IF4020 Kriptografi

21 – Digital Watermarking

Oleh: Rinaldi M

Program Studi Teknik Informatika
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
InstitutTeknologi Bandung
2026

Prolog

”Sebuah gambar bermakna lebih dari seribu kata”

(*A picture is more than a thousand words*)

Termasuk gambar-gambar animasi ini

Fakta

- Jutaan gambar/citra digital bertebaran di internet via *email*, *website*, *bluetooth*, dsb

- Siapapun bisa mengunduh citra dari internet, meng-*copy*-nya, menyunting, mengirim, memanipulasi, dsb.

- Memungkinkan terjadi pelanggaran HAKI:

  - mengklaim citra orang lain sebagai milik sendiri (pelanggaran kepemilikan)

  - meng-*copy* dan menyebarkan citra tanpa izin pemilik (pelanggaran *copyright*)

  - mengubah konten citra sehingga keasliannya hilang

Kasus 1: Alice dan Bob sama-sama mengklaim gambar ini miliknya

Siapa pemilik gambar ini sesungguhnya? Hakim perlu memutuskan!

Kasus 2: Alice memiliki sebuah gambar UFO hasil jepretannya. Bob menggandakan dan menyebarkannya tanpa izin dari Alice

Kasus 3: Alice memiliki sebuah gambar hasil fotografi. Bob memodifikasi gambar tersebut dengan menggunakan Photoshop

Mana gambar yang asli?

Original

Hasil pengubahan

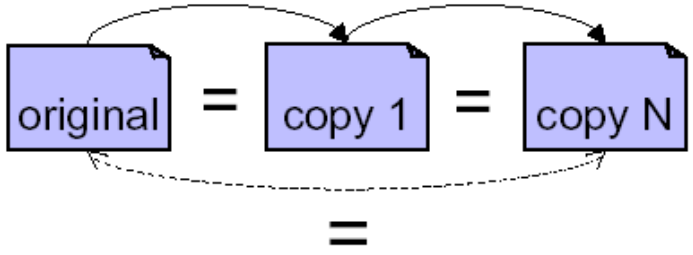
(a) Clinton and Monica

Foto mana yang asli?

(b) Clinton and Hillary

Semua kasus-kasus di atas karena karakteristik (kelebihan sekaligus kelemahan) gambar digital adalah:

- Tepat sama kalau digandakan



- Mudah didistribusikan (misal: via internet)

- Mudah di-edit (diubah) dengan *software*

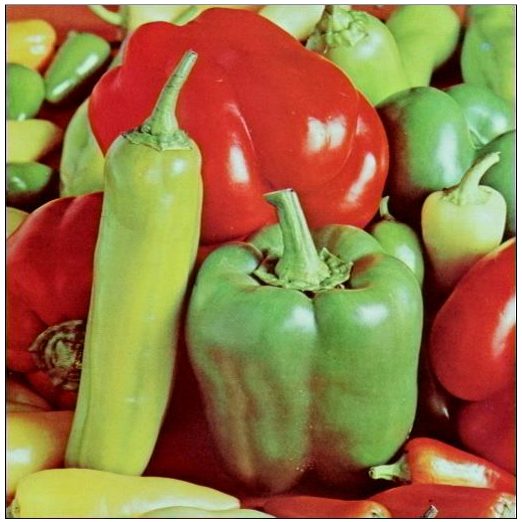
Tidak ada perlindungan terhadap citra digital!!!!

Solusi untuk masalah perlindungan citra di atas adalah:

Image Watermarking!!!!!!

Image Watermarking

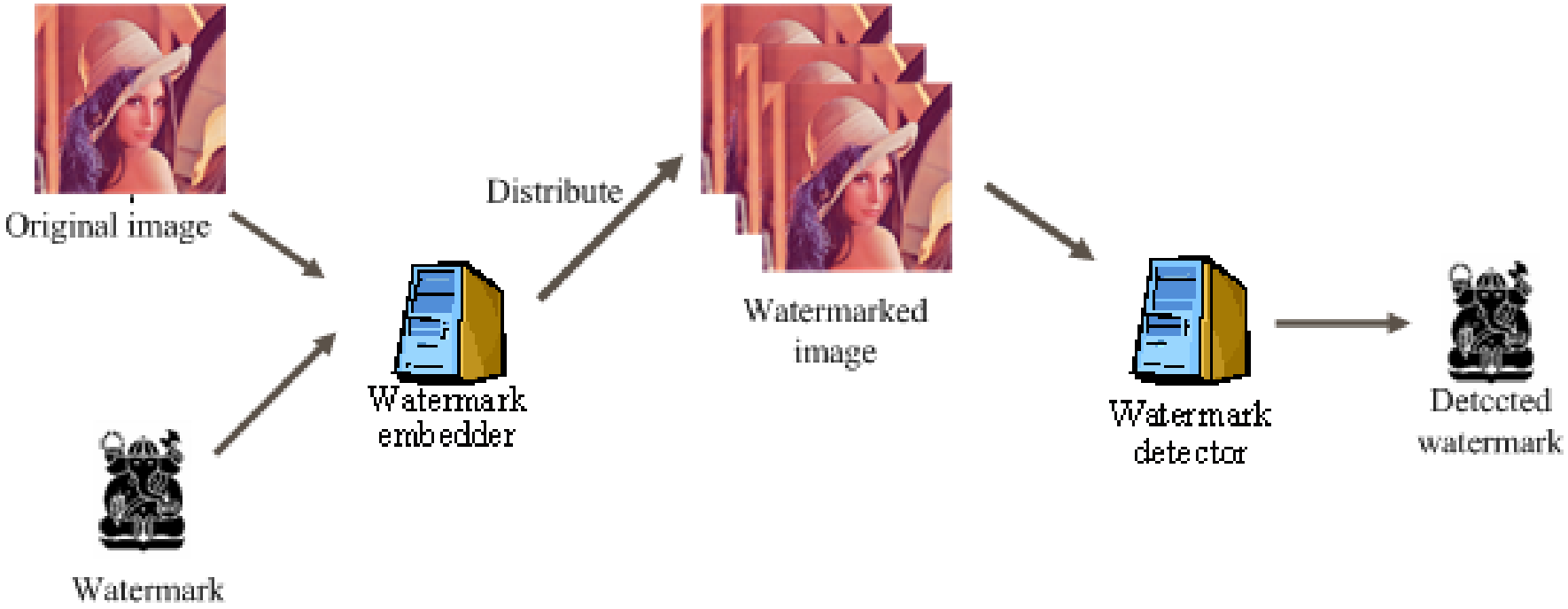
- *Image Watermarking*: teknik menyisipkan informasi yang mengacu pada pemilik gambar (disebut *watermark*) untuk tujuan melindungi kepemilikan, *copyright* atau menjaga keaslian konten
- *Watermark*: teks, gambar logo, audio, data biner (+1/-1), barisan bilangan riil
- Penyisipan *watermark* ke dalam citra sedemikian sehingga tidak merusak kualitas citra.



+

=

Model Image Watermarking



- *Watermark* melekat di dalam citra
- Penyisipan *watermark* tidak merusak kualitas citra
- *Watermark* dapat dideteksi/ekstraksi kembali sebagai bukti kepemilikan/*copyright* atau bukti adanya modifikasi

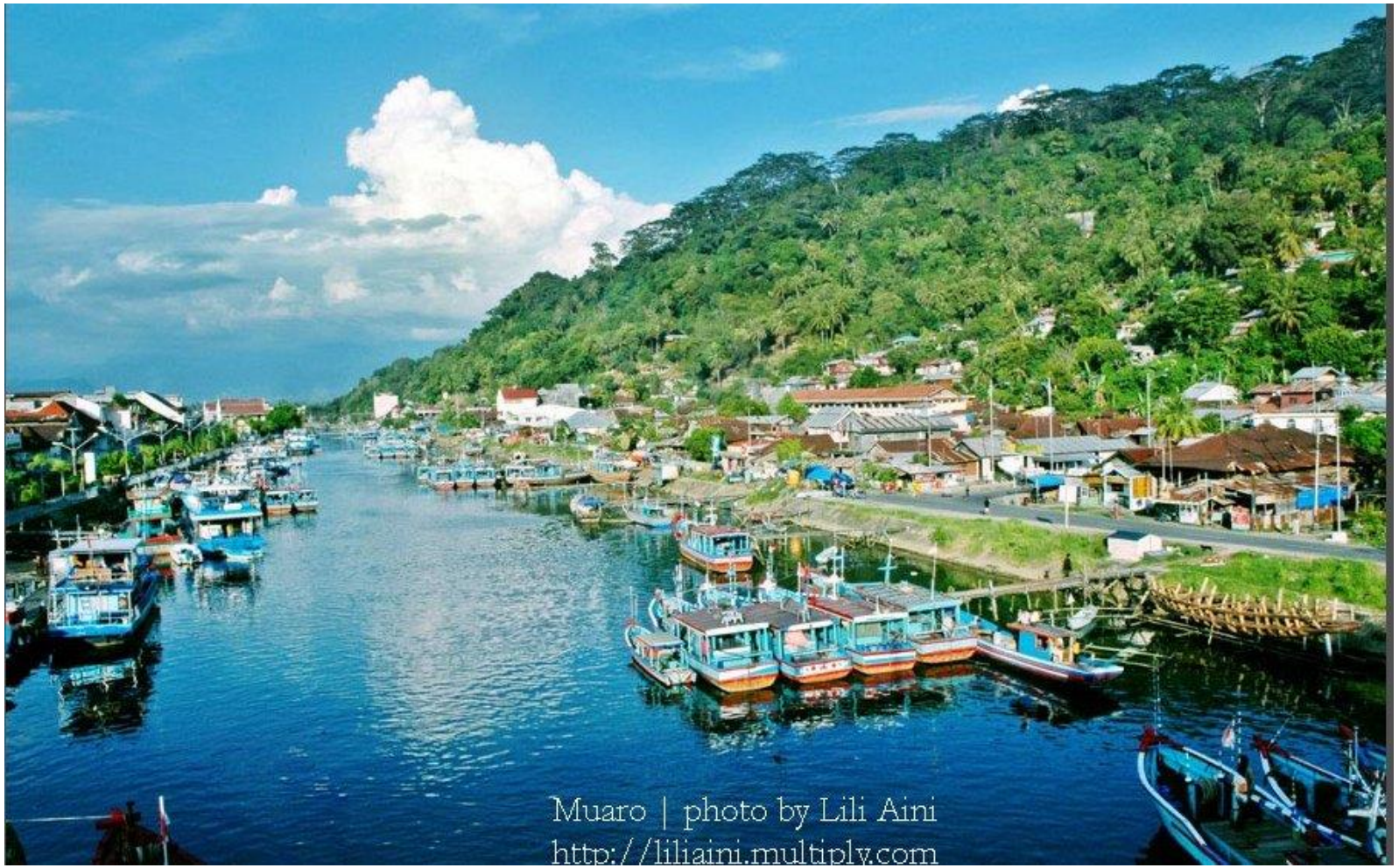
Cara-cara Konvensional Memberi Label *Copyright*

- Label *copyright* ditempelkan pada gambar.

- Kelemahan: tidak efektif melindungi *copyright* sebab label bisa dipotong atau dibuang dengan program pengolahan citra komersil (ex: *Adobe Photoshop*).

