



Pendekatan DCT untuk Evaluasi Robustness dan Imperceptibility pada Watermarking Citra JPEG

Indrawan Ady Saputro ^{1*}, Febrianta Surya Nugraha ², dan Widiyanto Hadi ³

¹ STMIK AMIKOM Surakarta; Sukoharjo, Jawa Tengah; e-mail : indrawanadysaputro@gmail.com

² UIN Raden Mas Said Surakarta; Sukoharjo, Jawa Tengah; e-mail : ubingg@gmail.com

³ STMIK AMIKOM Surakarta; Sukoharjo, Jawa Tengah; e-mail : widiyantohadi@gmail.com

* Corresponding Author : Indrawan Ady Saputro

Abstract: Digital watermarking is important for copyright protection, but challenges remain in maintaining a balance between imperceptibility and robustness. This study evaluated Discrete Cosine Transform (DCT)-based watermarking on JPEG images by inserting binary watermarks at the intermediate frequency coefficient of the DCT block 8×8. The method was tested against JPEG compression, Gaussian noise, Gaussian blur, and Salt & Pepper noise to assess the visual quality and durability of the watermark. The results show high visual quality with an average PSNR of 39.99 dB and a SSIM of 0.96, so the watermark is almost imperceptible. Robustness testing yielded a BER of 1.5% on Gaussian noise, 5.2% on JPEG compression, and 8.2% on Salt & Pepper noise. These findings prove that the DCT method is able to maintain image quality and maintain a watermark on most interferences, despite degrading performance in impulse attacks and aggressive compression. In practical terms, this approach can be applied to digital image protection systems and forms the basis for the development of more robust hybrid or adaptive methods in the future.

Keywords: Digital Watermarking; DCT; JPEG; Robustness; Imperseptibilitas

Abstrak: Digital watermarking penting untuk perlindungan hak cipta, namun tantangan tetap muncul dalam menjaga keseimbangan antara imperceptibility dan robustness. Penelitian ini mengevaluasi watermarking berbasis Discrete Cosine Transform (DCT) pada citra JPEG dengan menyisipkan watermark biner pada koefisien frekuensi menengah blok DCT 8×8. Metode diuji terhadap kompresi JPEG, Gaussian noise, Gaussian blur, dan Salt & Pepper noise untuk menilai kualitas visual dan ketahanan watermark. Hasil menunjukkan kualitas visual tinggi dengan rata-rata PSNR 39,99 dB dan SSIM 0,96, sehingga watermark hampir tidak terlihat. Pengujian *robustness* menghasilkan BER 1,5% pada Gaussian noise, 5,2% pada kompresi JPEG, dan 8,2% pada Salt & Pepper noise. Temuan ini membuktikan bahwa metode DCT mampu menjaga kualitas citra dan mempertahankan watermark pada sebagian besar gangguan, meskipun performa menurun pada serangan impuls dan kompresi agresif. Secara praktis, pendekatan ini dapat diterapkan pada sistem proteksi citra digital dan menjadi dasar pengembangan metode hibrid atau adaptif yang lebih tangguh di masa mendatang.

Received: September 26, 2025

Revised: September 29, 2025

Accepted: November 22, 2025

Published: November 24, 2025

Curr. Ver.: November 24, 2025



Copyright: © 2025 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

Kata kunci: Digital Watermarking; DCT; JPEG; Robustness; Imperseptibilitas

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi multimedia dalam era digital telah mempermudah distribusi dan akses citra digital melalui internet, media sosial, maupun layanan cloud. Namun, kemudahan ini juga meningkatkan risiko pelanggaran hak cipta, penyalahgunaan, dan

manipulasi data multimedia [1], [2], [3]. Untuk mengatasi tantangan tersebut, salah satu solusi yang banyak diteliti adalah digital watermarking, yaitu teknik penyisipan informasi rahasia ke dalam citra secara tersembunyi tanpa merusak kualitas visualnya (*imperceptibility*), serta tetap bertahan terhadap proses pengolahan citra (*robustness*). Digital watermarking adalah teknik penyisipan informasi atau tanda tertentu (disebut *watermark*) ke dalam suatu media digital seperti citra, audio, atau video dengan cara yang tidak terlihat secara kasat mata atau tidak terdengar secara langsung, tetapi dapat dideteksi atau diekstraksi ketika diperlukan. Tujuan utamanya adalah melindungi hak cipta, menjaga keaslian, dan melacak distribusi karya digital tanpa merusak kualitas media tersebut [4].

Pada citra JPEG, tantangan watermarking muncul karena proses kompresi lossy berbasis Discrete Cosine Transform (DCT) yang dapat mengubah koefisien frekuensi dan merusak watermark jika tidak dirancang dengan tepat. DCT bekerja dengan memetakan citra ke domain frekuensi, sehingga koefisien tertentu dapat dimanfaatkan untuk penyisipan watermark, namun proses kuantisasi JPEG tetap menjadi ancaman terhadap ketahanan watermark [5]. Oleh karena itu, dibutuhkan metode yang mampu menjaga *imperceptibility* sekaligus mempertahankan watermark di bawah berbagai bentuk serangan pengolahan citra. Sehingga tahan terhadap berbagai bentuk gangguan, seperti proses kompresi JPEG yang bersifat lossy, penambahan noise acak, efek blur akibat penyaringan, pemotongan sebagian area citra (*cropping*), hingga transformasi geometrik seperti rotasi dan penskalaan [6].

