

Robust Watermarking Untuk Citra Medis Pada Domain Discrete Wavelet Transform Menggunakan Dekomposisi Matriks Dengan Particle Swarm Optimization

1st Refsi Resandy
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

refsiresandy@student.telkomuniversity.
ac.id

2nd Rita Purnamasari
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

ritapurnamasari@telkomuniversity.ac.i
d

3rd Ratri Dwi Atmaja
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

ratriatmaja@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Teknik yang digunakan untuk melindungi hak cipta multimedia yaitu *watermarking* adalah proses penambahan informasi tambahan pada citra, video, atau audio untuk menjaga keamanan informasi. Citra medis dapat dikategorikan sebagai hak kekayaan intelektual, oleh karena itu perlu adanya perlindungan terhadap hak cipta dengan menggunakan *watermark*, yang dikenal sebagai *copyright watermark*. Metode *robust watermarking* dapat diaplikasikan untuk keperluan *copyright* karena memiliki sifat yang kokoh terhadap berbagai serangan. Artinya, *watermark* masih dapat dikenali dan diekstraksi meskipun citra ber-*watermark* mengalami serangan. Skema *robust watermarking* harus memiliki imperseptibilitas dan ketahanan yang baik, namun sering terjadi *trade-off* antara keduanya. Artinya semakin tinggi imperseptibilitas, semakin rendah ketahanan atau sebaliknya. Pada penelitian ini diusulkan metode *watermarking* citra pada domain transformasi *Discrete Wavelet Transform* dan dekomposisi matriks *Hessenberg* dan *Singular Value Decomposition* pada sub-band LL (*low-low*) dengan optimasi *Particle Swarm Optimization*. Hasil analisis skema *watermarking* untuk citra medis menunjukkan kualitas imperseptibilitas yang baik dengan nilai PSNR tertinggi 49,8469 dB dan SSIM lebih tinggi dari 0.98. Evaluasi menggunakan parameter NC menunjukkan ketahanan skema terhadap serangan *noise*, kompresi, filter, *sharpening* dan beberapa serangan geometri seperti rotasi dan *rescale*.

Kata kunci— *Watermarking, Robust Watermarking, DWT, SVD, HD, PSO*.

I. PENDAHULUAN

Sebagai salah satu teknik perlindungan yang banyak digunakan, metode *watermarking* telah diterapkan dalam banyak bidang perlindungan hak cipta multimedia [1]. *Watermarking* merujuk pada sebuah teknik yang digunakan untuk menambahkan informasi tambahan pada citra, video, atau audio guna melindungi keamanan informasi [2]. *Watermarking* diklasifikasikan secara luas menjadi tiga kelompok, yaitu *robust watermarking*, *fragile watermarking*, dan *semi-fragile watermarking* [3], [4]. Citra medis hasil riset misalnya untuk melihat gambaran visual DNA dengan menggunakan mikroskop elektron memerlukan persiapan sampel dan teknik pemrosesan yang kompleks sehingga

memerlukan biaya dapat dikategorikan sebagai hak kekayaan intelektual, oleh karena itu perlu adanya perlindungan terhadap hak cipta dengan menggunakan *watermark*, yang dikenal sebagai *copyright watermark*. Untuk kasus ini metode *robust watermarking* dapat digunakan. Metode *robust watermarking* dapat digunakan untuk *copyright watermark* karena tidak mengurangi secara signifikan kualitas visual citra yang diberi *watermark*, dan tahan terhadap berbagai macam serangan [2].

