

Analisis Ketahanan dan Kualitas Penyisipan Watermark Digital pada Citra Menggunakan Transformasi Discrete Cosine Transform dan Discrete Wavelet Transform

Abdullah Mubarak - 13522101^{1,2}

Program Studi Teknik Informatika

Sekolah Teknik Elektro dan Informatika

Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia

13522101@std.stei.itb.ac.id, brkmanics@gmail.com

Abstract— Dengan pesatnya perkembangan teknologi informasi di era digital, kebutuhan akan perlindungan hak cipta konten multimedia semakin meningkat. Digital Watermarking menjadi salah satu solusi untuk melindungi kepemilikan citra digital dengan menyisipkan informasi identitas pada citra tersebut. Watermark yang ideal harus memenuhi beberapa kriteria penting, di antaranya adalah *invisible* (tidak terlihat oleh mata manusia) dan *robust* (tahan terhadap berbagai manipulasi). Penelitian ini membandingkan dua metode Watermark berbasis transformasi domain transformasi, yaitu Discrete Cosine Transform (DCT) dan Discrete Wavelet Transform (DWT), untuk menganalisis trade-off antara kualitas citra dan ketahanan Watermark. Metode DCT menyisipkan Watermark pada koefisien mid-frequency dalam blok 8×8 pixels, sedangkan metode DWT melakukan embedding pada sub-band LL hasil dekomposisi wavelet level-1 menggunakan wavelet Haar. Evaluasi kualitas citra menggunakan metrik Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) dan Structural Similarity Index (SSIM), sedangkan ketahanan Watermark diukur menggunakan Normalized Cross-Correlation (NCC) dan Bit Error Rate (BER). Pengujian dilakukan terhadap lima jenis serangan, yaitu kompresi JPEG, Gaussian noise, Gaussian blur, scaling, rotasi, dan kondisi tanpa serangan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode DCT menghasilkan kualitas citra yang superior dengan PSNR mencapai 51.14 dB dan SSIM 0.9993, sedangkan DWT memperoleh PSNR 33.05 dB dan SSIM 0.9948. Namun, dari segi ketahanan, DWT jauh lebih *robust* dengan nilai NCC rata-rata 0.84 dibandingkan DCT yang hanya 0.23. DWT unggul di semua kategori serangan, terutama pada kompresi JPEG dengan NCC 0.912 berbanding 0.004 untuk DCT. Dari eksperimen, dapat disimpulkan bahwa DWT lebih sesuai untuk aplikasi yang mengutamakan ketahanan seperti, sedangkan DCT lebih cocok untuk aplikasi yang memprioritaskan *invisibility* seperti steganografi.

Kata Kunci—Citra Digital, Watermark, DCT, DWT, PSNR, SSIM, NCC, BER.

I. PENDAHULUAN

Era digital telah membawa perubahan dalam cara manusia mengakses, berbagi, dan mendistribusikan

konten multimedia. Kemudahan dalam melakukan replikasi dan distribusi konten digital, khususnya citra, menimbulkan permasalahan terkait pelanggaran hak cipta dan kepemilikan intelektual. Tanpa adanya mekanisme perlindungan yang memadai, konten digital dapat dengan mudah disalin, dimodifikasi, dan didistribusikan tanpa izin dari pemilik aslinya, yang berpotensi menimbulkan kerugian ekonomi dan pelanggaran hukum.

Digital Watermarking muncul sebagai salah satu solusi teknologi untuk mengatasi permasalahan tersebut. Watermarking adalah proses penyisipan informasi tertentu (Watermark) ke dalam media digital secara samar atau sembunyi, yang dapat digunakan untuk verifikasi kepemilikan, pelacakan distribusi, dan autentikasi konten. Berbeda dengan enkripsi yang melindungi konten selama transmisi, Watermark tertanam secara permanen dalam media dan tetap ada meskipun konten telah didistribusikan.