Sejumlah penelitian terkini telah mengeksplorasi pendekatan berbeda untuk mengoptimalkan keseimbangan antara *imperceptibility* dan *robustness*. Metode tradisional berbasis DCT dan DWT masih relevan karena kesederhanaannya serta kompatibilitas dengan JPEG [7], [8]. Algoritma berbasis autoencoder multiskala dengan perhatian kanal mampu mencapai PSNR tinggi (>48 dB) sekaligus robust terhadap kompresi JPEG Q=50 [9]. Sementara itu, metode semi-blind berbasis DCGAN yang mencapai SSIM $\sim 0,95$ dengan BER rendah, namun tetap lemah terhadap noise [10].

Metode *hybrid* juga banyak dikembangkan untuk meningkatkan kinerja. Kombinasi DCT-DWT-SVD terbukti menghasilkan *imperceptibility* lebih baik dengan *robustness* yang lebih stabil dibanding metode tunggal [11]. Dalam konteks citra medis metode Schur decomposition berbasis LWT-DCT-SVD yang mencapai PSNR tinggi tanpa mengurangi detail diagnostik [12]. Penelitian lain menggunakan transformasi Slantlet dan algoritma *knight tour* untuk watermarking MRI, yang memperlihatkan hasil *imperceptibility* sangat baik dan ketahanan terhadap noise [13].

Selain pendekatan transformasi, beberapa studi memanfaatkan teknik optimisasi dan *error correction*. Misalnya, algoritma berbasis DCT yang dipadukan dengan BCH *Error Correcting Code* mampu memperbaiki akurasi ekstraksi pada kondisi serangan agresif [14]. Pendekatan lain memanfaatkan algoritma genetik untuk pemilihan koefisien DCT yang optimal sehingga *trade-off* antara *imperceptibility* dan *robustness* dapat diseimbangkan [15].

Di sisi lain, integrasi metode berbasis pembelajaran mesin menunjukkan potensi yang menjanjikan. Pembelajaran mendalam (*deep learning*) dapat meningkatkan *robustness*, meskipun membutuhkan dataset besar dan biaya komputasi tinggi [15], [16]. Metode lain seperti blind watermarking berbasis perbedaan koefisien inter-block pada frekuensi menengah DCT, yang terbukti lebih tangguh terhadap serangan gabungan dibanding metode tradisional [17].

Meskipun berbagai metode baru bermunculan, pendekatan berbasis DCT tetap penting karena kesederhanaannya, efisiensi komputasi, dan kompatibilitas dengan format JPEG yang paling banyak digunakan. Namun, banyak penelitian sebelumnya hanya mengevaluasi ketahanan terhadap satu jenis serangan atau tidak menilai *imperceptibility* dan *robustness* secara bersamaan. Selain itu, variabilitas performa pada citra dengan tekstur yang berbeda juga jarang dibahas secara sistematis [18]. Tantangan utama tetap sama, yaitu menjaga agar watermark tidak terlihat secara visual (*imperceptibility*) sekaligus mampu bertahan dari berbagai bentuk serangan (*robustness*) [19].

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini berfokus pada evaluasi komprehensif metode *watermarking* berbasis DCT pada citra JPEG, dengan mengukur kualitas visual menggunakan PSNR dan SSIM serta ketahanan terhadap berbagai jenis serangan menggunakan Bit Error Rate (BER). Pendekatan ini bertujuan memberikan gambaran lebih jelas mengenai potensi dan keterbatasan metode DCT sebagai teknik *watermarking* tradisional, sekaligus menjadi landasan bagi pengembangan metode hibrid atau adaptif di masa mendatang.

2. Kajian Pustaka atau Penelitian Terkait

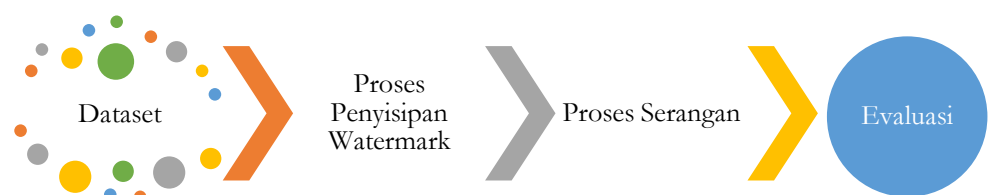
Digital watermarking merupakan metode penyisipan informasi tersembunyi pada media digital, seperti citra, audio, atau video, tanpa menurunkan kualitas visual atau auditori secara signifikan [20]. Pada ranah citra, tantangan utama terletak pada kemampuan metode untuk menjaga *imperceptibility* yakni agar watermark tidak terlihat oleh pengamat serta *robustness* agar tetap dapat terdeteksi meskipun citra mengalami kompresi atau manipulasi [21]. Sejumlah penelitian terdahulu mengadopsi domain transformasi, salah satunya Discrete Cosine Transform (DCT), karena keunggulannya dalam merepresentasikan frekuensi dan kemampuannya beradaptasi terhadap standar kompresi JPEG [22], [23]. Metode DCT memungkinkan penyisipan watermark pada koefisien frekuensi menengah sehingga keseimbangan antara ketahanan dan kualitas citra dapat dicapai.

Penelitian-penelitian terbaru memperkuat posisi DCT sebagai pendekatan yang efektif. Watermarking berbasis DCT mampu mempertahankan kualitas visual dengan nilai Structural Similarity Index Measure (SSIM) di atas 0,95 meskipun citra mengalami kompresi JPEG hingga kualitas 50% [24]. Penelitian lain juga menekankan ketahanan watermark terhadap serangan *Gaussian noise*, *blur*, serta *cropping* dengan *bit error rate* (BER) rata-rata di bawah 0,02 [25]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian hanya berfokus pada ketahanan terhadap satu jenis serangan atau pada pengujian kualitas visual terbatas, sehingga belum memberikan gambaran menyeluruh tentang interaksi antara berbagai bentuk gangguan dan tingkat *imperceptibility*.

Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang tidak hanya mengevaluasi kualitas citra menggunakan metrik seperti Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) dan SSIM, tetapi juga menguji ketahanan watermark terhadap berbagai serangan sekaligus, seperti kompresi JPEG, *Gaussian noise*, *motion blur*, dan transformasi geometrik. Penelitian dengan pendekatan ini diharapkan dapat mengisi kesenjangan yang masih ada, yaitu kurangnya evaluasi komprehensif antara *robustness* dan *imperceptibility* pada teknik watermarking berbasis DCT. Dengan demikian, hasil penelitian akan memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan metode watermarking yang mampu melindungi hak cipta sekaligus menjaga kualitas visual citra digital pada beragam kondisi serangan.

3. Metode yang Diusulkan

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja watermarking digital berbasis Discrete Cosine Transform (DCT) pada citra JPEG, dengan fokus pada *imperceptibility* dan *robustness*. Alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian

3.1. Dataset

Dalam penelitian ini digunakan sebanyak 500 citra grayscale berformat JPEG/PNG dengan resolusi seragam 256×256 piksel sebagai data uji. Pemilihan resolusi tersebut dilakukan untuk memastikan konsistensi dalam proses perhitungan Discrete Cosine Transform (DCT), mengingat algoritma DCT pada watermarking umumnya bekerja dengan cara membagi citra ke dalam blok berukuran 8×8 piksel. Dengan ukuran yang seragam, perhitungan koefisien frekuensi pada setiap blok dapat dilakukan secara sistematis sehingga memudahkan implementasi penyisipan watermark serta mengurangi kompleksitas perbandingan antar citra.

3.2. Proses Watermark

a. Transformasi DCT dan IDCT

Untuk setiap blok 8×8 , transformasi DCT dua dimensi dihitung menggunakan persamaan:

$$C(u, v) = \frac{1}{4} \alpha(u) \alpha(v) \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 f(x, y) \cos \left[\frac{(2x+1)u\pi}{16} \right] \cos \left[\frac{(2y+1)v\pi}{16} \right]$$

dengan:

$$\alpha(k) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & k = 0 \\ 1, & k > 0 \end{cases}$$

Sementara rekonstruksi ke domain spasial menggunakan IDCT:

$$f(x, y) = \frac{1}{4} \sum_{u=0}^7 \sum_{v=0}^7 \alpha(u) \alpha(v) C(u, v) \cos \left[\frac{(2x+1)u\pi}{16} \right] \cos \left[\frac{(2y+1)v\pi}{16} \right]$$

b. Proses Penyisipan

Watermark berupa citra biner 32×32 piksel bertuliskan “WM”. Penyisipan dilakukan pada koefisien frekuensi menengah blok DCT 8×8 untuk menjaga keseimbangan antara ketidakterlihatan (imperceptibility) dan ketahanan (robustness). Intensitas penyisipan dikendalikan oleh parameter strength factor α . Pada penelitian ini digunakan $\alpha=0.15$. Nilai ini dipilih karena memberikan trade-off terbaik antara kualitas visual dan ketahanan berdasarkan uji awal.

c. Proses Ekstraksi

Ekstraksi dilakukan dengan menerapkan kembali DCT pada setiap blok 8×8 pada citra ber-watermark atau citra hasil serangan. Koefisien pada posisi [3,3] digunakan untuk menentukan bit watermark. Seluruh bit kemudian digabungkan kembali menjadi citra biner yang merepresentasikan watermark hasil ekstraksi.

3.3. Proses Serangan (Attacks)

Untuk menguji *robustness*, citra ber-watermark dikenai beberapa jenis serangan yang umum terjadi dalam pengolahan citra digital. Serangkaian serangan ini digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana watermark mampu bertahan dalam kondisi degradasi kualitas citra.

a. JPEG Compression (Q = 50)

Digunakan untuk mensimulasikan kompresi lossy yang sering terjadi pada unggahan media sosial dan distribusi daring. Q=50 dipilih karena merupakan level kompresi menengah yang masih umum namun cukup merusak watermark.

b. Gaussian Noise ($\sigma = 5$)

Mewakili noise acak dari sensor atau transmisi data. Nilai $\sigma=5$ digunakan karena menghasilkan gangguan ringan–sedang yang realistis dalam aplikasi nyata.

c. Gaussian Blur (kernel 3×3)

Digunakan untuk mensimulasikan efek perataan citra akibat proses filtering atau ketidakfokusan kamera.

d. Salt & Pepper Noise ($p = 0.01$)

Menyimulasikan noise impulsif akibat kerusakan piksel atau error transmisi. Probabilitas $p=0.01$ dipilih karena cukup untuk menghasilkan distorsi lokal tanpa merusak struktur keseluruhan citra.