Original image + label *copyright*

Cropped image



Label kepemilikan

Dengan teknik *watermarking…*

- *Watermark* disisipkan ke dalam citra digital.
- *Watermark* terintegrasi di dalam citra digital
- Kelebihan:

1. Penyisipan *watermark* tidak merusak kualitas citra, citra yang diberi *watermark* terlihat seperti aslinya.
2. Setiap penggandaan (*copy*) citra digital akan membawa *watermark* di dalam salinannya.
3. *Watermark* tidak bisa dihapus atau dibuang
4. *Watermark* dapat dideteksi/ekstraksi kembali sebagai bukti kepemilikan /*copyright* atau deteksi perubahan

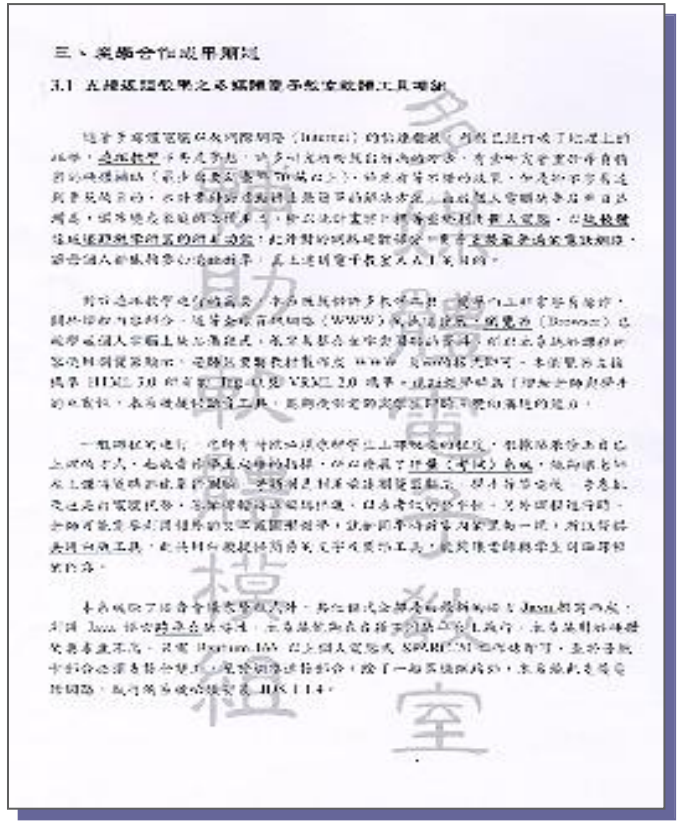
Sejarah *Watermarking*

- Abad 13, pabrik kertas di Fabriano, Italia, membuat kertas yang diberi *watermark* dengan cara menekan bentuk cetakan gambar pada kertas yang baru setengah jadi.

- Ketika kertas dikeringkan terbentuklah suatu kertas yang ber-*watermark*. Kertas ini biasanya digunakan oleh seniman/sastrawan untuk menulis karya seni.

- Kertas yang sudah dibubuhi tanda-air dijadikan identifikasi bahwa karya seni di atasnya adalah asli.

- Bangsa Cina melakukan hal yang sama pada pencetakan kertas



Klasifikasi *Watermarking*

1. *Paper watermarking*

Teknik memberikan impresi pada kertas berupa gambar/logo atau teks.

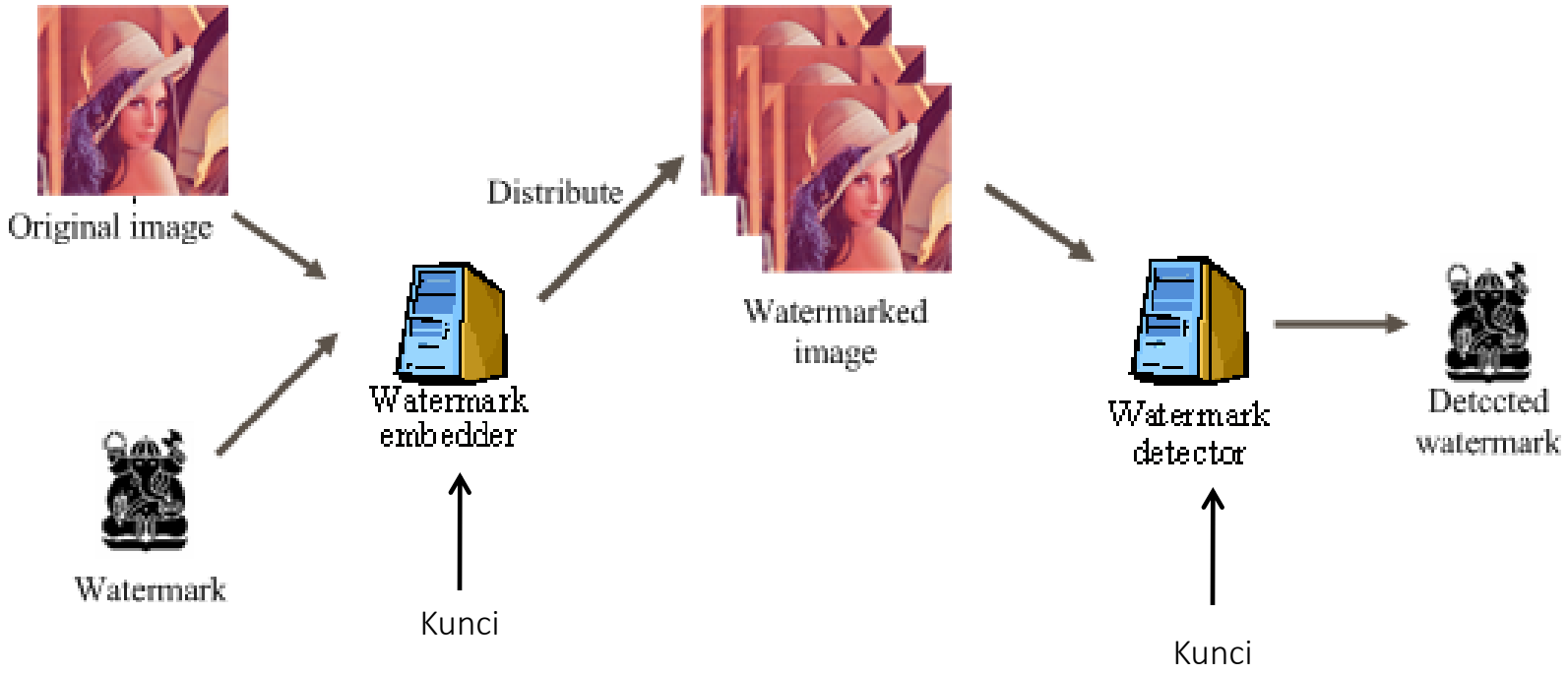
"Cannot be photocopied or scanned effectively"

Tujuan: Identifikasi keaslian (otentikasi)

Digunakan pada: uang, paspor, banknotes ,

2. *Digital Watermarking*

Menyisipkan sinyal digital ke dalam dokumen digital (gambar, audio, video, teks)



Perbedaan Steganografi dan *Watermarking*

Steganografi:

- Tujuan: mengirim pesan rahasia apapun tanpa menimbulkan kecurigaan
- Persyaratan: aman, sulit dideteksi, sebanyak mungkin menampung pesan (*large capacity*)
- Komunikasi: *point-to-point*
- Media penampung tidak punya arti apa-apa (*meaningless*)

***Watermarking*:**

- Tujuan: perlindungan *copyright*, pembuktian kepemilikan (*ownership*), keaslian/autentikasi
- Persyaratan: sulit dihapus (*remove*)
- Komunikasi: *one-to-many*
- Komentar lain: media penampung justru yang diberi proteksi, tidak mementingkan kapasitas *watermark*

Selain citra, data apa saja yang bisa diberi *watermark*?

- Citra → *Image Watermarking*
- Video → *Video Watermarking*
- Audio → *Audio Watermarking*
- Teks → *Text Watermarking*
- Perangkat lunak → *Software watermarking*

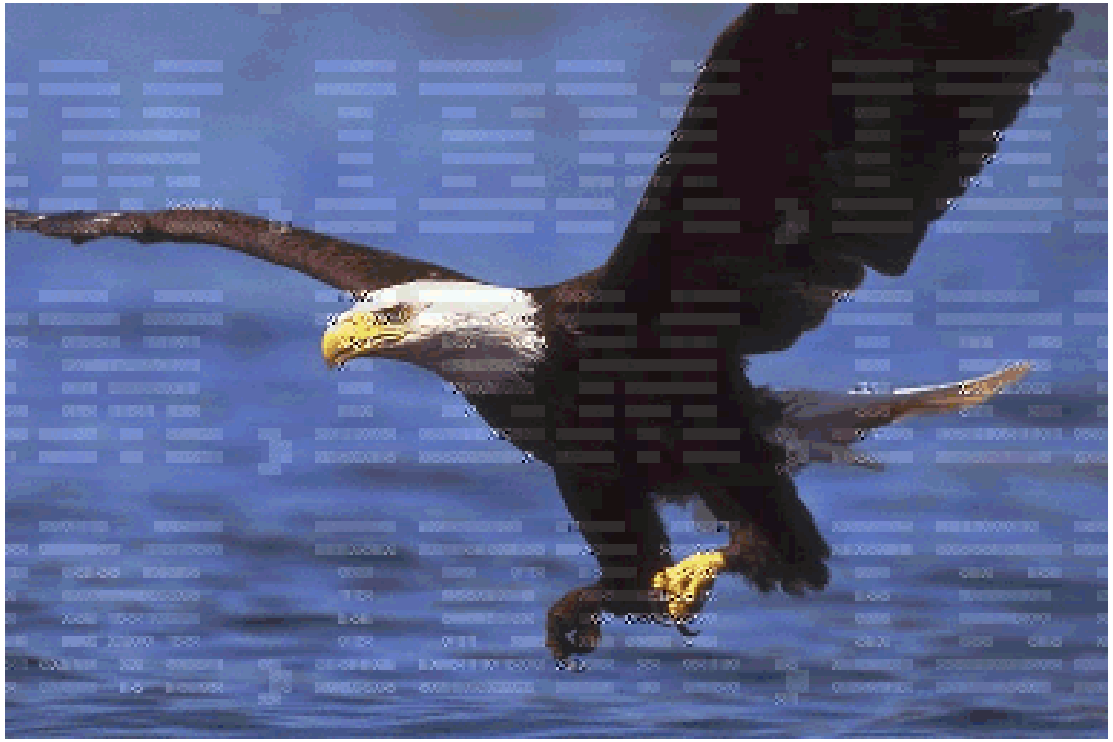
Image Watermarking

- Penyisipan *watermark* ke dalam citra menghasilkan citra ber-*watermark* (*watermarked image*)

- Terbagi menjadi 2 jenis: *visible watermarking* dan *invisible watermarking*

Invisible Watermark

Visible Watermark



Visible watermarking

Invisible watermarking

Klasifikasi (invisible) *Image Watermarking*

- ***Fragile watermarking***

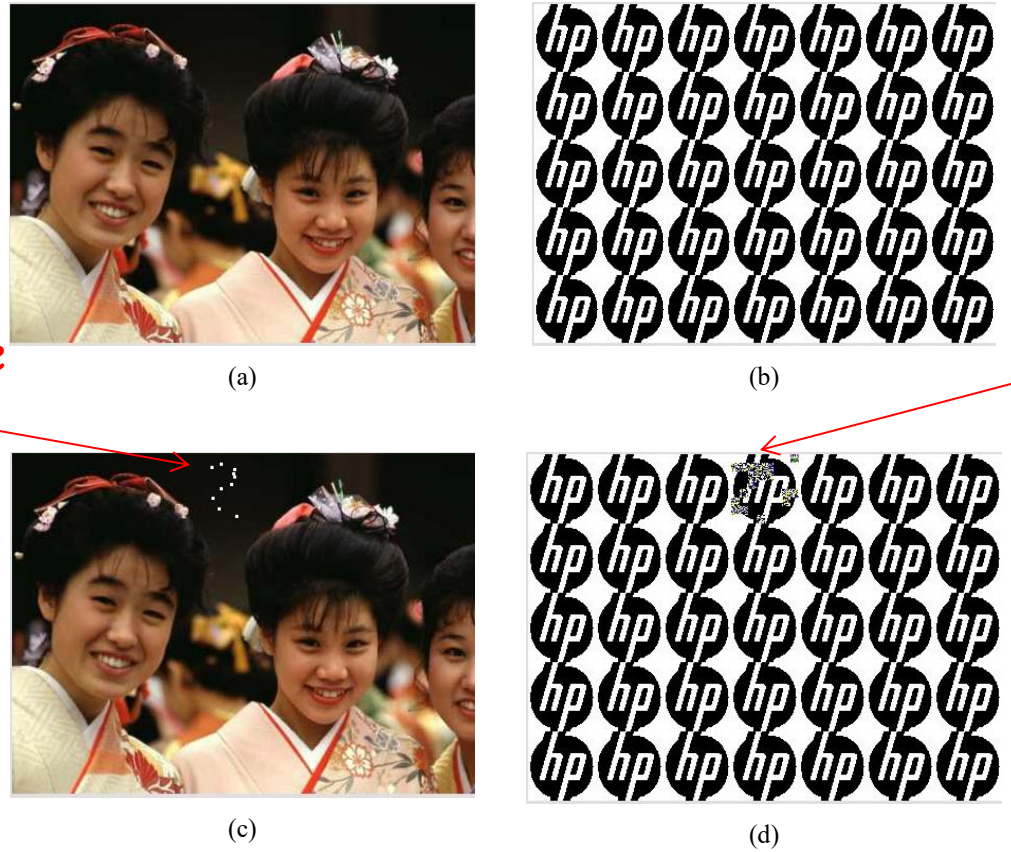
  Tujuan: untuk menjaga integritas/orisinilitas citra digital.