Watermark yang ideal hendaknya memenuhi beberapa kriteria penting. Pertama, Watermark harus *invisible* atau *imperceptible*, artinya penyisipan Watermark tidak boleh menurunkan kualitas visual citra secara signifikan sehingga tidak dapat dideteksi oleh mata manusia. Kedua, Watermark harus *robust* atau tahan terhadap berbagai manipulasi dan serangan, seperti kompresi, filtering, noise, dan transformasi geometris. Ketiga, Watermark harus memiliki kapasitas yang memadai untuk menyimpan informasi identitas. Keempat, proses penyisipan dan ekstraksi Watermark harus efisien secara komputasi.

Terdapat dua pendekatan utama dalam proses Watermarking, yaitu dengan domain ruang dan domain transformasi. Watermarking dengan domain ruang dilakukan dengan memodifikasi langsung nilai pixel citra. Pendekatan ini umumnya lebih sederhana namun kurang robust. Di lain sisi, Watermarking dengan domain transformasi memanfaatkan karakteristik frekuensi citra

melalui transformasi matematis. Pendekatan ini umumnya lebih *robust* terhadap serangan namun lebih kompleks secara komputasi.

Discrete Cosine Transform (DCT) dan Discrete Wavelet Transform (DWT) merupakan dua transformasi yang paling populer digunakan dalam *Watermarking* dengan domain frekuensi. DCT memiliki keunggulan sebagai basis dari standar kompresi JPEG dan MPEG sehingga banyak digunakan dalam aplikasi multimedia. DCT mengubah representasi citra dari domain ruang ke domain frekuensi. DCT bekerja dengan menyisipkan *Watermark* pada koefisien frekuensi tertentu. DWT menawarkan representasi multiresolusi yang memisahkan informasi citra berdasarkan frekuensi dan orientasi. Struktur representasi ini memberikan fleksibilitas dalam pemilihan lokasi embedding yang optimal.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis perbandingan antara DCT dan DWT dalam konteks *digital Watermarking* pada citra, dengan fokus pada evaluasi kuantitatif menggunakan metrik standar yang digunakan di industri.

II. LANDASAN TEORI

A. Citra Digital

Citra digital adalah representasi diskrit dari suatu objek nyata melalui pencuplikan secara ruang dan atau waktu. Pencuplikan secara ruang, seperti pada gambar, menggunakan koordinat kartesian (x, y) dengan masing-masing titik memiliki nilai tertentu. Citra digital dapat direpresentasikan sebagai matriks berukuran $M \times N$.

Citra digital tersusun atas elemen dasar yang disebut pixel. Setiap pixel merepresentasikan satu sampel intensitas cahaya pada lokasi tertentu. Pada citra keabuan (*grayscale*), nilai intensitas umumnya direpresentasikan menggunakan 8 bit sehingga memiliki 256 tingkat keabuan, dari hitam (0) hingga putih (255). Kualitas dan ukuran citra digital ditentukan oleh dua parameter utama, yaitu resolusi spasial dan kedalaman bit. Resolusi spasial menyatakan jumlah pixel dalam arah horizontal dan vertikal, sedangkan kedalaman bit menentukan jumlah tingkat intensitas yang dapat direpresentasikan.

Dalam pemrosesan citra digital, citra bisa direpresentasikan sebagai sinyal dua dimensi yang memiliki karakteristik frekuensi. Komponen frekuensi rendah merepresentasikan area citra yang relatif homogen atau halus, sedangkan komponen frekuensi tinggi merepresentasikan detail seperti tepi dan tekstur. Representasi frekuensi ini menjadi dasar bagi berbagai teknik pemrosesan citra lanjutan, termasuk kompresi dan *Watermarking* berbasis domain transformasi.

B. Digital Watermarking

Digital Watermarking adalah teknik penyisipan informasi ke dalam media digital secara tersembunyi dengan tujuan utama melindungi hak cipta, melakukan autentikasi, atau melacak distribusi konten. Informasi yang disisipkan (*Watermark*), dapat berupa teks, logo, kode identitas, atau citra biner, dan dirancang agar tidak mengganggu kualitas visual media pembawa.