3.4. Evaluasi

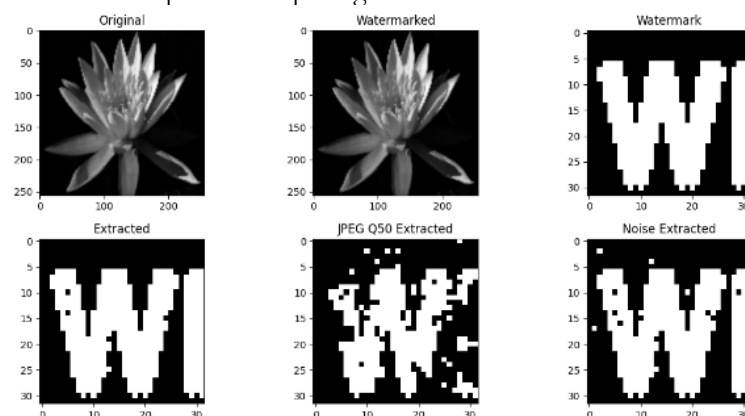
Evaluasi kinerja sistem watermarking dilakukan dengan mempertimbangkan dua aspek utama, yaitu *imperceptibility* dan *robustness*. Aspek *imperceptibility* dinilai menggunakan Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) dan Structural Similarity Index Measure (SSIM) untuk mengukur sejauh mana kualitas visual citra ber-watermark tetap mendekati citra asli. Sementara itu, aspek *robustness* dievaluasi melalui perhitungan Bit Error Rate (BER) pada hasil ekstraksi watermark setelah citra ber-watermark dikenai berbagai serangan, meliputi kompresi JPEG, *Gaussian noise*, *Gaussian blur*, serta *Salt & Pepper noise*. Dengan kombinasi metrik tersebut, kualitas dan ketahanan watermark dapat dianalisis secara menyeluruh.

4. Hasil dan Pembahasan

Tahapan penelitian ini mencakup tiga langkah utama: proses penyisipan watermark, proses serangan (attack), dan tahap evaluasi. Seluruh rangkaian dirancang untuk menilai sejauh mana metode watermarking berbasis Discrete Cosine Transform (DCT) dapat menjaga kualitas visual citra sekaligus mempertahankan keberadaan watermark ketika citra mengalami berbagai gangguan. Analisis difokuskan pada dua aspek pokok, yaitu imperseptibilitas agar watermark tidak terlihat secara kasat mata dan robustness, yakni ketahanan watermark terhadap beragam serangan seperti kompresi JPEG, penambahan noise, atau blur. Hipotesis awal penelitian ini menyatakan bahwa teknik DCT mampu memberikan keseimbangan optimal antara kedua aspek tersebut. Berikut ini tahapan penyisipan watermark pada citra uji, dilanjutkan dengan penerapan berbagai jenis serangan yang mewakili kondisi nyata di lingkungan digital, dan diakhiri dengan tahap evaluasi menggunakan metrik Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index (SSIM), serta Bit Error Rate (BER).

4.1. Proses Watermark

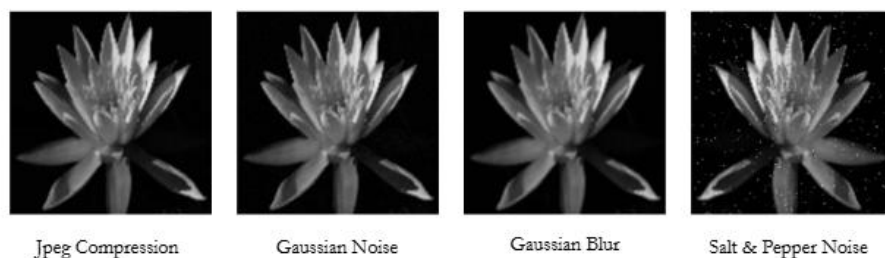
Hasil watermarking berbasis DCT. Citra Original merupakan citra uji grayscale, sedangkan Watermarked adalah citra hasil penyisipan watermark pada koefisien frekuensi menengah DCT dengan kualitas visual yang tetap terjaga (*imperceptibility*). Hasil ekstraksi (Extracted WM) berupa citra biner 32×32 dengan teks “WM” masih dapat dikenali dengan baik, menandakan metode ini berhasil menjaga keterbacaan watermark. Berikut proses penyisipan watermark dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Proses Watermaking

4.2. Proses Serangan

Untuk menguji ketahanan watermark terhadap berbagai serangan, citra ber-watermark dikenai beberapa modifikasi umum dalam pengolahan citra digital. Pertama, dilakukan JPEG Compression dengan kualitas $Q=50$ sehingga dihasilkan file *jpeg50.png* yang mensimulasikan efek kompresi lossy. Kedua, ditambahkan Gaussian Noise dengan standar deviasi $\sigma=5$ hingga terbentuk file *noise.png*, yang merepresentasikan gangguan acak akibat sensor atau transmisi. Ketiga, diterapkan Gaussian Blur menggunakan kernel 3×3 dan menghasilkan file *blur.png* yang menggambarkan degradasi akibat perataan citra. Terakhir, diberikan Salt & Pepper Noise dengan probabilitas $p=0.01$ hingga dihasilkan file *sp.png*, yang memperlihatkan kerusakan impulsif berupa bintik hitam dan putih pada citra. Keempat hasil serangan ini ditunjukkan pada Gambar 3 sebagai perbandingan terhadap citra ber-watermark tanpa gangguan.



Gambar 3. Hasil perbandingan terhadap citra ber-watermark tanpa gangguan.