- ***Robust watermarking***

  Tujuan: untuk menyisipkan label kepemilikan/*copyright* citra digital.

Fragile Watermarking

- *Watermark* menjadi rusak atau pecah jika dilakukan manipulasi (*common imageprocessing*) pada citra ber-*watermark*.
- Tujuan: pembuktian keaslian dan *tamper proofing*



Contoh *fragile watermarking* lainnya (Wong, 1997)

Bagaimana caranya?

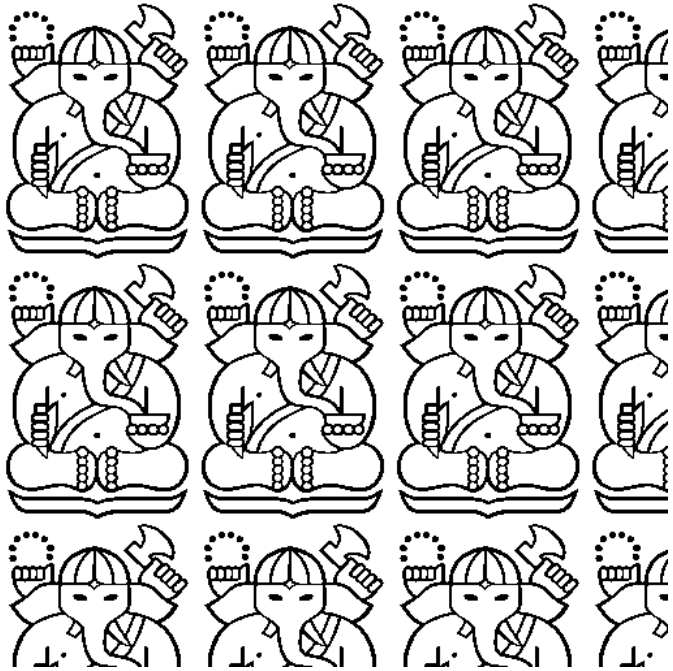
- Pertama, harus mengerti dulu konsep citra digital (sudah dijelaskan di dalam materi Steganografi)

- Kedua, mengerti metode LSB (sudah dijelaskan di dalam materi Steganografi)

Algoritma *Fragile Watermarking*

1. Nyatakan *watermark* seukuran citra yang akan disisipi (lakukan *copy and paste*)

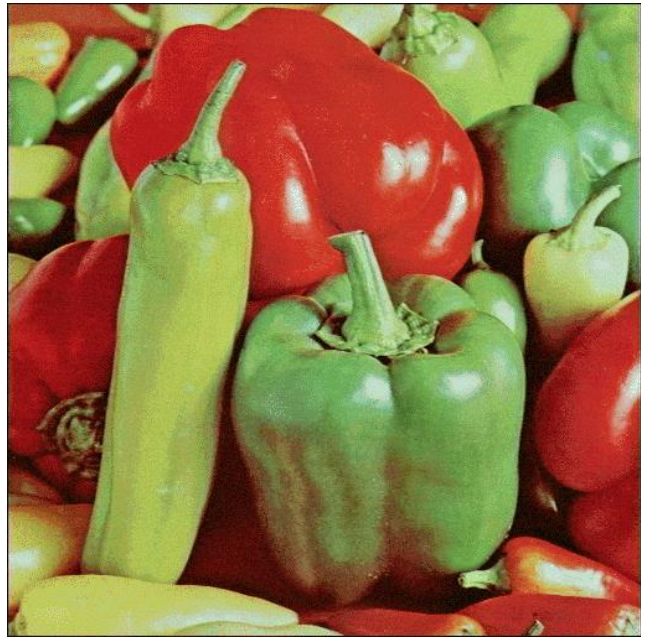
Citra asli



watermark

2. Sisipkan *watermark* pada seluruh *pixel* citra dengan metode LSB

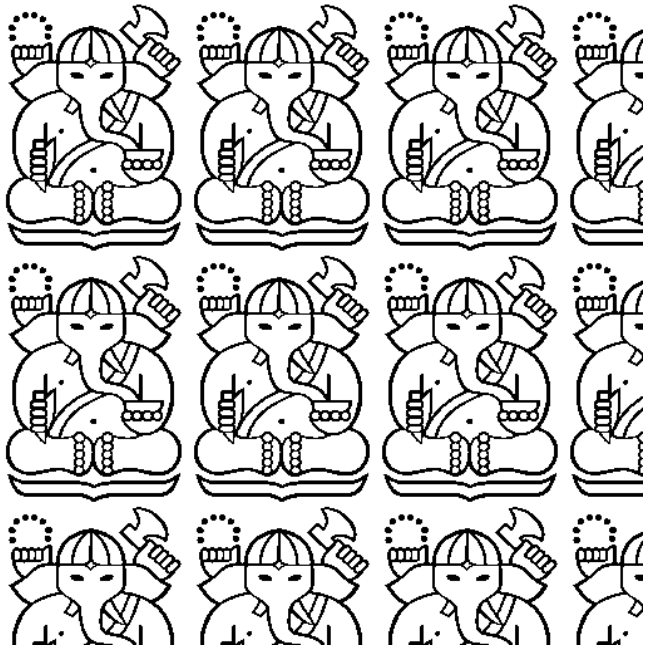
Citra asli



Citra ber-watermark

3. Ekstraksi *watermark* dengan mengambil bit-bit LSB pada setiap *pixel*, lalu satukan menjadi gambar *watermark* semula

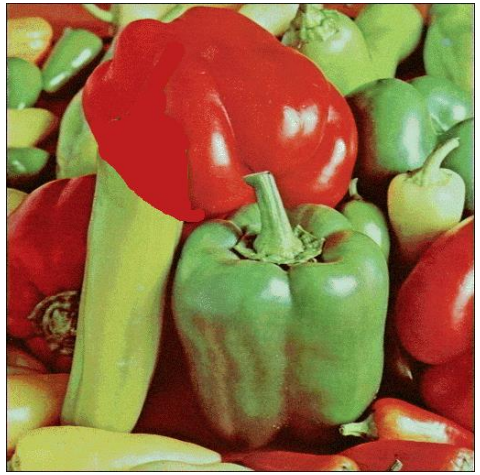
Citra ber-watermark

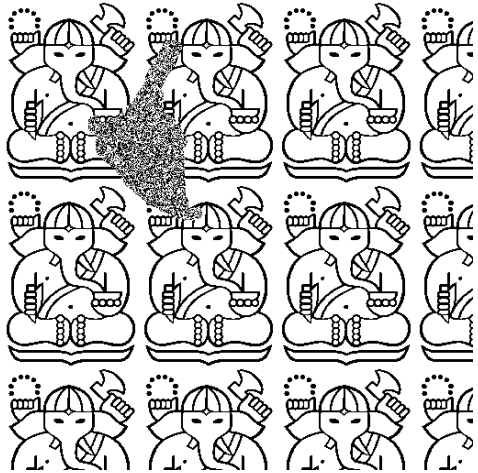


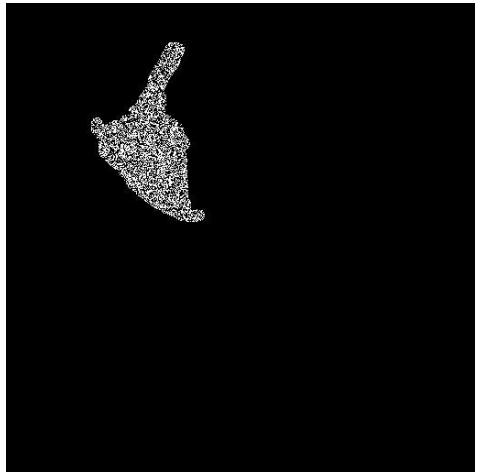
Watermark hasil ekstraksi

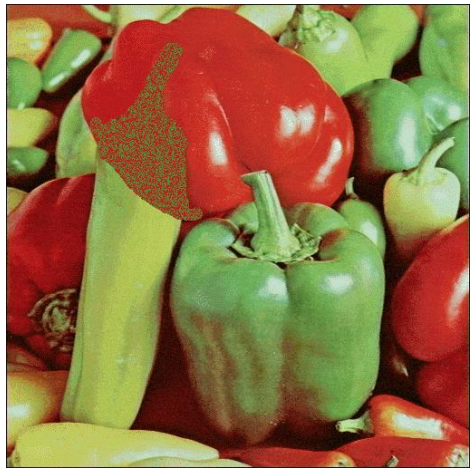
Test manipulasi pada citra ber-*watermark*