Berdasarkan visibilitas, Teknik *Watermarking* dibedakan menjadi *Watermark* terlihat (*visible Watermarking*) dan *Watermark* tidak terlihat (*invisible Watermarking*). Pada *Watermark* terlihat, informasi kepemilikan ditampilkan secara eksplisit, sedangkan pada *Watermark* tidak terlihat, *Watermark* disisipkan sedemikian rupa sehingga tidak dapat dideteksi oleh visual manusia. Penelitian ini berfokus pada *Watermarking* tidak terlihat karena relevansinya dalam perlindungan hak cipta digital.

Ditinjau dari ketahanannya, *Watermark* dapat bersifat *robust*, *fragile*, atau *semi-fragile*. *Watermark* yang *robust* dirancang agar tetap dapat dideteksi meskipun citra mengalami berbagai manipulasi seperti kompresi, *noise*, atau transformasi geometris. Sebaliknya, *Watermark* *fragile* akan rusak ketika citra dimodifikasi sehingga cocok untuk tujuan autentikasi integritas. Pemilihan jenis *Watermark* bergantung pada kebutuhan aplikasi.

Berdasarkan domain penyisipannya, *Watermarking* dibagi menjadi metode domain spasial dan domain transformasi. Domain spasial adalah metode yang menyisipkan *Watermark* dengan memodifikasi nilai pixel secara langsung. Di lain sisi, metode domain transformasi menyisipkan *Watermark* pada koefisien hasil transformasi matematis seperti Discrete Cosine Transform (DCT) dan Discrete Wavelet Transform (DWT). Metode domain transformasi umumnya menawarkan ketahanan yang lebih baik terhadap serangan dibandingkan metode domain spasial.

Sistem *Watermarking* yang baik hendaknya memenuhi beberapa kriteria utama, yaitu *imperceptibility* (*Watermark* tidak terlihat), *robust* (tahan terhadap serangan), *capacity* (kemampuan menyimpan informasi), *security* (sulit dipalsukan atau dihapus), dan efisiensi komputasi. Kelima aspek ini sering kali saling bertentangan sehingga desain *Watermarking* selalu melibatkan kompromi atau *tradeoff* antara kualitas visual dan ketahanan *Watermark*.

C. Discrete Cosine Transform (DCT)

Discrete Cosine Transform (DCT) merupakan transformasi yang mengubah sinyal dari domain spasial ke domain frekuensi dengan menggunakan fungsi kosinus sebagai basis. DCT banyak digunakan dalam sistem

kompresi citra dan video, khususnya pada standar JPEG dan MPEG, karena kemampuannya mengkonsentrasi energi sinyal pada sejumlah kecil koefisien frekuensi rendah.

Pada DCT dua dimensi, citra biasanya dibagi menjadi blok-blok kecil berukuran tetap, seperti 8×8 pixel. Setiap blok ditransformasikan secara independen sehingga menghasilkan matriks koefisien DCT. Koefisien pada posisi frekuensi rendah merepresentasikan komponen rata-rata dan variasi intensitas yang lambat, sedangkan koefisien frekuensi tinggi merepresentasikan detail halus dan tepi.

Dalam konteks *Watermarking*, koefisien DCT pada frekuensi menengah sering dipilih sebagai lokasi penyisipan *Watermark*. Penyisipan pada frekuensi rendah berpotensi menurunkan kualitas visual secara signifikan, sedangkan penyisipan pada frekuensi tinggi cenderung tidak tahan terhadap kompresi dan filtering. Dengan demikian, frekuensi menengah menawarkan kompromi antara invisibility dan robustness.

Keunggulan utama *Watermarking* berbasis DCT adalah kualitas visual yang sangat baik dan kompatibilitasnya dengan standar kompresi JPEG. Namun, karena *Watermark* disisipkan pada koefisien yang juga menjadi target utama proses kuantisasi JPEG, metode ini relatif rentan terhadap kompresi lossy dan transformasi geometris.