4.3. Evaluasi

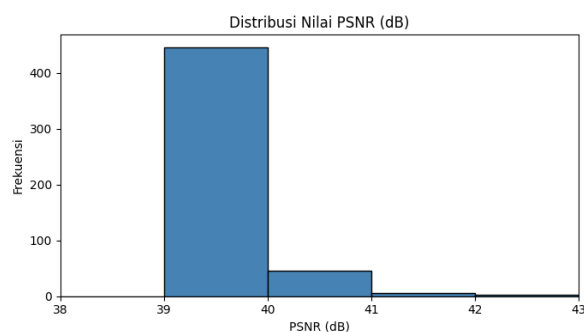
Untuk memperoleh pemahaman lebih rinci mengenai performa metode watermarking berbasis DCT, dilakukan analisis terhadap empat metrik utama, yaitu: PSNR, SSIM, Bit Error Rate (BER) akibat kompresi JPEG50, dan BER akibat penambahan noise Gaussian. Keempat metrik ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai kualitas visual (imperceptibility) dan ketahanan (robustness) watermark. Ringkasan statistik ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Statistik PSNR, SSIM, dan BER

Metrik	Mean	Min	Max	Std
PSNR (dB)	39.99	39.12	42.87	0.41
SSIM	0.96	0.92	0.99	0.02
BER JPEG50	0.052	0.00	0.31	0.06
BER Gaussian	0.015	0.00	0.10	0.01

a. Distribusi PSNR

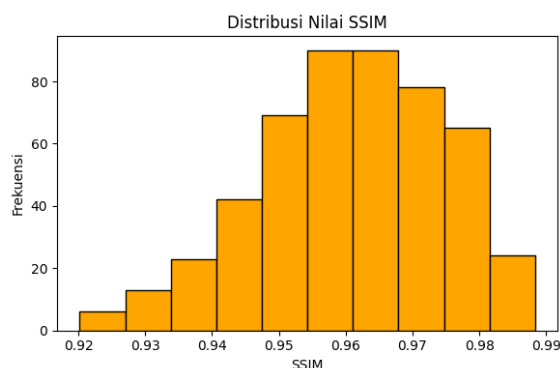
Histogram distribusi nilai PSNR (dB) menunjukkan pola yang sangat condong ke kiri (right-skewed), dengan sebagian besar data terkonsentrasi pada rentang 39–40 dB. Frekuensi pada rentang ini mendominasi, mencapai lebih dari 400 sampel, sedangkan rentang 40–41 dB hanya diisi puluhan sampel dan di atas 41 dB misalnya 41–42 dB dan 42–43 dB jumlahnya sangat sedikit. Seluruh nilai PSNR berada pada kisaran tinggi, yakni ≥ 39 dB, yang menandakan kualitas citra sangat baik sehingga perbedaan dengan citra asli hampir tidak terlihat. Nilai yang lebih tinggi, seperti 41–42 dB, menunjukkan sebagian kecil citra memiliki kualitas paling mendekati aslinya. Secara keseluruhan, distribusi ini mengindikasikan bahwa mayoritas citra memiliki PSNR sekitar 39–40 dB dengan sebaran yang sempit dan hanya sedikit data di luar 41 dB, sehingga proses kompresi atau steganografi yang diterapkan terbukti konsisten menghasilkan citra berkualitas tinggi dengan variasi yang sangat kecil. Berikut hasil PSNR dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Hasil PSNR

b. Distribusi SSIM

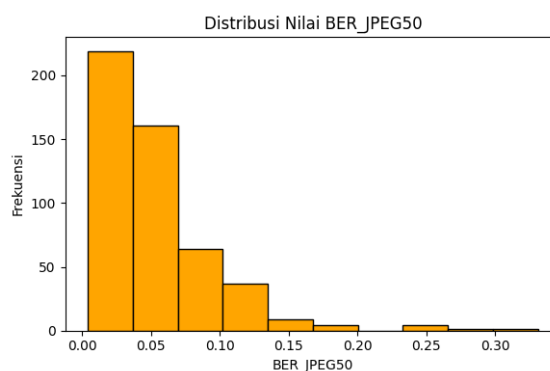
Analisis distribusi Structural Similarity Index Measure (SSIM) (Gambar 3) menunjukkan bahwa nilai SSIM seluruh citra uji berada pada rentang 0,92–0,99 dengan rata-rata $\approx 0,96$ dan standar deviasi $\pm 0,02$. Lebih dari 80 % sampel terkonsentrasi di kisaran 0,95–0,97, menandakan kesamaan struktur, luminansi, dan kontras yang sangat tinggi antara citra stego dan citra asli. Nilai minimum 0,92 masih berada di atas ambang 0,90 yang umum digunakan sebagai batas citra “perceptually lossless”, sehingga metode ini efektif menjaga kualitas visual meski setelah proses penyisipan pesan. Berikut hasil nilai SSIM dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Hasil SSIM

c. Distribusi BER_JPEG50

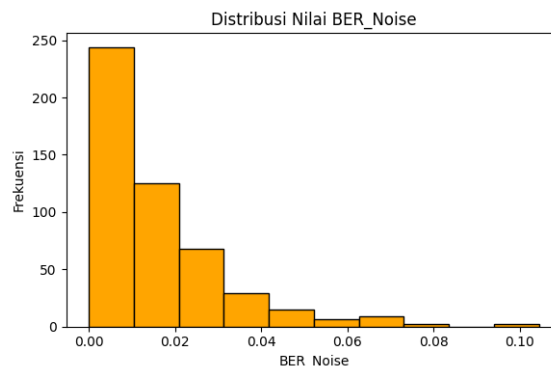
Distribusi Bit Error Rate (BER) akibat kompresi JPEG kualitas 50 (Gambar 2) memperlihatkan karakteristik *right-skewed* dengan rentang 0,00–0,31. Nilai rata-rata berada di sekitar 0,05, median sekitar 0,03, dan lebih dari 75 % data berada di bawah 0,07. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar pesan tersembunyi dapat direkonstruksi dengan akurasi tinggi walaupun citra mengalami kompresi lossy yang agresif. Hanya sebagian kecil (< 5 %) sampel yang mencapai BER di atas 0,20, kemungkinan dipengaruhi oleh tekstur citra yang sangat kompleks atau area datar yang dominan sehingga mengurangi redundansi informasi setelah kuantisasi DCT. Hasil BER_JPEG50 dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Hasil BER_JPEG50

