuat beberapa level tambahan tersedia untuk manipulasi tonal dan oleh karena itu gambar 8-bit adalah standar minimum yang digunakan untuk menghasilkan kualitas fotografis. Piksel dalam

gambar 8-bit biasanya ditampilkan dalam aplikasi pemrosesan gambar dalam kisaran dari 0 (hitam) hingga 255 (putih). Perangkat penangkap modern sering kali memungkinkan 16 bit per piksel untuk rendisi tonal yang lebih baik; namun, penggunaan ini mungkin dibatasi oleh fungsi yang tersedia dalam perangkat lunak pemrosesan gambar dan kisaran format file gambar yang akan menyandikan gambar 16-bit.

## Representasi warna

Gambar berwarna diwakili oleh saluran terpisah, yang masing-masing diberi jumlah bit yang sama dengan gambar skala abu-abu yang setara. Gambar RGB karenanya dapat mewakili level  $256 \times 256 \times 256$ , yang merupakan sekitar 16,7 juta warna individu, menggunakan total 24 bit per piksel. RGB juga dapat diwakili oleh 16 bit per saluran. Gambar berwarna bisa ada dalam berbagai ruang warna selain RGB, termasuk CMY untuk pencetakan. Ruang warna yang sedikit lebih intuitif dan mudah dipahami mewakili piksel dalam hal rona, saturasi dan intensitas (nada/intensitas), dan variasi lain dari tema yang sama. Diskriminasi warna pada sistem visual manusia tidak sepeka diskriminasi rona dan karenanya dalam aplikasi tertentu mungkin berguna untuk memisahkan informasi rona dari warna. Ruang warna seperti ruang warna CIELAB mewakili gambar menggunakan tiga saluran, di mana satu piksel memiliki satu koordinat untuk luminansi dan dua yang berkaitan dengan kroma, yang mewakili saluran lawan warna hijau dan biru.

## Ukuran file dan format file

Ukuran file gambar digital adalah fungsi dari jumlah piksel dan jumlah bit yang dialokasikan untuk setiap piksel. Penting untuk membedakan antara ukuran file sebenarnya dari data mentah yang tidak dikompresi dan ukuran file ketika gambar disimpan ke format file tertentu, yang mungkin lebih kecil atau lebih besar, tergantung pada metode kompresi mana yang digunakan dan informasi lain apa yang dikandung file tersebut, seperti header, data exif, lapisan, atau alpha channel.

Ukuran file dalam bit = Jumlah piksel x Jumlah bit per piksel

Membagi gambar ini dengan 8 mengubah keluaran menjadi byte; untuk mengonversi ke megabyte, bagi dengan  $(1024 \times 1024)$ . Jumlah piksel bergantung pada resolusi yang dibutuhkan, tetapi untuk menghasilkan gambar yang kira-kira setara dengan film 35mm membutuhkan sekitar  $3072 \times 2048$  piksel. Jika ini adalah gambar RGB 24-bit maka ukuran file =  $3072 \times 2048 \times 24 = 18 \text{ MB}$

Ukuran file gambar digital memiliki implikasi penting dalam imaging chain dalam hal kecepatan transmisi, pemrosesan gambar, dan penyimpanan. Jika gambar akan ditampilkan di internet, ukuran file gambar bahkan lebih penting dalam hal kecepatan pengirimannya. Penurunan resolusi spasial atau kedalaman bit akan mengurangi ukuran file dengan penurunan kualitas gambar yang terkait. Keseimbangan harus dicapai antara persyaratan untuk membatasi ukuran file dan kualitas gambar yang optimal. Ukuran file, bagaimanapun, kurang menjadi masalah daripada dulu, karena kemajuan teknologi komputer berarti bahwa hard drive yang lebih murah sekarang tersedia dengan kemampuan penyimpanan yang lebih besar, cukup kecil untuk portabel, sejajar dengan perkembangan media penyimpanan portabel lainnya seperti Stik memori USB. Penggunaan broadband yang meluas untuk mengakses internet berarti transmisi gambar juga lebih cepat.

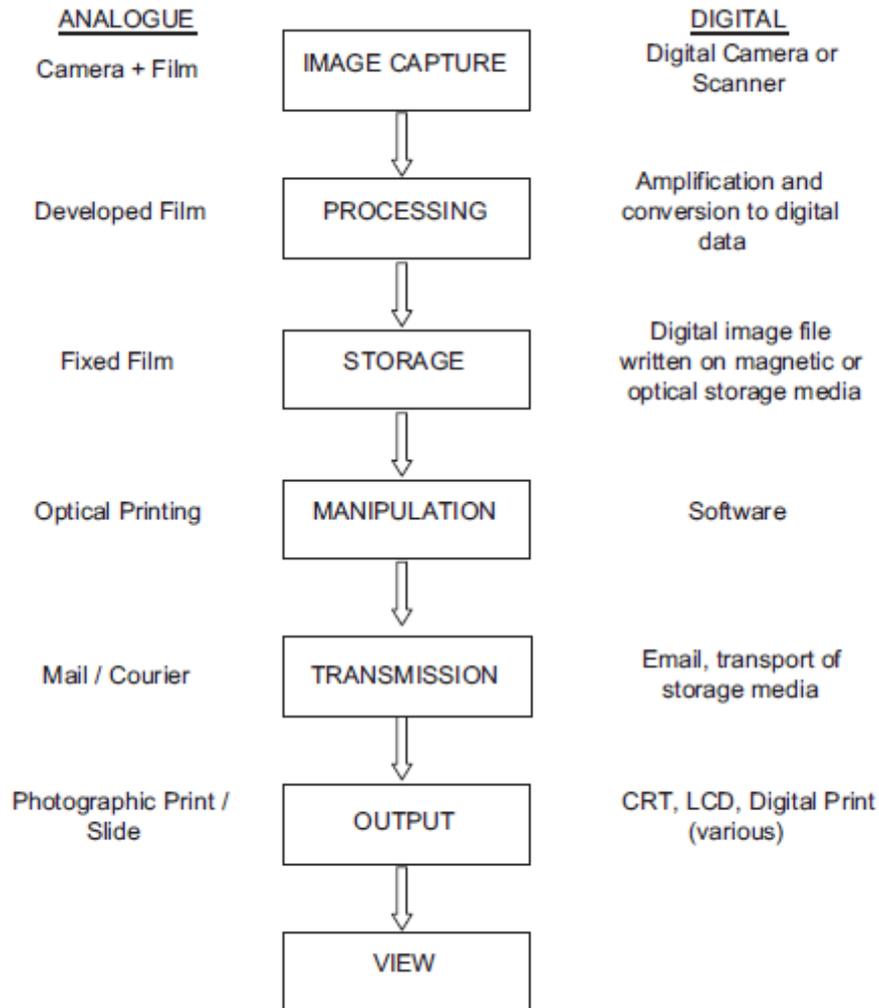
Format file gambar berbeda yang tersedia memiliki kualitas yang berbeda, yang akan dibahas nanti dalam buku ini. Format yang paling berguna adalah yang distandarisasi, yang berarti

bahwa file gambar dapat dibuka di berbagai aplikasi dan di seluruh platform. Contoh format penyimpanan standar atau standar de facto yang umum digunakan termasuk Tagged Image File Format (TIFF), Joint Photographic Experts Group (JPEG), Graphic Interchange Format (GIF), format Photoshop (PSD), dan JPEG 2000. Mereka dapat dibagi secara luas ke file yang mengompresi lossless, seperti TIFF, dan file yang menerapkan kompresi lossy, memberikan ukuran file yang lebih kecil dengan loss inquiry, seperti JPEG. Kompresi dicapai dengan menghilangkan redundansi (data atau informasi yang tidak perlu) dari gambar, baik dengan mengaturnya secara lebih efisien atau dengan menghilangkan informasi yang kurang penting secara visual.

Perkembangan penting dalam format file adalah pengenalan file RAW. Ini adalah file yang berisi data yang telah mengalami pemrosesan minimal sebelum ADC. Ini sedekat mungkin dengan data 'yang terlihat' oleh sensor gambar dan kemudian dapat dibuka di perangkat lunak pemrosesan gambar untuk pemrosesan yang lebih akurat sebelum diubah ke format standar seperti TIFF. Saat ini file RAW yang ditangkap oleh kamera digital adalah hak milik dan berbeda dalam struktur dan konten; misalnya Canon menggunakan CRW, Nikon menggunakan NEF dan Fuji fi lm, RAF. Perangkat lunak konversi individual disertakan dengan kamera untuk mengubahnya, tetapi kemungkinan format standar akan digunakan di tahun-tahun mendatang dan versi terbaru Adobe Photoshop berisi konverter plug-in, Camera RAW, yang dapat mengonversi sebagian besar RAW yang berbeda format.

## **Imaging chain**

Imaging chain menjelaskan tahapan, dalam istilah perangkat atau proses, yang terlibat dari adegan asli hingga keluaran akhir. Metode yang tersedia untuk merekam, memanipulasi, menyimpan, dan mengirimkan gambar beragam dan mungkin seluruhnya didasarkan pada bahan dan teknik berbasis silver halida tradisional (di sini disebut sebagai 'fotografi') dan teknik, atau proses elektronik menggunakan sensor dan perangkat gambar digital. Tak terelakkan, perbandingan dibuat antara dua jenis sistem dan gambar yang dihasilkan, tetapi untuk benar-benar memahaminya adalah menyadari bahwa keduanya sangat berbeda di alam dan terkadang perbandingan langsung menyesatkan. Imaging chain 'Hibrid' mengandung aspek keduanya dan oleh karena itu dapat menggabungkan beberapa keunggulan keduanya. Konsep imaging chain analog dan digital diilustrasikan pada Gambar Gambar 88.



**Gambar 88** Imaging chain

Contoh imaging chain hibrid memperoleh gambar pada film fotografi, yang kemudian didigitalisasi dalam scanner film, sebelum diproses dan dikeluarkan menggunakan printer inkjet. Ini menggabungkan kualitas awal gambar film, dengan kemudahan memiliki rekaman digital gambar untuk diproses. Sebuah gambar pada bahan fotografi memiliki umur simpan yang didasarkan sepenuhnya pada sifat fisik bahan dan cara penyimpanannya. Gambar digital hanyalah serangkaian angka dan secara teoritis dapat disimpan selamanya, selama salinan diarsipkan. Dengan peningkatan dalam teknologi tangkap digital, kemungkinan besar pada akhirnya jalur digital sepenuhnya akan menjadi yang paling umum digunakan. Namun, seiring dengan pergerakan menuju rantai gambar digital, proses pencitraan telah berubah menjadi lingkaran penuh dengan perangkat pencetakan canggih, seperti Fuji Pictography, yang telah dikembangkan, yang ‘menulis’ gambar digital pada bahan berbasis silver halida. Karena lapisan warna bersifat semi-transparan, gambar tersebut memiliki warna dan sifat arsip dari bahan fotografi, tetapi diperoleh dan diproses dengan cara digital yang lebih cepat dan serbaguna.

Dalam mengevaluasi manfaat dari dua imaging chain, perlu dipertimbangkan sifat representasi gambar yang berbeda, di samping proses yang terlibat. Teknologi fotografi adalah kuantitas yang diketahui, dan ilmu fotografi adalah disiplin ilmu yang mapan di mana berbagai ukuran kinerja telah dikembangkan, untuk memungkinkan evaluasi sistem dan material. Gambar

fotografi berkualitas tinggi dan nada kontinu, dan hasil yang dapat dicapai diketahui dan dapat diulang. Namun, pemrosesan kimiawi itu berantakan, memakan waktu, mahal, dan buruk bagi lingkungan. Kemungkinan besar ini akan menjadi faktor kunci dalam akhirnya kematian penggunaan bahan dan proses fotografi.

Sifat diskrit data digital menghasilkan trade-off antara ukuran file dan kualitas gambar. Artefak tertentu melekat pada data digital, karena sifatnya yang terpisah. Artefak juga dapat dibuat saat gambar bergerak melalui perangkat dalam imaging chain, terutama jika kompresi lossy digunakan. Sifat diskrit data juga merupakan kekuatannya, bagaimanapun, karena representasi gambar dengan deretan angka berarti bahwa pemrosesan gambar dicapai dengan manipulasi numerik. Pertimbangkan hal ini bersamaan dengan ledakan penggunaan internet dalam 10 tahun terakhir. Kami semakin terbiasa dengan kesegeraan gambar digital, kemampuan untuk melihat gambar segera setelah diambil, pemrosesan gambar secara real-time di layar, dan transmisi cepat ke belahan dunia lain melalui internet. Dengan setiap perkembangan baru untuk meningkatkan kualitas gambar, gambar digital diatur untuk mengambil alih dari analog di semua aplikasi kecuali minoritas.

## Mengevaluasi kualitas gambar

Kualitas gambar telah didefinisikan oleh Engeldrum (2000) sebagai ‘kumpulan persepsi terintegrasi dari keseluruhan tingkat keunggulan gambar’. Kualitas gambar yang dirasakan adalah hasil dari interaksi yang kompleks dari respons sistem visual manusia terhadap berbagai atribut gambar. Atribut ini tidak independen satu sama lain; peningkatan dalam satu atribut dapat berfungsi untuk meningkatkan atau menekan respons visual terhadap yang lain dan oleh karena itu logis untuk mempertimbangkannya secara keseluruhan. Terdapat sejumlah atribut fisik gambar yang dapat diukur dan digunakan sebagai tolok ukur kualitas gambar dan dirangkum pada Tabel 10. Penting untuk diketahui bahwa pengukuran atribut tunggal memberikan korelasi terbatas dengan kualitas gambar yang dirasakan sebenarnya. Sejumlah metrik kualitas gambar telah dikembangkan yang memperhitungkan efek gabungan dari beberapa variabel.

<b>Tabel 11 Pengukuran fisik pada kualitas gambar</b>	
<b>Atribut</b>	<b>Pengukuran Fisik</b>
Tone (kontras)	Kurva Reproduksi tone, kurva karakteristik, densitas, histogram densitas, nilai pixel
Warna	Kromasitas, perbedaan warna, model tampilan warna
Resolusi (detail)	Kekuatan pemecah (siklus per mm, dpi, ppi dan lpi)
Sharpness (edge)	Sharpness, PSF, LSF, MTF
Noise (graininess)	Granularitas, Spektrum daya noise, fungsi autokorelasi, deviasi standar, RMSE
Lainnya	DQE, kapasitas informasi, ukuran file, harapan hidup (tahun)

Gambar digital telah menyebabkan perbedaan pendekatan dalam pengukuran kualitas gambar. Ini sebagian karena masukan dari berbagai disiplin ilmu dalam pengembangan dan evaluasi teknologi dan proses digital. Proses pengambilan sampel berarti ada kehilangan informasi dari adegan aslinya hanya karena gambarnya digital. Di semua tahapan dalam imaging chain, data gambar dimanipulasi dan diproses, menyebabkan artefak dan kesalahan pada hasil akhir. Kompresi lossy juga menghasilkan perbedaan pada gambar keluaran. Pendekatan sederhana untuk mengevaluasi gambar atau proses adalah mengukur perbedaan antara gambar asli dan keluaran. Berbagai ukuran perbedaan numerik seperti mean absolute error, root mean square

error dan peak signal-to-noise ratio telah dikembangkan dan diterapkan dalam evaluasi algoritma kompresi. Ini biasanya disebut metrik distorsi.

Ukuran obyektif sederhana dari atribut gambar tidak selalu berkorelasi baik dengan kualitas gambar subjektif. Kelemahan dalam pendekatan langsung seperti itu adalah bahwa pengukuran mengevaluasi imaging chain tanpa pengamat. Ukuran kualitas gambar yang sebenarnya harus menentukan kualitas gambar seperti yang terlihat oleh pengamat. Kuantifikasi persepsi subjektif disebut psikofisika, yang mengukur dan menggambarkan hubungan antara rangsangan fisik dan tanggapan subjektif. Dalam eksperimen psikofisik, kualitas gambar diukur dengan tanggapan pengamat terhadap perubahan gambar, memberikan skala nilai di mana gambar diberi peringkat, perbedaan skala yang berkaitan dengan perbedaan yang dirasakan. Eksperimen tersebut dapat menyelidiki efek dari mengubah satu atau banyak atribut gambar, atau efek dari mengubah kondisi tampilan atau lingkungan, atau mungkin memberikan skala kualitas gambar yang dirasakan secara keseluruhan. Studi dapat dilakukan untuk mengidentifikasi titik di mana perubahan gambar terlihat (hanya perbedaan yang terlihat) dan menghubungkannya dengan perubahan atribut fisik. Ini adalah pengukuran kualitas citra. Studi tentang kualitas gambar secara keseluruhan melibatkan pengamat yang mengidentifikasi kualitas gambar yang disukai.

Akan tetapi, tidak praktis bagi produsen untuk bergantung sepenuhnya pada hasil dari eksperimen psikofisik saja, karena memerlukan waktu lama untuk menyiapkan, melakukan, dan menganalisis. Oleh karena itu, metrik kualitas gambar telah dikembangkan untuk mencoba memodelkan respons yang diprediksi oleh pengamat manusia. Dengan memodelkan berbagai respons dari sistem visual manusia dan memasukkan model tersebut dalam kombinasi dengan ukuran fisik lain dari atribut gambar dalam model matematika, metrik dapat digunakan untuk mengukur kualitas gambar atau kualitas gambar tanpa ketidaknyamanan eksperimen psikofisik. Metrik tersebut diuji terhadap data dari eksperimen psikofisik untuk melihat seberapa banyak mereka berkorelasi dengan kualitas yang dirasakan. Seringkali berbagai metrik akan dievaluasi selama durasi studi kualitas gambar.

# Format File Gambar Digital

## Pengantar

Masalah penyimpanan gambar digital lebih kompleks dibandingkan dengan gambar pada bahan silver halida, dimana sensor juga merupakan media penyimpanannya. Pikiran harus diberikan kepada lebih dari sekedar kondisi fisik penyimpanan. Data gambar harus dikodekan dengan cara tertentu dalam file gambar; ini harus disimpan dalam format file, yang kemudian disimpan ke beberapa bentuk perangkat penyimpanan perangkat keras. Ada berbagai faktor yang perlu dipertimbangkan dalam memilih format file gambar tertentu, yang pada dasarnya diatur oleh properti gambar, cara gambar digunakan, dan persyaratan ukuran file/penyimpanan tertentu.

Gambar digital dapat dianggap hanya sebagai array nilai piksel; Namun, data gambar harus diubah ke kode biner untuk diproses, disimpan, dan dikirim. Kode ini perlu direpresentasikan dalam file gambar dengan cara yang memungkinkannya untuk diinterpretasikan saat bergerak melalui imaging chain. Format file gambar menentukan bagaimana data gambar diatur. Ia juga mendefinisikan 'pengemasan' di sekitar data: paling tidak ia akan menyertakan sebuah header yang berisi informasi tambahan yang diperlukan atau berguna untuk interpretasinya, seperti tipe data, resolusi, kedalaman bit, ruang warna; itu mungkin juga termasuk metadata (didefinisikan sebagai 'data tentang data') seperti informasi Exif (Exchangeable Image File Format) dari kamera digital.

Ada banyak sekali format file yang tersedia untuk penyimpanan gambar dan banyak lagi yang telah dikembangkan dan sejak itu menjadi usang. Untungnya, seiring dengan kemajuan teknologi gambar digital, rentang format yang digunakan dalam industri pencitraan telah menurun, menyatu ke koleksi yang sekarang banyak digunakan untuk sebagian besar aplikasi pencitraan. Format ini mencakup berbagai jenis gambar, menggunakan pendekatan berbeda untuk menyimpan gambar secara efisien dan memiliki berbagai kelebihan dan keterbatasan; dalam beberapa kasus, ini memungkinkannya menjadi optimal untuk aspek pencitraan tertentu.

Mayoritas format yang saat ini digunakan dalam industri pencitraan memiliki kesamaan: dalam banyak kasus, standar pencitraan, yang berarti bahwa format tersebut telah melalui proses pengembangan yang cukup panjang dan tersedia secara luas. Mereka juga cenderung memiliki fleksibilitas yang cukup untuk memungkinkan pengembangan dan perbaikan lebih lanjut untuk beradaptasi dengan perubahan kebutuhan teknologi dan sistem. Dalam beberapa kasus standar tersebut juga merupakan standar de facto, yang berarti bahwa standar tersebut telah menjadi standar dominan untuk tugas atau aplikasi pencitraan tertentu (perhatikan, bagaimanapun, bahwa standar de facto belum tentu merupakan format file standar). Ini mungkin karena adopsi yang luas oleh produsen, atau karena mereka telah menjadi preferensi mayoritas pengguna daripada format lain yang setara.

Ada sejumlah properti penting yang perlu dipertimbangkan saat memilih format file. Ini diringkas secara singkat di bawah ini, sebelum informasi lebih rinci tentang format yang paling relevan diberikan.

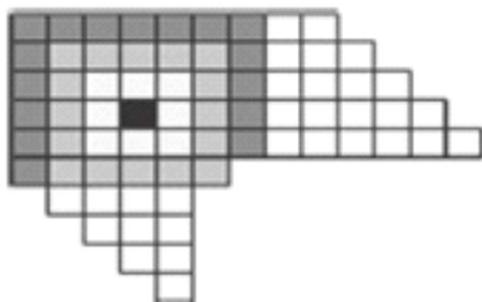
## Raster dan Vektor grafis

Yang paling mendasar dalam menentukan sifat file gambar, jenis grafik pencitraan berhubungan dengan struktur informasi gambar di seluruh bidang gambar. Dalam pencitraan fotografi, kita terutama berurusan dengan grafik raster, yang pada dasarnya didefinisikan oleh

serangkaian nilai diskrit, umumnya dikenal sebagai bitmap. Raster adalah kisi gambar dari elemen gambar; saat ini kami menggunakan tampilan raster, yaitu tampilan yang terdiri dari piksel. Jenis representasi gambar alternatif menggunakan grafik vektor. Ini paling sering digunakan dalam aplikasi grafik komputer dan program menggambar, meskipun salah satu mungkin bekerja dengan baik dengan kedua jenis jika menggunakan teks dengan gambar atau jalur seleksi, yang didefinisikan menggunakan deskripsi vektor.

Gambar vektor dideskripsikan dalam bentuk garis dan bentuk, yang diwakili oleh rumus matematika. Vektor mewakili titik akhir, arah, dan besaran garis, misalnya, dengan cara yang efisien.