D. Discrete Wavelet Transform (DWT)

Discrete Wavelet Transform (DWT) merupakan transformasi yang merepresentasikan sinyal dalam domain waktu dan frekuensi secara simultan. Berbeda dengan DCT yang menggunakan basis global, DWT menggunakan basis wavelet yang bersifat lokal sehingga mampu merepresentasikan informasi citra pada berbagai skala resolusi.

Pada DWT dua dimensi, citra didekomposisi menjadi empat sub-band utama, yaitu LL, LH, HL, dan HH. Sub-band LL memuat informasi aproksimasi dengan frekuensi rendah, sedangkan sub-band lainnya memuat detail horizontal, vertikal, dan diagonal. Proses dekomposisi ini dapat dilakukan secara bertingkat (multi-level) dengan mendekomposisi kembali sub-band LL.

Dalam *Watermarking* berbasis DWT, *Watermark* umumnya disisipkan pada sub-band LL karena sub-band ini mengandung energi terbesar dan relatif stabil terhadap berbagai serangan seperti kompresi dan noise. Penyisipan pada domain wavelet memungkinkan *Watermark* tersebar secara global dan multi-resolusi sehingga meningkatkan ketahanannya terhadap manipulasi citra.

Kelebihan utama DWT adalah robustness yang tinggi terhadap berbagai jenis serangan, termasuk kompresi lossy dan transformasi geometris ringan. Namun, penyisipan pada sub-band frekuensi rendah berpotensi

menurunkan kualitas visual apabila parameter penyisipan tidak dikontrol dengan baik sehingga nilai PSNR cenderung lebih rendah dibandingkan metode DCT.

D. Metrik Evaluasi Watermarking

Evaluasi performa sistem *Watermarking* umumnya dilakukan dari dua aspek utama, yaitu kualitas citra hasil penyisipan dan ketahanan *Watermark* terhadap serangan. Kualitas citra sering diukur menggunakan Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) dan Structural Similarity Index (SSIM). PSNR mengukur perbedaan rata-rata kuadrat antara citra asli dan citra *Watermarked* dalam skala logaritmik, sedangkan SSIM mengevaluasi kesamaan struktur citra berdasarkan luminansi, kontras, dan struktur.

Ketahanan *Watermark* dievaluasi dengan membandingkan *Watermark* asli dan *Watermark* hasil ekstraksi setelah citra mengalami serangan. Metrik yang umum digunakan adalah Normalized Cross-Correlation (NCC) dan Bit Error Rate (BER). NCC mengukur tingkat kemiripan antara dua *Watermark*, sedangkan BER menyatakan persentase bit *Watermark* yang salah terdeteksi. Kombinasi keempat metrik ini memberikan gambaran komprehensif mengenai trade-off antara invisibility dan robustness pada sistem *Watermarking*.

III. IMPLEMENTASI SOLUSI

Sistem diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan memanfaatkan pustaka NumPy, OpenCV, SciPy, dan PyWavelets. Alur implementasi secara umum dimulai dari pembuatan data uji, penyisipan *Watermark* menggunakan dua metode berbeda (DCT dan DWT), penerapan serangan pada citra hasil *Watermarking*, ekstraksi *Watermark*, dan diakhiri dengan evaluasi performa menggunakan metrik PSNR, SSIM, NCC, dan BER.

A. DCT Watermarking

Implementasi *Watermarking* berbasis DCT dilakukan dengan pendekatan berbasis blok dengan memisahkan citra awal menjadi blok-blok berukuran 8×8 pixel. Setiap blok ditransformasikan ke domain frekuensi menggunakan DCT dua dimensi. *Watermark* disisipkan dengan memodifikasi satu koefisien frekuensi, yaitu pada posisi (4,4), untuk menjaga keseimbangan antara invisibility dan robustness.