Deletion attack

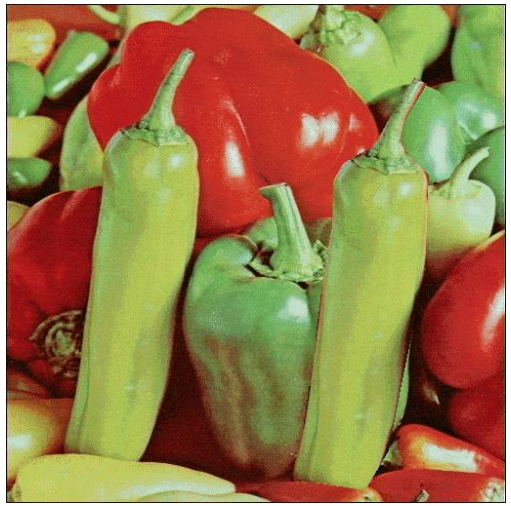


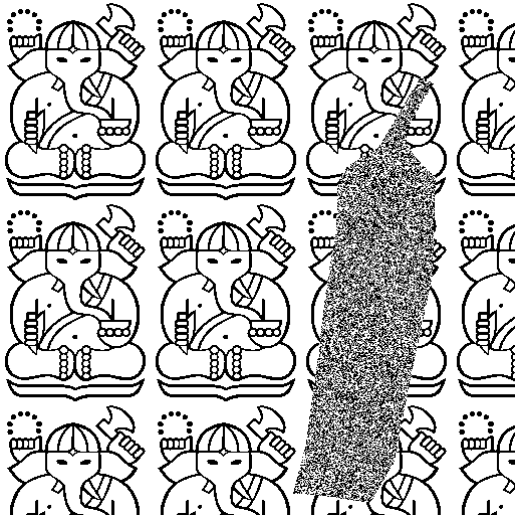


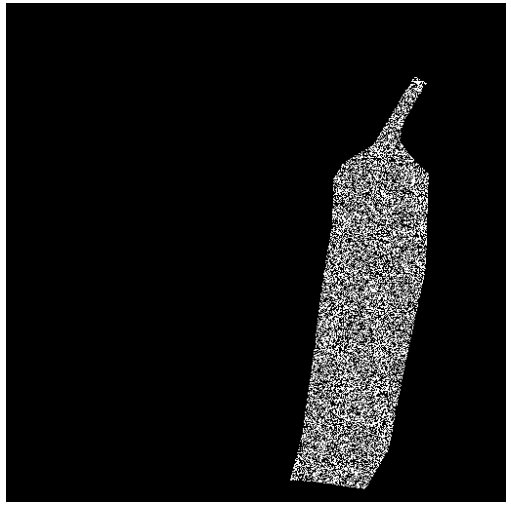


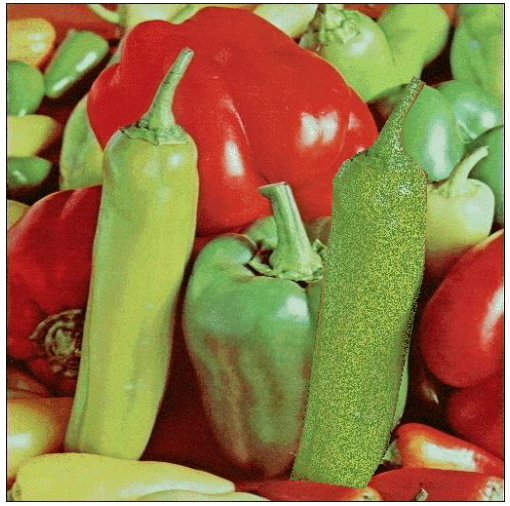


Insertion attack

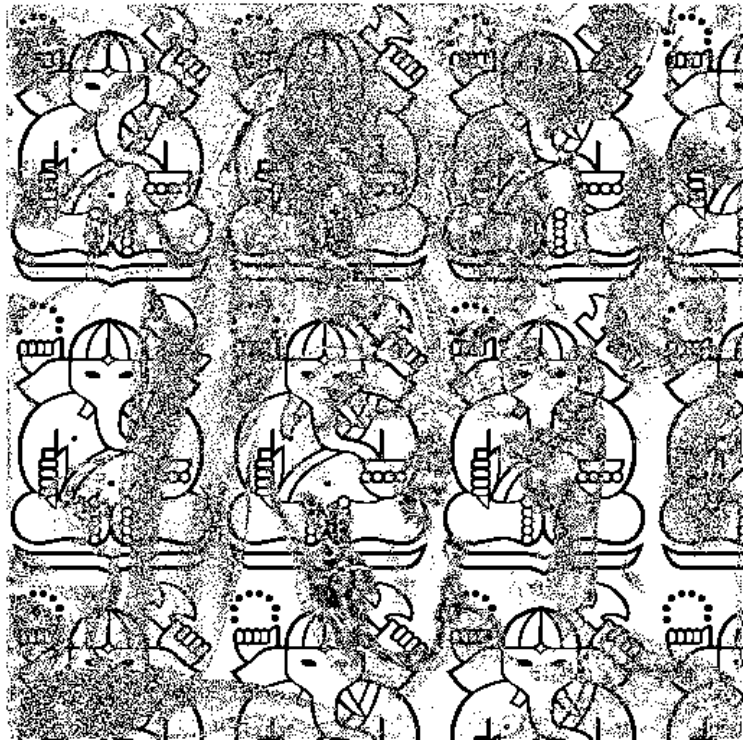








Brightness and contrast attack



Robust Watermarking

- *Watermark* tetap kokoh (*robust*) terhadap manipulasi (*common digital processing*) yang dilakukan pada citra ber-watermark.

  Contoh manipulasi: kompresi, *cropping*, *editing*, *resizing, dll*

- Tujuan: perlindungan hak kepemilikan dan *copyright*

+

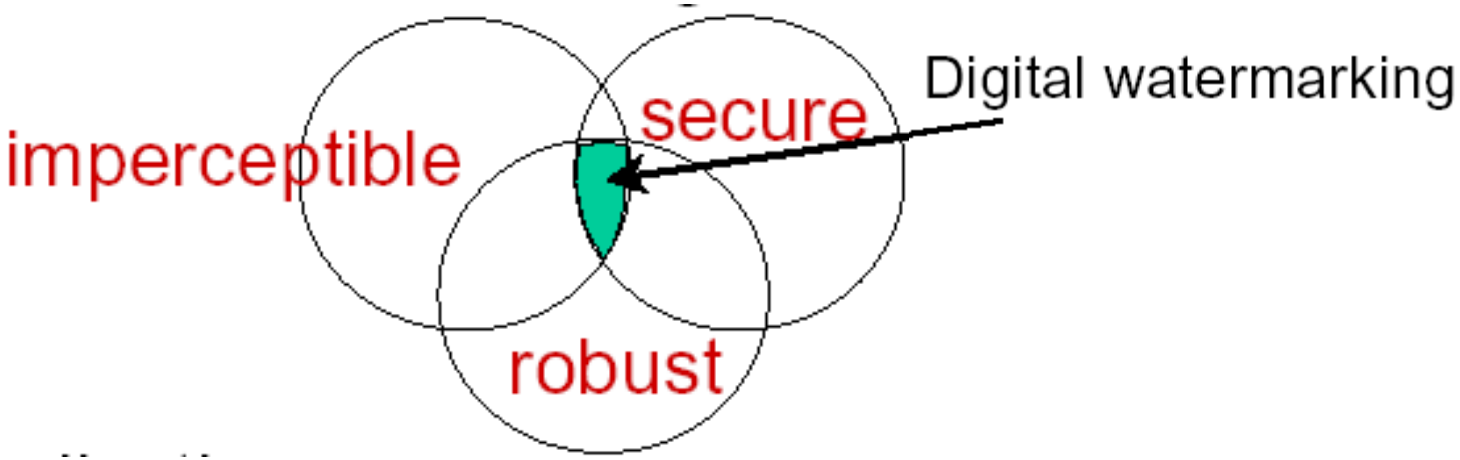
=

- Persyaratan umum *robust watermarking* :

  - *imperceptible*

  - *robustness*

  - *secure*



Original image

Watermarked image

watermark

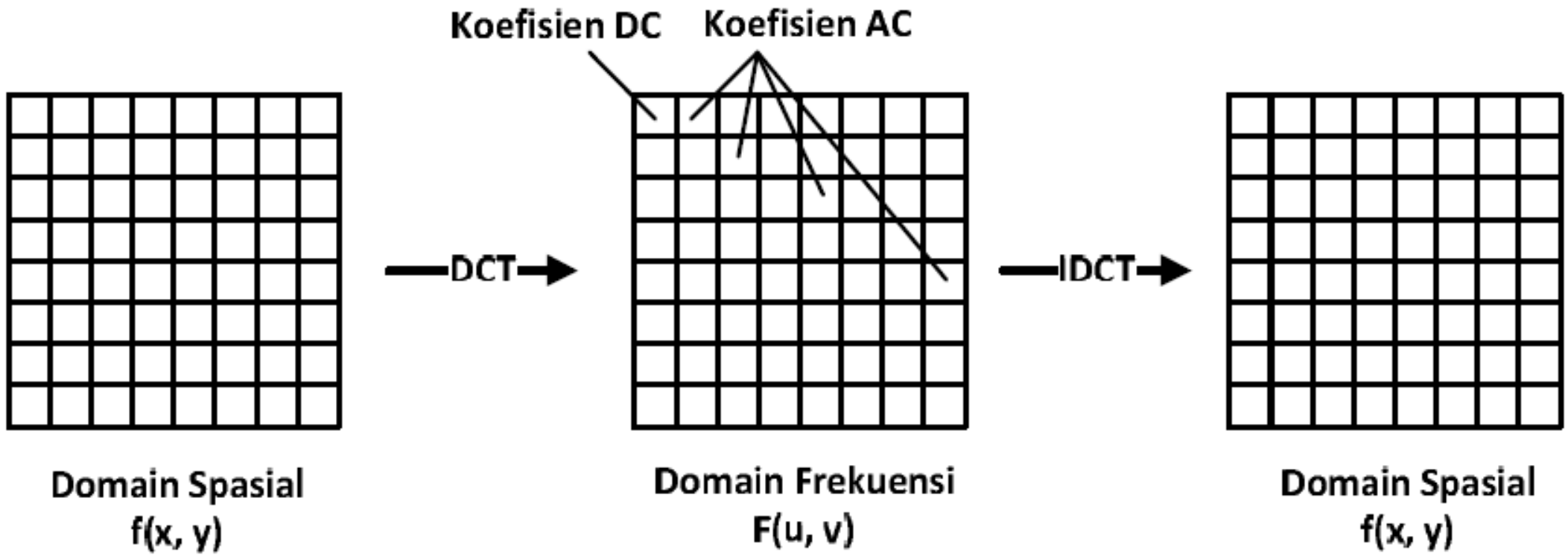
extracted watermark

Bagaimana caranya?

- Tidak seperti metode *fragile watermarking* yang mana *watermark* disisipkan pada domain spasial (*pixel-pixel* citra),
- maka pada metode *robust watermarking*, *watermark* disisipkan pada domain transform, misalnya domain frekuensi.

- Hal ini bertujuan agar *watermark* tahan terhadap manipulasi pada citra.

- Pertama-tama, citra ditransformasi dari ranah spasial ke ranah *transform* (frekuensi), misalnya menggunakan transformasi DCT (*Discrete Cosine Transform*)


Koefisien DC
Koefisien AC
DCT
IDCT
Domain Spasial
f(x, y)
Domain Frekuensi
F(u, v)
Domain Spasial
f(x, y)

- *Discrete Cosine Transform (DCT)*

$$C(u,v) = \alpha_u \alpha_v \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I(x,y) \cos\frac{\pi(2x+1)u}{2M} \cos\frac{\pi(2y+1)v}{2N} \qquad (1)$$

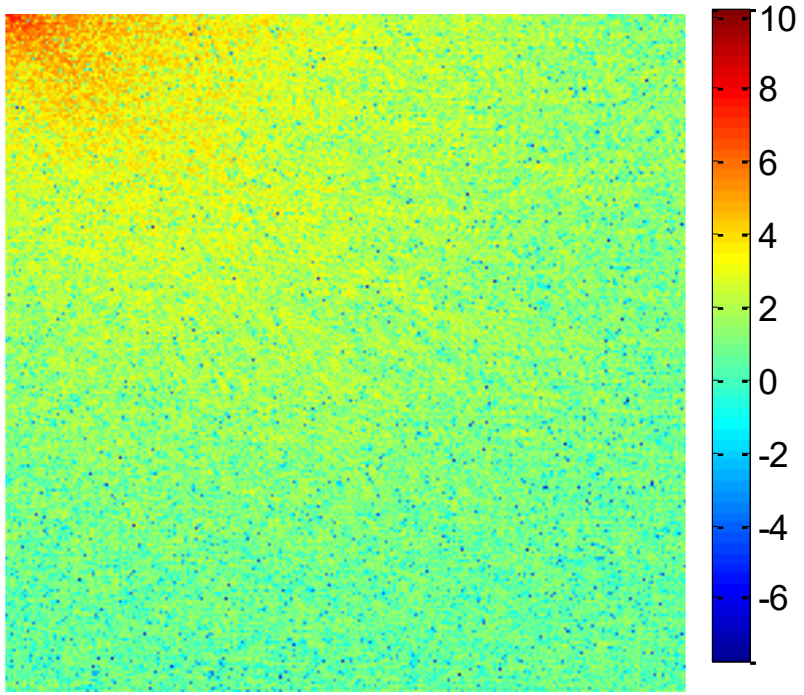
$$\alpha_u = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{M}} & ,u = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{M}} & ,1 \le u \le M-1 \end{cases} \qquad \alpha_v = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}} & ,v = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & ,1 \le v \le N-1 \end{cases}$$

C(u,v) disebut koefisien-koefisien DCT

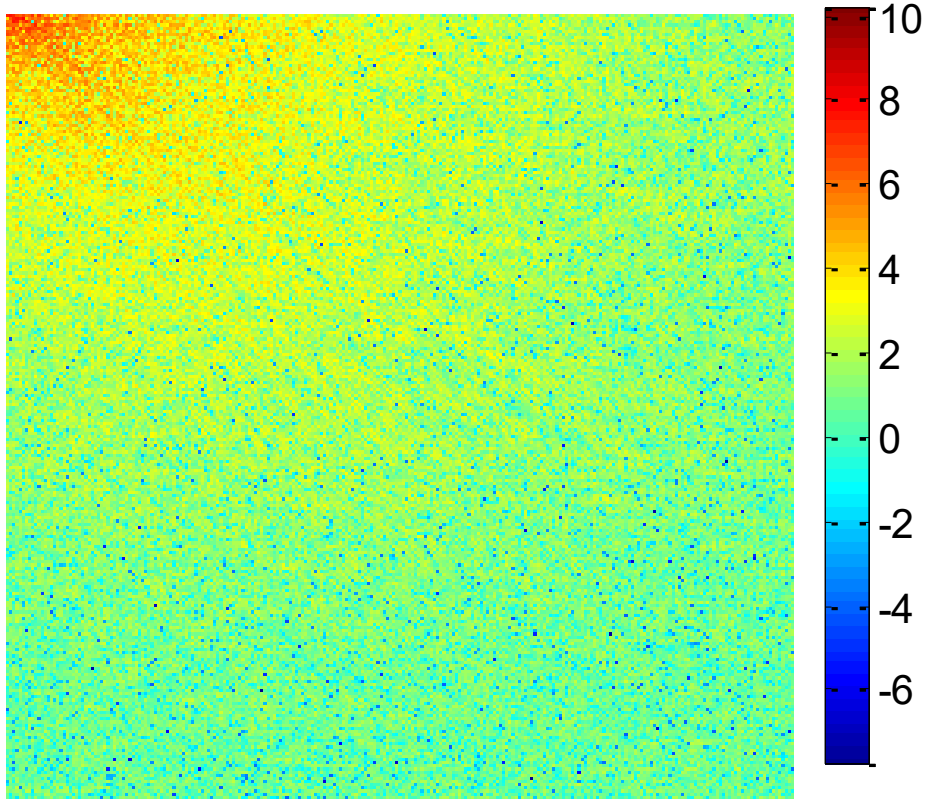
- *Inverse Discrete Cosine Transform (IDCT)*