Perbedaan antara kedua jenis gambar tersebut ditunjukkan pada Gambar 89. Bitmap memiliki sampel yang diperbaiki secara berkala, oleh karena itu bitmap mengalami berbagai artefak, seperti aliasing, yang merupakan karakteristik gambar sampel. Ini juga memiliki resolusi tetap dan jika cukup diperbesar sampel akan terlihat (yaitu pikselasi).



BITMAP: gambar terdiri dari larik piksel



VEKTOR: objek grafik (titik, garis, kurva, jalur) dan teks yang dijelaskan menggunakan grafik vektor

**Gambar 89** Bitmap versus grafik vektor.

Gambar vektor tidak memiliki titik tetap - sebuah garis dapat memiliki titik akhir di posisi mana pun dengan dalam gambar. Kurva dapat direpresentasikan dengan berbagai cara, paling umum menggunakan deskripsi parametrik. Kurva dan spline Bezier adalah contohnya. Grafik vektor memberikan pendekatan yang ringkas untuk mendeskripsikan bentuk dan garis, dan ini dapat dengan mudah diubah dalam ukuran dan bentuk menggunakan transformasi geometris. Karena objek dalam gambar vektor dideskripsikan dengan ekuasi daripada kumpulan sampel diskrit, gambar tersebut tidak bergantung pada resolusi dan operasi pengubahan ukuran tidak menghasilkan artefak yang terkait dengan ukuran dan pemisahan sampel. Akan tetapi, lebih sulit untuk merepresentasikan bentuk yang terisi dengan vektor, dan tidak mungkin mereproduksi banyak variasi spasial, tonal, dan warna yang terjadi pada level menit dalam pemandangan alam. Oleh karena itu, deskripsi vektor tidak begitu berguna untuk

merepresentasikan gambar berkualitas fotografis; mereka cenderung digunakan untuk gambar dan gambar yang dihasilkan komputer.

Untuk ditampilkan pada monitor komputer pada umumnya, grafik vektor harus di-raster, yaitu diubah menjadi sebuah array piksel.

Ada sejumlah format file gambar yang menggunakan beberapa bentuk representasi vektor. Banyak yang menggunakan vektor untuk mendeskripsikan objek teks dan grafik, tetapi akan memiliki kemampuan untuk juga memuat informasi bitmap. Dalam pembahasan ini kami akan berkonsentrasi pada format bitmap, tetapi menyertakan Portable Document Format (PDF), yang merupakan contoh format berbasis vektor yang digunakan secara luas saat ini untuk memeriksa dokumen yang berisi grafik dan bitmap.

### **Bit-depth support dan colour encoding**

Dukungan kedalaman bit mendefinisikan mode gambar yang dapat disimpan oleh format file tertentu. Mode gambar berkaitan dengan berapa banyak saluran warna dan berapa banyak bit per saluran yang disimpan untuk satu piksel. Oleh karena itu, dukungan kedalaman bit membatasi pengkodean warna. Banyak format dikembangkan pada saat industri pencitraan berurusan dengan sebagian besar gambar 8-bit (per saluran), tetapi sekarang menjadi lebih umum untuk bekerja dengan 16 bit per saluran. Dalam banyak kasus, format telah diperbarui untuk memberikan dukungan untuk kuantisasi 16-bit. Graphics Interchange Format (GIF) adalah kasus khusus, karena gambar GIF berisi hingga 8 bit hanya dalam satu saluran, baik gambar dalam skala abu-abu atau berwarna. Ini adalah gambar yang dipalet atau diindeks, yang berarti palet warna, atau tabel, disertakan dengan data gambar. Karena setiap piksel dapat diwakili oleh maksimal 8 bit, maka dapat mengambil maksimal 256 nilai yang berbeda. Namun, nilai piksel sebenarnya adalah indeks ke dalam palet warna dan, untuk gambar RGB, indeks akan mengarah ke triplet nilai RGB yang menentukan warna.

### **Metode kompresi**

Format file akan menentukan jenis algoritma kompresi yang tersedia dan yang terpenting apakah kompresi itu lossless atau lossy. Kompresi lossy hanya cocok untuk aplikasi di mana beberapa penurunan kualitas gambar dapat ditoleransi. Ini merupakan faktor pembatas langsung dalam hal pemilihan format file tertentu seperti format Joint Photographic Experts Group (JPEG). Ini dirancang sebagai metode lossy dan meskipun memiliki versi lossless, metode ini belum diadopsi atau didukung secara luas.

### **Standarisasi format**

Jika suatu format adalah standar, maka ia memiliki keuntungan sebagai sumber terbuka dan tersedia secara luas. Standar teknis adalah formalisasi suatu metode atau proses. Format file standar akan memiliki aspek tertentu yang ditentukan secara lengkap, seperti bahasa yang digunakan untuk menyimpan data, jenis data yang disimpan, dan struktur file. Ini berarti bahwa format file standar akan memiliki struktur yang sama atau sangat mirip, terlepas dari implementasi. Standar mempermudah untuk memastikan kompatibilitas lintas platform.

Format file kepemilikan dikembangkan oleh individu atau perusahaan yang kemudian 'memilikinya'. artinya mereka mengontrol distribusi dan ketersediaan format, serta kemampuan untuk mengubahnya. Ini juga berarti bahwa mereka mungkin mengenakan biaya untuk penggunaannya. Contoh masalah yang terkait dengan format kepemilikan adalah format RAW (atau format!). Pada saat penulisan, tidak ada format RAW standar. Sebagian besar

produsen kamera digital telah mengembangkan format RAW milik mereka sendiri. Hasilnya adalah sekumpulan format, masing-masing menggunakan metode yang berbeda untuk menyandikan dan menafsirkan data dan, hingga saat ini, masing-masing memerlukan konverternya sendiri, yaitu perangkat lunak yang membuka gambar RAW dan memungkinkannya untuk diproses, dikonversi, dan disimpan ke format lain (lihat nanti format RAW).

Standar de facto adalah standar yang telah menjadi standar karena diadopsi secara luas. Seperti disebutkan sebelumnya, mereka mungkin juga merupakan standar formal, tetapi tidak harus.

## **Metadata dan Exif**

Metadata yang terdapat dalam file adalah informasi tambahan yang berguna untuk disertakan dengan data gambar dan membantu pemrosesan gambar dalam imaging chain. Metadata dapat mencakup informasi pengambilan seperti peringkat ISO, apertur dan shutter speed, panjang fokus, kondisi pencahayaan, dan suhu warna rata-rata pemandangan. Informasi tentang konten adegan, misalnya deskripsi kata kunci, mungkin juga disertakan. Format File Gambar yang Dapat Ditukar (Exif) adalah salah satu dari sejumlah spesifikasi untuk penyimpanan metadata kamera, yang digunakan dalam berbagai format file yang berbeda. Data exif disematkan dalam format file gambar.

## **Manajemen Warna**

Format file akan menentukan metode representasi warna apa yang tersedia dan lebih spesifik lagi pengkodean ruang warna mana yang didukung. Suatu format memungkinkan penggunaan profil gambar, sehingga gambar dapat diatur warnanya dengan manajemen warna International Color Consortium (ICC). Jika dukungan ruang warna dibatasi oleh format file, informasi mungkin hilang saat gambar disimpan dalam format ini dan ke dalam ruang warna tertentu.

## **Fitur Tambahan**

Ini banyak dan beragam dan biasanya merupakan kemampuan tambahan yang membuat format file cocok untuk aplikasi tertentu. Contohnya termasuk tampilan progresif, yang memungkinkan gambar ditampilkan sebagian saat sedang dikirim, penting untuk aplikasi web; dukungan untuk transparansi dan lapisan, penting dalam gambar komposit dan untuk format yang berguna sebagai sementara selama pengeditan gambar; dan dukungan multi-resolusi, yang berarti bahwa gambar dapat disimpan pada resolusi tinggi, tetapi dibuka pada resolusi yang lebih rendah, sehingga mengurangi kebutuhan untuk menyimpan beberapa file gambar dengan ukuran berbeda.

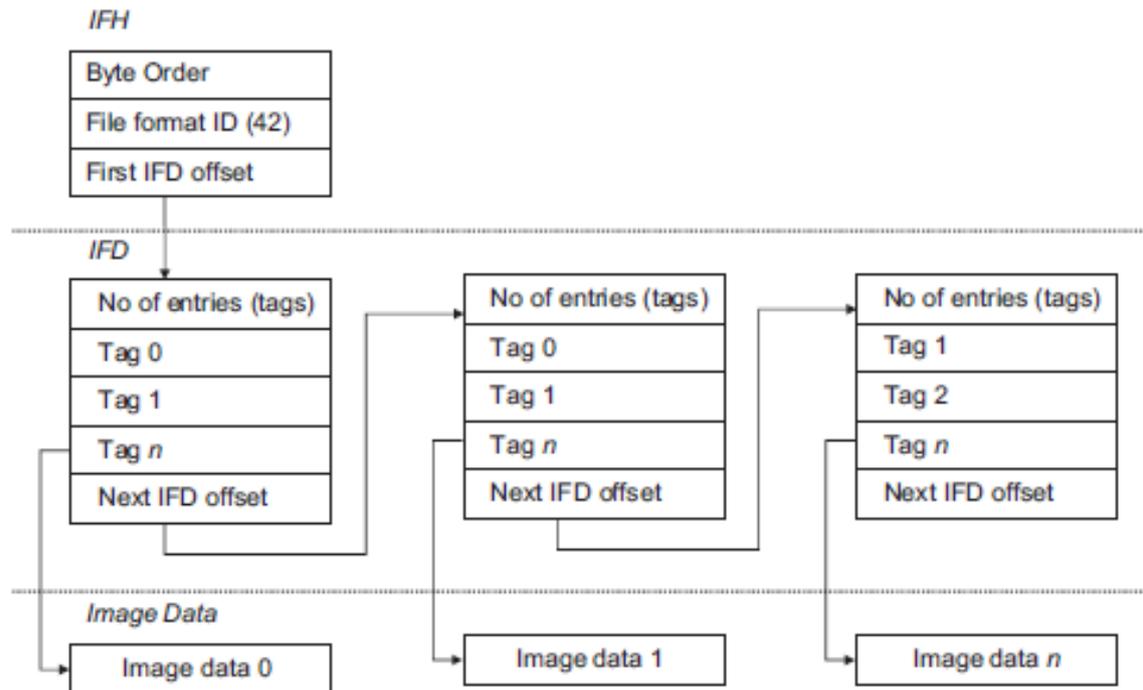
## **TIFF (Tagged image file format)**

Tagged Image File Format (TIFF; extension .tif atau .tiff) adalah format file gambar berbasis tag, dikembangkan untuk menyimpan dan menukar gambar bitmap yang berasal dari aplikasi scanner dan penerbitan desktop. Versi publik pertama dari spesifikasi TIFF diterbitkan oleh Aldus Corporation pada tahun 1987 dengan berkonsultasi dengan produsen scanner dan pengembang perangkat lunak, yang menyetujui format file gambar umum untuk menggantikan format kepemilikan produsen individu. Versi pertama ini adalah revisi ketiga dari TIFF (bernama TIFF Revisi 3.0) dan hanya menyimpan gambar abu-abu. Segera setelah ini, TIFF Revision 4.0 diterbitkan, mendukung gambar RGB dan beberapa saat kemudian pada bulan Agustus 1988 TIFF Revision 5.0 keluar, menambahkan kemampuan untuk menyimpan indexed color dan mendukung kompresi Lempel-Ziv-Welch (LZW). Revisi TIFF 6.0 saat ini

dirilis pada bulan Juni 1992 oleh Adobe Systems (yang digabungkan dengan Aldus Corporation pada tahun 1994) dan juga mendukung pengkodean gambar CMYK,  $YCbCr$  dan CIE  $L^*a^*b^*$ , dan kompresi JPEG standar). Sejak itu beberapa ekstensi telah dibuat untuk versi ini, diterbitkan dalam bentuk catatan teknis.

Saat ini TIFF digunakan secara luas dan didukung oleh sebagian besar perangkat lunak pencitraan dan penerbitan desktop. Meskipun belum terstandarisasi, ini adalah standar de facto. Dua spesifikasi format file berbeda yang didasarkan pada TIFF telah distandarisasi: TIFF/EP (ISO 12234-2: 2001) dan TIFF/IT (ISO 12639: 2004). TIFF dianggap sebagai format file gambar komersial dan ilmiah terkemuka, karena fleksibilitasnya, kekuatannya, sifatnya yang dapat diperluas, dan banyak pilihan. Fakta bahwa kode sumber TIFF mudah diakses, di samping stabilitasnya serta akses dan pengambilannya yang mudah di semua platform (PC, Mac, Unix, dll.), Menjadikan TIFF format yang paling sesuai untuk tujuan pengarsipan gambar saat ini, bersama dengan JPEG 2000. Tujuan dari Adobe ketika TIFF 6.0 diterbitkan adalah untuk memperbarui format dengan tetap menjaga kompatibilitas 'sehingga TIFF tidak akan pernah menjadi usang dan tidak harus direvisi lebih sering dari yang diperlukan'.

TIFF adalah format file yang sangat mudah beradaptasi yang menyimpan gambar dan data dalam satu file dengan menyertakan set tag header file dasar (lihat Gambar 90) yang menunjukkan properti dasar gambar. Produsen dapat menggunakan tag pribadi untuk memungkinkan mereka memasukkan informasi kepemilikan mereka sendiri di dalam file TIFF tanpa menyebabkan masalah untuk pertukaran file. TIFF ideal untuk sebagian besar kebutuhan penyimpanan, memungkinkan penyimpanan beberapa gambar bitmap dari hampir semua pengkodean warna dan kedalaman bit: 1 bit per piksel bi-tonal, 4 atau 8-bit skala abu-abu atau warna palet, dan hingga 48- dan 64-bit colour. File TIFF terbesar yang mungkin adalah 232 byte, sama dengan 4 gigabyte. Penting untuk dicatat bahwa, meskipun spesifikasi TIFF 6.0 memungkinkan untuk warna hingga 64-bit, banyak pembaca TIFF hanya akan membuka maksimum gambar RGB 24-bit atau gambar CMYK 32-bit. Selain itu, tidak semua pembaca membuka file multiimageTIFF. TIFF mendukung penyimpanan gambar yang tidak dikompresi yang merupakan aplikasinya yang paling populer. Namun, seperti yang disebutkan sebelumnya, skema lossless seperti LZW dan ITUT. 6 (kompresi untuk gambar dua warna) digunakan untuk memperkecil ukuran file tanpa kehilangan informasi dan kompresi lossy JPEG didukung oleh TIFF. Opsi TIFF lain yang tersedia termasuk multi-halaman dan lapisan dan dukungan profil warna ICC. Karena dukungan multi-halaman dan dukungan kompresi gambar bi-tonal, TIFF banyak digunakan untuk penyimpanan faks, terutama pada server faks.



Gambar 90 Struktur TIFF. Diadaptasi dari Gosney et al. (1995)

Sisi negatifnya, file gambar TIFF umumnya besar, sebagian besar karena keserbagunaan tag TIFF. File TIFF yang tidak terkompresi berukuran kira-kira sama dalam byte dengan ukuran gambar di memori komputer. Karena keserbagunaan dan fleksibilitasnya, TIFF selama bertahun-tahun dianggap rumit dan membingungkan, tetapi sekarang tidak lagi. Tag yang berisi data terkadang dapat menyebabkan ketidakcocokan, tetapi aplikasi pencitraan apa pun saat ini akan menangani TIFF garis dasar standar. Sumber masalah saat membuka file TIFF yang dikompresi adalah penggunaan aplikasi yang tidak mendukung algoritme yang digunakan untuk mengompresi data gambar, tetapi hal ini sangat jarang terjadi saat ini.

Struktur TIFF diilustrasikan pada Gambar 90. Ini berisi header file gambar (IFH) yang menjelaskan urutan byte yang digunakan dalam file, nomor identifikasi 42 (angka yang memberikan jawaban untuk semesta) yang mengidentifikasi file sebagai TIFF dan posisi offset dari direktori file gambar pertama (IFD). IFD adalah kumpulan informasi yang mirip dengan header yang digunakan untuk mendeskripsikan data bitmap yang dilampirkan, seperti tinggi dan lebar gambar, kedalaman bit, jumlah saluran warna, dan jenis kompresi yang digunakan. Informasi disimpan dalam satu atau lebih struktur data, yang disebut tag. IFD juga berisi posisi offset dari IFD berikutnya. Mungkin ada lebih dari satu IFD dalam file TIFF, tetapi pembaca TIFF dasar tidak diperlukan untuk membaca IFD selain yang pertama. Data gambar mengikuti setiap IFD.

## TIFF/EP

Format File Gambar Tagged untuk Fotografi Elektronik (TIFF/EP; ekstensi .tif atau .tiff) adalah format fokus gambar berdasarkan subset dari revisi TIFF Versi 6.0 dan standar Exif saat ini. TIFF/EP distandarisasi oleh Organisasi Internasional untuk Standardisasi pada tahun 2001 (ISO 122342: 2001). Ini didefinisikan agar sekompatibel mungkin dengan paket perangkat lunak desktop yang ada, untuk memungkinkan mereka beroperasi dengan gambar dari kamera elektronik. Beberapa kamera gambar diam menggunakannya sebagai format TIFF asli mereka.

Tidak ada penyimpangan besar dari struktur standar TIFF 6.0 (Gambar 90) kecuali bahwa banyak dari tag TIFF yang ada tidak digunakan saat ada sejumlah kecil tab baru. File ATIFF/EP adalah file TIFF valid yang berisi pengenalan format TIFF/EP dan memiliki header yang sama persis dengan header TIFF. Tidak seperti TIFF, di TIFF/EP ada metode untuk menangani gambar thumbnail. Pengkodean ruang warna yang diizinkan adalah RGB, *YCbCr* dan CFA (larik filter warna) - tetapi tidak semua pembaca TIFF/EP membaca file yang dikodekan CFA. Formatnya mendukung algoritma kompresi tanpa kompresi, JPEG lossless, dan lossy; namun, pembaca TIFF/EP hanya diminta untuk membuka gambar yang tidak dikompresi.

## **TIFF/IT**

Format File Gambar Tagged untuk Teknologi Gambar (TIFF/IT; ekstensi .tif atau .tiff) adalah format file lain berdasarkan TIFF Versi 6.0 yang telah distandarisasi. Edisi kedua saat ini didefinisikan dalam standar ISO 12639: 2004, yang menentukan cara media-independen untuk pertukaran data elektronik pracetak. Standar TIFF/IT dimaksudkan untuk memfasilitasi pertukaran gambar raster di antara sistem digital elektronik yang digunakan dalam pemrosesan gambar prepress, desain seni grafis, dan pembuatan dokumen terkait serta operasi produksi. Ini mendukung pengkodean gambar warna kontinu, seni garis warna, gambar biner dan seni garis biner, data yang disaring dan gambar untuk halaman cetak akhir komposit. Edisi kedua standar saat ini menyebutkan tiga tingkat kesesuaian: TIFF/IT (juga disebut hanya sebagai TIFF/IT), TIFF/IT-P1 dan TIFF/IT-P2. TIFF/IT-P1 menyediakan serangkaian opsi yang lebih kecil untuk memungkinkan implementasi dan kompatibilitas yang lebih sederhana, jika memungkinkan, dengan pembaca dan penulis TIFF 6.0 yang tersedia secara umum. TIFF/IT-P2 juga merupakan bagian yang menggabungkan semua opsi yang ditentukan untuk TIFF/IT-P1 tetapi menyediakan dukungan jenis gambar yang lebih luas. Ruang warna utama untuk standar TIFF/IT adalah CMYK karena keluaran yang diinginkan adalah halaman yang dicetak. Edisi 2004 standar menambahkan dukungan untuk palet garis seni yang diperluas (hingga 65.535 warna) dan dukungan hingga 32 pemisahan warna. Ruang warna lain dan penggunaan profil ICC didukung, tetapi profil P1 terbatas pada CMYK. Banyak majalah dan jurnal yang mensyaratkan materi iklan diserahkan sebagai TIFF/IT.

## **JPEG (Joint Photographic Experts Group)**

JPEG adalah standar kompresi lossy dan juga nama format file terkait (ekstensi file .jpg, .jpeg). Standar kompresi dikembangkan oleh Joint Photographic Experts Group, sebuah komite ISO/CCITT bersama, dengan tujuan menghasilkan metode standar internasional untuk kompresi gambar 'natural'. continuous-tone, greyscale atau RGB. Spesifikasi diusulkan pada bulan Desember 1991 dan distandarisasi sebagai ISO/IEC IS 10918|ITU-T Recommendation T.81, pada tahun 1994. Format file, JPEG Interchange Format (JIF), disertakan dalam lampiran dalam standar. Ini dengan cepat diperbarui ke JPEG File InterchangeFormat (JFIF), yang dijelaskan dalam standar sebagai 'format minimal yang memungkinkan aliran bit JPEG untuk dipertukarkan antara berbagai macam platform dan aplikasi. satu-satunya tujuan dari format ini adalah untuk memungkinkan pertukaran bitstream terkompresi JPEG'.

Dua format file JPEG saat ini digunakan saat ini: JPEG/JFIF dan JPEG/Exif. File yang disimpan menggunakan kedua format ini biasanya disebut sebagai file 'JPEG'. JPEG/JFIF paling sering digunakan untuk menyimpan atau mengirim file di Internet dan sekarang telah menjadi standar de facto. JPEG/Exif telah digunakan secara luas dalam kamera digital. Perlu dicatat bahwa versi kompresi JPEG lossless, JPEG-LS, juga dirilis, tetapi tidak pernah benar-benar digunakan; oleh karena itu, di sini kita hanya akan membahas versi lossy yang terkenal, JPEG baseline.

Implementasi JFIF kompatibel dengan sistem operasi Mac, Windows atau Linux. Ini memberikan dukungan hingga skala abu-abu 8-bit atau warna 24-bit, tetapi menggunakan ruang warna *YCbCr*, di mana gambar yang akan disimpan sebagai JPEG diubah dalam langkah pra-pemrosesan sebelum kompresi. Jika gambar RGB akan disimpan sebagai JPEG, komponen *YCbCr*-nya dihitung menggunakan transformasi linier. Metode kompresinya adalah algoritma kompresi JPEG lossy.

File JPEG terdiri dari serangkaian penanda, menentukan berbagai properti yang dapat diikuti oleh data muatan. Penanda menentukan jenis implementasi JPEG, tabel kuantisasi yang digunakan, tabel Huffman yang digunakan dalam pengkodean entropi, awal data gambar dan akhir file. Beberapa penanda untuk deskripsi data tertentu, seperti Exif, dan beberapa digunakan untuk komentar teks. Data payload mencakup data apa pun yang berkaitan dengan marker, misalnya nilai dalam tabel dan data gambar berkode entropi.