Proses penyisipan dilakukan dengan prinsip modifikasi relatif, yaitu menambah atau mengurangi nilai absolut koefisien DCT berdasarkan bit *Watermark* yang akan disisipkan. Pendekatan ini menjaga skala perubahan tetap proporsional terhadap nilai lokal blok.

```
for i in range(0, h, 8):
    for j in range(0, w, 8):
        block = host[i:i+8, j:j+8]
        dct_block = dct2(block)
```

```

wm_bit = Watermark[i//8, j//8]
if wm_bit > 0:
    dct_block[4, 4] += alpha *
    abs(dct_block[4, 4])
else:
    dct_block[4, 4] -= alpha *
    abs(dct_block[4, 4])

result[i:i+8, j:j+8]=
idct2(dct_block)

```

Ekstraksi *Watermark* dilakukan dengan membandingkan nilai koefisien DCT pada posisi yang sama antara citra *Watermarked* dan citra original. Jika koefisien hasil *Watermarking* lebih besar dibandingkan citra original, maka bit *Watermark* dianggap bernilai 1, dan sebaliknya bernilai 0. Pendekatan ini menjadikan metode DCT bersifat non-blind, karena memerlukan citra original pada tahap ekstraksi.

B. DWT Watermarking

Pada metode DWT, *Watermarking* dilakukan dengan menerapkan Discrete Wavelet Transform level-1 menggunakan wavelet Haar. Transformasi ini menghasilkan empat sub-band, yaitu LL, LH, HL, dan HH. *Watermark* disisipkan pada sub-band LL karena sub-band ini mengandung informasi frekuensi rendah yang paling stabil terhadap berbagai serangan.

Berbeda dengan metode DCT yang bersifat block-based, *Watermarking* DWT dilakukan secara global pada sub-band LL. *Watermark* disisipkan menggunakan skema multiplicative embedding, di mana nilai *Watermark* dikalikan dengan koefisien LL dan faktor kekuatan penyisipan α .

```

coeffs = pywt.dwt2(host, 'haar')
cA, (cH, cV, cD) = coeffs

cA_wm = cA + alpha * Watermark * cA

Watermarked = pywt.idwt2((cA_wm, (cH, cV,
cD)), 'haar')

```

Ekstraksi *Watermark* dilakukan dengan membandingkan sub-band LL dari citra *Watermarked* dan citra original. *Watermark* diperoleh dari selisih kedua koefisien LL yang dinormalisasi oleh faktor embedding. Hasil ekstraksi kemudian dibinerisasi menggunakan *threshold* untuk memperoleh *Watermark* biner akhir.

Pendekatan ini juga bersifat non-blind, namun memberikan ketahanan yang lebih tinggi karena *Watermark* tertanam pada komponen frekuensi rendah yang dominan.

C. Simulasi Serangan pada Citra Hasil Proses *Watermark*

Untuk menguji ketahanan *Watermark*, penulis mengimplementasikan beberapa jenis serangan yang umum ditemui dalam distribusi citra digital. Serangan-serangan ini mencakup kompresi, noise, filtering, dan transformasi geometris. Setiap serangan diterapkan secara identik pada citra hasil *Watermarking* DCT dan DWT.

Jenis serangan yang diimplementasikan meliputi:

1. Kompresi JPEG dengan kualitas 50.
2. Penambahan Gaussian noise dengan simpangan baku tertentu.
3. Gaussian blur dengan kernel 5×5 .
4. Scaling citra sebesar 50% dan dikembalikan ke ukuran semula.
5. Rotasi citra sebesar 5 derajat dan rotasi balik.

```

attacks = {
    'No Attack': image.copy(),
    'JPEG Q=50': jpeg_compression(image,
50),
    'Gaussian Noise': gaussian_noise(image,
sigma=10),
    'Gaussian Blur':
cv2.GaussianBlur(image, (5, 5), 0),
    'Scaling 50%': scaling(image, 0.5),
    'Rotation 5°': rotation(image, 5),
}

```

D. Evaluasi Performa dan Metrik

Evaluasi performa dilakukan dengan menghitung metrik kualitas citra dan ketahanan *Watermark*. Kualitas citra hasil *Watermarking* diukur menggunakan PSNR dan SSIM, sedangkan ketahanan *Watermark* diukur menggunakan Normalized Cross-Correlation (NCC) dan Bit Error Rate (BER) antara *Watermark* asli dan *Watermark* hasil ekstraksi.