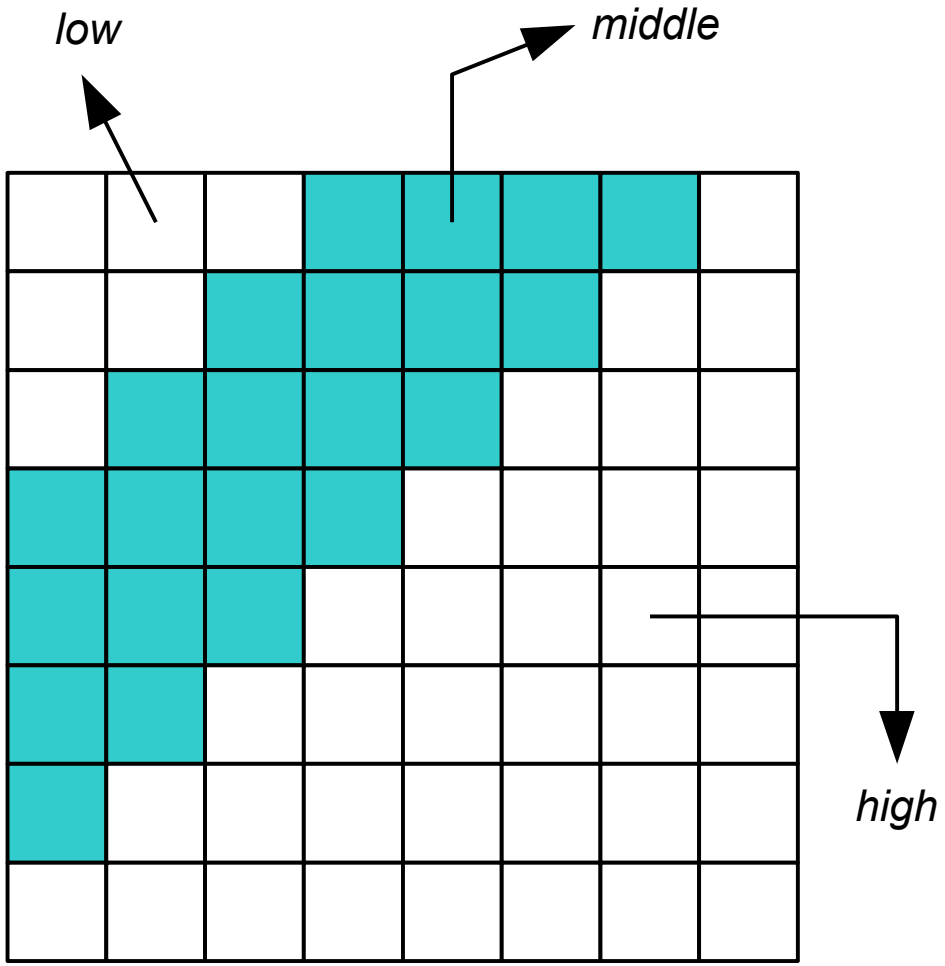
$$I(x,y) = \alpha_u \alpha_v \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} C(u,v) \cos\frac{\pi(2x+1)u}{2M} \cos\frac{\pi(2y+1)v}{2N} \qquad (4)$$

Citra dalam ranah spasial



Citra dalam ranah frekuensi


10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6


low
middle
high

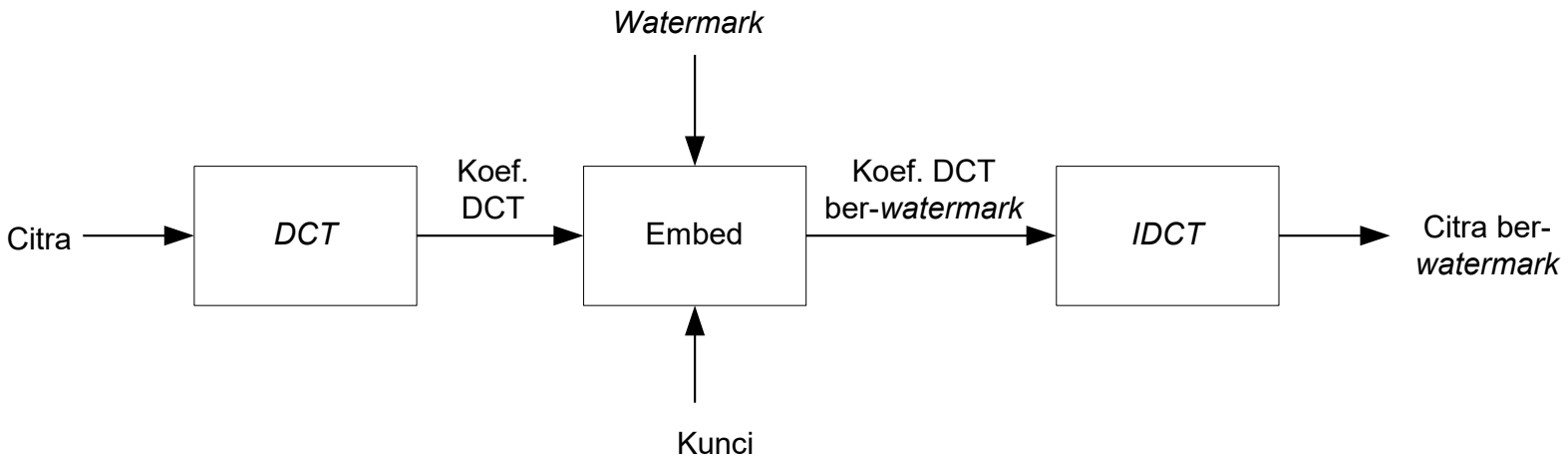
- Hasil tranformasi menghasilkan nilai-nilai yang disebut koefisien-koefisien transformasi (misalnya koefisien DCT).

- Bit-bit *watermark* (*w*) disembunyikan pada koefisien-koefisien tranformasi (*x*) menggunakan berbagai metode, seperti metode LSB, *spread spectrum*, dsb.
- Jika watermark berupa bilangan riil, salah satu formulanya adalah:

$$\hat{x}_i = x_i + \alpha w_i$$

α = kekuatan *robustness*

- Selanjutnya, citra ditransformasikan kembali (*inverse transformation*) ke ranah spasial untuk mendapatkan citra *ber-watermark*).



Wang Algorithm (1)

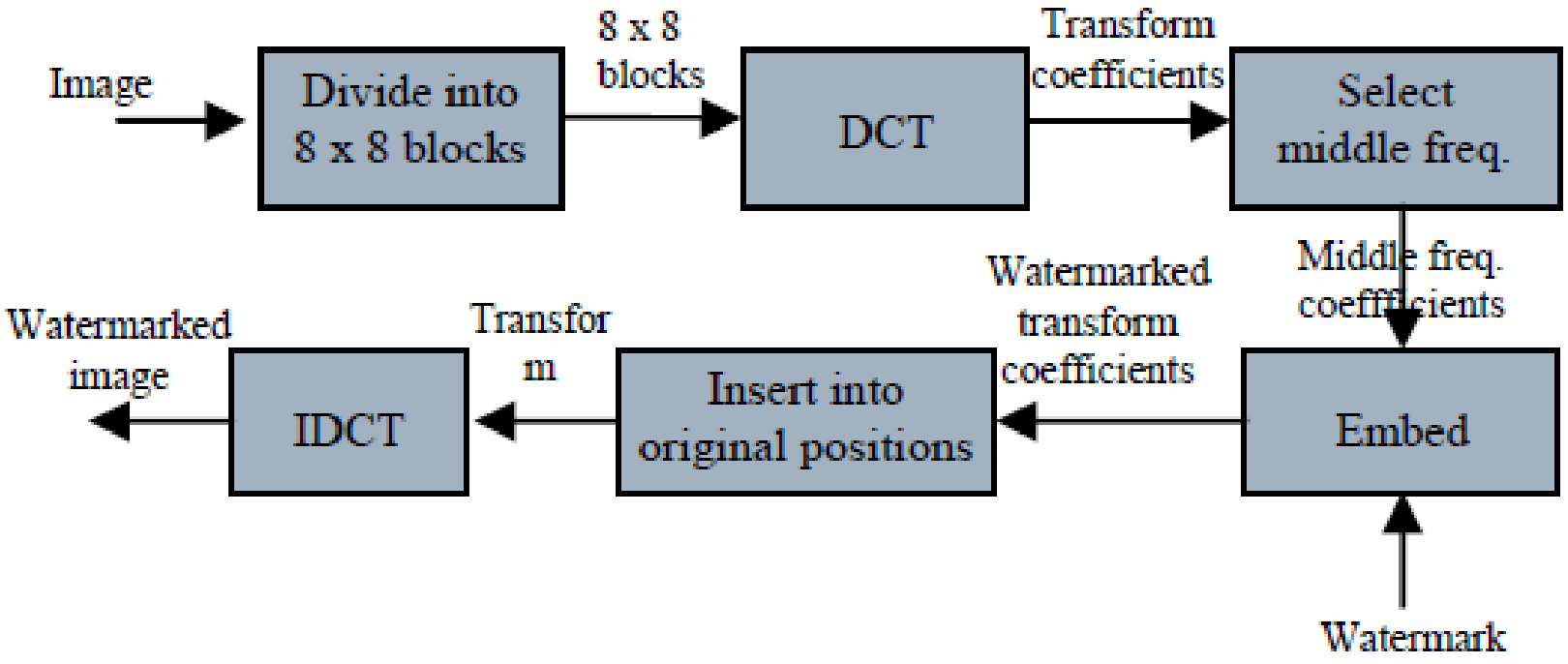


Fig. 1. Embedding process

J. Wang, et al, *A Novel Correlation Detection System for Multiplicative Robust Watermarking*, Proc. of *ISCCSP2006*, 2006.

Wang Algorithm (2)