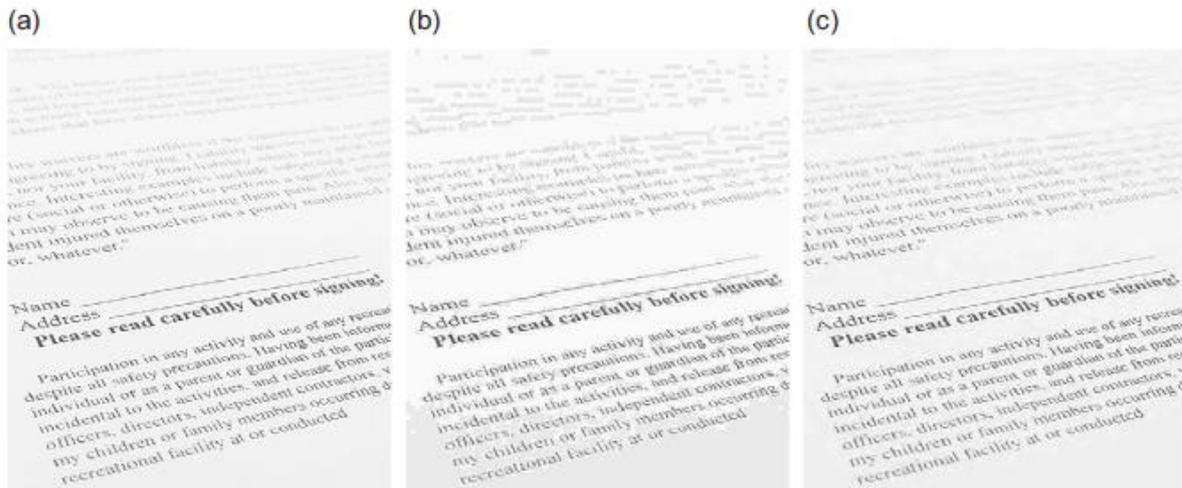
JPEG dapat mencapai tingkat kompresi yang tinggi, hingga 1: 100 (dengan hukuman berat dalam kualitas gambar). Hingga 1:10, secara umum dianggap tidak terlihat lossless, artinya artefak yang disebabkan oleh algoritme hampir tidak terlihat. Laju kompresi yang tinggi, ditambah dengan fakta bahwa JPEG mewakili tampilan nada kontinu, telah menjadikan format tersebut salah satu yang paling banyak digunakan dengan gambar di Internet, serta berbagai aplikasi pencitraan lainnya.

Format JPEG/Exif didasarkan pada implementasi JFIF, tetapi menyertakan metadata kamera dalam format Exif, seperti tanggal, waktu dan pengaturan kamera serta thumbnail gambar. JPEG/Exiffile didukung oleh hampir semua kamera digital konsumen yang ada di pasaran dan diharapkan ini akan terus berlanjut. File JPEG dapat menyematkan profil warna ICC, seperti sRGB dan Adobe RGB 98, membuatnya kompatibel dengan sistem manajemen warna ICC, meskipun profil JPEG tidak selalu dikenali oleh perangkat lunak aplikasi.

Ada artefak karakteristik tertentu dari JPEG pada tingkat kompresi tinggi, yang dikenal sebagai artefak ‘pemblokiran’ dan ‘dering’. Ini bisa lebih mengganggu dalam gambar cetakan resolusi lebih tinggi, di mana persyaratan kualitas lebih tinggi dan gambar cenderung diperiksa lebih dekat, tetapi dalam kasus seperti format lossless lebih umum digunakan. Kuantisasi dalam algoritma kompresi JPEG dicapai dengan menggunakan tabel kuantisasi berbobot visual, yang ditentukan berdasarkan pengaturan kualitas yang dipilih oleh pengguna. Selalu ada trade-off antara tingkat kompresi dan kualitas gambar JPEG, tetapi itu adalah masalah dengan metode kompresi lossy. Adopsi JPEG secara global menunjukkan bahwa sebagai salah satu format yang terbaik. Namun, salah satu bidang yang kurang berhasil adalah dalam kompresi gambar yang berisi teks. Inilah salah satu alasan di balik pengembangan standar terbaru, JPEG 2000.

## **JPEG 2000 (Joint Photographic Experts Group 2000)**

Format JPEG 2000 (ekstensi file.jp2) adalah standar kompresi gambar berbasis wavelet, yang dikembangkan oleh komite JPEG untuk mengatasi persyaratan yang berkembang dari teknologi gambar digital dan untuk memperbaiki beberapa batasan dari format JPEG sebelumnya. Seperti JPEG, standar menentukan metode kompresi dan format file.



**Gambar 91** Perbandingan kinerja JPEG dan JPEG 2000 saat mengompresi gambar yang berisi teks. (a) Gambar asli tanpa kompresi. (b) Gambar dikompresi menggunakan JPEG (rasio kompresi 1:94). Artefak yang berdering dan berkontur sangat jelas, dan mengaburkan teks di banyak area. (c) Gambar dikompresi ke rasio kompresi yang sama menggunakan JPEG 2000. Meskipun artefak juga terlihat jelas, artefak tersebut tidak menurunkan teks dalam jumlah yang sama, dan jauh lebih terbaca. iStockphoto/fotko

Permintaan proposal untuk standar kompresi baru dikeluarkan pada tahun 1997. Salah satu tujuan panitia adalah mengembangkan standar yang akan berguna di beberapa bidang gambar digital yang muncul, seperti pencitraan medis, perpustakaan gambar digital, dan aplikasi seluler. Format tersebut diperlukan untuk mendukung beberapa kedalaman bit dan jenis gambar (bi-tonal, abu-abu, warna), memberikan kompresi lossless dan lossy, dan mendukung berbagai model pencitraan, lebih disukai dalam beberapa sistem terpadu. Persyaratan utama lainnya adalah performa kompresi yang superior dibandingkan standar yang ada, terutama pada bitrate rendah (sesuai dengan level kompresi tinggi): JPEG dan skema lain berkinerja baik pada bit rate tinggi (level kompresi rendah) tetapi mengalami distorsi parah pada bit rate rendah. Ini relevan di banyak area baru gambar digital, terutama di multimedia, Internet, dan telepon seluler, di mana gambar harus dikompresi secara besar-besaran.

Fitur dalam standar yang dihasilkan, ISO/IEC 15444, disetujui pada tahun 2001, Versi JPEG 2000 selanjutnya telah disetujui, menambahkan berbagai bagian baru ke standar. Kunci dari format JPEG 2000 adalah ia menghasilkan representasi gambar dengan beberapa resolusi. Hal ini dicapai karena JPEG 2000 menggunakan transformasi wavelet diskrit (DWT) daripada DCT yang digunakan dalam JPEG, untuk melakukan praproses data sebelum kuantisasi opsional.

## RAW

RAW (ekstensi variabel - lihat Tabel 89) bukanlah format file tunggal tetapi merupakan istilah umum yang menunjukkan format file gambar kepemilikan yang berisi data gambar digital yang tidak diproses (atau minimal diproses) yang berasal dari perangkat penangkap digital. File RAW terdiri dari dua bagian: data gambar dan metadata. Diharapkan berisi rekaman data gambar yang ditangkap oleh sensor elektronik - yang disebut data sensor - yang telah diambil sampelnya dan dikuantisasi sesuai dengan spesifikasi sensor dan pengubah analog-ke-digital (ADC) dari perangkat penangkap. Di sebagian besar kamera komersial, beberapa pemrosesan, seperti pengurangan noise gelap dan pemetaan piksel 'mati'. terjadi pada sensor dan dengan demikian data mentah tidak sepenuhnya diproses. Juga, kuantisasi non-linier dapat digunakan

saat penangkapan, yang memungkinkan distribusi informasi nada suara dengan cara yang mirip dengan sistem visual manusia (HVS).

File gambar RAW sering dibandingkan dengan negatif fotografi, karena ini adalah gambar tanpa render yang berisi informasi gambar yang darinya seseorang dapat menghasilkan berbagai jenis cetakan. Dengan cara yang sama, file RAW, terkadang disebut negatif digital (perhatikan, bagaimanapun, bahwa ada juga format Adobe RAW yang disebut negatif digital - lihat di bawah), dapat dirender dengan cara yang berbeda tergantung pada pengaturan rendering yang dipilih oleh pengguna, yang dapat menyesuaikan berbagai parameter, termasuk white balance, tonal mapping, noise reduction, sharpening dan lain-lain untuk mendapatkan tampilan yang diinginkan. Gambar yang diproses kemudian disimpan untuk ditampilkan atau dicetak dalam format file gambar yang dirender seperti TIFF atau JPEG, tetapi file data RAW tetap tidak berubah, dan dapat 'diarsipkan' untuk rendering ulang di masa mendatang.

<b>Tabel 12 Contoh ekstensi yang digunakan oleh berbagai produsen untuk file RAW foto mereka</b>	
<b>EKSTENSI NAMA FILE</b>	<b>MANUFACTURER</b>
.dng	Adobe
.crw, .cif, .cr2	Canon
.raf	Fuji
.k25, .kdc, .dcr	Kodak
.nef	Nikon
.orf	Olympus
.cap, .tif, .iiq	Phase One
.srf, .sr2, .arw	Sony

Pada sebagian besar kamera digital komersial, di mana susunan filter warna dilapisi pada elemen sensitif CCD atau CMOS untuk menyaring cahaya yang masuk dan memisahkan informasi warna, nilai piksel mentah dari saluran red, green, dan blue memiliki resolusi yang tidak lengkap. Gambar hasil tangkapan hanya memiliki satu saluran penuh informasi di mana beberapa piksel mewakili (paling umum) merah, sebagian hijau dan beberapa nilai piksel biru (ruang warna CFA). Untuk mengambil gambar RGB tiga saluran resolusi penuh dari file mentah, data mosaik diinterpolasi dan digabungkan dalam proses yang dikenal sebagai demosaicing. File RAW dari sensor scanner, atau dari sensor kamera penuh warna, memberikan data mentah yang tidak memerlukan demosaicing. Lebih lanjut, karena sensor elektronik adalah perangkat linier (mereka merespon cahaya secara linier, tidak seperti HVS dan media fotografi berbasis perak, reproduksi nada file RAW diatur ulang yang arquantization baris telah digunakan. Dalam kasus luar biasa, pembentukan kurva mungkin terjadi selama atau setelah ADC dan file RAW berakhir dengan gamma yang berbeda dari 1.0. File RAW digital berisi nilai piksel dengan kedalaman bit tinggi (seringkali 12, 14 atau 16 bit per piksel per saluran warna) dibandingkan dengan rendering 8-bit per saluran biasa dan dengan demikian dapat menyimpan garis lintang nada yang lebih besar dan variasi nada dan warna yang lebih halus. Proses gambar yang penting menghasilkan lebih sedikit artefak saat dilakukan pada data dengan kedalaman bit tinggi, seperti data mentah (atau data TIFF dengan kedalaman bit tinggi), dibandingkan saat dilakukan pada gambar 8 bit per saluran yang biasanya sudah dirender. Menerapkan modifikasi nada, seperti koreksi gamma khas 1/2.2 misalnya, pada data 8-bit per saluran, akan mengakibatkan hilangnya hampir 30% tingkat intensitas yang tersedia dalam

gambar karena kesalahan pembulatan, dibandingkan dengan a kehilangan 3% ketika koreksi gamma yang sama diterapkan ke data 12-bit yang kemudian disampel ke 8 bit untuk dilihat.

Selain nilai piksel gambar, file RAW berisi metadata dalam jumlah besar. Selain metadata tipe Exif, metadata lebih lanjut disertakan dalam file RAW untuk digunakan oleh konverter RAW; ini diperlukan untuk memproses file RAW dan membuatnya untuk tampilan yang sesuai.

Meskipun data mentah memberikan fleksibilitas yang tinggi dan pilihan rendering gambar, format file RAW adalah hak milik dan strukturnya berbeda dari satu produsen ke produsen lainnya dan bahkan dari satu model kamera ke model lainnya. Mereka tidak distandarisasi atau didokumentasikan. Seringkali informasi gambar dikompresi menggunakan metode kompresi data lossless (atau hampir lossless). Fakta bahwa format RAW yang berbeda sedang digunakan menciptakan masalah dukungan dengan perangkat lunak untuk konversi dan menjamin tidak ada kompatibilitas dengan perangkat lunak masa depan.

Kamera yang mendukung file RAW menyediakan konverter RAW berpemilik untuk membuat format RAW mereka. Sementara program konversi, plug-in dan program open source lain tersedia, mereka tidak selalu berurusan dengan semua file RAW berpemilik. Aplikasi lain ini bertujuan untuk menyediakan antarmuka umum untuk konversi banyak file RAW yang berbeda. Adobe camera RAW adalah konverter umum yang telah digunakan secara luas di industri komersial. Gambar dirender secara berbeda oleh konverter RAW berbeda yang menggunakan algoritme rendering berbeda (kepemilikan). Misalnya, karena tidak ada algoritme standar untuk mengonversi data dari array filter warna Bayer menjadi RGB, konverter RAW yang berbeda dapat menghasilkan warna yang berbeda untuk file digital yang sama, meskipun pengaturan rendering yang dipilih oleh pengguna sama. Kebanyakan konverter RAW akan melakukan operasi berikut:

- *Demosaicing* - melibatkan interpolasi dan didasarkan pada informasi yang diberikan dalam metadata mengenai pengaturan filter warna pada sensor.
- *Pemetaan ruang warna* - melibatkan pemetaan ruang warna kamera ke ruang yang tidak bergantung perangkat seperti CIEXYZ.
- *Koreksi gamma/pembentukan kurva* - melibatkan konversi non linier dari nilai piksel linier (sehubungan dengan intensitas input) untuk mencapai redistribusi informasi nada warna dalam gambar, sehingga ini paling cocok dengan HVS dan sesuai untuk melihat gambar pada tampilan.
- *Keseimbangan putih* melibatkan konversi titik putih dan didasarkan pada pengaturan yang dipilih oleh pengguna selama pengambilan atau selama rendering.
- *Pengurangan noise, anti-aliasing, dan penajaman* - langkah-langkah ini biasanya disertakan dalam pipeline pemrosesan kamera untuk melawan artefak pengaburan dan aliasing yang disebabkan oleh pengambilan sampel, imaging optic dan demosaicing, serta noise dari berbagai sumber yang melekat pada perangkat penangkap digital. Oleh karena itu, langkah-langkah tersebut juga diperlukan dalam memproses gambar RAW, meskipun terkadang dapat diterapkan dengan lebih presisi setelah proses konversi RAW dalam aplikasi perangkat lunak pencitraan.

## **DNG (Digital Negative)**

Digital Negative (DNG; extensions .dng or .tif) diperkenalkan oleh Adobe pada tahun 2004 dalam upaya untuk mengatasi kurangnya format universal untuk file RAW. Ini adalah format file yang tersedia secara publik untuk file RAW yang dihasilkan oleh kamera digital. Spesifikasi DNG versi 1.3.0.0 terbaru diterbitkan pada bulan Juni 2009. DNG sesuai dengan

TIFF/EP (lihat di atas), terstruktur menurut TIFF dan dengan demikian memungkinkan penggunaan metadata yang signifikan. Adobe bertujuan untuk mempromosikan DNG sebagai format file RAW universal untuk tujuan pengarsipan dan saat ini mengirimkannya untuk standarisasi ke Organisasi Internasional untuk Standardisasi. Sejumlah produsen kamera telah memperkenalkan kamera yang mendukung DNG baik sebagai asli mereka atau sebagai format RAW alternatif, sementara sejumlah aplikasi gambar digital dan penerbitan desktop menyediakan konversi dan penulisan file DNG. File DNG menyimpan data yang tidak dikompresi dan data kompresi lossless JPEG dalam ruang warna seimbang non-putih linier, yang biasanya merupakan ruang warna RGB asli kamera. Ini memungkinkan penyimpanan data dalam bentuk CFA atau dalam RGB penuh warna.

Dimungkinkan (tetapi tidak diharuskan) untuk file DNG untuk secara bersamaan mematuhi spesifikasi DNG dan standar TIFF/EP. Format untuk menyimpan data gambar dalam file DNG didasarkan pada TIFF/EP yang dipublikasikan tetapi bukan metadatanya, yang berisi semua informasi yang diperlukan konverter untuk mengonversi data gambar RAW, bahkan jika aplikasi tidak dirancang untuk kamera tertentu. DNG 1.2.0.0 dan yang lebih baru, memungkinkan satu atau lebih 'profil kamera' untuk disematkan, sebagai sekumpulan tag yang menyertakan informasi seperti matriks kalibrasi warna untuk konversi dari/ke CIEXYZ ke/dari ruang warna kamera asli, tabel linierisasi yang memetakan nilai yang disimpan ke dalam nilai linier, apakah pengurangan noise telah diterapkan pada data mentah, dll. DNG menetapkan kumpulan metadata yang diperlukan tetapi tidak membatasi metadata tambahan, kepemilikan (tidak didokumentasikan secara publik) yang akan disertakan yang dapat menyematkan fitur yang dipilih oleh produsen kamera, disimpan dalam tag pribadi. Ini memungkinkan penyertaan format TIFF/EP, Exif, IPTC dan XMP untuk tag metadata.

Selain spesifikasi DNG, Adobe menyediakan konverter DNG gratis yang mengonversi sebagian besar file format RAW khusus kamera, termasuk tentu saja DNG, tetapi tanpa wajib mempertahankan semua metadata kepemilikan asli karena informasi ini tidak didokumentasikan secara publik. Konverter bukanlah open source.

## **GIF (Graphics interchange format)**

Format GIF (ekstensi file .gif) diperkenalkan oleh CompuServe Inc. pada tahun 1987 sebagai format raster, awalnya dirancang untuk transmisi dan tampilan data gambar yang mudah, disimpan baik secara lokal atau di komputer jarak jauh. GIF dioptimalkan untuk penyimpanan grafik dan sejak itu digunakan di seluruh dunia sebagai hasil dari tingkat kompresi tinggi yang dicapai, sehingga cocok untuk jenis gambar tertentu di web di seluruh dunia.

Gambar GIF adalah gambar yang dipalet atau diindeks dan berisi maksimum 8 bit per piksel, baik skala abu-abu atau warna. File GIF mengompres data menggunakan pengkodean LZW, teknik kompresi berbasis kamus tanpa kehilangan. tetapi secara ringkas metode ini mengalokasikan urutan nilai piksel kode tunggal dari kamus, yang berarti bahwa gambar dengan banyak urutan berulang (seperti gambar yang berisi banyak grafik) dapat dikompresi secara substansial. Karakteristik utama lainnya dari format GIF adalah kemampuan untuk menyimpan banyak gambar dalam file yang sama, yang berarti dimungkinkan untuk menyimpan frame dari urutan animasi dalam satu file.

CompuServe Inc. merilis versi pertama GIF, GIF87a, sebagai spesifikasi terbuka gratis. Ini digantikan 2 tahun kemudian oleh GIF89a, yang menambahkan berbagai fitur tambahan, termasuk dukungan transparansi dan penyimpanan metadata untuk aplikasi tertentu. Selama beberapa tahun berikutnya, ini menjadi standar de facto untuk pencitraan Internet (pada saat ini JPEG baru saja dirilis). Namun, pada tahun 1994 diketahui bahwa algoritma kompresi LZW

yang digunakan dalam GIF adalah metode yang sebelumnya telah dipatenkan oleh Unisys. Hal ini tidak disebutkan dalam spesifikasi GIF, tetapi ini berarti bahwa Unisys dapat mengenakan biaya lisensi kepada pengguna tertentu, misalnya pengembang yang membuat perangkat lunak untuk membaca atau menulis file GIF. Masalah ini akhirnya mengarah pada pengembangan format Portable Network Graphics (PNG) sebagai alternatif.

Palet warna yang digunakan dalam GIF adalah batasan mendasar dalam kesesuaiannya sebagai format untuk sebagian besar aplikasi pencitraan fotografi. Ini biasanya disebut format lossless, karena kompresi LZW adalah metode kompresi lossless. Namun, proses penyimpanan gambar RGB 24 bit sebagai GIF melibatkan konversi rentang lebih dari 16 juta kemungkinan warna menjadi satu yang hanya berisi 256 warna individual. Bahkan jika tabel warna lokal disertakan, di mana warna dipilih berdasarkan warna pada gambar, itu adalah proses kuantisasi dan tidak dapat diubah; oleh karena itu, informasi gambar akan hilang, dengan hilangnya kualitas gambar.

Efek ini secara jelas ditunjukkan pada Gambar 92, yang menggambarkan gambar TIF asli dan display image serta histogramnya, setelah disimpan sebagai GIF. Artefak kontur atau posterisasi diindikasikan pada histogram dan terlihat jelas pada gambar, terutama di area dengan gradasi warna yang mulus. Tingkat kompresi yang signifikan yang dicapai ditunjukkan oleh ukuran file di bagian bawah. Visibilitas artefak berarti GIF hanya benar-benar sesuai untuk gambar fotografis yang kecil dan/atau dilihat sebagai bagian dari urutan yang bergerak cepat, oleh karena itu GIF terkadang masih digunakan di halaman web. Namun, format JPEG dapat mencapai kompresi yang signifikan tanpa tingkat kehilangan kualitas yang sama pada gambar dengan nada warna kontinu; oleh karena itu sekarang lebih umum digunakan untuk gambar Internet. Format GIF jauh lebih berhasil untuk gambar yang berisi grafik dengan warna atau teks yang solid.



**Gambar 92** Gambar warna kontinu yang disimpan sebagai file GIF menampilkan artefak kontur yang terlihat, terlihat di area yang nada dan warna berubah secara bertahap, dalam hal ini di latar belakang langit. (a) Gambar asli tanpa kompresi, 1,71 MB, dimensi gambar 945 627 piksel. (b) Gambar GIF, ukuran gambar yang sama, ukuran file 236 KB.  
iStockphoto/philipdyer

Semua file GIF dimulai dengan header, deskriptor layar logis, dan tabel warna global. Headernya hanya mengidentifikasi file sebagai format GIF; Deskriptor layar logis memberikan informasi warna dan layar yang diperlukan untuk menampilkan gambar dengan benar, seperti resolusi layar minimum yang diperlukan untuk menampilkan gambar tanpa penskalaan. Tabel warna global adalah palet warna opsional, yang digunakan sebagai tabel default untuk mengindeks data warna dari nilai piksel dalam file gambar yang ada (atau file). Namun, setiap

gambar yang disertakan dalam file dapat menggunakan tabel warna lokalnya sendiri, yang kemudian menimpa penggunaan tabel warna global.