Proses *watermarking* konvensional yaitu menempelkan secara langsung *watermark* pada citra *host*. Operasi ini mudah dilakukan, tetapi *watermark* mudah dihilangkan atau dipotong dengan *software* pengeditan citra seperti Adobe Photoshop. Selain itu, citra medis memiliki syarat agar *watermark* tidak tampak (*invisibility*) sehingga tidak merusak detail citra dan kokoh terhadap usaha menghilangkan atau merusak *watermark*. Proses penanaman *watermark* dapat dilakukan pada domain transformasi seperti *Discrete Cosine Transform* (DCT), *Discrete Fourier Transform* (DFT), *Discrete Wave Transform* (DWT), dan *Singular Value Decomposition* (SVD) [5], [6]. Tujuan utama dalam proses *watermarking* adalah penyisipan *watermark* ke dalam citra *host* tanpa mengganggu secara signifikan kualitas visual citra asli. Jika *watermark* ditempatkan pada rentang frekuensi tinggi yang lebih sensitif terhadap perubahan, maka perubahan pada koefisien frekuensi tinggi tersebut akan terlihat lebih mencolok dan dapat mempengaruhi kualitas visual citra *host*. Oleh karena itu, performa operasi yang baik dapat dicapai pada domain transformasi, terutama ketika *watermark* ditempatkan pada rentang frekuensi rendah. DWT (*Discrete Wavelet Transform*) dapat bekerja pada rentang frekuensi rendah [7]. Teknik *watermarking* dengan DWT memiliki ketahanan terhadap berbagai serangan pemrosesan citra, penyimpanan data yang efisien, kualitas visual yang tinggi dan citra *watermark* yang tak tampak [8]. Namun, *watermarking* berbasis DWT sulit mempertahankan serangan geometri. Kelemahan ini dapat dikurangi dengan mengekstrak fitur geometri citra menggunakan dekomposisi matriks [9].

Ali Azrahrani dan Nisar Ahmed Memon (2021) [10] melakukan *watermarking* jenis *robust* dengan aplikasi pada citra medis seperti CT-SCAN, MRI, USG dan X-ray. Hasilnya skema yang diusulkan memiliki imperseptibilitas yang tinggi dan dapat digunakan untuk aplikasi citra medis. Pada penelitian yang dilakukan Seif Eddine Naffouti, Anis Kricha, dan Anis Sakly (2022) [11] metode yang diusulkan adalah *watermarking* DWT dengan kombinasi SVD, hasil dari penelitian yang dilakukan skema *watermarking* memiliki imperseptibilitas dan ketahanan yang kuat terhadap banyak serangan umum dan operasi pemrosesan sinyal. Namun, dikarenakan *watermarking* dilakukan pada *sub-band high-high* (HH), ketahanan skema yang diusulkan tidak cukup baik terhadap serangan *noise*.

Skema *robust watermarking* harus memiliki dua kriteria penting yaitu imperseptibilitas dan ketahanan. Namun, keduanya dapat saling menghambat atau terjadi *trade-off* artinya semakin tinggi imperseptibilitas, semakin rendah ketahanan atau sebaliknya [12]. Junxiu Liu dkk (2019) [13] melakukan *watermarking* metode hybrid multi-level DWT, *Hessenberg Decomposition* (HD) dan SVD dengan algoritma optimasi *fruit fly optimization*. *Watermarking* dilakukan pada *sub-band low-low* (LL) kemudian *baseline* yang ditetapkan untuk evaluasi imperseptibilitas nilai PSNR > 37 db dan SSIM > 0.93. Metode yang diusulkan tahan terhadap berbagai serangan seperti serangan filter, *noise*, kompresi JPEG, kompresi JPEG2000, dan *sharpening*. *Watermark* ter ekstraksi memiliki nilai NC (*Normalized Correlation*) yang relatif tinggi. Berdasarkan pemaparan ini, metode yang diusulkan adalah *watermarking* untuk aplikasi citra medis pada domain transformasi *Discrete Wavelet Transform* (DWT) dengan dekomposisi matriks *Hessenberg Decomposition* (HD) dan *Singular Value Decomposition* (SVD), untuk mengatasi masalah *trade-off* antara ketahanan dan imperseptibilitas, pada skema *watermarking* dilakukan penerapan algoritma *Particle Swarm Optimization*. Tugas Akhir ini dilakukan sebagai studi pengembangan pengetahuan mengenai pemrosesan citra dan menguji metode *watermarking* yang diusulkan.