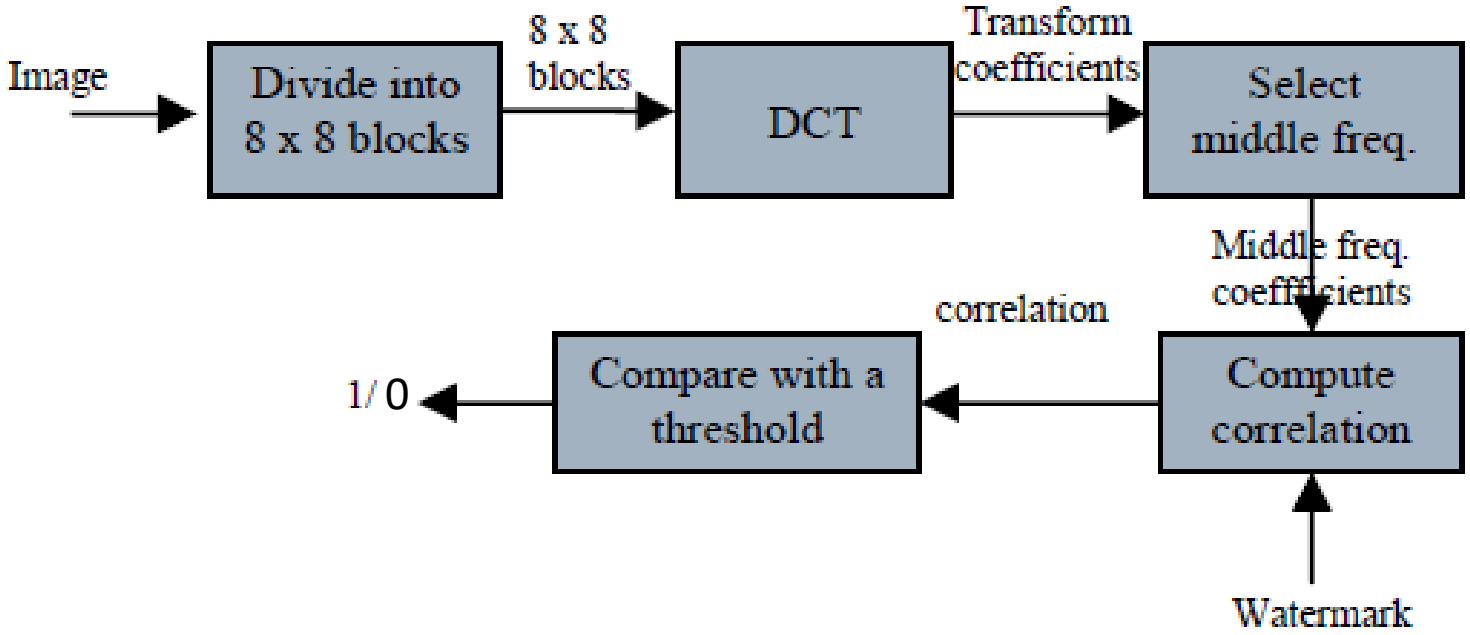


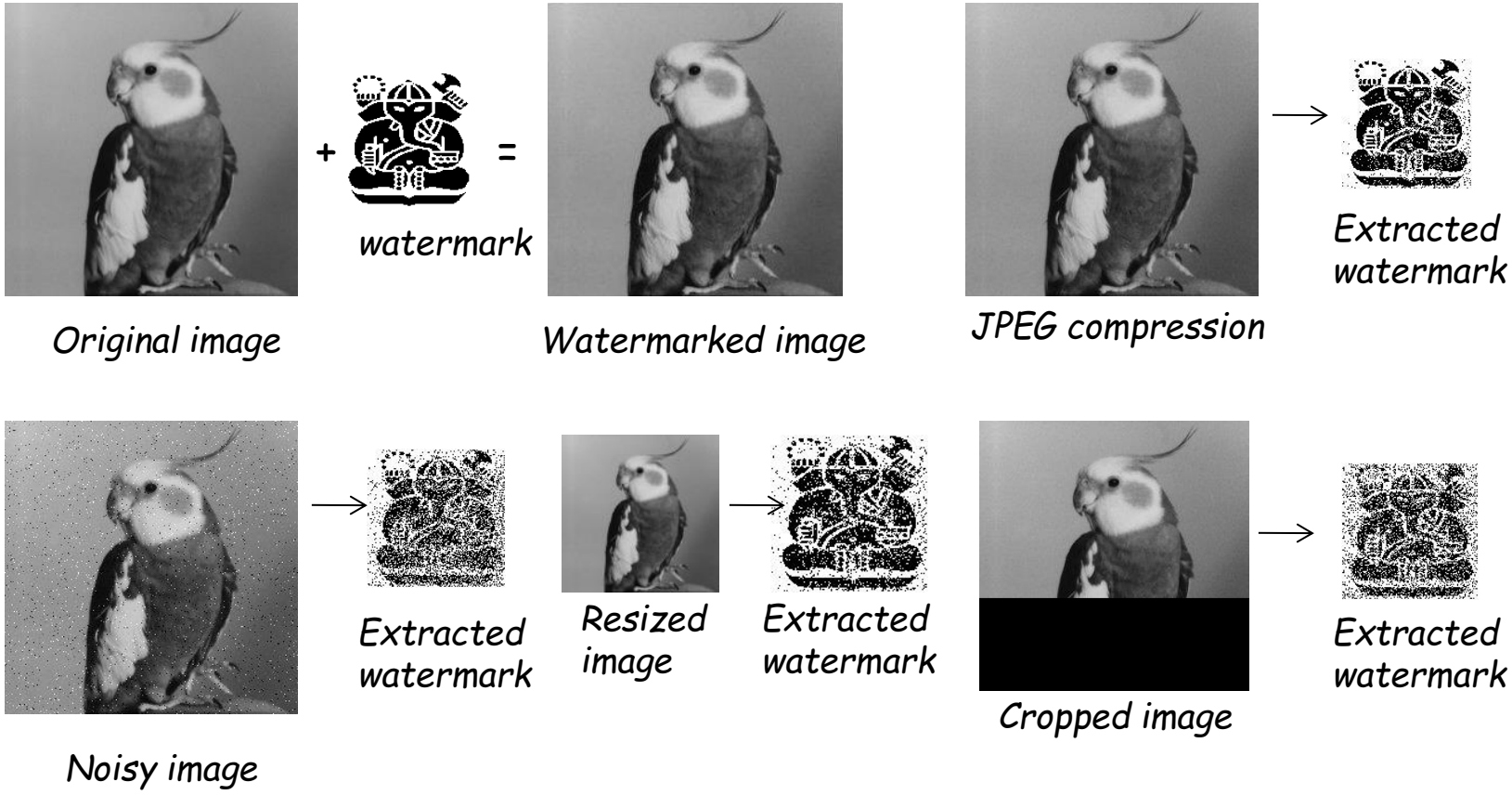
Fig. 2. Detection process

Correlation formula: $$c = \frac{1}{M}\sum_{i=i}^{M} x^*(i)\cdot w(i)$$

Decision: $$\begin{cases} 1 & ,c \geq T \\ 0 & ,c < T \end{cases}$$

Test ketahanan *watermark* terhadap manipulasi terhadap citra.

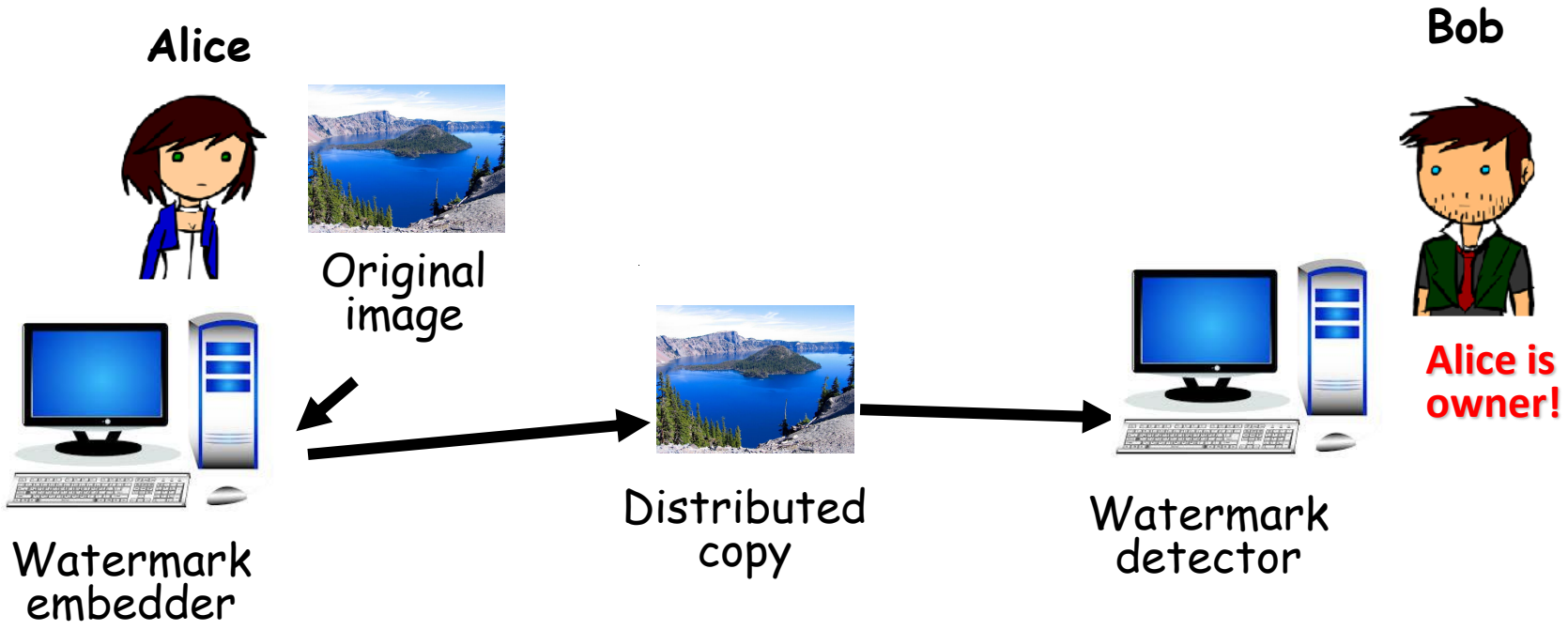
Contoh: kompresi, *cropping*, *editing*, *resizing, dll*



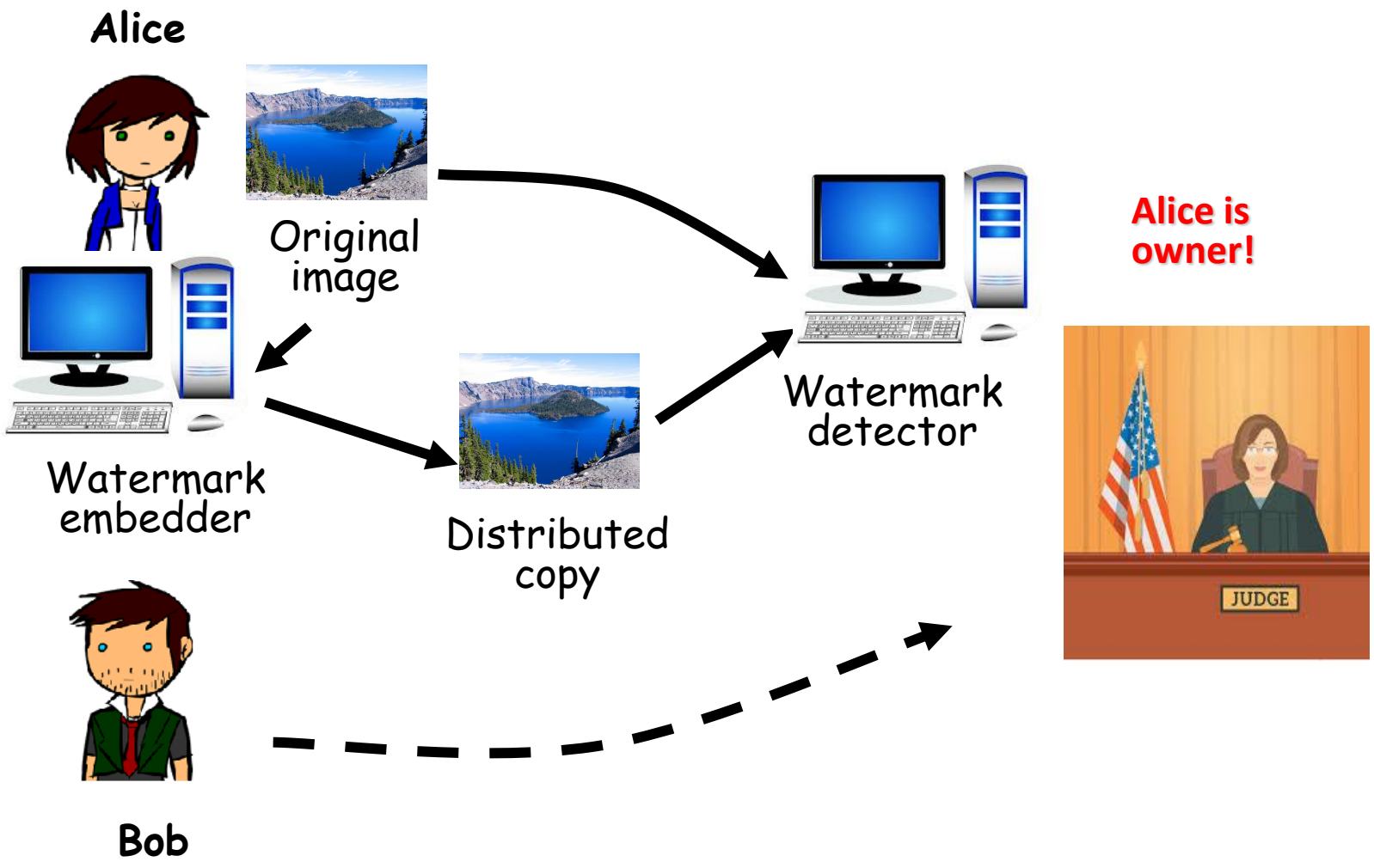
Aplikasi *Watermarking*

- Identifikasi kepemilikan (*ownership identification*)
- Bukti kepemilikan (*proof of ownership*)
- Memeriksa keaslian isi karya digital (*tamper proofing*) ➔ *Content authentication*
- *Transaction tracking*
- *Piracy protection/copy control*: mencegah penggandaan yang tidak berizin.
- *Broadcast monitoring*