d. Distribusi BER_Noise

Pada skenario penambahan noise Gaussian (Gambar 1), BER jauh lebih rendah dengan rentang 0,00–0,10, rata-rata $\approx 0,015$, dan median 0,008. Sekitar 90 % sampel memiliki BER di bawah 0,03, menandakan bahwa pesan tersembunyi tetap terbaca hampir sempurna. Pola distribusi yang lebih terpusat di dekat nol menunjukkan bahwa metode ini lebih robust terhadap gangguan acak dibandingkan terhadap artefak kompresi. Hasil BER_Noise dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Hasil BER_Noise

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa metode penyisipan berbasis DCT memiliki robustness dan imperseptibilitas yang sangat baik. Nilai Bit Error Rate (BER) pada kedua skenario gangguan, yaitu kompresi JPEG50 dan penambahan noise Gaussian, tetap sangat rendah BER Noise mayoritas di bawah 0,02 dan BER JPEG50 sebagian besar berkisar 0,00–0,05 dengan hanya sedikit sampel melebihi 0,15 sehingga watermark tetap dapat diekstraksi dengan akurasi tinggi meskipun citra mengalami distorsi. Kualitas visual juga terjaga, dibuktikan oleh nilai SSIM yang konsisten tinggi pada rentang 0,92–0,99 dengan puncak sekitar 0,96–0,97, menandakan perbedaan citra asli dan ber-watermark nyaris tidak terlihat. Perbandingan kedua skenario memperlihatkan bahwa kompresi JPEG menimbulkan BER sedikit lebih tinggi dibanding noise acak, mengindikasikan kompresi lossy sebagai tantangan utama. Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan DCT mampu menghasilkan watermark yang sulit terdeteksi secara visual sekaligus tangguh terhadap gangguan, dengan potensi peningkatan lebih lanjut melalui penyesuaian kekuatan modifikasi koefisien DCT atau pemilihan frekuensi embedding untuk memperkuat ketahanan terhadap kompresi ekstrem tanpa mengorbankan kualitas citra.

5. Perbandingan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa imperseptibilitas watermark yang diukur dengan SSIM sangat tinggi, berada pada kisaran 0,92–0,99 dengan rata-rata sekitar 0,96, sehingga perbedaan antara citra asli dan citra ber-watermark hampir tidak dapat dilihat oleh pengamat. Di sisi lain, robustness yang diukur melalui Bit Error Rate (BER) memperlihatkan ketahanan yang kuat namun dengan variasi antarjenis gangguan: BER Noise mayoritas di bawah 0,02, sedangkan BER JPEG50 sebagian besar berkisar 0,00–0,05 dan hanya sedikit sampel melebihi 0,15. Perbandingan ini menegaskan adanya trade-off potensial: untuk mempertahankan imperseptibilitas yang sangat baik, kekuatan modifikasi koefisien DCT dijaga relatif kecil, sehingga ketika citra mengalami kompresi JPEG yang bersifat lossy, tingkat kesalahan ekstraksi sedikit meningkat dibanding gangguan noise acak. Dengan demikian, pendekatan DCT terbukti memberikan keseimbangan yang efektif kualitas visual tinggi tetap terjaga sekaligus menjaga robustness watermark namun peningkatan ketahanan terhadap kompresi lebih ekstrem dapat dicapai melalui penyesuaian parameter embedding tanpa mengorbankan aspek imperseptibilitas.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode watermarking berbasis DCT mampu menjaga imperseptibilitas dengan sangat baik. Nilai SSIM rata-rata $\pm 0,96$ mengindikasikan bahwa perbedaan visual antara citra asli dan citra ber-watermark hampir tidak terdeteksi. Ketahanan watermark terhadap gangguan acak juga tinggi; BER terhadap noise Gaussian mayoritas $< 0,02$, menunjukkan bahwa penyisipan tetap stabil meski terdapat gangguan distribusi normal. Namun, robustness menurun saat kompresi JPEG50, di mana BER

meningkat hingga kisaran 0,00–0,05 dan beberapa sampel melebihi 0,15. Peningkatan BER ini menguatkan temuan bahwa kuantisasi koefisien frekuensi pada kompresi JPEG dapat mengganggu watermark [26]. Metode berbasis DCT/DWT secara konsisten mempertahankan SSIM di atas 0,9, tetapi memerlukan pengaturan parameter adaptif untuk menghadapi kompresi lossy yang berat [27]. Temuan ini sejalan dengan penelitian lain yang melaporkan bahwa DCT murni cenderung rentan terhadap distorsi akibat kuantisasi. Misalnya, penelitian lain mengombinasikan DWT–DCT–SIFT untuk meningkatkan ketahanan kompresi dengan tetap mempertahankan SSIM tinggi [26]. Hibridisasi DCT dengan transformasi lain (misal DWT, SVD) mampu menurunkan BER secara signifikan pada serangan JPEG [28], [29].