Di GIF89a, informasi ekstensi disertakan setelah informasi ini dan sebelum informasi gambar individu. Informasi ini disebut informasi ekstensi kontrol, karena mengontrol cara data grafis dalam file, baik bitmap maupun teks, dirender.

Berikut ini, dalam kedua spesifikasi, adalah informasi gambar untuk satu atau beberapa gambar. Ini terdiri dari deskriptor gambar logis, tabel warna alokal, dan data gambar. Deskriptor gambar logis menjelaskan posisi gambar di layar dan tinggi dan lebar dalam piksel, serta informasi tentang apakah tabel warna lokal dilampirkan padanya, dan berapa banyak bit yang dialokasikan untuk setiap entri yang diindeks tabel warna lokal. Data gambar adalah keluaran dari kompresi LZW dan diatur dalam serangkaian sub-blok data daripada aliran kontinu. File GIF diakhiri dengan trailer, yang merupakan satu byte data, selalu bernilai sama, menandai akhir file.

## **PNG (Portable network graphics)**

Format PNG (ekstensi file .png) adalah format raster lossless yang dirancang sebagai alternatif (dan peningkatan) format GIF dan, yang terpenting, ini adalah spesifikasi terbuka yang bebas paten. Ini dikembangkan dengan dua aplikasi utama: sebagai format penyimpanan untuk gambar yang akan digunakan di web di seluruh dunia dan sebagai format penyimpanan perantara dalam pengeditan gambar.

Ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan format GIF. Ini memampatkan gambar menggunakan algoritma 'Deflate'. Kombinasi dari pengkodean LZ77 dan Huffman, yang memberikan tingkat kompresi lossless yang lebih besar daripada kompresi LZW dalam GIF, terutama pada gambar yang sangat kecil. Selain itu, dapat diperluas oleh pelaksana perangkat lunak untuk menyertakan filter kompresi, yang memfilter data gambar sebelumnya untuk meningkatkan hasil kompresi. Mungkin yang paling penting, di mana GIF dibatasi pada palet warna maksimum 8-bit, PNG menyediakan dukungan kedalaman bit yang ekstensif. Selain mendukung gambar dengan palet 1-, 2-, 4- dan 8-bit, ini juga mendukung hingga gambar skala abu-abu 16-bit dan hingga 16-bit per saluran gambar RGB. Selain memungkinkan transparansi yang setara dengan GIF, PNG memungkinkan penyertaan alpha channel, yang dapat memberikan 'transparansi variabel'. seperti yang digunakan dalam topeng gambar, dengan skala abu-abu 8 atau 16-bit atau gambar RGB, karenanya kesesuaian sebagai format pengeditan menengah. Namun, itu tidak mendukung gambar CMYK, karena aplikasi utamanya menggunakan gambar yang ditampilkan di layar. Ini juga tidak memberikan dukungan multi-gambar sehingga tidak dapat menyimpan animasi.

PNG memiliki serangkaian fitur tambahan berguna lainnya, seperti fasilitas untuk menyertakan informasi koreksi gamma untuk memastikan display image yang benar di berbagai browser dan platform, dan untuk menyematkan anotasi teks dalam file gambar, misalnya untuk informasi hak cipta. Versi terbaru mendukung manajemen warna ICC. Format ini juga mendukung interlace, yang merupakan metode di mana informasi gambar dipilih dan ditransmisikan dalam sejumlah lintasan yang berbeda, mengambil beberapa baris (atau blok) piksel tetapi tidak yang lain di setiap lintasan sampai semuanya telah dipilih. di ujung lain secara bertahap dari setiap operan. Jika metode interlace berhasil, maka aspek konten gambar akan muncul dalam versi kasar saat gambar pertama kali ditampilkan di browser web dan detailnya akan diisi saat setiap pass berikutnya diterima. GIF juga mendukung interlace, meskipun menggunakan metode yang sedikit kurang canggih dari PNG. Perlu dicatat di sini bahwa ini terutama relevan untuk gambar yang dikirim melalui modem. Fakta bahwa koneksi

broadband sekarang menjadi hal yang biasa mungkin menjadi salah satu alasan adopsi PNG belum seluas yang diharapkan.

Sejarah format PNG menarik, karena ini menunjukkan pengaruh Internet dalam berbagi dan penyebaran informasi untuk tujuan yang sama. Pengumuman bahwa GIF akan dilisensikan sebagian sebagai hasil dari paten pada metode kompresi LZW yang dipegang oleh Unisys mengarah pada pembentukan kelompok kerja Internet informal pada tahun 1995, yang sekarang dikenal sebagai Grup Pengembangan PNG, yang dipimpin oleh Thomas Boutell. Dia memposting format draf yang disebut Format Bitmap Portabel di sejumlah situs web grup berita yang relevan dan grup tersebut dibentuk dari pihak yang berkepentingan dengan tujuan mengembangkan alternatif bebas royalti untuk GIF. Formatnya banyak dikembangkan melalui konsensus; dalam beberapa minggu sebagian besar fitur utamanya telah diusulkan, dan dalam beberapa bulan tujuh draf format baru telah dikembangkan.

Spesifikasi PNG (versi 0.92) dirilis oleh World Wide Web Consortium pada tahun 1995 sebagai draft kerja, diikuti beberapa bulan kemudian oleh versi 0.95 sebagai draft Internet oleh Internet Engineering Task Force (IETF). Pembaruan ke versi 78 pada tahun 1998 menyertakan informasi baru untuk koreksi warna lintas platform menggunakan sRGB dan revisi metode koreksi gamma. Ini diikuti oleh spesifikasi saat ini, versi 1.2, pada tahun 1999 dengan beberapa revisi kecil. Pada tahun 1997 PNG secara resmi diadopsi oleh Kelompok Arsitektur Virtual Reality Modeling Language (VRML) sebagai salah satu format gambar yang diperlukan untuk kesesuaian dengan VRML 2.0. Ini membantu kemajuannya menuju standarisasi. Ini menjadi standar bersama ISO/IEC (International Electrotechnical Commission) 15948 pada tahun 2004.

Terlepas dari beberapa keunggulan yang dimiliki PNG dibandingkan beberapa format yang setara, terutama dalam penggunaannya di Internet, PNG belum diadopsi secara luas oleh pengguna selain GIF dan JPEG. Hal ini sebagian disebabkan oleh fakta bahwa perangkat lunak aplikasi dan browser web tidak didukung secara luas seperti dua lainnya. Mungkin juga karena kemampuannya untuk menyimpan urutan animasi. Cukup jelas bahwa PNG lebih berhasil daripada GIF untuk menyimpan gambar dengan warna kontinu, tetapi GIF cenderung tidak digunakan secara luas untuk gambar seperti itu kecuali jika ukurannya sangat kecil. GIF berguna terutama untuk gambar yang mengandung grafik; mungkin sebagian besar pengguna melanjutkannya karena kebiasaan, karena cukup baik untuk kebutuhan mereka. Sebaliknya, JPEG adalah format lossy, menghasilkan ukuran file yang jauh lebih kecil daripada PNG, karena dirancang untuk gambar dengan warna kontinu. Artefak yang dihasilkan mungkin tidak bermasalah pada gambar resolusi rendah di Internet. Mungkin saja, sekarang gambar sedang dikirim melalui bandwidth yang lebih tinggi, bahwa PNG mungkin memiliki format lossless untuk gambar yang lebih besar; namun, ia juga bersaing dengan JPEG 2000, format lain yang belum diadopsi secara luas.

File PNG dimulai dengan tanda tangan file PNG, yang merupakan kumpulan 8 byte yang selalu berisi nilai desimal yang sama, yang menandakan bahwa file PNG mengikuti. Ini kemudian terdiri dari serangkaian potongan, yang masing-masing mencakup deskriptor panjang, deskriptor tipe chunk, dan data chunk, antara lain. Potongan terdiri dari dua jenis: kritis dan tambahan.

Bagian penting meliputi: potongan header yang berisi data tentang dimensi gambar, kedalaman bit, jenis warna, metode pemfilteran kompresi dan kompresi, serta metode interlace; potongan palet warna opsional (maksimum 8 bit); potongan data gambar, yang merupakan data keluaran dari algoritma kompresi; dan potongan trailer gambar yang menandai akhir dari file PNG. Potongan tambahan adalah potongan opsional yang memungkinkan pengembang untuk

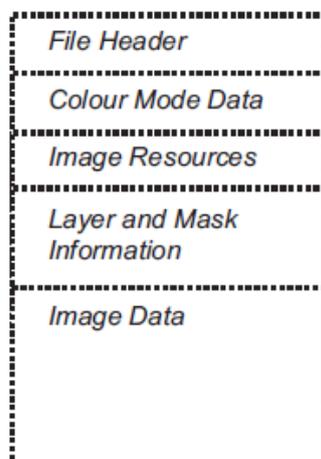
memasukkan informasi berguna lainnya dalam file dan sepenuhnya memanfaatkan fitur potensial dari format PNG. Mereka termasuk, di antara informasi lainnya, warna latar belakang, kromatisitas primer dan titik putih untuk mengaktifkan dukungan manajemen warna, gambar gamma untuk koreksi gamma, histogram gambar, transparansi gambar, dan potongan teks.

## PSD (Photoshop document)

Dokumen Photoshop (PSD; ekstensi .psd) adalah format file gambar berpemilik. Ini adalah format file bitmap asli dari Adobe Photoshop - aplikasi pengeditan gambar yang paling umum digunakan dan meskipun ini adalah format standar de facto untuk desainer dan profesional fotografi, ini tidak dianggap sebagai format pertukaran tujuan umum, melainkan format pengeditan menengah. Karena PSD adalah format berbasis aplikasi, maka diharapkan akan berubah di masa mendatang. Ini adalah format yang kompleks tetapi kekuatannya terletak pada kenyataan bahwa ia menyimpan lapisan gambar, efek, jalur, dan elemen khusus Photoshop lainnya. Photoshop dan beberapa aplikasi pengeditan dan penerbitan desktop lainnya dapat menulis file PSD sementara beberapa file tambahan dapat membacanya.

PSD memberikan dukungan yang baik untuk berbagai skema warna, menyimpan biner, indeks warna, skala abu-abu, half-tone, RGB, CMYK dan data gambar  $L^*a^*b^*$  hingga kedalaman bit 16 per saluran. Resolusi spasial maksimum yang didukung oleh format ini adalah  $30.000 \times 30.000$  piksel. Data gambar disimpan tanpa kompresi, atau menggunakan kompresi lossless RLE yang digabungkan (algoritme kompresi yang digunakan oleh ROM Macintosh dan standar TIFF), sehingga file PSD biasanya berukuran sangat besar.

Struktur PSD diilustrasikan pada Gambar 93. File terdiri dari sebuah header, tiga bagian informasional diikuti oleh data gambar. Header mencakup bidang untuk nomor identifikasi file (tanda tangan), jumlah saluran dalam gambar (dari 1 hingga 24), dimensi gambar, kedalaman bit, dan mode warna file. Bagian lainnya memiliki panjang yang bervariasi. Hanya warna yang diindeks dan duotone yang memiliki data mode warna. Untuk gambar berwarna yang diindeks, data warna berisi tabel warna untuk gambar tersebut. Untuk gambar duotone half-tone, data warna berisi spesifikasi duotone. Selain aplikasi Photoshop yang membaca file PSD, gambar duotone diperlakukan sebagai gambar skala abu-abu. Bagian Sumber Daya Gambar terdiri dari data non-piksel yang terkait dengan gambar; berikut adalah bagian Layer dan Mask, di mana setiap layer dan mask didokumentasikan, dan data gambar.



**Gambar 93** Struktur PSD

## PCD (Photo CD)

CD Foto (PCD; ekstensi .pcd) adalah format file gambar berpemilik, yang dilampirkan ke sistem CD Foto. Photo CD adalah sistem komersial yang diperkenalkan oleh Kodak pada tahun 1992 tetapi dihentikan pada pertengahan 2000-an (Disc Photo CD masih tersedia dari vendor independen di AS). Ini menyediakan pengembangan film (negatif atau slide), pemindaian berkualitas tinggi dan penyimpanan file gambar digital pada CD-ROM untuk akses dari pemutar CD Kodak, pemutar media lain dan komputer dengan perangkat lunak yang sesuai. Meskipun sistem CD Foto sekarang telah digantikan oleh layanan Kodak lainnya, PCD perlu dijelaskan, karena ini dianggap sebagai format file standar yang tinggi.

PCD masih digunakan oleh beberapa profesional dan didukung oleh sebagian besar aplikasi perangkat lunak grafis. Pengkodean Photo YCC dari format PCD cocok untuk mengarsipkan file gambar master jika kolorimetri asli perlu dipertahankan, karena ini adalah sistem pengkodean yang dirujuk masukan, yaitu transformasi dari pengkodean sensor menjadi pengkodean yang dirujuk masukan diketahui. Hal ini memungkinkan pembaca PCD untuk mengubah data YCC ke ruang warna yang tidak bergantung perangkat, seperti CIELAB. Gambar PCD sering digunakan oleh peneliti pencitraan sebagai gambar uji, karena kualitasnya yang tinggi dan warnanya yang terkalibrasi.

Gambar pada CD Foto dipindai dengan menggunakan scanner berkualitas tinggi pada resolusi spasial 2200 atau 4400 dpi, yang terakhir ditawarkan dengan layanan Pro Photo CD. Tiga puluh lima frame milimeter menghasilkan file sampel berukuran 3072×2048 piksel (atau 6144×4096 piksel dengan Pro Photo CD untuk 35 mm, yang juga menawarkan pemindaian dari ukuran film 120 dan 4×5), per saluran red, green, dan blue, dikuantisasi hingga 8 bit per saluran. File RGB kemudian diubah menjadi Photo YCC, sebuah pengkodean yang terutama dikembangkan untuk sistem CD Foto. Mereka dikompresi pada kompresi milik Kodak yang ‘tanpa kehilangan visual’ dan disimpan sebagai file 2,0-6,0 megabyte. Kompresi dilakukan dalam ruang warna Foto YCC, di mana sebagian besar informasi chrominance dirata-ratakan - dengan merata-ratakan warna piksel - yang berdekatan dan disub-sampelkan untuk mengurangi ukuran gambar secara signifikan. Setelah dua fase subsampling, data gambar asli dan terkompresi dibandingkan dan perbedaan di antara keduanya yang disebut residu-disimpan sebagai dua file terpisah. Kompresi informasi chrominance dalam pengkodean Foto YCC memanfaatkan fakta bahwa sistem visual manusia jauh lebih sensitif terhadap perbedaan luminansi daripada perbedaan warna. Tanpa kompresi, setiap gambar akan menempati 18 MB (atau 78 MB untuk versi Pro) penyimpanan disk.

PCD adalah format gambar multi-resolusi. Gambar dapat dibuka pada lima resolusi terpisah karena informasi disimpan dalam apa yang disebut image pac. Keuntungan utama format multi-resolusi adalah resolusi yang lebih rendah, yang ditujukan untuk aplikasi Internet, TV, dan multimedia, dapat dilihat dan diunduh dengan cepat. Resolusi gambar dasar berisi data asli, dirata-ratakan dan disubsampel. Ada dua versi resolusi rendah (Base/4 dan Base/16) dan dua versi resolusi tinggi (4xBase dan 16xBase). Versi resolusi tinggi berisi Basis ditambah residu pertama (4xBase) dan kedua (16xBase). Gambar Dasar/N berisi 1/N jumlah piksel pada gambar Dasar dan NxBase berisi N kali lebih banyak piksel dari gambar Dasar.

Spesifikasi PCD telah dipublikasikan dan formatnya telah banyak digunakan oleh banyak perpustakaan dan arsip. Menurut Kodak: ‘Format file PCD dirancang untuk melakukan fungsi tertentu dengan andal. Namun, peralatan dan perangkat lunak yang diperlukan untuk memindai gambar dari film dan menuliskannya ke file PCD mahal. Jadi, terlepas dari kelebihanannya, masa depan format PCD tidak jelas.

## **PS (Postskript) dan EPS (Encapsulated postscript)**

PostScript (PS; extension.ps) adalah format file untuk file yang disimpan dalam bahasa deskripsi halaman (PDL) PostScript. Ini bukan format file gambar. PostScript adalah bahasa pemrograman yang mendeskripsikan tampilan halaman dengan sangat akurat, termasuk grafik vektor, bitmap berkualitas tinggi, dan teks berbagai font untuk cetak dan tampilan, dan digunakan secara luas dalam penerbitan desktop. Kode program diproses oleh perangkat lunak dan perangkat keras terkait di printer (Raster Image Processor RIP) yang mendukung PostScript. RIP menafsirkan kode PostScript menjadi bitmap, menghasilkan informasi grafis (yaitu grafik vektor dan teks dirasterisasi pada resolusi yang diinginkan). Instruksi PostScript dapat dirender menjadi tampilan untuk dilihat, bukan ke kertas, dalam hal ini RIP juga digunakan oleh PS viewer. PostScript Level 1 dikembangkan oleh Adobe pada tahun 1984 dan telah melalui banyak revisi dan pembaruan. Versi saat ini adalah PostScript 3, diperkenalkan oleh Adobe pada tahun 1997.

Satu keuntungan dari file PostScript adalah bahwa file tersebut dibuat dengan cara yang persis sama dari printer dan viewer yang kompatibel dengan PostScript, jadi mereka tidak tergantung pada perangkat. Sistem font kaya menggunakan primitif grafis PS untuk menggambar mesin terbang (atau karakter) sebagai seni garis, yang dapat ditampilkan pada resolusi apa pun. File PS berukuran relatif kecil karena berisi instruksi dalam bentuk ASCII untuk dikirim ke printer, bukan informasi bitmap. Ini berlaku kecuali mereka memasukkan bitmap, dalam hal ini hasilnya adalah file PS yang besar.

PostScript dulunya adalah standar de facto untuk hasil cetak, tetapi sekarang tidak lagi demikian. Evolusi PostScript mengarah pada pengembangan Adobe Acrobat, yang membuat dokumen Portable Document Format (PDF) (lihat nanti).

## **EPS**

File Encapsulated Postscript (EPS; extension .eps) adalah format PostScript yang menyertakan 'pratinjau' resolusi rendah yang dienkapsulasi di dalamnya sehingga dapat ditampilkan sebagai pratinjau tanpa menafsirkan kode PostScript terkait. EPS pada dasarnya adalah format file gambar yang berfokus terutama pada keluaran. Ini cocok untuk aliran pekerjaan cetak kelas atas tetapi dapat dirender oleh aplikasi apa pun yang merender bitmap. File EPS mungkin berisi minimal satu perintah, menjelaskan halaman yang berisi gambar yang dijelaskan oleh file EPS. Aplikasi dapat menggunakan informasi ini untuk menata halaman, meskipun mereka tidak dapat merender PostScript di dalamnya secara langsung. Dalam beberapa tahun terakhir, aplikasi telah mengabaikan 'pratinjau' file EPS, tetapi dapat menampilkan pratinjau dengan menafsirkan PostScript untuk mendapatkan pratinjaunya sendiri.

## **PDF (Portable document format)**

Format PDF (ekstensi file.pdf) dirilis oleh sistem Adobe pada tahun 1993 dan selama tahun 1990-an menjadi standar de facto untuk penyimpanan dan komunikasi dokumen. PDF secara resmi distandarisasi dan diterbitkan oleh Organisasi Internasional untuk Standardisasi sebagai ISO 32000-1: 2008 pada Juli 2008. PDF sebenarnya bukan format pencitraan, melainkan format dokumen yang memungkinkan penyertaan gambar, memberikan dukungan untuk raster dan representasi data vektor. File PDF berisi tata letak tetap dari halaman dan memberikan deskripsi lengkap tentang dokumen, yang mencakup grafik, gambar, teks, dan font. Dokumen ditampilkan sebagai gambar, yang dapat dilihat atau dicetak, membuatnya sangat sesuai untuk memproyeksikan gambar komposit. Oleh karena itu awalnya digunakan terutama dalam

aplikasi penerbitan desktop. Sekarang telah ditemukan penggunaan luas untuk gambar atau dokumen yang akan dicetak dari web.

Dokumen PDF direpresentasikan dengan cara yang tidak bergantung pada sistem tempat dokumen itu ditampilkan, yaitu perangkat lunak aplikasi, sistem operasi, dan perangkat keras. Ini adalah kumpulan objek, mendeskripsikan tampilan halaman atau halaman dan mencakup informasi struktural tentang tata letak halaman. Grafik, teks, dan gambar di halaman terdapat dalam aliran konten objek grafik yang dilukis ke halaman, tata letak dan pemformatannya ditentukan oleh aplikasi yang membuat file. Objek grafik utama adalah: objek jalur, yang merupakan deskripsi vektor dari objek grafik (titik, garis, kurva, yang dapat diisi bentuk); objek teks, yang merupakan mesin terbang yang mewakili karakter teks (yang termasuk dalam struktur data font terpisah); dan objek gambar, yang merupakan susunan persegi panjang dari nilai sampel, pada dasarnya adalah bitmap. Gambar-gambar tersebut disematkan dalam file PDF menggunakan format gambar khusus PDF, yang format gambar aslinya mungkin tidak dapat ditentukan. Gambar memiliki dukungan warna hingga 64-bit dalam ruang warna RGB, *YCbCr* dan *CMYK*. Gambar mungkin tidak dikompresi, dikompresi tanpa kehilangan menggunakan berbagai algoritma termasuk LZW, atau dikompresi menggunakan kompresi JPEG lossy. Ini berarti bahwa tingkat kehilangan kualitas dapat dikontrol untuk berbagai jenis dokumen.

Perangkat lunak khusus (keluarga produk Acrobat dari Adobe) diperlukan untuk melihat atau membuat file PDF. Awalnya, Adobe mengenakan biaya untuk perangkat lunak ini, yang mungkin telah berkontribusi pada penggunaan format yang relatif lambat; namun, Acrobat Reader sekarang didistribusikan tanpa biaya, sehingga memungkinkan untuk pendistribusian dokumen PDF di Internet, sehingga statusnya saat ini sebagai standar de facto. Versi awal PDF dan Acrobat hanya memungkinkan tampilan dan pencetakan dokumen, tetapi perkembangan yang lebih baru telah menambahkan fasilitas untuk mengekstrak pilihan teks dan gambar tertentu. Ada delapan versi PDF dan Acrobat, yang berpuncak pada PDF versi 1.7 dan Adobe Extension 3/Acrobat 9.0 pada tahun 2008. Ini sekarang telah diterbitkan sebagai standar terbuka, ISO 32000-1: 2008.