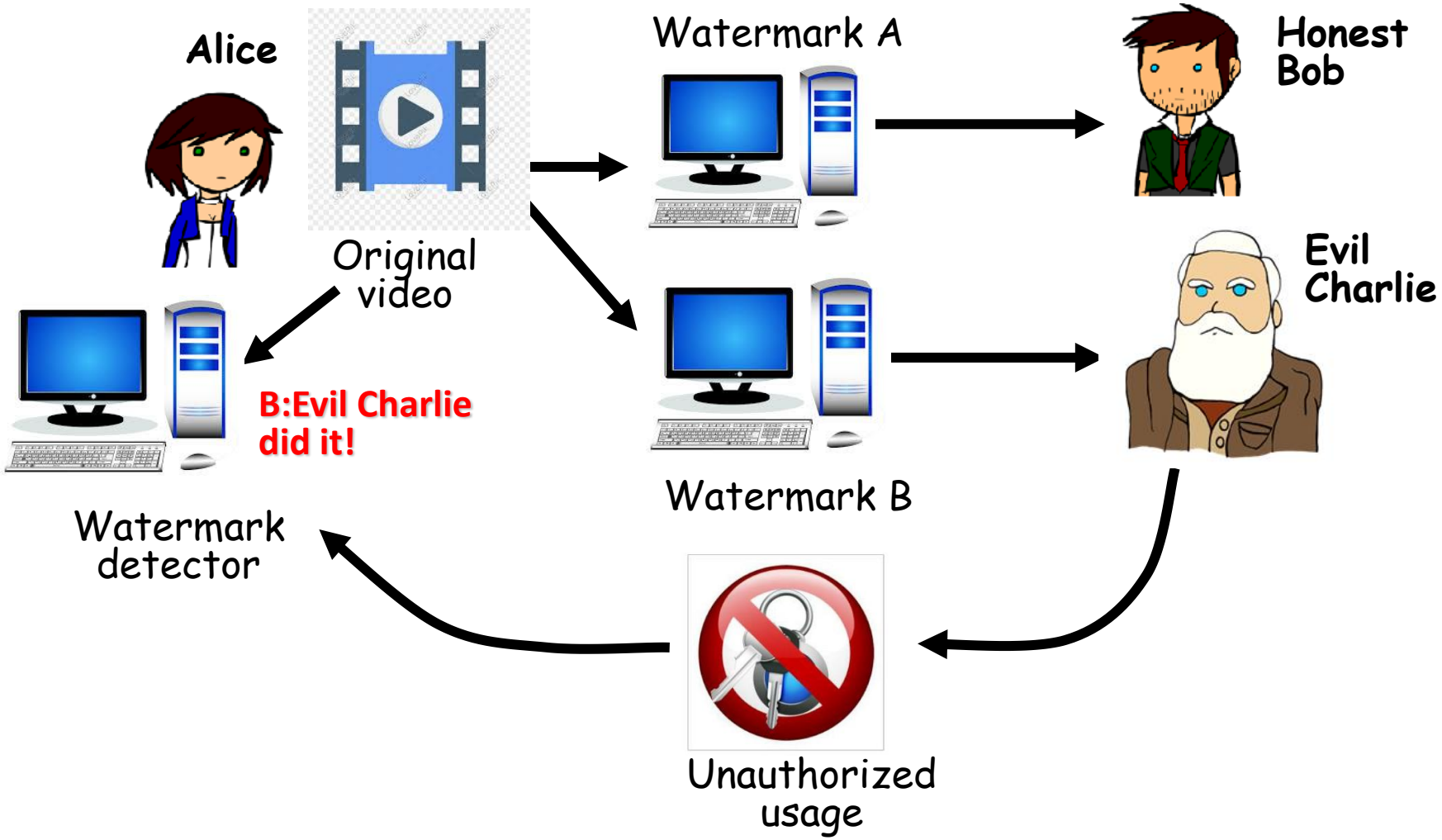
Aplikasi watermarking: *Owner identification*



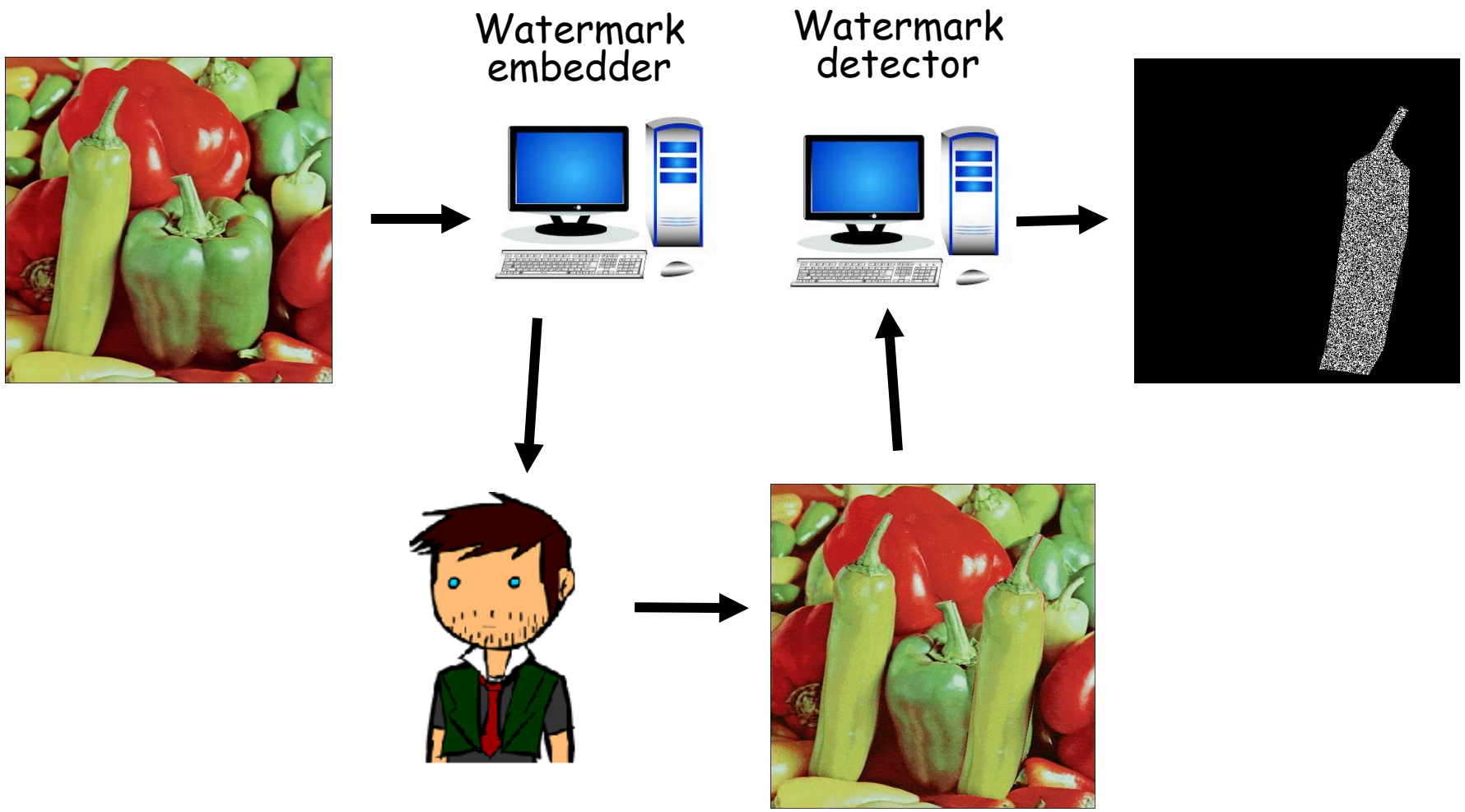
Aplikasi watermarking: *Proof of ownership*



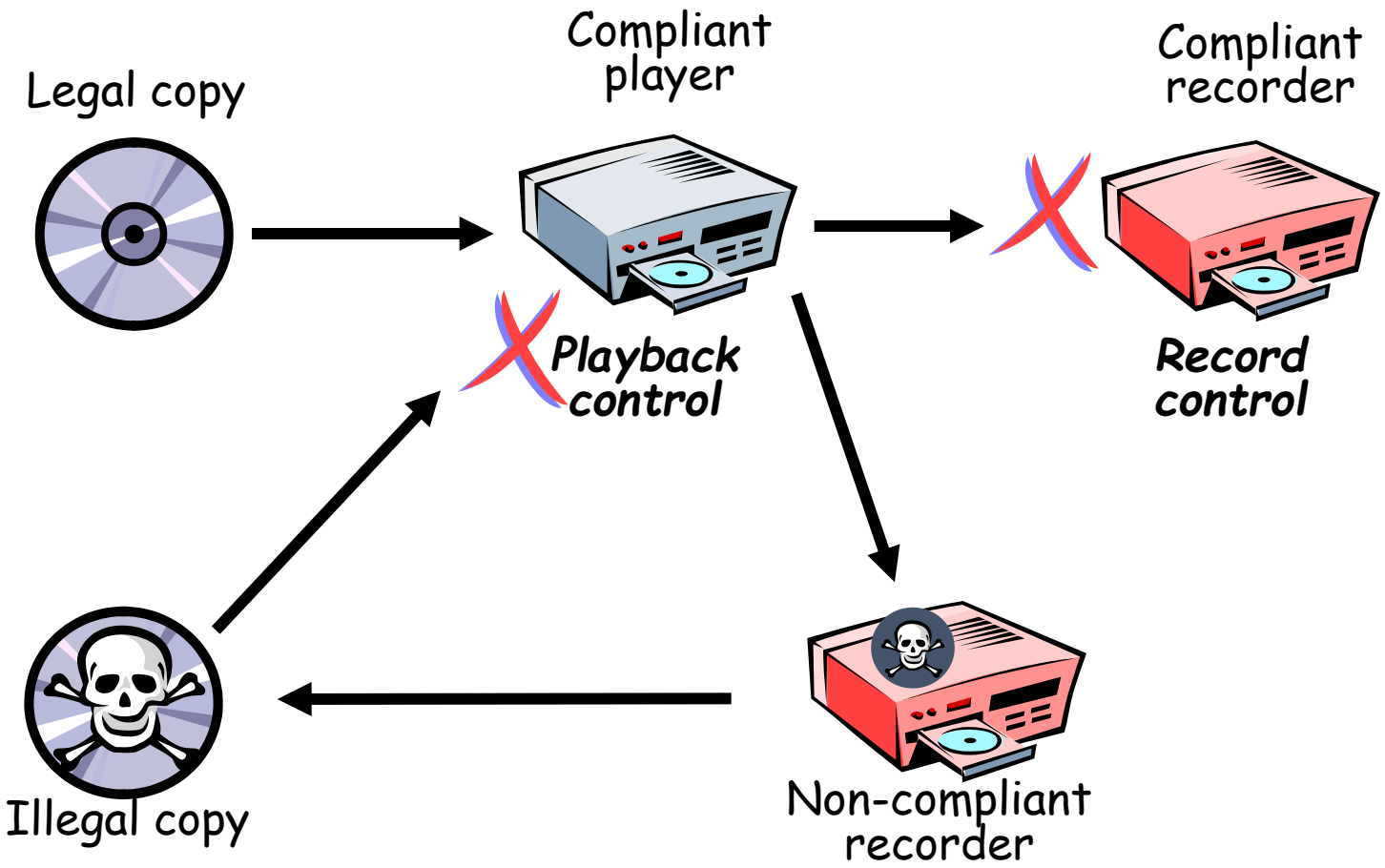
Aplikasi watermarking: *Transaction tracking/fingerprinting*