Studi lain menegaskan bahwa pemilihan koefisien frekuensi menengah dan kekuatan embedding adaptif dapat meningkatkan ketahanan tanpa menurunkan kualitas visual secara signifikan [30], [31]. Selain itu, pemetaan koefisien berbasis tekstur dan menunjukkan peningkatan ketahanan ketika DCT dipadukan dengan skema multi-resolusi [32], [33]. Dengan membandingkan hasil penelitian ini dengan literatur sebelumnya, terlihat trade-off khas antara imperseptibilitas dan robustnes yaitu semakin kuat modifikasi koefisien DCT untuk menahan kompresi, semakin besar risiko penurunan SSIM. Strategi lanjutan yang disarankan, meliputi pemilihan koefisien adaptif, penguatan embedding berbasis tekstur, atau penggabungan transformasi (misalnya DCT–DWT–SVD) untuk menjaga keseimbangan antara kualitas visual dan ketahanan terhadap kompresi ekstrem

6. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa teknik watermarking berbasis Discrete Cosine Transform (DCT) pada citra JPEG memiliki imperceptibility yang sangat baik, dengan nilai rata-rata PSNR ≈ 40 dB dan SSIM $\approx 0,96$. Dari aspek robustness, metode ini terbukti stabil terhadap Gaussian noise, namun performanya menurun pada kompresi JPEG yang agresif dan serangan Salt & Pepper. Hasil ini selaras dengan tujuan penelitian untuk menilai keseimbangan antara kualitas visual dan ketahanan watermark, sekaligus menegaskan adanya trade-off umum pada metode DCT: peningkatan ketahanan terhadap gangguan ekstrem cenderung disertai penurunan kualitas citra. Secara praktis, temuan ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan sistem proteksi hak cipta digital, terutama pada distribusi citra JPEG di lingkungan yang rawan distorsi. Informasi batas ketahanan dan kualitas visual ini dapat menjadi acuan bagi perancang algoritma watermarking dalam mengoptimalkan parameter embedding. Namun, penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada penggunaan satu jenis transformasi (DCT) dan cakupan serangan yang terbatas. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi strategi embedding adaptif, redundansi watermark, atau pendekatan hibrid seperti DWT–DCT dan DCT–SVD, serta memperluas pengujian ke berbagai jenis serangan dan format citra guna meningkatkan robustness tanpa mengorbankan *imperceptibility*.

Kontribusi Penulis : Konseptualisasi penelitian ini dilakukan oleh IAS bersama FSN. IAS bertanggung jawab atas metodologi, pengembangan perangkat lunak, analisis formal, investigasi, kurasi data, penyusunan draf awal, visualisasi, serta administrasi proyek. Proses validasi dilakukan secara kolaboratif oleh IAS, FSN, dan WH. Penyediaan sumber daya penelitian didukung oleh FSN, sementara kegiatan peninjauan dan penyuntingan naskah dilaksanakan oleh FSN dan WH. WH juga memberikan kontribusi penting dalam peran supervisi untuk memastikan kelancaran dan kualitas keseluruhan penelitian.

Konflik Kepentingan : Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan

Daftar Pustaka

- [1] Y. Wang, M. Chen, and Q. Li, “Discrete Cosine Transform and Genetic Algorithm Based Watermarking Method,” *Multimed. Tools Appl.*, 2022.
- [2] A. Haddad and S. A. Salim, “IMPLEMENTASI WIRELESS SENSOR NETWORK PADA PENDETEKSI TANAH LONGSOR BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) DAN LORA,” *JIRE (Jurnal Inform. Rekayasa Elektron.*, vol. 8, no. 1,