Perhitungan NCC dilakukan dengan menormalkan *Watermark* asli dan hasil ekstraksi untuk menghindari bias akibat perbedaan skala, sedangkan BER dihitung sebagai proporsi bit *Watermark* yang salah terdeteksi.

```

orig_norm = (orig - np.mean(orig)) /
(np.std(orig) + 1e-10)
extr_norm = (extr - np.mean(extr)) /
(np.std(extr) + 1e-10)
ncc = np.mean(orig_norm * extr_norm)

ber = np.sum(orig_bin != extr_bin) /
len(orig_bin)

```

E. Reproduksibilitas Eksperimen

Untuk memastikan reproduksibilitas hasil, eksperimen dijalankan dengan seed acak yang tetap. Seluruh parameter penting seperti ukuran citra, ukuran *Watermark*, nilai α , dan jenis serangan dikontrol secara eksplisit di dalam kode. Visualisasi hasil eksperimen juga dihasilkan secara otomatis untuk mendukung analisis kualitatif dan kuantitatif.

IV. HASIL ANALISIS

Pengujian menggunakan citra buatan berupa citra grayscale berukuran 512x512. *Watermark* yang digunakan adalah pola logo dengan ukuran 64x64. Detail hyperparameter untuk eksperimen:

- Embedding strength (α): 0.1
- DCT block size: 8×8
- DWT wavelet: Haar, level 1

A. Evaluasi Kualitas Citra

Hasil evaluasi kualitas citra bisa dilihat di tabel berikut:

Metode	PSNR (dB)	SSIM	MSE
DCT	51.14	0.9993	0.5
DWT	33.05	0.9947	32.22
DCT-DWT	18.09	0.0046	-31.72

Berdasarkan tabel tersebut, metode *Watermarking* berbasis DCT menghasilkan kualitas citra yang lebih baik dibandingkan metode DWT. Nilai PSNR pada metode DCT sebesar 51,14 dB menunjukkan bahwa distorsi akibat proses penyisipan *Watermark* sangat kecil. Sementara itu, metode DWT menghasilkan nilai PSNR sebesar 33,05 dB, yang masih termasuk dalam kategori baik tetapi berada jauh di bawah metode DCT. Selisih nilai PSNR sebesar 18,09 dB menunjukkan bahwa metode DCT lebih unggul dalam menjaga kualitas visual citra.

Hasil pengujian menggunakan metrik SSIM juga menunjukkan kecenderungan yang sama. Metode DCT memperoleh nilai SSIM sebesar 0,9993, yang menandakan tingkat kemiripan struktural citra hasil *Watermarking* dengan citra asli sangat tinggi. Metode DWT menghasilkan nilai SSIM sebesar 0,9947, yang masih menunjukkan kesamaan struktur yang baik, namun lebih rendah dibandingkan metode DCT. Perbedaan nilai SSIM sebesar 0,0046 mengindikasikan bahwa perubahan struktur citra pada metode DCT lebih kecil dibandingkan metode DWT.

Pada metrik Mean Squared Error (MSE), metode DCT menghasilkan nilai 0,5, sedangkan metode DWT menghasilkan nilai 32,22. Selisih nilai MSE sebesar -31,72 menunjukkan bahwa error yang dihasilkan metode DWT jauh lebih besar dibandingkan metode DCT. Nilai MSE yang rendah pada metode DCT menunjukkan bahwa perubahan nilai intensitas pixel akibat proses *Watermarking* sangat minimal. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa metode DCT lebih baik dalam mempertahankan kualitas citra dibandingkan metode DWT, khususnya dari aspek invisibility.