Aplikasi watermarking: *Content authentication*

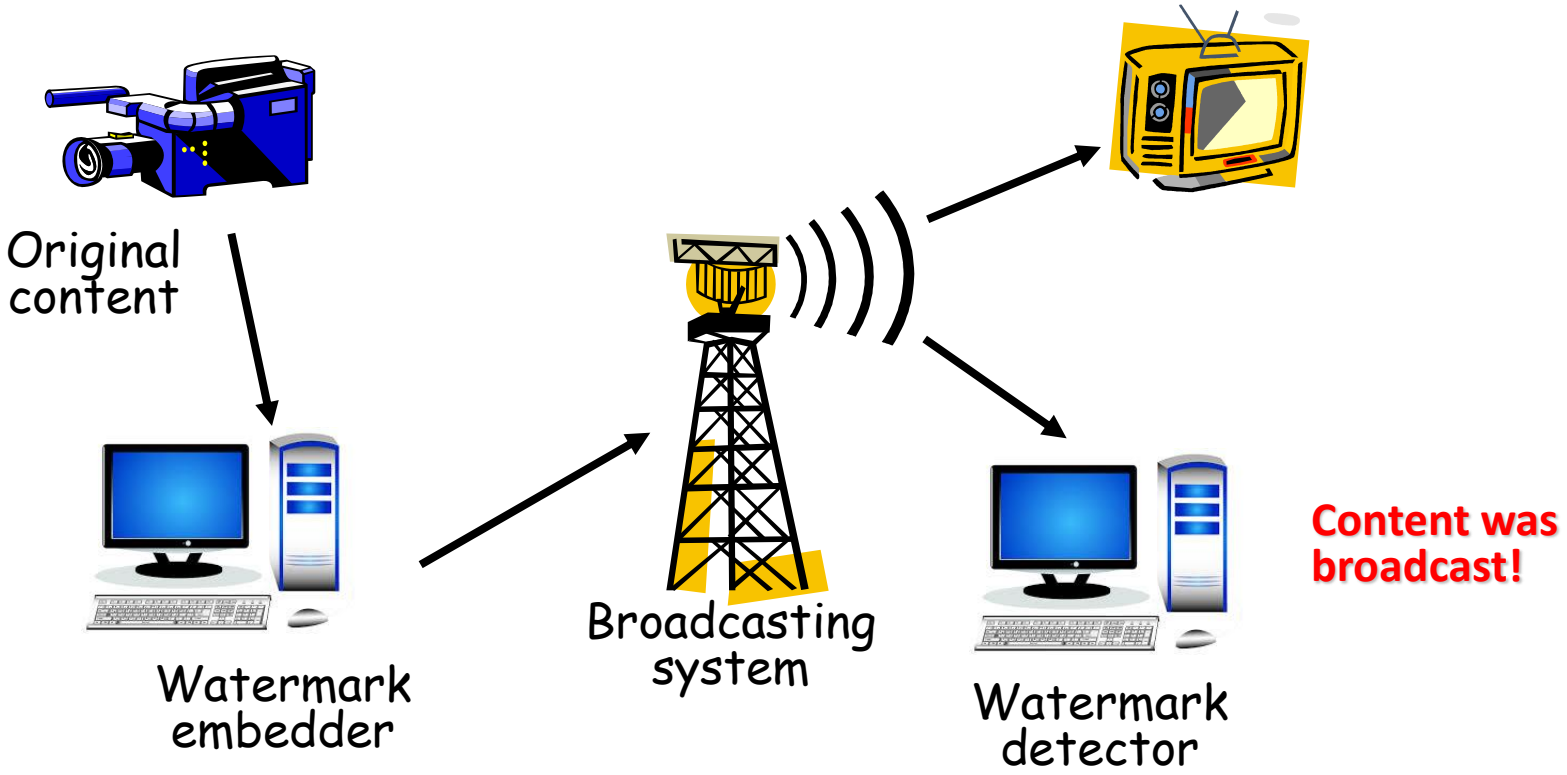


Aplikasi watermarking: *Copy control/Piracy Control*



Watermark digunakan untuk mendeteksi apakah media digital dapat digandakan (copy) atau dimainkan oleh perangkat keras.

Aplikasi watermarking: *Broadcast monitoring*



Watermark digunakan untuk memantau kapan konten digital ditransmisikan melalui saluran penyiaran seperti TV dan radio.

Bagaimana watermarking digunakan di dalam Netflix?

- Di Netflix, watermarking digunakan sebagai bagian dari sistem keamanan konten (*content protection*) untuk mencegah pembajakan dan melacak sumber kebocoran film atau serial.
- *Watermark* tertanam di dalam video/audio (disebut juga *invisible watermarking* atau *forensic watermarking*), bukan *watermark* yang terlihat (*visible watermark*)
- Watermark bisa dideteksi secara forensik jika terjadi pembajakan.
- Watermark tersebut mengandung identitas seperti:
    - ID akun
    - ID sesi streaming
    - Perangkat
    - Timestamp distribusi
- Jika file Netflix direkam dan diunggah ke situs bajakan, maka Netflix dapat mengekstrak watermark dari video bajakan tersebut dan dapat mengetahui dari akun siapa bocor dan kapan.

Salah satu teknik konvensional membajak film yang tayang di layar, kamera *camcorder* atau kamera *handphone* merekam film yang sedang *play* di layer

Sumber gambar: https://medium.com/pallycon/how-netflix-protects-contents-part-2-33c1b60002a3

Bagaimana cara penyisipan watermark ke dalam video Netflix?

- Saat user melakukan video streaming, sistem menyisipkan watermark unik secara real-time pada setiap segmen video.
- Watermark yang disisipkan bisa lebih dari satu untuk masing-masing segmen
- Misalnya, segmen 1 punya dua versi (A dan B), segmen 2 punya dua versi, dst
- Setiap user akan menerima kombinasi unik: A – B – B – A – A – B – ...
- Kombinasi itu = identitas user.
- Watermark biasanya disisipkan dalam domain DCT (Discrete Cosine Transform) dengan penerapan kompresi video (H.264 / H.265)

- Baca lebih lengkap di: https://medium.com/pallycon/how-netflix-protects-contents-part-2-33c1b60002a3

Digital Right Management (DRM)

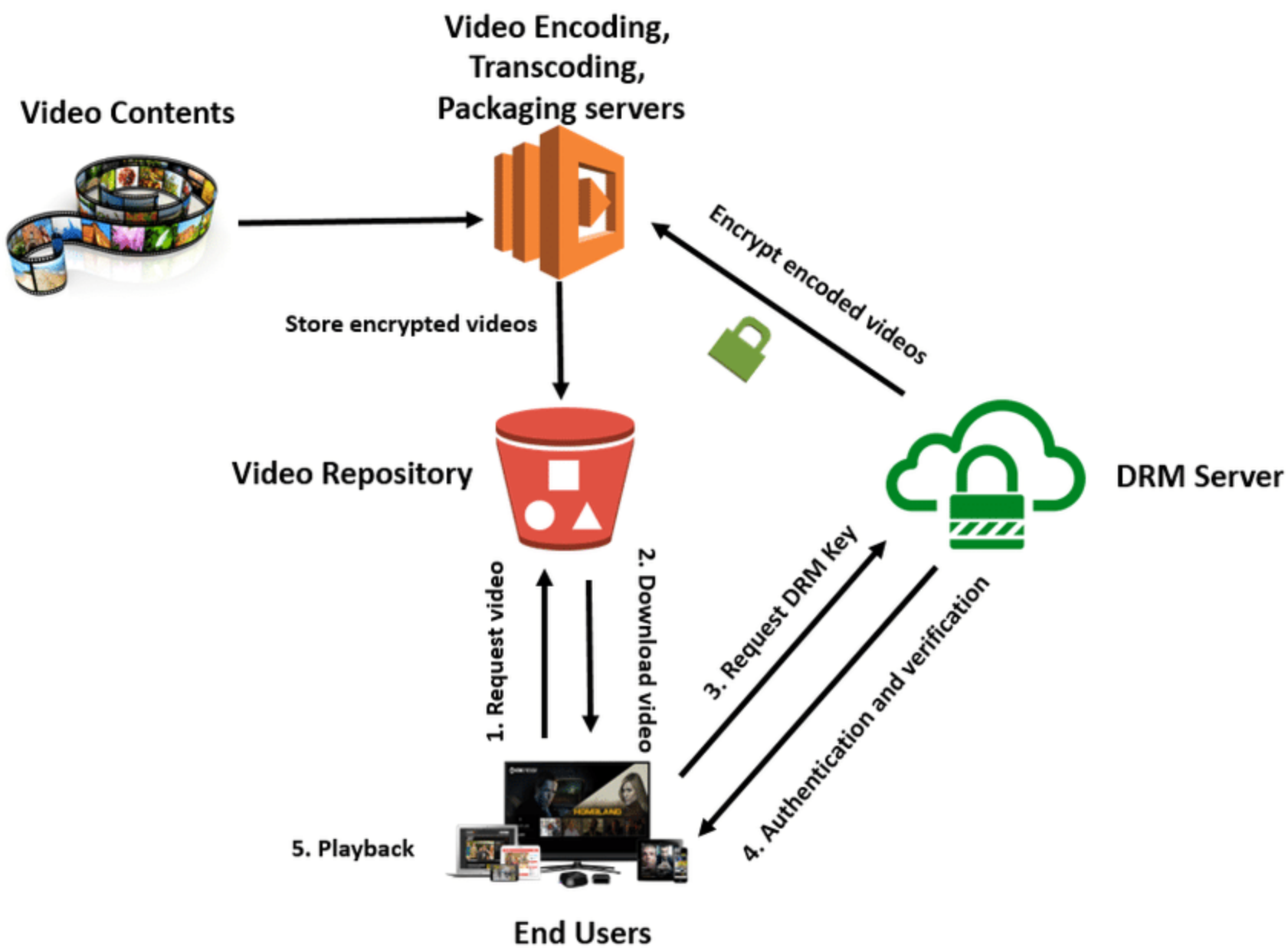
- DRM (*Digital Rights Management*) adalah teknologi untuk mengontrol akses dan penggunaan konten digital seperti film, musik, e-book, dan software agar hanya bisa digunakan sesuai izin pemilik hak cipta.
- DRM = sistem pengamanan berbasis enkripsi + kontrol lisensi

- DRM digunakan untuk:
  - Mencegah pembajakan
  - Membatasi siapa yang boleh mengakses konten
  - Membatasi perangkat yang boleh memutar konten
  - Mengatur durasi akses (misalnya sewa 48 jam)

Cara Kerja DRM

Secara umum prosesnya seperti ini:

- **Konten dienkripsi**
  Video atau file tidak disimpan dalam bentuk asli, tapi sudah terenkripsi.
- **User login & verifikasi lisensi**
  Saat menekan tombol play:
  - Aplikasi meminta lisensi ke server DRM.
  - Server memverifikasi akun & hak akses.
- **Kunci dekripsi dikirim secara aman**
  Jika valid, sistem mengirimkan *decryption key*.
- **Konten didekripsi di perangkat**
  Biasanya dilakukan dalam *secure environment* (*Trusted Execution Environment*).


Video Contents
Video Encoding,
Transcoding,
Packaging servers
Encrypt encoded videos
Store encrypted videos
Video Repository
DRM Server
1. Request video
2. Download video
3. Request DRM Key
4. Authentication and verification
5. Playback
End Users

- Beberapa DRM populer:

  - Widevine → digunakan oleh Netflix, YouTube
  - PlayReady → banyak dipakai Windows ecosystem
  - FairPlay → digunakan Apple

- Di platform seperti Netflix, video tidak pernah dikirim dalam bentuk mentah. Semua stream terenkripsi. Hanya perangkat yang lolos verifikasi DRM yang bisa memutar.

- Kalau file video diunduh langsung dari server tanpa lisensi:
  ➞ file tetap tidak bisa diputar karena terenkripsi.

- Watermarking di Netflix bekerjasama dengan sistem DRM (*Digital Right Management*) seperti *Widevine* (*Google*), *PlayReady* (Microsoft), *FairPlay* (*Apple*)

- Perbedaan DRM dan watermarking,

DRM	**Watermarking**
- mencegah akses illegal	- melacak sumber kebocoran/pembajakan
- berbasis enkripsi	- berbasis penyisipan identitas
- aktif saat streaming	- watermark tetap ada walau video direkam

- Kenapa tidak cukup proteksi konten hanya dengan DRM? Karena DRM bisa dibypass, orang masih bisa merekam video pakai kamera. Saat perekaman terjadi, DRM tidak bisa lagi melindungi, tapi watermark masih bisa mengidentifikasi sumber kebocoran. Inilah alasan *forensic watermarking* sangat penting.

DRM
(Digital Rights Management)

Encryption + Usage management

Prevents illegal use

Complement each other

Forensic Watermarking

Inserts invisible user information

Tracks illegal distribution

TERIMA KASIH