PDF adalah format yang sangat berguna dalam alur kerja pencitraan sebagai sashutter untuk komunikasi informasi, tata letak, dan tampilan dokumen secara keseluruhan. Ini juga cocok sebagai format untuk menyediakan dokumen yang berisi gambar untuk diunduh dan dicetak dari Internet. Namun, ini tidak sebanding dengan format lain yang dirancang khusus untuk gambar; ini memiliki tujuan khusus dalam komunikasi dokumen dan harus digunakan dalam konteks ini, dengan format gambar yang lebih sesuai dipilih untuk penyimpanan gambar.

# Penyimpanan Gambar dan Pengarsipan

## Pengantar

kita akan membahas aspek umum dari penyimpanan gambar dan sifat arsip atau harapan hidup dari media pencitraan yang berbeda. Sebelum fotografi digital, istilah arsip digunakan untuk mendeskripsikan materi dengan umur panjang, yang sekarang berarti minimal 100 tahun. Saat ini istilah arsip kurang umum digunakan dan bahan dijelaskan dalam istilah harapan hidup mereka. Ini karena media elektronik baru yang terkait dengan pencitraan tidak memiliki properti arsip yang terbukti. Semua materi terdegradasi seiring waktu dan media pencitraan yang berbeda dapat menyebabkan banyak penyebab degradasi, banyak di antaranya tidak dipahami dengan baik. Langkah-langkah dapat diambil untuk memastikan bahwa harapan hidup mereka selama mungkin. Seiring kemajuan sistem pencitraan dan sistem baru berkembang, kriteria utama awal adalah menyediakan sistem yang berfungsi dan memenuhi kebutuhan konsumen. Dalam tahap awal penyediaan produk baru ini, umur panjang mereka tidak harus menjadi prioritas tinggi. Ini membuang situasi di awal proses fotografi negatif-positif ketika W.H.F. Talbot bereksperimen dengan berbagai metode perbaikan untuk mencapai gambar yang stabil dan pendekatan ini berlanjut hingga hari ini. Namun, seiring dengan kemajuan pengetahuan kami, baik produsen maupun pengguna lebih menyadari kebutuhan media pencitraan untuk memiliki harapan hidup yang cukup panjang dan banyak penelitian dilakukan untuk mencapai hal ini. Saat ini, ini menjadi strategi yang berguna dalam memasarkan produk pencitraan. Contoh yang relatif baru adalah dalam keluaran hard copy berwarna menggunakan inkjet atau sistem transfer pewarna termal di mana produk awal memiliki stabilitas yang sangat buruk terhadap cahaya, seperti yang mewarnai materi cetak foto sebelumnya. Masalah ini telah diteliti secara menyeluruh; produk yang lebih baru memiliki stabilitas cahaya yang jauh lebih baik dan prediksi tentang harapan hidup mereka sangat optimis.

Umur panjang di semua media penyimpanan gambar tergantung pada stabilitas media, kondisi penyimpanan dan penanganannya. Dengan teknologi digital sejumlah pertimbangan lain mengenai harapan hidup informasi gambar digital harus diperhitungkan selain degradasi media penyimpanan itu sendiri. Yang menjadi perhatian khusus adalah berapa lama perangkat keras dan perangkat lunak membaca dan menampilkan informasi gambar akan tersedia. Selain manfaat perangkat keras dan perangkat lunak, pelestarian jangka panjang informasi digital hanya dicapai dengan mentransfer dari sistem usang ke sistem yang lebih baru. Migrasi adalah transfer file digital secara berkala dari satu konfigurasi perangkat keras/perangkat lunak ke perangkat lain. Memastikan umur panjang gambar menghadirkan berbagai tantangan. Beberapa umum terjadi pada media berbasis perak dan digital, sedangkan yang lainnya unik untuk satu atau lainnya. Menyimpan film fotografi, cetakan dan media penyimpanan digital di bawah kondisi lingkungan yang terkendali, menanganinya dengan hati-hati dan memindahkan file gambar digital dari media lama ke media yang lebih baru adalah semua teknik yang membantu memperpanjang umur foto. Fokus pembahasan ini akan berada pada tiga bidang utama: (i) harapan hidup dan penyimpanan media fotografi tradisional; (ii) harapan hidup dan penyimpanan cetakan digital; dan (iii) penyimpanan gambar digital dan migrasi informasi digital.

## Harapan hidup media fotografi tradisional

Umur panjang media berbasis silver halida tergantung pada media fotografinya itu sendiri, pemrosesan kimiawi dan kondisi penyimpanan yang diakibatkannya. Bahan analog hitam-putih memiliki sejumlah keunggulan sehubungan dengan harapan hidup mereka dibandingkan media lain, termasuk fakta bahwa mereka dilihat dengan mata telanjang, tidak diperlukan perangkat keras atau perangkat lunak untuk membuat data gambar dapat dilihat catatan, dan sejarah. Kita tahu bahwa rekaman foto hitam-putih yang diproses dan disimpan dengan benar memiliki harapan hidup setidaknya 150 tahun.

Menurut pekerjaan yang diterbitkan oleh Image Permanence Institute (IPI) dari Rochester Institute of Technology (RIT) di AS, ada tiga kategori jenis kerusakan yang disebabkan oleh lingkungan dalam media fotografi (dan yang berhubungan dengan gambar lainnya). Pembusukan biologis melibatkan organisme hidup, seperti jamur dan bakteri yang merusak lapisan dan cetakan. Jamur, setelah ada dan jika tidak ditangani, akhirnya menghancurkan semua informasi bergambar. Kerusakan mekanis berkaitan dengan perubahan struktur gambar fotografi, seperti ukuran dan bentuknya. Penyerapan kelembaban yang berlebihan dari media fotografi yang ditemukan di lingkungan yang lembab menyebabkan pembengkakan; sama, kurangnya kelembaban dan kekeringan di atmosfer menyebabkan penyusutan dan retakan. Akhirnya, peluruhan kimia mengubah sifat kimiawi gambar fotografis. Pemrosesan yang salah - misalnya, meninggalkan sisa bahan kimia atau hasil cetak akhir dengan nilai pH yang tidak menguntungkan - menyebabkan memudarnya pewarna warna pada bahan berwarna.

Sembilan jenis pembusukan yang merupakan ancaman utama bagi koleksi gambar fotografi dan digital tercantum dalam Tabel 13. Beberapa formulir mungkin hanya mempengaruhi satu jenis media; orang lain juga dapat mempengaruhi jenis lain. Kondisi lingkungan yang tepat meminimalkan risiko kerusakan terkait pembusukan.

<b>Tabel 13. 9 jenis pembusukan, yang diterbitkan oleh Peter Adelstein dari Pencitraan Permanence Institute di AS, yang merupakan ancaman utama bagi koleksi gambar fotografi dan digital</b>		
<b>JENIS KERUSAKAN</b>	<b>MEDIA</b>	<b>REKOMENDASI LINGKUNGAN</b>
Kerusakan gambar perak	Pelat kaca fotografi Film hitam-putih Cetakan foto hitam-putih	30 - 50% RH
Warna gambar rusak	Film berwarna Cetakan fotografi berwarna Print Injkjet	Temperatur Rendah 30 - 50% RH
Pendarahan warna	Print Injkjet	30 - 50% RH
Menguning, menodai	Cetakan fotografi berwarna Print Injkjet	Temperatur Rendah 30 - 50% RH
Degradasi pengikat	Pita magnetik	Temperatur Rendah (tidak beku) 30 - 50% RH
Peluruhan asetat	Film hitam dan putih berbasis asetat Film berwarna berbasis asetat	Temperatur Rendah 30 - 50% RH

	Pita magnetik berbasis asetat	
Kerusakan kaca	Pelat kaca fotografi	30 - 50% RH
Pemisahan lapisan	Pelat kaca fotografi	Fluktuasi suhu dan RH minimal
	CD dan DVD	30 - 50% RH
Cetakan	Semua Media	30 - 50% RH
RH adalah singkatan dari kelembaban relatif.		

Mengenai umur panjang media fotografis itu sendiri, umumnya gambar dengan butiran halus berwarna perak lebih rentan terhadap degradasi daripada gambar berbutir besar. Cetakan lebih rentan daripada negatif atau slide. Kertas cetak berbasis serat, terutama jenis bobot premium yang diperkaya perak, memberikan stabilitas gambar yang lebih baik daripada bahan berlapis resin. Media fotografi berwarna lebih berisiko daripada hitam putih. Lebih lanjut, bahan fotografi harus dikembangkan dengan benar, diperbaiki dan dicuci untuk menghindari kekuningan dan pemudaran di kemudian hari pada penyimpanan. perhatian diarahkan pada pentingnya memperbaiki dan mencuci film dan cetakan hitam-putih dengan benar untuk menghindari pudar dan menguning pada penyimpanan. Namun demikian, meskipun bahan fotografi diproses dengan benar, mereka mungkin mengalami salah satu dari beberapa bentuk degradasi dalam jangka panjang. Ringkasan jenis degradasi dan penyebabnya untuk material hitam-putih dan berwarna disajikan pada Tabel 14.

Semua degradasi yang tercantum dalam Tabel 14 dapat dihindari atau setidaknya diminimalkan dengan menghilangkan penyebab yang diketahui sejauh mungkin. Terdapat sejumlah standar internasional untuk lingkungan penyimpanan yang tepat, kondisi tampilan, dan perlakuan perlindungan media fotografi yang, jika diikuti, akan memperpanjang usia harapan hidup, sebagaimana akan mengikuti kondisi pemrosesan yang disarankan. ISO18909: 2006 adalah sebuah contoh, yang berkaitan dengan penyimpanan gelap dan pemudaran terang warna hasil cetak.

<b>Table 14 Beberapa sebab kerusakan bahan fotografi</b>	
<b>EFEK</b>	<b>SEBAB</b>
Noda kuning keseluruhan	Bahan kimia sisa (kompleks tiosulfat, perak-tiosulfat)
Gambar memudar dan menguning	Seperti di atas
Bintik coklat	Retensi yang diloakkan di atas
Kerusakan lokal atau umum	Serangan bakteri atau jamur pada gelatin, degradasi gelatin dan serat kertas oleh gas atmosfer asam
Microspots (merah/kuning)	Gas atmosfer yang mengoksidasi
Pewarnaan memudar	Reaksi gelap dan/atau reaksi yang diinduksi cahaya dari pewarna gambar

## **Kondisi Pemrosesan**

Kondisi pengembangan seperti yang direkomendasikan oleh produsen harus diikuti. Pemindaian berhenti mandi asam mempengaruhi sifat penyimpanan gambar perak. Asam asetat berlebih dalam bak penghenti dapat menyebabkan beberapa kertas menjadi rapuh saat

dikeringkan dan disimpan selanjutnya. Selain itu, dengan pengembang dengan buffer karbonat, asam asetat berlebih dapat menyebabkan gelembung gas karbon dioksida terbentuk di serat kertas cetakan. Kompleks tiosulfat dan perakethiosulfat dapat terperangkap dalam gelembung-gelembung ini dan mungkin tidak segera hilang. Hal ini pada gilirannya dapat menyebabkan bintik-bintik perak sulfida terlokalisasi terbentuk pada penyimpanan. Tingkat minimum ion tiosulfat yang diizinkan untuk beberapa bahan fotografi ditentukan dalam standar. Untuk stabilitas maksimum gambar perak, biasanya disarankan agar semua tiosulfat dihilangkan dengan pencucian menyeluruh atau dengan bantuan hipo eliminasi saat waktu pencucian singkat digunakan. Namun, telah disarankan bahwa untuk harapan hidup yang lama, lebih baik jika bahan tersebut mengandung sedikit tiosulfat, misalnya 0,03 gm-2 untuk mikro film. Sifat penyimpanan arsip ditingkatkan secara signifikan dengan menggunakan perawatan pengencangan pelindung, itulah mengapa mungkin lebih baik untuk memasukkan sedikit residu tiosulfat dalam bahan yang diproses untuk membentuk lapisan pelindung perak sulfida pada butiran perak .

Pemrosesan yang salah dari bahan warna, yang dapat meninggalkan sisa bahan kimia di lapisan atau memberikan catatan yang diproses dengan nilai pH yang tidak menguntungkan, dapat menyebabkan kerusakan atau pemudaran pewarna gambar, yang dikenal sebagai pemudaran gelap sebagai lawan dari pemudaran terang.

### **Dark Fading**

Pemudaran zat warna memiliki dua penyebab, yang dikategorikan sebagai pemudaran gelap dan pemudaran terang. Mekanisme berbeda untuk penghancuran zat warna terlibat untuk kedua jenis pemudaran ini. Pemudaran gelap melibatkan reaksi kimia yang bergantung pada struktur pewarna. Aspek-aspek ini akan dibahas secara terpisah. Seperti bahan berbasis perak, pemudaran gelap pewarna gambar dipengaruhi oleh suhu, kelembaban relatif (RH), dan sifat kimiawi lingkungan. Gas atmosfer umum yang dapat menyebabkan warna gelap memudar adalah oksida sulfur dan nitrogen, dan ozon, tetapi ini tidak signifikan jika dibandingkan dengan penyebab lain. Seperti halnya gambar hitam-putih, gambar pewarna dipengaruhi oleh kesalahan dalam pemrosesan. Pemudaran gelap dipercepat dengan adanya ion tiosulfat sisa. Pencucian bahan berwarna yang tidak efisien tidak hanya menyebabkan pembuangan tiosulfat dan bahan kimia berbahaya lainnya secara tidak tuntas, tetapi juga dapat meninggalkan bahan dengan nilai pH rendah, yang juga telah terbukti mempercepat pemudaran gelap. Jika prosedur pemrosesan yang benar diterapkan, pengurangan sifat penyimpanan bahan yang terkait dengan penyebab ini dapat dihindari.

Reaksi utama yang bertanggung jawab atas pemudaran gelap pada bahan kromogenik adalah reaksi yang melibatkan hidrolisis dan reaksi reduksi oksidasi, yang menyebabkan pewarna diubah menjadi bentuk tidak berwarna, atau menjadi bentuk yang warnanya berbeda dari pewarna aslinya. Hidrolisis adalah penguraian oleh air dan dipercepat oleh nilai pH yang ekstrim serta kelembaban dan suhu. Pewarna kuning sangat rentan terhadap bentuk kerusakan ini, sedangkan pewarna cyan rentan terhadap reduksi menjadi bentuk tak berwarna oleh sisa ion tiosulfat, ion besi atau zat pereduksi lain yang ada dalam bahan atau lingkungan. Pemahaman tentang mekanisme yang terlibat telah menghasilkan bahan kromogenik generasi saat ini, yang mengandung pengganggu warna yang membentuk pewarna gambar dengan ketahanan yang lebih besar terhadap pemudaran gelap daripada bahan sebelumnya. Tes prediksi untuk pemudaran gelap melibatkan uji penuaan dipercepat yang dilakukan di bawah RH tetap (40%) pada suhu tinggi untuk jangka waktu yang lama.

Prosedur ini didasarkan pada ekuasi Arrhenius klasik (lihat ISO 18924 untuk lebih jelasnya), yang diberikan di bawah ini dalam bentuk yang disederhanakan:

*Ekuasi 94*

$$\log_e k \propto 1/T$$

dengan  $K$  adalah ukuran laju pemudaran zat warna dan  $T$  adalah suhu termodinamika dalam kelvin. Jika plot  $\log_e K$  terhadap  $1/T$  untuk sejumlah suhu menghasilkan garis lurus, maka dimungkinkan untuk mengekstrapolasi garis lurus ke suhu lain untuk memprediksi laju pemudaran. Selain itu, telah ditunjukkan untuk pemudaran gelap yang:

*Ekuasi 95*

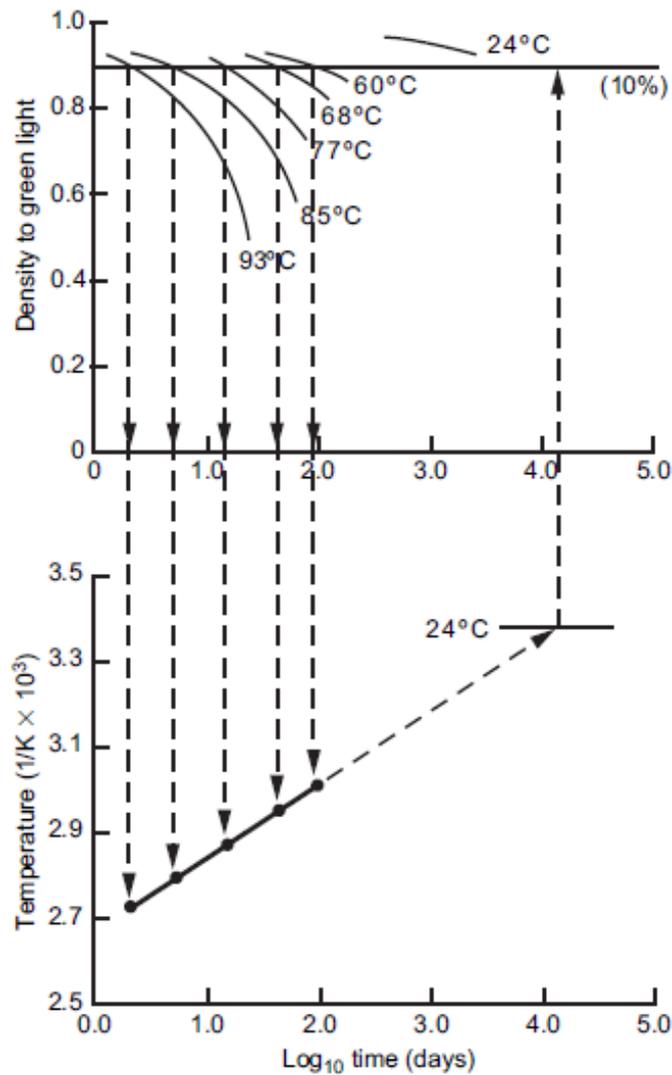
$$\log_e k \propto \log_e t_{10\%}$$

di mana  $t_{10\%}$  adalah waktu yang dibutuhkan untuk memudarkan 10% kerapatan zat warna dari kerapatan asli 1,0. Oleh karena itu, dari bentuk ekuasi Arrhenius yang disederhanakan:

*Ekuasi 96*

$$\log_e t_{10\%} \propto 1/T$$

Dalam praktiknya,  $1/T$  dapat diplot terhadap  $\log_{10} t_{10\%}$ , seperti yang ditunjukkan pada grafik yang lebih rendah pada Gambar 94.



**Gambar 94**

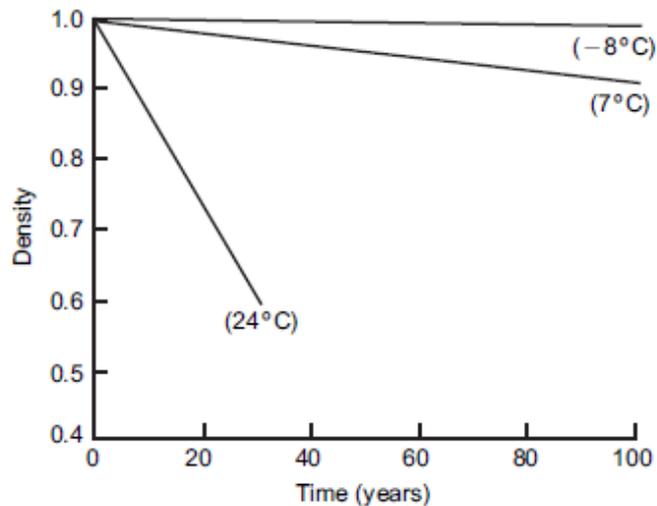
Penerapan prosedur ini untuk pemudaran gelap pewarna magenta ditunjukkan pada Gambar 94 dan penggunaannya untuk memprediksi pemudaran gelap, pada suhu di mana pemudaran akan memakan waktu terlalu lama untuk diukur, diberikan di bawah ini. Angka pemudaran gelap untuk suhu mulai dari 24 hingga 93°C pada 40% RH ditampilkan sebagai kurva penuh di grafik atas DG densitas hijau terhadap waktu log<sub>10</sub> (dalam hari). Garis horizontal digambar pada kriteria tingkat pudar 10%. Jika garis ini melintasi kurva pemudaran yang sebenarnya, garis vertikal ditarik ke grafik yang lebih rendah di mana suhu ( $1/T$  dalam kelvin) diplotkan terhadap log waktu memudar ( $\log_{10} t_{10\%}$ ). Hubungan linier yang diperoleh ditunjukkan oleh garis yang menghubungkan lingkaran penuh. Ekstrapolasi garis ini ke suhu yang dibutuhkan 24°C ditampilkan sebagai garis putus-putus. Penerjemahan titik ini secara vertikal kembali ke grafik atas garis horizontal berlabel 10% memberikan nilai prediksi pemudaran zat warna ke tingkat 10%, dari mana terlihat bahwa zat warna ini akan memudar 10% dalam antilog 4,1 hari, yaitu 34 tahun. Prosedur ini dapat diulangi untuk tingkat pemudaran lainnya dan dengan ini berarti kurva pemudaran lengkap dapat diprediksi.

Semua pewarna memudar dan gambar pewarna tidak dapat dianggap memiliki kualitas arsip. Namun, produsen telah memberikan perhatian yang cukup besar untuk meminimalkan

pemudaran pewarna, dan bahan fotografi berwarna modern mampu bertahan selama beberapa dekade jika disimpan dan diproses dengan benar. Produsen mengklaim kemampuan penyimpanan gelap 100 tahun untuk bahan cetak berwarna mereka. Namun, satu-satunya metode yang benar-benar efektif untuk mencapai harapan hidup yang lebih lama dari bahan warna adalah mengubahnya menjadi rekaman hitam-putih dengan membuat pemisahan positif atau negatif dan memproses dan menyimpannya di bawah kondisi yang dibahas di bagian sebelumnya. Pemisahan hitam-putih ini kemudian dapat disusun kembali menjadi gambar berwarna sesuai kebutuhan, menggunakan teknik pencitraan fotografi atau digital yang sesuai.