II. KAJIAN TEORI

A. Discrete Wavelet Transform

Discrete Wavelet Transform (DWT) adalah suatu teknik pengolahan sinyal digital yang digunakan untuk memecah sinyal menjadi beberapa sub-bagian dengan skala yang berbeda. DWT dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam pemrosesan citra dan pengolahan suara. Dalam DWT, citra dipecah menjadi beberapa sub-bagian (*sub-band*) dengan resolusi yang berbeda, yaitu LL (*Low-Low*), LH (*Low-High*), HL (*High-Low*), dan HH (*High-High*). *Sub-band* LL berisi informasi citra dengan resolusi yang paling rendah, sementara *sub-band* LH, HL, dan HH berisi informasi detail citra dengan resolusi yang semakin tinggi. Pada setiap level transformasi, *sub-band* LL selanjutnya dibagi lagi menjadi *sub-band-sub-band* yang lebih kecil dengan resolusi yang lebih tinggi, sehingga memungkinkan untuk mendapatkan representasi citra dengan berbagai tingkat resolusi [14].

B. Hessenberg Decomposition

Hessenberg Decomposition, atau yang juga dikenal sebagai *Hessenberg Transform*, adalah suatu teknik yang digunakan untuk memecahkan matriks menjadi dua bagian, yaitu matriks *Hessenberg* dan matriks transformasi ortogonal [15]. Dekomposisi *Hessenberg* adalah teknik untuk mengubah matriks persegi biasa menjadi bentuk spesifik yang disebut matriks *Hessenberg*. Matriks *Hessenberg* berbentuk matriks persegi yang memiliki struktur segitiga di bawah diagonal kedua. Persamaan untuk *Hessenberg Decomposition* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$HD(A) = PHP^T \quad (1)$$

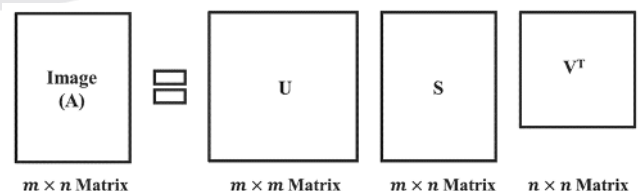
dimana A adalah matriks asli, P adalah matriks transformasi ortogonal dan H adalah matriks *Hessenberg*. Matriks P diperoleh dengan menggunakan transformasi ortogonal dan matriks H adalah matriks hasil yang hampir triangular dengan satu elemen di luar diagonal utama. Matriks ini dapat digunakan untuk melakukan operasi matematika lebih lanjut, seperti untuk memecahkan suatu sistem persamaan linier atau memecahkan suatu masalah optimasi. Dalam aplikasi *watermarking*, HD dapat mempersiapkan matriks dengan struktur yang lebih stabil sebelum diterapkan transformasi *watermarking* [16]. Hal ini dapat membantu dalam menjaga kestabilan transformasi atau manipulasi yang dilakukan pada matriks, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap serangan seperti kompresi, filtrasi, atau pemrosesan citra lainnya.

C. Singular Value Decomposition

Singular Value Decomposition (SVD) adalah teknik dekomposisi matriks yang umum digunakan dalam matematika dan ilmu komputer. SVD menguraikan matriks ke dalam tiga matriks: matriks *singular value* (S), matriks *left singular value* (U), dan matriks *right singular value* (V) [11]:

$$SVD(A) = USV^T \quad (2)$$

di mana A adalah matriks asli, U adalah matriks *left singular value*, S adalah matriks *singular value*, dan V adalah matriks *right singular value*. Simbol T menunjukkan transpose dari matriks. Dekomposisi matriks SVD dapat diilustrasikan pada Gambar 1 dengan A adalah matriks citra berukuran $m \times n$, U adalah matriks ortogonal berukuran $m \times m$, S adalah matriks *singular* berukuran $m \times n$, dan V adalah matriks ortogonal berukuran $n \times n$.