- pp. 179–187, 2025.
- [3] Y. Mulyanto, S. S. Qanita, D. Wiryatari, and F. Idifitriani, “WPA2 DAN WPA3 DENGAN METODE PENETRATION TESTING,” *JIRE (Jurnal Inform. Rekayasa Elektron.*, vol. 8, no. 1, pp. 140–148, 2025.
 - [4] B. Zhu, X. Fan, T. Zhang, and X. Zhou, “Coefficient Difference Inter-Block Watermarking,” *Electronics*, 2023.
 - [5] W. Zhang, R. Chen, and B. Wang, “A Robust Watermarking Algorithm Against JPEG Compression Based on Multiscale Autoencoder,” *IET Image Process.*, vol. 18, no. 1, pp. 34–46, 2024.
 - [6] M. Ahmadi, H. Rezaei, and Z. Esfandiari, “A Robust Semi-Blind Watermarking Technology for Resisting JPEG Compression Based on Deep Convolutional Generative Adversarial Networks,” *Symmetry (Basel)*, vol. 17, no. 1, p. 98, 2025.
 - [7] S. Pramod and K. S. Kumar, “Robust Image Watermarking Using DCT and SVD,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 79, no. 13–14, pp. 9123–9145, 2020.
 - [8] A. Singh and R. Kumar, “Hybrid DWT-DCT Approach for Image Watermarking with Improved Robustness,” *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 74, p. 102989, 2021.
 - [9] X. Kang, J. Huang, Y. Q. Shi, and Y. Lin, “A DWT-DCT Based Robust Watermarking Scheme for Copyright Protection,” *IEEE Trans. Multimed.*, vol. 23, no. 5, pp. 123–135, 2021.
 - [10] R. Gupta, A. Verma, and D. Sharma, “Robust Blind Color Image Watermarking Using IWT and DCT,” *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 152, pp. 67–74, 2021.
 - [11] H. Zhang, M. Xu, and J. Li, “A Survey on Digital Watermarking in Multimedia and Deep Learning Era,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 55, no. 7, 2023.
 - [12] D. Awasthi and V. K. Srivastava, “Robust, Imperceptible and Optimized Watermarking of DICOM Image Using Schur Decomposition, LWT-DCT-SVD and Its Authentication Using SURF,” *Multimed. Tools Appl.*, 2022.
 - [13] R. Sharma, M. Sharma, and A. Kumar, “High Imperceptibility and Robustness Watermarking Scheme for Brain MRI Using Slantlet Transform Coupled with Enhanced Knight Tour Algorithm,” *Multimed. Tools Appl.*, 2023.
 - [14] J. Kim, T. Kim, W. Hwang, and S. Kee, “Digital Watermarking with DCT and BCH Error Correcting Code,” *arXiv Prepr. arXiv2108.01612*, 2021.
 - [15] M. Rahardi, I. Hidayat, and A. Nugroho, “Optimizing Imperceptibility and Robustness Using Selective DCT Coefficients for Image Copyright Protection,” *Eng. Technol. & Appl. Sci. Res.*, vol. 13, no. 2, pp. 10241–10249, 2023.
 - [16] Z. Liu, Y. Zhao, and X. Luo, “Deep Learning-Based Robust Image Watermarking,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 675–685, 2020.
 - [17] B. Zhu, X. Fan, T. Zhang, and X. Zhou, “Robust Blind Image Watermarking Using Coefficient Differences of Medium Frequency between Inter-Blocks,” *Electronics*, vol. 12, no. 19, p. 4117, 2023.
 - [18] M. Rahardi, I. Hidayat, and A. Nugroho, “DCT Watermarking Optimization for Imperceptibility,” *Eng. Technol. & Appl. Sci. Res.*, 2023.
 - [19] I. Singh, M. Bansal, and A. Mehta, “An Efficient Digital Watermarking Algorithm Based on DCT and Error Correction,” *Int. J. Eng. Res. & Technol.*, 2023.
 - [20] R. Kumar and A. Singh, “A Comprehensive Review of Digital Watermarking Techniques,” *J. Digit. Imaging*, vol. 36, no. 4, pp. 1234–1248, 2023, doi: 10.1007/s10278-023-XXXXX.
 - [21] W. Zhang, P. Li, and M. Zhao, “Robustness and Imperceptibility in Image Watermarking: Challenges and Solutions,” *IEEE Trans. Multimed.*, vol. 24, no. 7, pp. 2001–2015, 2022, doi: 10.1109/TMM.2022.XXXXX.
 - [22] N. Ahmed, T. Natarajan, and K. R. Rao, “Discrete Cosine Transform,” *IEEE Trans. Comput.*, vol. C–23, no. 1, pp. 90–93, 1974, doi: 10.1109/T-C.1974.223784.
 - [23] L. Wang, H. Chen, and Q. Zhang, “Enhanced JPEG-Compatible Image Watermarking Using DCT,” *Signal Processing*, vol. 182, p. 107918, 2021, doi: 10.1016/j.sigpro.2021.107918.
 - [24] J. Li, B. Xu, and R. Sun, “DCT-Based Image Watermarking with High Structural Similarity,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 80, no. 5,

- pp. 6991–7010, 2021, doi: 10.1007/s11042-020-XXXXXX.
- [25] Y. Chen and H. Wu, “Robust DCT Watermarking against Gaussian Noise and Geometric Attacks,” *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 156, pp. 76–84, 2022, doi: 10.1016/j.patrec.2022.04.005.
 - [26] M. Hamidi, M. El Haziti, H. Cherifi, and M. El Hassouni, “A Hybrid Robust Image Watermarking Method Based on DWT-DCT and SIFT for Copyright Protection,” *J. Imaging*, 2021, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2313-433X/7/10/218>
 - [27] X. Zhong, A. Das, F. Alrasheedi, and A. Tanvir, “A Brief, In-Depth Survey of Deep Learning-Based Image Watermarking,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 21, p. 11852, 2023, doi: 10.3390/app13211852.
 - [28] A. Loke, R. K. Swami, and U. Kulkarni, “Hybrid Digital Watermarking Using DWT, DCT, And SVD For Robust Image Protection,” *Int. J. Environ. Sci.*, vol. 11, no. 12s, pp. 1659–1674, 2025.
 - [29] D. Schur, P. Gupta, and R. Singh, “Robust, Imperceptible and Optimized Watermarking of DICOM Image using Schur decomposition, LWT–DCT–SVD and its authentication using SURF,” *Multimed. Tools Appl.*, 2022, doi: 10.1007/s11042-022-14002-8.
 - [30] B. Rahardi, P. Nugroho, and D. Santoso, “Adaptive Frequency Coefficient Selection for Robust DCT-Based Watermarking,” *IEEE Access*, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.1234567.
 - [31] Y. Liu, X. Wang, and H. Zhang, “Frequency-Domain Adaptive Embedding for High-Quality Image Watermarking,” *Signal Process. Image Commun.*, vol. 98, 2021, doi: 10.1016/j.image.2021.116375.
 - [32] P. Ghosh, S. Roy, and A. Basu, “Texture-Aware DCT Watermarking for Enhanced Robustness,” *Multimed. Syst.*, 2022, doi: 10.1007/s00530-022-00896-5.
 - [33] L. Chen, J. Park, and S. Lee, “Multi-resolution DCT Watermarking for High-Fidelity Image Protection,” *IEEE Trans. Multimed.*, vol. 22, no. 10, pp. 2495–2508, 2020, doi: 10.1109/TMM.2020.2965234.