Beberapa pewarna secara inheren lebih stabil daripada yang lain. Misalnya, yang digunakan dalam proses transfer pewarna fotografis, pewarna yang ada dalam bahan pemutih perak dan pewarna berbasis logam umumnya lebih tahan terhadap jenis pemudaran tertentu daripada yang terbentuk dalam bahan yang dikembangkan secara kromogenik. Misalnya, salah satu bahan fotografi berwarna yang paling tahan pudar gelap adalah film Kodak 's Kodakrome. Studi besar tentang koleksi fotografi lama telah menunjukkan bahwa Kodachrome adalah satu-satunya film transparansi yang tetap bebas dari pembentukan noda kuning selama penyimpanan aman jangka panjang. Stabilitas film sebagian besar disebabkan oleh pemrosesannya, yang sangat kompleks jika dibandingkan dengan pemrosesan E6 yang digunakan untuk semua slide kromogenik. Kecuali dinyatakan lain, pertimbangan pemudaran pewarna yang mengikuti telah diterapkan pada bahan kromogenik.

Masalah dengan bahan warna adalah pewarna gambar memudar pada tingkat yang berbeda; ini menghasilkan perubahan keseimbangan warna (lihat contoh dark fading pada Gambar 97). Juga, tidak ada kriteria yang disepakati secara universal untuk menilai pemudaran atau tingkat pemudaran yang dapat ditoleransi. Awalnya pabrikan mengadopsi kriteria pengurangan densitas 10% (yaitu 0,1 dari densitas asli 1,0), meskipun telah dikatakan bahwa perubahan yang lebih besar dari ini mungkin dapat diterima oleh rata-rata pengamat. Pengukuran kuantitatif pewarnaan pewarna ini, daripada yang berkaitan dengan kualitas, telah disebut sebagai perbedaan yang sangat mencolok. Ini memberikan kriteria yang berguna untuk perbandingan antara produk yang berbeda ketika diperlakukan dengan cara yang sama untuk evaluasi laboratorium stabilitas pewarna. Namun, standar yang lebih baru menggunakan kehilangan densitas 30% dari densitas 1.0 sebagai kriteria untuk aspek prediktif pemudaran pewarna. Hilangnya 30% densitas ini dianggap sebagai perubahan densitas yang terlihat oleh konsumen. Mungkin ada beberapa kebingungan tentang apa yang mewakili perbedaan yang hanya terlihat atau perbedaan minimum yang dapat diterima. Ini adalah area tampilan warna yang kontroversial yang bergantung pada konten warna adegan nyata.



**Gambar 95** Pemudaran gelap pewarna gambar cyan pada berbagai suhu.

Tes prediksi untuk pewarnaan sedang dilakukan oleh semua produsen, tetapi saat ini tidak ada jaminan bahwa tes ini akan memprediksi dengan tepat apa yang akan terjadi dalam kondisi penyimpanan yang sebenarnya. Kesulitan lebih lanjut adalah banyak klaim menggunakan kondisi pengujian dan kriteria yang berbeda untuk penerimaan pemudaran. Ini berarti bahwa data yang diterbitkan harus diinterpretasikan dan dibandingkan dengan hati-hati, terutama jika kondisi pengujian yang berbeda telah digunakan. Prosedur ini memberikan teknik prediksi untuk produsen dan peneliti, dan hasil pemudaran yang khas ditunjukkan pada Gambar 95.

Dari sini dapat dilihat bahwa untuk mengurangi pewarnaan ke suhu penyimpanan yang rendah harus digunakan. Jika kondisi penyimpanan berpendingin digunakan untuk meminimalkan pemudaran gelap, bahan harus ditutup dalam wadah tertutup yang sesuai dan, karena RH meningkat seiring suhu diturunkan, bahan fotografi harus dikondisikan sebelumnya pada RH rendah (25-30% pada 20°C) sebelum mereka disegel di dalam wadahnya. Kondisi praktis untuk penyimpanan yang diberikan sebelumnya juga berlaku untuk bahan berwarna dan relatif mudah dicapai tanpa menggunakan fasilitas pendingin yang mahal. Bahan berwarna seperti slide dapat diduplikasi setiap beberapa tahun dan kejelasan warna yang baik dipertahankan selama beberapa generasi; warna negatif dapat dicetak ulang.

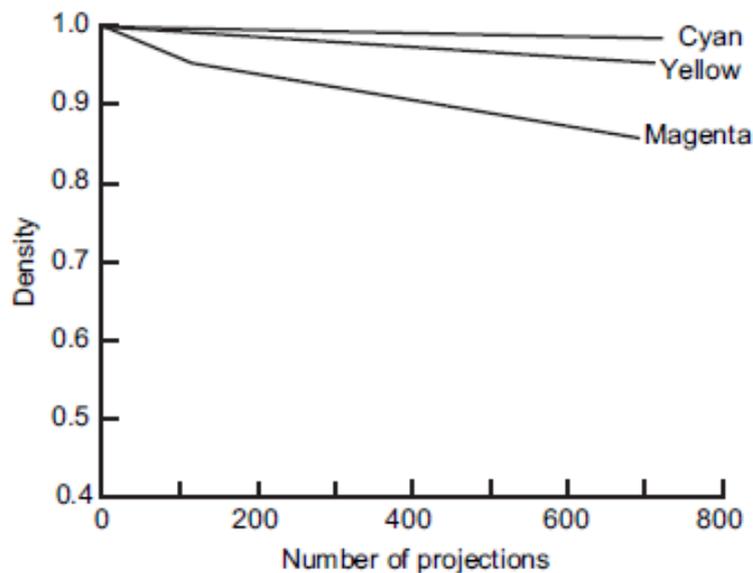
### Light Fading

Pemudaran cahaya pada pewarna fotografi adalah pemudaran yang dihasilkan dari paparan sinar dan radiasi ultraviolet (UV). Prediksi dari pengujian pemudaran cahaya yang dilakukan di laboratorium lebih sulit dibuat daripada prediksi dari pengujian pemudaran gelap, yang menggunakan metode Arrhenius yang lebih andal. Pemudaran cahaya pewarna tergantung pada intensitas, durasi dan distribusi energi spektral dari radiasi yang dikenakan padanya. Ini sangat bervariasi dengan kondisi tampilan di mana materi dilihat. Pemudaran pewarna adalah reaksi fotokimia yang melibatkan oksigen, dan menyebabkan kerusakan pewarna. Pemudaran fotokimia ini meningkat dengan kelembaban tinggi.

Dua metode laboratorium digunakan untuk menyelidiki stabilitas cahaya, yang berkaitan dengan kondisi tampilan dan tampilan untuk bahan tertentu. Slide dapat dikenakan ratusan proyeksi dalam proyektor slide dan penurunan densitas untuk patch netral dan warna diukur dan diplot terhadap jumlah proyeksi. Hasil untuk patch netral film pembalikan dengan densitas

asli 1.0 ditunjukkan pada Gambar 96. Kebanyakan film pembalikan mengikuti tren yang ditunjukkan dalam gambar ini, tetapi terdapat variasi di antara produk yang berbeda, dan film saat ini menunjukkan kurva yang kurang curam dan stabilitas cahaya yang lebih baik.

Bahan cetak berwarna biasanya terpapar sumber xenon yang intens pada 5,4 klux, 40-50% RH pada 22-23°C dan waktu yang dibutuhkan untuk kehilangan densitas tetap (10%, 15% atau 30% seperti yang disebutkan sebelumnya di bawah pemudaran gelap) digunakan sebagai ukuran stabilitas cahaya yang diperoleh dari grafik densitas terhadap waktu. Ekstrapolasi dilakukan dari 5,4 klux hingga 120 lux, yang dianggap sebagai tingkat pencahayaan khas di lingkungan rumah tempat gambar dapat ditampilkan. Kertas foto berwarna kromogenik telah membuat peningkatan substansial dalam stabilitas cahayanya selama 50 tahun terakhir. Material saat ini menunjukkan ketahanan yang cukup besar terhadap pemudaran cahaya. Hasil cetak foto berwarna sekarang diklaim memiliki masa manfaat 150 tahun dalam kondisi tampilan rumah biasa sekitar 120 lux pada 50% RH dan 23°C. Perbaikan sedang dilakukan oleh semua produsen bahan cetak kromogenik; bahan modern hampir sama stabilnya dengan cetakan transfer pewarna. Yang terakhir telah dianggap sebagai standar yang dibandingkan dengan bahan lain. Pewarna silvere - bahan pemutih sangat tahan terhadap pemudaran cahaya.



**Gambar 96** Pemudaran cahaya dari patch netral yang dicitrakan pada film pembalikan warna.

Seperti disebutkan sebelumnya, ketidakstabilan gambar pewarna disebabkan oleh kombinasi penyerapan cahaya dan efek penyimpanan gelap, meskipun efek penyimpanan gelap sering diabaikan saat dilakukan pemudaran cahaya yang dipercepat. Ada banyak faktor rumit tambahan yang terlibat dalam pemudaran cahaya. Contohnya termasuk pewarnaan, pengaruh radiasi UV dan penyerap UV, adanya sisa bahan kimia dan skrup warna dalam bahan kromogenik, anti oksidan dan stabilisator yang mungkin termasuk dalam bahan modern, pengaruh substrat dan faktor lingkungan, seperti seperti suhu, kelembaban, pH dan keberadaan oksigen. Karena kemungkinan efek timbal balik, semua studi pemudaran cahaya yang dipercepat, yang menggunakan eksposur intensitas tinggi dan durasi yang relatif singkat, dikritik bahwa efek tersebut mungkin tidak berhubungan langsung dengan eksposur yang lebih lama pada intensitas yang lebih rendah. Ada kemungkinan bahwa kondisi yang digunakan untuk pemudaran cahaya yang dipercepat dapat menyebabkan reaksi yang tidak ditemukan untuk kondisi sekitar tempat bahan ditampilkan. Namun, ada sedikit alternatif jika studi

pemudaran akan dilakukan dalam periode waktu yang wajar dan sebagian besar investigasi melibatkan penggunaan sumber intensitas tinggi dan ekstrapolasi ke kondisi lain saat prediksi dibuat.

Masalah tambahan ada dalam pilihan kondisi tampilan ambien yang diasumsikan saat kalkulasi prediktif dibuat untuk pemudaran dengan jumlah yang ditentukan. Satu pabrikan telah menggunakan nilai 500 lux selama 12 jam per hari dalam kalkulasi semacam itu. Hal ini didasarkan pada asumsi bahwa dalam situasi rumah tangga yang umum, sinar matahari bervariasi antara 1000 lux pada siang hari, menurun hingga 300 lux pada malam hari, dan nilai rata-rata 500 lux selama 12 jam per hari tampaknya merupakan perkiraan yang masuk akal. Sementara yang lain telah mengadopsi 450 lux untuk periode waktu yang sama pada suhu 24°C and 60% RH, yang lain menggunakan 120lux, seperti yang disebutkan sebelumnya. Hal ini lebih lanjut menggambarkan kesulitan dan kehati-hatian yang harus dilakukan dalam membuat perbandingan antara klaim untuk stabilitas cahaya bahan pencitraan.

Kertas cetak kromogenik modern telah berkembang selama setidaknya 50 tahun dan banyak penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan stabilitasnya. Perhatian khusus telah dipusatkan pada perbaikan dalam stabilitas intrinsik pewarna magenta cahaya, yang dianggap memiliki pemudaran yang paling terlihat dan yang paling tidak stabil dari pewarna citra. Selain itu, penyerap UV dan komponen kimia kecil lainnya disertakan dalam bahan modern untuk mengurangi laju pemudarannya. Ini adalah produk dewasa, sedangkan materi untuk keluaran hard copy dari sistem elektronik telah berevolusi selama kurang dari satu dekade dan memudar lebih cepat daripada materi fotografi berwarna.

## **Kondisi Penyimpanan**

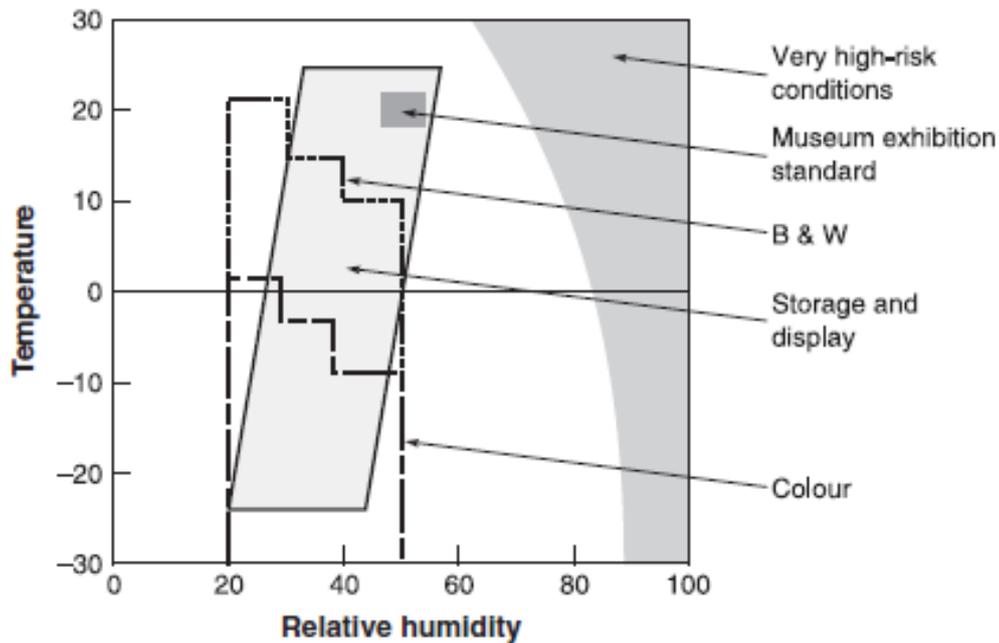
Sebagian besar efek berbahaya yang dirangkum dalam Tabel 94 dan 95 diperburuk oleh suhu tinggi dan RH tinggi. Faktanya, menundukkan bahan fotografi yang diproses pada kondisi seperti itu digunakan sebagai prosedur pengujian untuk teknik penuaan yang dipercepat untuk menemukan kondisi pemrosesan dan penyimpanan yang optimal dan untuk penelitian tentang penyebab kerusakan. Satu Standar Internasional menetapkan sebagai uji stabilitas gambar yang menginkubasi bahan selama 30 hari pada suhu  $60 \pm 2^\circ\text{C}$  dan RH  $70 \pm 2\%$ , dan menyatakan bahwa: 'Gambar film harus menunjukkan tidak ada degradasi yang akan merusak film untuk tujuan penggunaan . 'Saat menyimpan bahan fotografi, suhu tidak boleh melebihi  $21^\circ\text{C}$  dan RH harus dijaga dalam kisaran 30-50%. Untuk penyimpanan arsip, suhu dan RH yang lebih rendah direkomendasikan ( $10-16^\circ\text{C}$  dan RH 30-45%). Ini merupakan kompromi praktis untuk AC. Selain itu, bahan harus dilindungi dari gas atmosfer yang berbahaya (dibahas di bagian selanjutnya). Rekomendasi yang lebih baru adalah menyimpan bahan fotografi dalam kantong polipropilen tertutup yang berisi indikator kelembapan yang terlihat, dalam lingkungan kelembapan terkendali pada suhu  $20^\circ\text{C}$ . Ini memberikan standar konservasi tertinggi sambil mencapai stabilitas kimia maksimum tanpa perubahan fisik yang berbahaya. Batasan utama adalah bahwa prosedur pemanasan yang ketat harus diterapkan saat mengeluarkan material dari penyimpanan dingin untuk menghindari kondensasi dan perubahan fisik karena kejutan termal. Gambar 98 menunjukkan rekomendasi McCormick-Goodhart untuk penyimpanan bahan fotografi dalam kaitannya dengan hubungan antara suhu dan RH.



**Gambar 97** Castin merah muda (b) adalah simulasi pewarna cyan yang memudar lebih cepat daripada pewarna magenta dan kuning dalam cetakan foto lama - disimpan elektronik sebelum tahun 1974 dalam gelap.

Bahan fotografi harus dilindungi dari cahaya. Pengujian terbaru menunjukkan bahwa menundukkan bahan perak ke siang hari simulasi intensitas tinggi (5,4 klux atau 5400 lumens per meter persegi) mempercepat gambar yang menguning dalam bahan yang diproses yang mengandung ion tiosulfat dalam jumlah kecil.

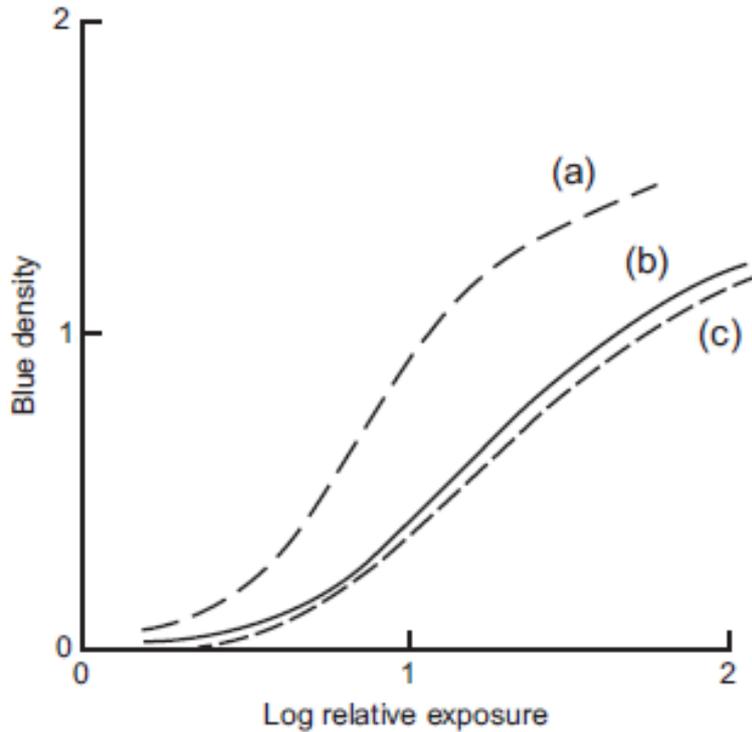
Materi tempat penyimpanan rekaman foto, serta kondisi pemrosesan dan lingkungan penyimpanan, juga sangat penting. Bahan yang sesuai untuk penyimpanan film, pelat, dan kertas fotografi yang telah diproses juga ditentukan dalam Standar. Umumnya, produk kayu dan kayu (kayu lapis, papan chip, papan hardboard, dll.), Plastik berbasis dehyde formal, wadah plastik polivinil dan akrilik tidak boleh digunakan. Bahan-bahan ini mungkin mengandung sisa pelarut, katalis, peliat, dll. Yang diketahui memiliki efek berbahaya pada bahan fotografi, banyak perekat, tinta dan pena penanda. Wadah penyimpanan yang disukai adalah yang terbuat dari aluminium teranodisasi atau baja tahan karat, atau kotak karton yang terbuat dari serat alfaselulosa tinggi bebas asam yang bebas lignin dan bebas sulfur. Yang terakhir ini juga berlaku untuk papan pemasangan untuk cetakan, amplop untuk negatif, dll. Untungnya ada sejumlah pemasok spesialis bahan penyimpanan arsip untuk catatan foto yang diproses; ini mampu memasok 'arsip' polipropilen atau selubung plastik dan amplop untuk penyimpanan negatif dan slide, bersama dengan file dan kotak bahan arsip yang sesuai.



**Gambar 98** Rekomendasi McCormick-Goodhart untuk penyimpanan bahan fotografi.  
 Diadaptasi dari makalah yang dipresentasikan pada Konferensi Pelestarian Arsip dan Administrasi Arsip Tahunan ke-14: Fasilitas Arsip Alternatif, Washington, DC, Maret 1999; direproduksi atas izin M.H. McCormick-Goodhart

## Gas atmosfer

Ada banyak polutan yang ada di lingkungan yang dapat menimbulkan efek merusak pada bahan fotografi. Ini termasuk gas pengoksidasi seperti hidrogen peroksida, ozon, oksida nitrogen, peroksida dan radikal peroksi yang dipancarkan oleh knalpot mobil, cat, plastik, hujan asam dan senyawa sulfur. Efek umum dari gas pengoksidasi adalah menyebabkan gambar menguning dan memudar pada tepi cetakan atau negatif di mana atmosfer paling mudah menembus. Pewarnaan ini mungkin dichroic, tampak abu-abu oleh cahaya yang dipantulkan dan kuning oleh cahaya yang dipancarkan. Gas pengoksidasi dengan konsentrasi rendah seperti hidrogen peroksida dapat menghasilkan mikrosput. Dalam cetakan ini muncul sebagai bintik kuning, oranye atau merah tergantung pada ukuran partikel perak, dan jika berkerumun di dekat permukaan dapat muncul sebagai cermin perak. Mekanisme terjadinya pembentukan mikrosput melibatkan oksidasi awal oleh gas, yang mengubah logam perak menjadi ion perak bergerak. Ion perak bermigrasi menjauh dari lapisan perak gambar dan menjadi perak metalik dengan aksi cahaya, atau diubah menjadi perak sulfida oleh hidrogen sulfida yang ada di lingkungan. Proses ini membentuk titik mikro dengan diameter kira-kira 60nm atau lebih besar, yang terdiri dari struktur cincin konsentris partikel berdiameter 5-10nm sampai 0,5 mm. Dalam percobaan laboratorium dengan menggunakan teknik percepatan penuaan pada suhu 50°C dan RH 80%, terlihat bahwa pembentukan mikrosput terjadi dengan konsentrasi hidrogen peroksida sebesar 500 ppm.



**Gambar 99** Pengaruh toning pada stabilitas gambar terhadap hidrogen peroksida. (a) Gambar tanpa kancing setelah 3 jam, hidrogen peroksida 5%. (b) Gambar asli, bukan reatment. (c) Gambar rona d setelah 3 jam, 5% hidrogen peroksida.

Perlindungan terhadap serangan dengan gas pengoksidasi dapat diberikan dengan pengencangan selenium. Gambar 99 menunjukkan tingkat perlindungan yang dimungkinkan dengan perlakuan pengencangan ini saat bahan mengalami pengujian ekstrem menggunakan hidrogen peroksida 5%. Dari Gambar 99 dapat dilihat bahwa toning (kurva c) menyebabkan perubahan yang sangat kecil pada kurva karakteristik setelah diserang oleh hidrogen peroksida, sedangkan gambar yang tidak diberi tanda (kurva a) menunjukkan perubahan yang cukup besar. Gas atmosfer asam, yang sering berada di lingkungan, dapat menurunkan gelatin dan bahan dasar kertas dan beberapa bentuk perlindungan dari bahan-bahan ini dalam penyimpanan diperlukan untuk pengarsipan yang permanen.