GAMBAR 1
(Penguraian Matriks A dengan SVD [11])

D. Particle Swarm Optimization

Particle Swarm Optimization (PSO) adalah metode komputasi yang digunakan untuk mencari solusi optimal suatu masalah. Metode ini didasarkan pada ide mensimulasikan perilaku sosial kelompok burung atau

serangga, yang disebut sebagai "swarm" (kawanan), yang sedang mencari makanan [17]. PSO dapat digunakan untuk menemukan solusi perkiraan pada masalah-masalah numerik yang sulit dipecahkan dengan mencari nilai maksimum atau minimum [18]. *Particle Swarm Optimization* (PSO) terdiri dari beberapa faktor penyusun yang bekerja bersama untuk mencapai solusi optimal:

1. Partikel

Setiap partikel mewakili solusi potensial untuk masalah yang dipecahkan. Melalui pergerakan dan pembaruan posisi, partikel berkontribusi pada eksplorasi ruang pencarian.

2. Jumlah partikel (*Swarm*)

Jumlah partikel dalam populasi, disebut sebagai *swarm*, disesuaikan dengan kompleksitas permasalahan yang dihadapi.

3. *Personal Best* (*pBest*)

Personal best (*pBest*) adalah posisi terbaik yang pernah dicapai oleh suatu partikel dengan membandingkan nilai *fitness* pada posisi saat ini dan sebelumnya.

4. *Global Best* (*gBest*)

Global Best adalah posisi terbaik yang pernah dicapai oleh seluruh kawanan partikel. Semua partikel dalam kawanan mendapatkan informasi tentang *gBest* diukur melalui nilai *fitness* terbaik.

5. *Objective Function*

Objective Function adalah fungsi matematis yang dievaluasi berdasarkan solusi yang diusulkan. PSO berusaha untuk meminimalkan atau memaksimalkan nilai fungsi tujuan, sesuai dengan sifat masalah yang dipecahkan.

6. Bobot Inersia (*w*)

Bobot inersia adalah faktor yang mengontrol dampak kecepatan partikel dari iterasi ke iterasi. Nilai *w* mempengaruhi sejauh mana partikel dapat menjelajahi ruang pencarian.

7. Koefisien akselerasi (c_1 dan c_2)

Koefisien akselerasi, merupakan faktor pengontrol sejauh mana partikel berpindah dalam satu iterasi. Umumnya, nilai koefisien akselerasi c_1 dan c_2 berada dalam rentang 0 hingga 4, tetapi dapat disesuaikan untuk setiap penelitian.

8. *Velocity* (*v*)

Velocity (*v*) menentukan seberapa cepat dan ke arah mana partikel bergerak dalam ruang pencarian. Perubahan kecepatan dilakukan setiap iterasi agar partikel dapat mendekati solusi optimal. PSO memperbarui vektor kecepatan masing-masing partikel menggunakan persamaan (3). Kemudian memperbarui posisi partikel berdasarkan kecepatan yang diperbarui dengan persamaan (4)

$$V_{i,d}^{t+1} = wV_{i,d}^t + c_{1rand}(0,1)(P_{i,d}^t - X_{i,d}^t) + c_{2rand}(0,1)(P_{g,d}^t - X_{i,d}^t) \quad (3)$$

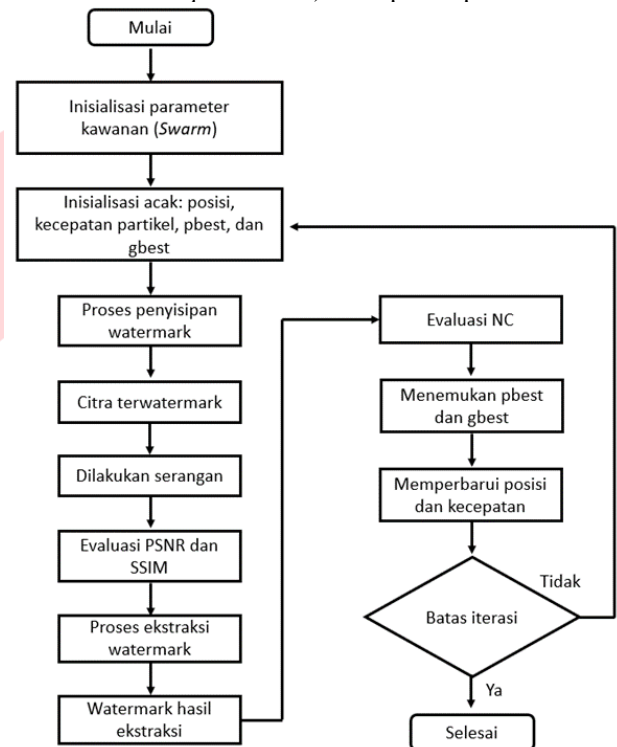
$$X_{i,d}^{t+1} = X_{i,d}^t + V_{i,d}^{t+1} \quad (4)$$