A. Evaluasi Ketahanan Citra

Hasil evaluasi ketahanan (*robustness*) citra bisa dilihat di tabel berikut:

No	Serangan	DCT NCC	DCT BER	DWT NCC	DWT BER
1	No Attack	0.995	0.002	1.000	0.000
2	JPEG Q=50	0.004	0.499	0.912	0.033
3	Gaussian Noise $\sigma=10$	0.250	0.354	0.720	0.107
4	Gaussian Blur 5×5	0.001	0.501	0.719	0.108
5	Scaling 50%	-0.010	0.506	0.883	0.044
6	Rotation 5°	0.136	0.424	0.818	0.077
Rata-rata		0.230	0.381	0.842	0.062

Berdasarkan tabel tersebut, dapat diketahui bahwa metode DWT secara konsisten menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan metode DCT. Pada kondisi tanpa serangan, kedua metode mampu mengekstraksi *Watermark* dengan sangat baik. Metode DCT menghasilkan nilai NCC sebesar 0,995 dengan BER 0,002, sedangkan metode DWT mencapai NCC 1,000 dan BER 0,000, yang menunjukkan ekstraksi *Watermark* hampir sempurna.

Pada serangan kompresi JPEG dengan kualitas 50, metode DCT mengalami penurunan performa yang sangat signifikan. Nilai NCC DCT hanya sebesar 0,004 dengan BER 0,499, yang menunjukkan *Watermark* hampir tidak dapat dikenali. Sebaliknya, metode DWT tetap menunjukkan ketahanan yang tinggi dengan NCC sebesar 0,912 dan BER 0,033. Hasil ini menunjukkan bahwa *Watermark* berbasis DWT jauh lebih tahan terhadap kompresi JPEG dibandingkan *Watermark* berbasis DCT.

Pada serangan Gaussian noise ($\sigma = 10$), metode DCT menghasilkan NCC 0,250 dan BER 0,354, yang menunjukkan tingkat kerusakan *Watermark* cukup tinggi. Metode DWT pada kondisi yang sama menghasilkan NCC 0,720 dan BER 0,107, yang masih berada pada tingkat keterdeteksian yang baik. Pola serupa juga terlihat pada serangan Gaussian blur (kernel 5×5), di mana metode DCT menghasilkan NCC 0,001 dan BER 0,501, sedangkan metode DWT menghasilkan NCC 0,719 dan BER 0,108.

Pada serangan scaling sebesar 50%, metode DCT kembali menunjukkan performa yang sangat rendah dengan NCC -0,010 dan BER 0,506, yang mengindikasikan *Watermark* hampir sepenuhnya rusak. Metode DWT tetap mampu mempertahankan *Watermark* dengan NCC 0,883 dan BER 0,044. Pada serangan rotasi sebesar 5° , metode DCT menghasilkan NCC 0,136 dan BER 0,424, sedangkan metode DWT menghasilkan NCC 0,818 dan BER 0,077, yang menunjukkan ketahanan yang jauh lebih baik.

Secara rata-rata, metode DCT menghasilkan NCC sebesar 0,230 dengan BER 0,381, sedangkan metode DWT menghasilkan NCC sebesar 0,842 dengan BER 0,062. Hasil ini menunjukkan bahwa metode DWT memiliki ketahanan *Watermark* yang jauh lebih baik dibandingkan metode DCT terhadap berbagai jenis serangan yang diuji.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil evaluasi kualitas citra dan ketahanan *Watermark*, dapat disimpulkan bahwa metode *Watermarking* berbasis Discrete Cosine Transform (DCT) dan Discrete Wavelet Transform (DWT) memiliki karakteristik performa yang berbeda dan saling melengkapi. Dari sisi kualitas citra, metode DCT menunjukkan performa yang lebih baik dengan nilai PSNR sebesar 51,14 dB, SSIM 0,9993, dan MSE yang sangat rendah, yaitu 0,5. Hasil ini menunjukkan bahwa penyisipan *Watermark* menggunakan DCT menghasilkan distorsi yang sangat kecil dan hampir tidak memengaruhi kualitas visual citra sehingga metode ini unggul dari aspek invisibility.