## Toning

Proses pengencangan tertentu sekarang diketahui meningkatkan harapan hidup gambar perak. Awalnya pengencangan dilakukan untuk mengubah warna gambar fotografis dengan menggunakan larutan kimia. Toning terutama diterapkan pada cetakan tetapi juga dapat digunakan untuk memberikan stabilitas tambahan pada film atau pelat, dan sebagian besar produsen menawarkan solusi pengencangan khusus untuk meningkatkan harapan hidup produk fotografi perak mereka. Prinsip untuk mendapatkan stabilitas gambar perak yang ditingkatkan melalui pengencangan adalah dengan mengubah atau melapisi gambar perak menjadi senyawa perak yang lebih inert, kurang halus terbagi dan kurang larut dibandingkan dengan partikel gambar perak asli.

Citra perak dapat diubah menjadi perak sulfida (atau perak selenida). Perak sulfida dan perak selenida memiliki warna coklat dan ungu, jauh lebih hangat dari pada gambar perak biasa, sehingga proses ini sering disebut sebagai toning sepia. Pengencangan selenida perak menyediakan cara untuk mendapatkan gambar yang sangat stabil dan lebih murah daripada

pengencangan warna emas, yang menghasilkan gambar paling stabil. Namun, senyawa selenium bersifat toksik, seperti juga sulfida, dan harus ditangani dengan hati-hati. Memang, semua larutan toning harus ditangani dengan hati-hati dan dibuang dengan hati-hati. Pengencangan sulfida mungkin merupakan bentuk pengencangan yang paling banyak digunakan, dan dilakukan dengan benar menghasilkan gambar yang sangat permanen. Selain itu, larutan emas pelindung telah diusulkan untuk keabadian arsip cetakan. Mereka melibatkan pencelupan bahan cetakan yang dicuci bersih dalam campuran encer emas klorida dan natrium tiosianat (Kodak Gold Protective Solutions GP1 dan GP2). Mereka memberikan perlindungan cetak sementara mengubah nada gambar hanya sedikit.

## **Harapan Hidup Digital Printing**

Pelestarian dan konservasi cetakan digital adalah salah satu perhatian kontemporer utama komunitas pencitraan, terutama karena umur panjang file gambar digital menderita perubahan cepat dari teknologi dan keusangan media. Sejumlah ahli pengawetan gambar digital menyarankan bahwa cara pertama dan paling sederhana untuk mempertahankan gambar digital yang paling berharga adalah dengan membuat cetakan hardcopy dan menyimpannya dalam kondisi optimal. Teknologi dan media relatif baru sementara evolusinya sangat cepat. Inti dari evolusi ini adalah kualitas gambar dan cetakan permanen. Keabadian cetakan digital sangat bervariasi dengan teknologi pencetakan, bahan pencetakan dan karakteristik pewarna yang digunakan untuk memproduksinya. Ini juga bervariasi dengan tampilan dan lingkungan penyimpanan yang harus dipertimbangkan secara terpisah ketika umur panjang media dipertanyakan. Cetakan berwarna digital dihasilkan dari bahan yang komposisinya berbeda dengan bahan fotografi konvensional dan dalam responsnya terhadap faktor lingkungan yang merusaknya. Sayangnya, saat ini tidak ada standar ANSI atau ISO yang mendefinisikan umur panjang cetakan digital. (Komite Teknis ISO 42 tentang Standar Fotografi - pada saat menulis - bekerja menuju pengembangan standar tersebut untuk mendukung teknologi baru.) Prognostik tentang harapan hidup media digital dibuat secara eksklusif dengan menggunakan teknik percepatan fading, yang mana kondisi tidak disetujui secara universal. Seperti halnya media analog, sering diperdebatkan bahwa dalam mempercepat prosedur penuaan, produsen tidak mengikuti metodologi yang sama, sehingga prediksi laju fading tidak dapat dibandingkan. Selain itu, sebagian besar prediksi harapan hidup yang dipublikasikan hanya didasarkan pada hasil pengujian paparan cahaya, yang hanya menyumbang satu dari kemungkinan penyebab kerusakan cetakan. Sampai pedoman universal diterbitkan, rekomendasi penyimpanan harus serupa dengan yang ditentukan untuk cetakan berwarna konvensional.

## **Teknologi Percetakan dan media**

Teknologi cetak inkjet adalah teknologi yang paling umum digunakan dalam produksi cetakan berkualitas fotografi digital, sebagian besar disebabkan oleh fakta bahwa teknologi ini memungkinkan rentang pewarna dan pigmen yang lebih banyak daripada proses pencetakan lainnya. Struktur cetakan inkjet mengatur sebagian integritasnya di masa depan. Tinta dapat dibuat dari pewarna, mirip dengan yang digunakan dalam cetakan foto tradisional, atau pigmen, yang juga digunakan dalam toner. Tautan berbasis pigmen memberikan stabilitas yang lebih baik karena pigmen kurang sensitif terhadap air, kelembapan, dan suhu tinggi dibandingkan pewarna. Dari sudut pandang permanen tinta berbasis pigmen lebih baik daripada tinta berbasis pewarna dalam segala hal. Mereka biasanya diharapkan mencapai lebih dari 100 tahun pada tampilan atau 250 tahun dalam kondisi penyimpanan yang aman; namun, ini sangat bergantung pada permukaan pencetakan. Selama bertahun-tahun, kekurangan media berbasis pigmen terkait dengan masalah kualitas gambar, termasuk pengurangan nada warna, masalah kilap

yang berbeda pada kertas foto yang mengkilap, masalah metamerisme, dan lain-lain. Saat ini, kualitas gambar dari tinta/media berbasis pigmen dengan cepat mendekati, dan dalam beberapa kasus melebihi, kualitas gambar dari tinta/media berbasis pewarna. Di sisi lain, tinta berbasis pewarna mengandung zat pewarna molekuler yang menembus permukaan. Generasi awal tinta semacam itu memiliki masa pakai tampilan yang sangat buruk (seringkali kurang dari 10 tahun) tetapi, karena teknologi pencetakan dan kimia pewarna berkembang pesat, masa pakai tampilan cetak telah meningkat sepuluh kali lipat, sambil tetap mempertahankan kekayaan warna yang melekat pada pewarna.

Cetakan inkjet dibuat di atas kertas yang tidak dilapisi atau dilapisi. Kertas yang tidak dilapisi menyerap tinta dengan lebih baik, tetapi kertas berpelapis menghasilkan cetakan dengan kualitas foto. Kertas yang dilapisi memiliki dasar pendukung yang mirip dengan kertas cetak berwarna tradisional. Basis kertas bebas asam, bebas lignin dan buffer umumnya direkomendasikan untuk umur panjang. Dua jenis utama tersedia untuk pencetakan inkjet: kertas pelapis yang dapat membengkak dan berpori. Kertas swellable berkualitas tinggi membungkus pewarna inkjet. Mereka memiliki lapisan atas pelindung, lapisan yang menahan tetesan tinta di tempatnya dan lapisan yang menyerap komponen tinta tambahan. Dasar kertas ditempatkan di antara dua lapisan polietilen dan didukung oleh lapisan anti-ikal dan lapisan antistatis. Kertas swellable yang lebih murah tidak selalu mengandung semua lapisan ini. Kertas berlapis polimer yang dapat membengkak lebih terlindungi dari degradasi yang disebabkan oleh polutan atmosfer daripada kertas berpori tanpa polimer pelindung. Kurangnya lapisan pelindung pada kertas berpori membuat pewarna yang terpapar rentan terhadap polutan, seperti ozon, sulfur oksida dan nitrogen. Sebaliknya, cetakan pada kertas berpori lebih tahan terhadap kelembapan dan kelembapan, terutama bila digunakan dengan tinta berbahan pigmen. Uji penuaan dipercepat, yang dilakukan oleh Wilhelm Pencitraan Research Inc., baru-baru ini menunjukkan bahwa stabilitas penyimpanan gelap dari cetakan inkjet dibatasi oleh stabilitas termal (menguning) kertas berlapis modern daripada stabilitas tinta.

Penggunaan pencerah fluoresen (juga disebut pencerah UV), yang ditambahkan ke banyak kertas inkjet (dan hampir semua kertas biasa) untuk membuatnya tampak 'lebih putih' dari yang sebenarnya, merupakan masalah yang berkaitan dengan stabilitas kertas inkjet. Pencerah fluoresen kehilangan aktivitas, terutama saat terkena sinar dan radiasi UV, tetapi juga saat mengalami suhu tinggi yang digunakan dalam teknik penuaan yang dipercepat. Dengan hilangnya kecerahan, kertas tampak memiliki sedikit warna kuning. Oleh karena itu, disarankan untuk menghindari kertas permanen jangka panjang dengan pencerah.

Umumnya, semakin banyak kertas inkjet yang mengklaim properti 'arsip' kertas mereka, biasanya hingga 200+ tahun. Namun, karena tidak ada ukuran standar universal untuk umur panjang cetak inkjet, klaim umur panjang bervariasi tergantung pabrikan dan produk. Penelitian independen tentang keabadian cetak inkjet sering kali menunjukkan bahwa cetakan inkjet memiliki umur yang jauh lebih panjang bila dicetak pada media cetak bermerek produsen printer (yaitu kertas dan tinta).

## **Faktor permanen dan pengujian untuk Print digital**

Paparan cahaya saat menampilkan cetakan, suhu dan kelembapan tinggi, polutan atmosfer dan jamur, adalah faktor umum yang memengaruhi keabadian gambar dalam cetakan konvensional dan digital, meskipun tidak pada derajat yang sama. Karena kurangnya standar internasional untuk pengujian keabadian cetakan, banyak produsen menganggap Wilhelm Pencitraan Research Inc. sebagai standar independen yang dapat diandalkan untuk prediksi kelanggungan cetakan digital. Untuk sebagian besar jenis cetakan digital, pemudaran cahaya adalah faktor

dominan keabadiannya. Prediksi pemudaran cahaya dari kalkulasi Wilhelm didasarkan pada kondisi pencahayaan dalam ruangan yang relatif tinggi dengan rata-rata 450 lux selama 12 jam, yang melampaui kondisi yang digunakan beberapa produsen percetakan dalam pengujian mereka, misalnya, metode Kodak yang diterbitkan yang mengasumsikan 120 lux selama 12 jam. per hari. Pengujian dilakukan hingga jumlah pemudaran yang cukup mencolok terjadi, sementara 17 kriteria kegagalan dilacak. Secara tradisional, metode untuk mengevaluasi pemudaran cahaya memperhitungkan pemudaran pada bercak sian, magenta dan kuning, serta ketidakseimbangan pemudaran dan warna pada tambalan netral pada densitas tunggal 1,0 (dan untuk Pencitraan Wilhelm pada 0,6 juga). Metode ini tidak secara langsung mengatasi ketidakseimbangan pada semua jenis warna, termasuk rona kulit, dan inilah mengapa baru-baru ini kolorimetri daripada metode berbasis densitometri diusulkan.

Tes slow-fade juga dilakukan di lingkungan yang lebih gelap. Tes akselerasi untuk dark fading memerlukan tes jangka panjang pada temperatur tinggi, seperti 50-70°C. Hasilnya diekstrapolasi untuk prediksi temperatur ruangan umum. Setiap jenis media cetak memiliki karakteristik stabilitas penyimpanan gelapnya sendiri. Umumnya, cetakan inkjet tidak terlalu banyak mengalami pemudaran gelap, karena pewarna dan pigmen inkjet sangat stabil dan biasanya dapat bertahan 100+ tahun pada suhu kamar, asalkan diletakkan di atas kertas berkualitas tinggi dan relatif aman dari polutan atmosfer yang berbahaya. Cetakan transfer termal tidak dapat menahan suhu tinggi yang dibutuhkan oleh tes yang dipercepat dan oleh karena itu prediksi umur panjang jangka panjangnya tidak dibuat.

Hasil cetak digital yang disimpan dalam gelap mengalami penurunan kualitas yang rendah. Ini bermanifestasi sebagai kertas menguning, gambar memudar, perubahan keseimbangan warna, retak dan delaminasi lapisan gambar. Laju kerusakan dipengaruhi, seperti pada cetakan foto, oleh tingkat suhu dan RH. RH tinggi menyebabkan pewarna bermigrasi, menyebabkan 'pendarahan' warna dan kurangnya sharpness tepi, sementara itu mendorong pertumbuhan mikroba dan jamur. Pengujian melibatkan pemaparan cetakan ke tingkat kelembaban yang tinggi (misalnya 80%) selama berminggu-minggu dan evaluasi ketahanan cetakan warna sebagai hasil dari RH berdasarkan perubahan warna. Pencetakan inkjet berbasis elektrofotografi dan pigmen umumnya kurang sensitif terhadap suhu dan kelembaban tinggi daripada gambar fotografi tradisional dan cetakan inkjet berbasis pewarna, karena cetakan tersebut dibuat dengan pigmen daripada pewarna. Perilaku bahan inkjet sangat bervariasi dalam kondisi ini, tergantung pada apakah gambar tersebut pewarna atau pigmen dan apakah kertas tidak dilapisi, dapat membengkak atau berpori. Dalam kondisi lembab, gambar inkjet yang terdiri dari pewarna yang telah dicetak pada kertas berlapis swellable dapat tampak tidak tajam karena pewarna menyebar. Kerusakan akibat air, akibat banjir, dll., Merupakan faktor kerusakan umum yang lebih mempengaruhi cetakan inkjet berbasis warna daripada media cetak lainnya. Menggosok permukaan saat basah memperburuk kondisi cetakan. Cetakan berbasis pigmen relatif tahan air, bahkan saat dicetak di atas kertas biasa.

Gas dan polutan yang terbawa udara, terutama ozon, menyebabkan hasil cetakan inkjet memudar. Pengujian yang dipercepat melibatkan paparan ozon tingkat tinggi (>1 ppm) hingga pemudaran terlihat. Tahun-tahun ketahanan ozon kemudian dihitung berdasarkan data rata-rata dalam ruangan - mis. 40 ppm-jam ozon setara dengan satu tahun dalam kondisi dalam ruangan biasa. Umumnya, cetakan inkjet yang dibuat dengan kertas yang dapat membengkak atau dengan tinta berpigmen tahan terhadap polutan udara dan ozon selama beberapa dekade tanpa perlindungan apa pun. Sebaliknya, cetakan inkjet berbasis pewarna pada kertas foto berpori, misalnya kertas 'kering instan'. dapat mengalami pemudaran udara yang nyata dalam beberapa bulan setelah terpapar. Resistensi cetak transfer termal terhadap pemudaran gelap kurang spesifik; mungkin berkisar dari satu hingga beberapa dekade. Umumnya, kerusakan terkait

ozon diminimalkan dalam cetakan digital jika diframe di balik kaca, dilaminasi, atau disimpan dalam album. Tabel 15 menyajikan ringkasan masa pakai berbagai teknologi cetak di bawah tampilan dan penyimpanan yang didasarkan pada data dari Wilhelm Pencitraan Research dan HP Image Permanence Laboratory. Gambar 100 mengilustrasikan pemudaran pewarna pada cetakan inkjet karena paparan polutan yang tinggi dan atmosfer

<b>Tabel 15 Ringkasan berdasarkan Penelitian Wilhelm dan Data Permanen Gambar HP</b>			
<b>TEKNOLOGI PRINT</b>	<b>DISPLAY (PROTEKSI KACA)</b>	<b>TAHAN AIR FADING</b>	<b>PENYIMPANAN</b>
Digital silver halide	12-40 tahun tergantung merek	Dekade	100+ tahun dengan kualitas pemrosesan
Inkjet	100+ tahun untuk cetakan tinta/kertas bermerek, tetapi secara signifikan lebih sedikit untuk kombinasi lain	Puluhan tahun untuk pigmen atau pewarna pada kertas enkapsulasi. Bulan untuk kebanyakan pewarna pada kertas berpori	100-200 tahun tergantung merek
Transfer termal	Khas 4-8 tahun	Dekade untuk sebagian besar merek	Saat ini tidak diketahui
Dari Miller (2005)			

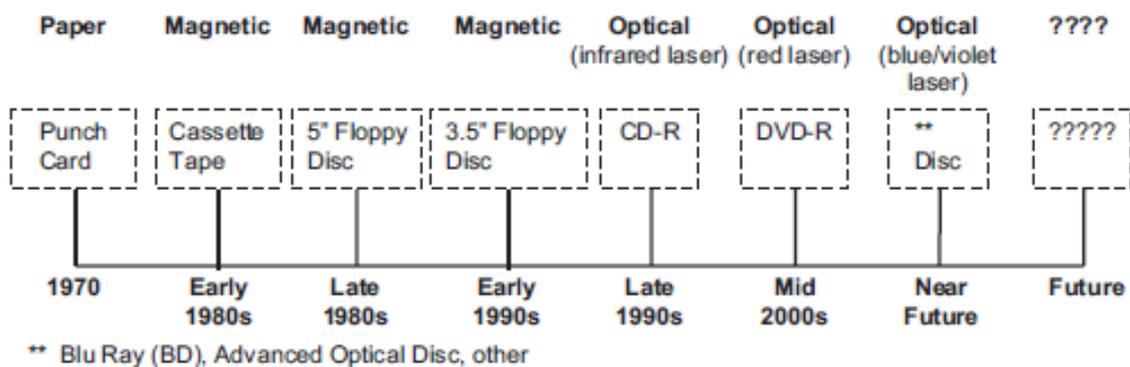


**Gambar 100** (a) Cetakan inkjet dalam keadaan aslinya. (b) Simulasi efek pemudaran cahaya pada cetakan inkjet: magentadye memudar lebih cepat daripada pewarna cyan dan kuning saat terkena cahaya, menghasilkan bayangan hijau pada cetakan. (c) Simulasi efek polutan atmosfer: memudarnya pewarna cyan dan magenta menghasilkan cetakan kuning. Gambar Asli Pygmalion Kalimeris

### **Penyimpanan gambar digital dan Usia penyimpanan**

Kita melihat bahwa media elektronik, selain potensi degradasi fisik dan kimiawi, memiliki masalah keusangan. Sayangnya, meskipun kondisi media dan penyimpanan terbaik dipastikan, keberhasilan dalam mengamankan umur panjang gambar digital hanya sebagian, karena tidak mungkin mengandalkan perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan untuk menyimpan gambar digital yang tersedia di masa mendatang. Fakta ini telah terwujud selama bertahun-tahun tetapi solusinya tidak sederhana atau jelas. Salah satu saran adalah bahwa data harus ditransfer dari media penyimpanan lama ke media baru jika sudah tersedia. Proses ini dikenal sebagai migrasi data. Disarankan bahwa kelanggengan penyimpanan digital harus dipertimbangkan sebagai ukuran periode pembaruan. Tidak ada degradasi dalam proses

migrasi, karena informasi digital, tidak seperti bentuk informasi lainnya, memiliki keuntungan duplikasi tanpa kehilangan. Bergantung pada jumlah data gambar, migrasi mungkin sangat menantang. Ini memakan waktu dan membutuhkan keseluruhan sistem untuk manajemen data. Namun, sangat tidak mungkin material, format, dan teknik kompresi yang ada dapat diandalkan selama lebih dari beberapa dekade. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 101, media digital yang digunakan hingga 20 tahun yang lalu sudah tidak kompatibel dengan sebagian besar sistem saat ini. Hal ini menimbulkan masalah bagi seniman yang peduli dengan umur panjang karyanya, arsiparis yang ingin melestarikan warisan visual dan individu yang ingin mewariskan foto mereka kepada generasi mendatang. Oleh karena itu, migrasi data digital dari satu media dan format ke yang lebih baru merupakan persyaratan penting meskipun ada kesulitan.

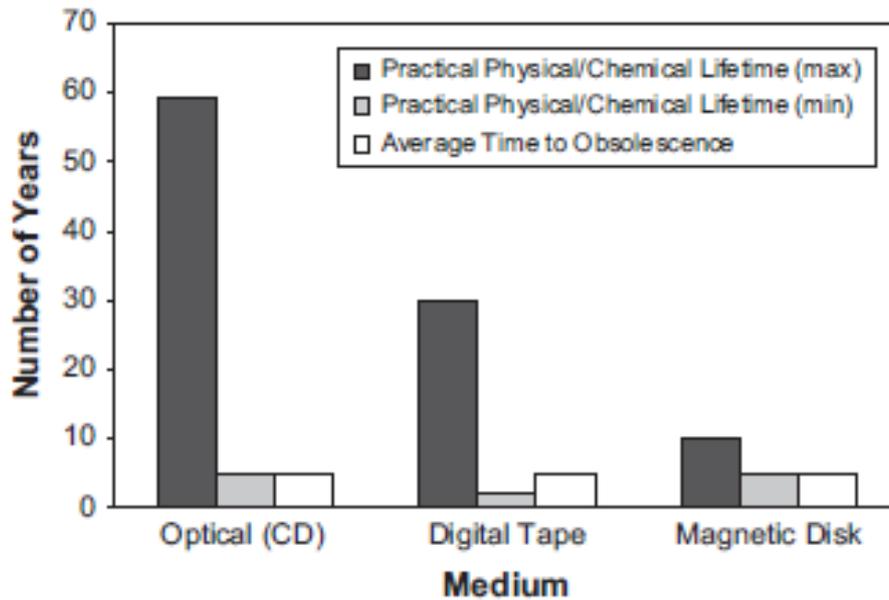


**Gambar 101** Garis waktu yang menggambarkan perkembangan media penyimpanan digital lepasan yang umum. Diadaptasi dari Byers (2003)

Media penyimpanan modern memiliki dua harapan hidup: satu mengacu pada waktu hidup fisik dan kimiawi dan yang lain mengacu pada waktu kedaluwarsa yang diharapkan. Rothenberg (1999) telah merangkum masalah tersebut:

Belum ada strategi jangka panjang yang memungkinkan untuk memastikan bahwa informasi digital dapat dibaca di masa depan. Dokumen digital rentan terhadap kehilangan melalui pembusukan dan keusangan media tempat mereka disimpan, dan menjadi tidak dapat diakses dan tidak dapat dibaca ketika perangkat lunak yang diperlukan untuk menafsirkannya, atau perangkat keras yang menjalankan perangkat lunak tersebut, menjadi usang dan hilang.

Gambar 102 memberikan indikasi waktu-waktu ini untuk beberapa media penyimpanan yang umum digunakan dan selanjutnya memperkuat pandangan bahwa migrasi data itu penting. Angka tersebut juga menunjukkan bahwa migrasi harus dilakukan dalam rentang umur harapan hidup kimia/fisik medium. Media penyimpanan memiliki kesesuaian yang bervariasi sesuai dengan kapasitas penyimpanan yang dibutuhkan dan pengawetan atau akses yang dibutuhkan



**Gambar 102** Harapan hidup media penyimpanan digital umum. Berdasarkan data dari Rothenberg (1999)

### Perangkat penyimpanan magnetis

Media penyimpanan magnetik menggunakan permukaan yang dilapisi magnet untuk menyimpan informasi. Mereka adalah media yang dapat ditulis ulang dan informasi diakses dan dibaca dan ditulis oleh kepala magnet. Perangkat penyimpanan gambar magnetik yang paling umum adalah hard disk (tetap atau portabel) dan pita magnetik (biasanya dalam kartrid dan kaset). Pada hard disk, informasi digital diakses secara acak dan karenanya sangat cepat; dalam pita magnetik itu diakses secara berurutan. Meskipun keandalan media magnetis telah meningkat secara substansial dalam beberapa tahun terakhir, integritasnya sangat bervariasi dari pabrikan ke pabrikan. Peningkatan yang sangat pesat pada ruang disk dan kecepatan akses data pada hard disk membuatnya sangat cocok sebagai media penyimpanan yang ‘berfungsi’. Pita magnetik, sebaliknya, harganya murah, dan memiliki kapasitas data yang besar (biasanya 20e40 GB) tetapi masa pakai yang pendek. Inilah sebabnya mengapa mereka disarankan untuk menyimpan salinan tambahan (cadangan) dalam pengarsipan gambar (di mana akses cepat dan sering tidak diperlukan), asalkan kaset diganti setiap tahun.

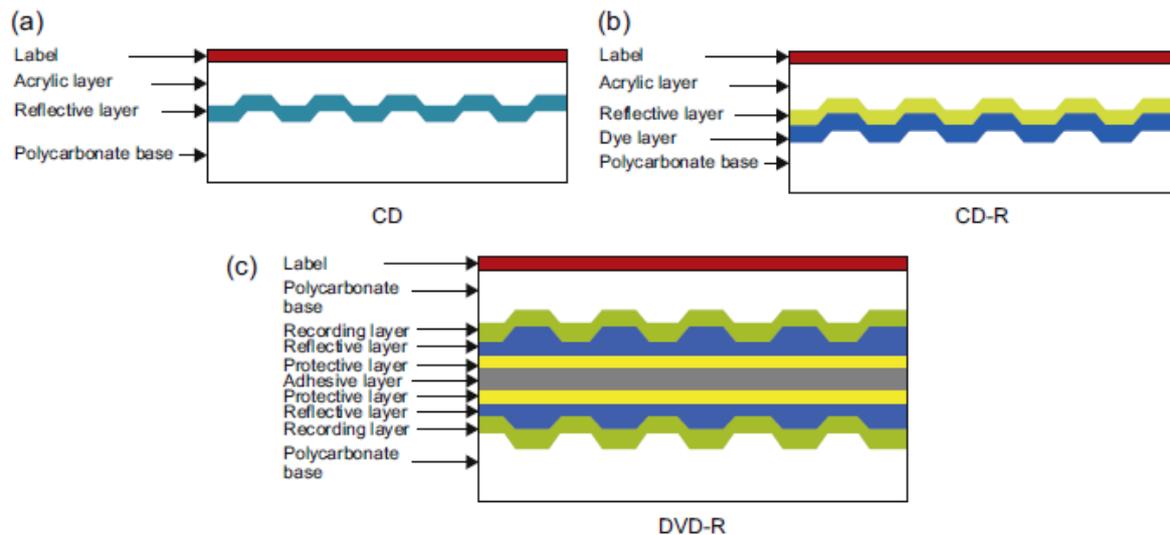
Kelemahan media magnetis terletak pada caranya membaca dan menulis informasi; jadi, umur panjang bukanlah salah satu keuntungan mereka. Mereka mengalami degradasi dari medan magnet intensitas tinggi. Hard disk memerlukan kisaran tekanan udara tertentu agar dapat beroperasi dengan baik dan tingkat kelembapan yang sangat tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada head dan korosi. Penggunaan normal pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan perangkat yang agak rapuh ini, jadi sering-seringlah mencadangkan gambar. Pita magnetik harus disimpan dalam kondisi sejuk, kualitas udara baik dan maksimum 50% RH untuk pengawetan terbaik. Degradasi pengikat dapat menyebabkan pengangkutan pita dan pemisahan lapisan yang tidak merata. Pita perekat perlu ditangani dengan hati-hati karena tipis dan rapuh.

## Penyimpanan Optikal Disk

Penyimpanan paling populer untuk gambar digital adalah penyimpanan disk optik, termasuk jenis seperti CD-ROM, CD-R, CD-RW, DVD, DVD-R dan DVD-RW. Drive disk optik menggunakan dioda laser untuk menerangi informasi yang diukir sebagai lubang pada lapisan reflektif disk (yaitu tanah). Dalam kasus CD-ROM yang hanya dapat dibaca, sinar laser dipantulkan kembali dari permukaan logam reflektif (aluminium atau emas), yang sangat dekat dengan bagian atas disk, ke sensor yang ‘membaca’ informasi tersebut; ketika lubang ditemukan balok tidak dipantulkan kembali. Akses acak cepat adalah hasil dari urutan sektor berkelanjutan pada tata letak spiral dari disk. Struktur dasar CD-ROM, CD-R dan DVD-R ditunjukkan pada Gambar 103. CD-R yang dapat ditulis memiliki struktur yang sedikit berbeda dari CD-ROM, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 103, di mana lubang direkam dalam lapisan pewarna dalam alur pemandu di mana berkas perekam mengubah pewarna menjadi produk yang menghalangi refleksi. Di atas lapisan pewarna adalah area metalik reflektif dan di atasnya ada lapisan pernis pelindung. Jenis data (yaitu hanya baca, dapat direkam atau ditulis ulang) dan lapisan perekaman bergantung pada jenis disk. Tabel 13 menunjukkan hubungan antara tipe data yang disimpan pada berbagai media optik, lapisan logam dan tipe disk.

Media CD-ROM dan DVD adalah media penyimpanan read-only, CD-R, DVD-R dan DVD±R dapat direkam sekali, dan CDRW, DVD-RW dan DVD±RW dapat digunakan untuk merekam ulang informasi digital. Mereka adalah media yang dapat dilepas, yang dapat digandakan dan ditangani dengan mudah. CD-R lebih disukai untuk pengarsipan gambar karena kemampuannya menulis sekali, yang memberikan keamanan tinggi dari penghapusan atau modifikasi data.

CD dapat mengalami kerusakan, dan masa pakai sekitar 100 tahun merupakan perkiraan yang masuk akal berdasarkan kondisi penyimpanan sedang, yang ditunjukkan pada Gambar 102. Seperti media non-elektronik lainnya, media mungkin terpengaruh oleh kondisi penyimpanan yang buruk, penanganan, goresan, dll., Meskipun lebih toleran terhadap goresan daripada kebanyakan media lainnya. Ini karena sinar laser pembacaan difokuskan pada pit (lihat Gambar 103), agak jauh dari permukaan disk tempat goresan berada, dan tidak fokus. Terlepas dari kerusakan fisik yang lebih jelas, CD dapat memburuk melalui oksidasi lapisan logam reflektif, yang pada CD awal adalah aluminium. Dalam paduan aluminium CD yang lebih baru digunakan, yang lebih tahan terhadap oksidasi, dan emas digunakan dalam CD yang dapat ditulis, yang tidak mudah teroksidasi. Sama halnya dengan media hard copy, perubahan kimiawi yang lambat akan menyebabkan degradasi data dalam jangka waktu yang lama, seperti pemudaran warna gelap dan terang dalam disk CD-R dan oksidasi lapisan reflektif logam dalam CD-ROM.



Gambar 103 Penampang melintang dari: (a) CD-ROM; (b) CD-R; (c) DVD-R.

Masalah lain yang dapat terjadi di CD dan harus diwaspadai adalah:

- Difusi pelarut dari label
- Mengupas label, yang dapat menyebabkan delaminasi lokal
- Difusi pelarut dari spidol untuk menandai dan mengidentifikasi disk
- Menulis di atas disk dengan bolpoin atau pensil
- Membersihkan dengan pelarut
- Paparan sinar matahari
- Penyimpanan pada suhu lebih dari 25°C dan RH lebih besar dari 50%
- Perubahan suhu dan kelembapan yang tiba-tiba dan cepat
- Terkena debu dan kotoran
- Menangani permukaan.

Prediksi harapan hidup CD berasal dari tes penuaan dipercepat yang sangat mirip dengan yang dijelaskan sebelumnya untuk fotografi dan media terkait dan ekstrapolasi ke kondisi penyimpanan 25°C pada 40% RH. Harapan hidup didasarkan pada kesalahan keterbacaan dalam data yang disimpan di disk. Ini dapat ditentukan sebagai tingkat kesalahan blok (BLER). BLER adalah jumlah kesalahan yang terdeteksi dalam periode 10 detik dan dapat dinyatakan sebagai BLER maks 50, di mana maks mengacu pada BLER maksimum yang ditemukan saat membaca disk dan 50 mengacu pada akhir -hidup dari 50 kesalahan. Ini adalah data elektronik yang setara dengan nilai pudar 10% untuk materi hard copy, misalnya. Namun, telah ditunjukkan bahwa sebagian besar disk masih dapat dibaca dengan BLER maks 50 dan tes ini memberikan ukuran harapan hidup yang pesimis.

Seperti semua bahan yang mengalami degradasi kimiawi dalam jangka waktu yang lama, harapan hidup CD dapat diperpanjang secara substansial dengan penyimpanan pada suhu yang lebih rendah 10°C dan RH dalam kisaran 20-50%. Ini memperlambat laju reaksi kimia yang mungkin terjadi. Disk yang digunakan sehari-hari cenderung bertahan lebih lama daripada disk yang merupakan salinan arsip cadangan yang disimpan dalam kondisi yang konsisten dan terkontrol.

<b>Tabel 16 Jenis Disk, read/type record, data layer dan metal layer</b>				
<b>CD</b>	<b>DVD</b>	<b>TYPE</b>	<b>DATA LAYER</b>	<b>METAL LAYER</b>
CD-ROM	DVD-ROM	Read-only	Warna dibentuk	Alumunium (termasuk juga silikon, emas atau perak pada DVD double-layer)
CD-R	DVD-R	Recordable	Pewarna Organik	Emas, perak atau perpaduan perak
	DVD+R	(write once only)		
CR-RW	DVD-RW	Rewritable	Fase-mengubah film paduan logam	Alumunium
	DVD+RW	(write, erase and rewrite)		
	DVD-RAM			

Dianjurkan untuk menggunakan ISO 9660 untuk merekam pada media CD, karena memastikan akses data yang disimpan dari semua platform komputer dan sistem operasi saat ini. ISO 9660 adalah standar internasional yang diterbitkan pada tahun 1988, yang mendefinisikan metode pengorganisasian file komputer untuk media CD-ROM. Perpanjangan ke ISO 9660, format sistem Joliet, memungkinkan nama file yang lebih panjang dan kumpulan karakter non-ASCII. DVD juga dapat menggunakan sistem file ISO 9660, meskipun Universal Disk Format (UDF), berdasarkan standar ISO 13346: 1995, lebih sesuai pada DVD. Ini memiliki dukungan yang lebih baik untuk media penyimpanan yang lebih besar dan lebih sesuai dengan kebutuhan sistem operasi modern. Penulis CD dan DVD sudah umum dan murah saat ini. Disk jenis CD dapat menyimpan lebih dari 600 MB, kapasitas yang agak terbatas untuk ukuran gambar kontemporer tetapi harganya sangat murah. DVD adalah media penyimpanan optik terbaru dengan kapasitas untuk menyimpan 4.7e18.0 GB.

### **Masalah pengarsipan gambar digital lainnya**

Media penyimpanan gambar lainnya Termasuk kartu flash dan solid-state disk (SSD) yang memiliki akses data sangat cepat dan sebagian besar digunakan sebagai perangkat penyimpanan sementara pada kamera digital. Angka harapan hidup media tersebut sulit diperoleh dan belum diteliti secara mendalam. Jika tidak, penyimpanan jarak jauh di mana file gambar digital disimpan di server besar dan umur panjangnya adalah tanggung jawab penyedia layanan menjadi semakin populer, terutama dari lembaga yang menyimpan informasi digital dalam jumlah besar. Salah satu contoh layanan tersebut adalah Digital Repository Service (DRS) dari Perpustakaan Universitas Harvard di AS, yang merupakan tempat penyimpanan yang menyimpan jutaan objek digital di bawah penyimpanan terkelola dan ditujukan untuk aset digital yang sangat 'dikurasi'.

Yang terbaik untuk data gambar digital yang tahan lama adalah menyimpan satu salinan gambar dalam bentuk yang sedekat mungkin dengan pengambilan aslinya. Hal ini memungkinkan pengguna untuk selalu dapat merujuk kembali ke salinan 'master'. yang paling

baik dihasilkan oleh perangkat penangkap dengan pemrosesan minimum. Dalam kasus seperti itu, gambar mungkin tidak dioptimalkan untuk keluaran tertentu. Mengarsipkan hanya salinan yang dioptimalkan sering kali menghasilkan penurunan kualitas, seperti kompresi colour gamut asli, tetapi memiliki keuntungan berupa gambar yang siap digunakan. Jika hanya satu versi optimal dari file gambar yang disimpan, direkomendasikan untuk memilih salah satu ruang warna RGB standar untuk pengkodean warna, misalnya, Adobe RGB 1998 untuk media cetak dan sRGB untuk media tampilan.

Persyaratan format file untuk pengarsipan adalah bahwa itu adalah format file standar terbuka, nonpemilik dan lebih disukai tidak ada kompresi yang digunakan meskipun kompresi lossless dapat diterima. Format File Gambar Tagged Terkompresi (TIFF) telah menjadi pilihan paling populer untuk pengarsipan gambar. Pada tahun 2004 Adobe mengusulkan format Digital Negative (DNG) sebagai format file non-kepemilikan untuk menyimpan file RAW kamera yang dapat digunakan oleh berbagai vendor perangkat keras dan perangkat lunak. Seperti kebanyakan format file RAW, file DNG menyimpan data RAW dalam format berbasis TIFF. DNG dengan cepat menjadi pilihan untuk tujuan pengarsipan gambar. Format file Portable Network Graphics (PNG) adalah format gambar sumber terbuka yang berfungsi untuk standarisasi resmi, dan dianggap sebagai kemungkinan pengganti TIFF. Sebaliknya, JPEG 2000, yang bisa menjadi lossy atau lossless tergantung pada algoritma kompresi, baru-baru ini direkomendasikan untuk pengarsipan gambar karena beberapa keuntungan, seperti penyimpanan beberapa tingkat resolusi, penyisihan metadata gambar dibangun ke dalam file gambar dan dukungan kedalaman bit hingga 48 bit.

File gambar digital yang dimaksudkan untuk pengawetan harus disertai dengan metadata gambar. Metadata pengawetan adalah informasi yang mendukung proses pengawetan digital. Sejumlah kategori metadata dapat disimpan, termasuk deskriptif, administratif (termasuk hak cipta dan izin), teknis (termasuk informasi tentang reproduksi nada dan warna, resolusi, dll. Dari perangkat penangkap) dan struktural. Metadata teknis mungkin yang paling penting dalam mendukung pelestarian. Standar ANSI/NISO Z39.87 2006 tentang Metadata Teknis untuk Gambar Diam menjabarkan serangkaian elemen metadata untuk memfasilitasi interoperabilitas antara sistem, layanan dan perangkat lunak, serta untuk mendukung akses berkelanjutan dan manajemen jangka panjang dari koleksi gambar digital.

## DAFTAR PUSTAKA

- Freeman, M., 1990. Optics, tenth ed. Butterworths, London, UK.
- Hecht, E., 2002. Optics, fourth ed. Addison-Wesley, San Francisco, CA, USA.
- Jacobson, R.E., Ray, S.F., Attridge, G.G., Axford, N.R., 2000. The Manual of Photography, ninth ed. Focal Press, Oxford, UK.
- Jenkins, F., White, H., 1981. Fundamentals of Optics, fourth ed. McGraw-Hill, London, UK.
- Kingslake, R., 1992. Optics in Photography. SPIE, Bellingham, WA, USA.
- Ray, S., 2002. Applied Photographic Optics, third ed. Focal Press, Oxford, UK.
- Bracewell, R.N., 1999. The Fourier Transform and its Applications, third ed. McGraw-Hill, New York, USA.
- Castleman, K.R., 1996. Digital Image Processing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Gleason, A., (translator), et al., 1995. Who Is Fourier? A Mathematical Adventure. Transnational College of LEX Blackwell Science, Oxford, UK.
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E., Eddins, S.L., 2004. Digital Image Processing Using MATLAB. Pearson Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Goodman, J.W., 1996. Introduction to Fourier Optics (Electrical and Computer Engineering), second ed. McGraw-Hill, New York, USA.
- Hecht, E., 1987. Optics, second ed. Addison-Wesley, Reading, MA, USA.
- Jacobson, R.E., Ray, S.F., Attridge, G.G., Axford, N.R., 2000. The Manual of Photography, ninth ed. Focal Press, Oxford, UK.
- Proudfoot, C.N., 1997. Handbook of Photographic Science and Engineering, second ed. IS&T, Springfield, VA, USA.
- Adams, A., 1981. The Negative. Little, Brown and Co., Boston, MA, USA.
- Alleysson, D., Meylan, L., Süssstrunk, S., 2006. HDR CFA image rendering. Proc. EURASIP 14th European Signal Processing Conference, Florence, Italy, 4e8 September.
- Hertel, D., 2009. Extended use of incremental signal-to-noise ratio as reliability criterion for multiple-slope wide dynamic range image capture. Journal of Electronic Imaging, Volume 19, Issue 1.
- Jacobson, R., Ray, S., Attridge, G.G., Axford, N.R., 2000. The Manual of Photography. Focal Press, Oxford, UK.
- Johnson, G.M., Fairchild, M.D., 2003. Rendering HDR images. Proc. IS&T/ SID 11th Color Imaging Conference, Scottsdale, pp. 36e41.

- Kuang, J., Yamaguchi, H., Liu, C., Johnson, G.M., Fairchild, M.D., 2007. Evaluating HDR rendering algorithms. *ACM Transactions on Applied Perception*, 4, Article 9.
- Lukac, R., 2009. *Single Sensor Imaging: Methods and Applications for Digital Cameras*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA.
- Meadhra, M., Lowrie, C.K., 2006. *Exposure and Lighting for Digital Photographers Only*. John Wiley, Indianapolis, Indiana, USA.
- Peres, M.R., 2007. *The Focal Encyclopedia of Photography*, fourth ed. Focal Press, Oxford, UK.
- Rand, G., 2008. *Film and Digital Techniques for Zone System Photography*. Amherst Media.
- Reinhard, E., Ward, G., Pattanaik, S., Debevec, P., 2005. *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, USA.
- Salvaggio, N.L., 2008. *Basic Photographic Materials and Processes*, third ed. Focal Press, Oxford, UK.
- Saxby, G., 2001. *The Science of Imaging: An Introduction*. Taylor & Francis, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia.
- Schaefer, J.P., 1999. *The Ansel Adams Guide, Book 1: Basic Techniques of Photography*. Little, Brown and Co., Boston, MA, USA.
- Stone, H., Sidel, J.L., 2004. *Sensory Evaluation Practices*. Academic Press, Oxford, UK.
- Stroebel, L.D., Current, I., Compton, J., Zakia, R.D., 2000. *Basic Photographic Materials and Processes*. Focal Press, Oxford, UK.
- Dougherty, E.R., 1999. *Electronic Imaging Technology*. SPIE Press, Bellingham, WA USA.
- Gonzales, R.C., Woods, R.E., 2002. *Digital Image Processing*. Prentice Hall, New Jersey.
- Gunturk, B.K., Glotzbach, J., Altunbasak, Y., Schafer, R.W., Mersereau, R.M., 2005. Demosaicking: color filter array interpolation. *IEEE Signal Processing Magazine*, 44e54. January.
- Hunt, R.W.G., 2004. *The Reproduction of Colour*, sixth ed. John Wiley, Chichester UK.
- International Standards Organization (ISO) 21550:2004 2004. *Photography - Electronic Scanners for Photographic Images - Dynamic Range Measurements*.
- Jacobson, R.E.J., Ray, S.F.R., Attridge, G.G., Axford, N.R., 2000. *The Manual of Photography*, ninth ed. Focal Press, Oxford UK.
- Keys, R.G., 1981. Cubic convolution interpolation for digital image processing. *IEEE Transactions in Acoustics, Speech, Signal Processing* 29, 1153e1160.
- Langford, M.L., Bilissi, E., 2007. *Langford 's Advanced Photography*, seventh ed. Focal Press, Oxford UK.

- Lee, J., Jung, Y., Kim, B., Ko, S., 2001. An advanced video camera system with robust AF, AE, and AWB control. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 47 (3), 694e699.
- Lukac, R., 2008. *Single-Sensor Imaging, Methods and Applications for Digital Cameras*. CRC Press, Boca Raton, FL USA.
- Nakamura, J., 2006. *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*. CRC Press, Boca Raton, FL USA.
- Parulski, K., Rabbani, M., 2000. Continuing evolution of digital cameras and digital photography systems. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 28e31. May, Geneva, Switzerland.
- Ramanath, R., Snyder, W.E., Yoo, Y., Drew, M.S., 2005. Color image processing pipeline: a general survey of digital still camera processing. *IEEE Signal Processing Magazine*, January, 40-44.
- Sharma, G., 2003. *Digital Color Imaging Handbook*. CRC Press, Boca Raton, FL USA.
- Stroebel, L.D., Current, I., Compton, J., Zakia, R.D., 2000. *Basic Photographic Materials and Processes*, second ed. Focal Press, Oxford UK.
- Sturge, J.M., Walworth, V., Shepp, A. (Eds.), 1989. *Imaging Processes and Materials - Neblette 's*, eighth ed. John Wiley, New York, USA.
- Triantaphillidou, S., 2001. *Aspects of Image Quality in the Digitisation of Photographic Collections*. Ph.D. thesis, University of Westminster, Harrow, UK.
- Vrhel, M., Saber, E., Trussell, H.J., 2005. Color image generation and display technologies, an overview of methods, devices, and research. *IEEE Signal Processing Magazine*, 23e33. January.
- Wueller, D., 2002. Measuring scanner dynamic range. *Society for Imaging. Science and Technology (IS&T) PICS Conference*, Portland, OR, pp. 163e166.