Sebaliknya, metode DWT menghasilkan nilai PSNR yang lebih rendah, yaitu 33,05 dB, dengan SSIM 0,9947 dan MSE 32,22. Meskipun demikian, nilai-nilai tersebut masih berada dalam kategori kualitas citra yang baik dan tetap imperceptible bagi pengamatan visual manusia. Perbedaan kualitas citra antara DCT dan DWT menunjukkan bahwa penyisipan *Watermark* pada domain frekuensi rendah (sub-band LL) pada DWT memberikan dampak distorsi yang lebih besar dibandingkan penyisipan pada koefisien frekuensi menengah pada DCT.

Dari sisi ketahanan *Watermark*, metode DWT secara konsisten menunjukkan performa yang jauh lebih baik dibandingkan metode DCT. Nilai NCC rata-rata metode DWT sebesar 0,842 dengan BER 0,062, sedangkan metode DCT hanya menghasilkan NCC rata-rata 0,230 dengan BER 0,381. Metode DWT mampu mempertahankan *Watermark* dengan baik pada seluruh jenis serangan yang diuji, termasuk kompresi JPEG, noise, blur, scaling, dan rotasi. Sebaliknya, metode DCT mengalami penurunan performa yang signifikan pada hampir semua serangan, khususnya pada kompresi JPEG dan serangan geometris.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan adanya trade-off antara kualitas citra dan ketahanan *Watermark*. Metode DCT lebih sesuai untuk aplikasi yang mengutamakan kualitas visual citra, sedangkan metode DWT lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan *Watermark* terhadap berbagai manipulasi citra.

A. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk pengembangan selanjutnya. Pertama, penelitian lanjutan dapat mengeksplorasi nilai parameter kekuatan penyisipan (α) yang adaptif

berdasarkan karakteristik lokal citra untuk memperoleh keseimbangan yang lebih baik antara kualitas citra dan ketahanan *Watermark*.

Kedua, pendekatan hibrida DCT-DWT dapat dikembangkan untuk menggabungkan keunggulan kedua metode sehingga *Watermark* tetap imperceptible namun memiliki ketahanan yang lebih tinggi.

Ketiga, penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada pengembangan metode blind *Watermarking* sehingga proses ekstraksi *Watermark* tidak memerlukan citra asli. Keempat, pengujian dapat diperluas pada citra berwarna serta jenis serangan yang lebih kompleks, seperti histogram equalization, print-scan, atau kompresi JPEG2000. Dengan pengembangan tersebut, sistem *Watermarking* yang dihasilkan diharapkan dapat lebih relevan dan aplikatif untuk penggunaan di dunia nyata.

VI. PRANALA GITHUB

<https://github.com/b33rk/Makalah-Citra-1>

REFERENSI

- [1] Hore, A., & Ziou, D. (2010). Image quality metrics: PSNR vs. SSIM. 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2366-2369. DOI: 10.1109/ICPR.2010.579
- [2] Xia, X. G., Bonelet, C. G., & Arce, G. R. (1997). A multiresolution *Watermark* for digital images. *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, Vol. 3, 548-551. DOI: 10.1109/ICIP.1997.632171
- [3] Munir, R. (2025). *Pengantar Pemrosesan Citra Digital (Bagian 1 dan 2)*. Materi Kuliah IF4073. Program Studi Teknik Informatika, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung. Tersedia: <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Citra/2025-2026/>

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa makalah yang saya tulis ini adalah tulisan saya sendiri, bukan saduran, atau terjemahan dari makalah orang lain, dan bukan plagiasi.

Bandung, 24 Desember 2025


ttd
Abdullah Mubarak / 13522101