dimana $V_{i,d}$ adalah kecepatan partikel, $X_{i,d}$ adalah posisi partikel, $w \in [0,1]$ adalah bobot inersia, $c_1, c_2 \in [0, 4]$ adalah koefisien akselerasi pribadi dan sosial, $P_{i,d}$ menunjukkan solusi optimal individu dan $P_{g,d}$ menunjukkan solusi optimal global atau kawanan.

III. METODE

A. Desain Sistem

Citra *host* dan *watermark* menjadi input dalam algoritma penanaman *watermark*. Citra *host* yang digunakan memiliki resolusi 512×512 , citra *watermark* dengan resolusi yang berbeda 256×256 , 128×128 dan 64×64 . Citra *host* dan citra *watermark* memiliki jenis warna *grayscale*. Pengujian *watermarking* dilakukan dengan berbagai serangan dan pengukuran performa sistem dengan PSNR, SSIM dan NC. Kemudian untuk mencari solusi masalah *trade-off* antara ketahanan dan imperseptibilitas digunakan algoritma optimasi *Particle Swarm Optimization*. Diagram alir perancangan *robust watermarking* dengan optimasi PSO (*Particle Swarm Optimization*) ditampilkan pada Gambar 2.



GAMBAR 2
(Diagram Alir Perancangan *Robust Watermarking*)

Berikut penjelasan diagram alir *robust watermarking* dengan optimasi PSO:

1. Melakukan inisialisasi parameter kawanan (*swarm*) yaitu: Jumlah partikel, bobot inersia, koefisien akselerasi, dan jumlah iterasi.
2. Inisialisasi acak awal iterasi dengan komponen inisialisasi posisi, kecepatan partikel (*velocity*), *pBest* dan *gBest*.
3. Dilakukan proses penyisipan *watermark* pada citra *host*, proses penyisipan dijelaskan pada III.B.
4. Hasil dari proses penyisipan adalah citra ter-*watermark*.
5. Penambahan serangan pada iterasi PSO yang paling menyebabkan distorsi pada citra ter-*watermark* dengan *wavelet transform* terutama serangan geometri yaitu *cropping*, *rescale*, *rotasi* dan jenis serangan lain kompresi *JPEG*, *gaussian noise*.
6. Evaluasi citra ter-*watermark*, yaitu membandingkan citra ter-*watermark* dengan citra *host* dengan parameter PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*) dan SSIM (*Structural Similarity Index Measure*).
7. Proses ekstraksi *watermark* dari citra ter-*watermark*, proses ekstraksi secara rinci dijelaskan pada III.C.
8. Hasil dari proses ekstraksi adalah citra *watermark* hasil ekstraksi.

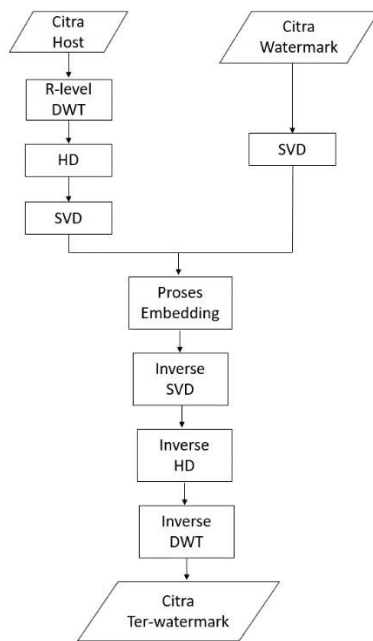
- Pengukuran NC (*Normalized Corelation*) untuk mengetahui koefisien korelasi dari *watermark* asli dan *watermark* hasil ekstraksi.
- Memperbarui pBest, gBest berdasarkan nilai evaluasi PSNR dan NC. Fitness Function PSO ditentukan dengan persamaan berikut:

$$FF = NC + \left(\frac{PSNR}{PSNR_{max}} \right) \quad (5)$$

dengan $PSNR_{max}$ adalah nilai PSNR terbaik untuk citra grayscale 8-bit yaitu 60 dB.

- Memperbarui posisi dan kecepatan setiap partikel, perubahan vektor kecepatan masing-masing partikel menggunakan persamaan (3) dan (4).
- Jumlah iterasi yang sudah tentukan pada inisialisasi parameter kawanan harus terpenuhi, jika belum terpenuhi maka algoritma akan melakukan pengulangan dan memperbarui parameter inisialisasi acak.
- Jika jumlah iterasi sudah terpenuhi, menghasilkan nilai gBest yang dipakai sebagai nilai faktor skala (α) pada proses penyisipan dan ekstraksi.

B. Proses Penyisipan



GAMBAR 3

(Proses Penyisipan *Watermark* pada *Citra Host*)

Berikut penjelasan proses penyisipan *watermark* pada Gambar 3:

- Menyiapkan citra medis MRI dan X-Ray sebagai citra *host* dan citra *watermark* berupa logo.
- Menghitung tingkat dekomposisi (R) dengan memperoleh panjang citra *host* dan panjang citra *watermark*. Tingkat dekomposisi (R) dihitung sebagai logaritma basis 2 dari M dibagi N

$$R = \log_2 \frac{M}{N} \quad (6)$$

dengan M adalah panjang dari citra *host* dan N merupakan panjang dari citra *watermark*.

- Menerapkan tranformasi *wavelet* pada citra *host* sebanyak R tingkat. Hasilnya menjadi *sub-band* citra yang terdekomposisi (LL, HL, LH, HH). Kemudian,

menerapkan matriks Hessenberg pada *sub-band* LL dengan persamaan (1)

$$PHP^T = HD(LL) \quad (7)$$

dengan P adalah matriks transformasi orthogonal dan H adalah matriks Hessenberg pada *sub-band* LL hasil dari transformasi *wavelet*.

- Melakukan SVD (*Singular Value Decomposition*) pada matriks H yang dihasilkan dari langkah sebelumnya dengan persamaan (2)

$$HU_H HS_H HV_H^T = SVD(H) \quad (8)$$

hasilnya adalah matriks-matriks SVD dari citra *host* HU_H , HS_H dan HV_H^T . HU sebagai matriks *left singular value*, HS sebagai matriks *singular value*, dan HV sebagai matriks *right singular value*.

- Menerapkan SVD dengan persamaan (2) pada citra *watermark* (W). Hasilnya adalah matriks-matriks SVD U_w , S_w , dan V_w^T

$$U_w S_w V_w^T = SVD(W) \quad (9)$$

dimana U_w merupakan matriks *left singular value*, S_w merupakan matriks *singular value*, dan V_w^T merupakan matriks *right singular value*.

- Melakukan penyematan dari hasil penguraian *singular value* pada citra *host* dan citra *watermark* dengan persamaan:

$$HS'_w = HS_H + \alpha S_w \quad (10)$$

dimana HS'_w adalah matriks hasil modifikasi dari matriks *singular value* pada citra *host* HS_H ditambahkan dengan matriks *singular value* pada citra *watermark* S_w yang telah dikalikan dengan faktor skala alpha α .

- Melakukan invers SVD dengan persamaan:

$$H' = HU_w HS'_w HV_w^T \quad (11)$$

sub-band H' merupakan hasil invers SVD dari matriks HU_w , HS'_w , dan HV_w^T .

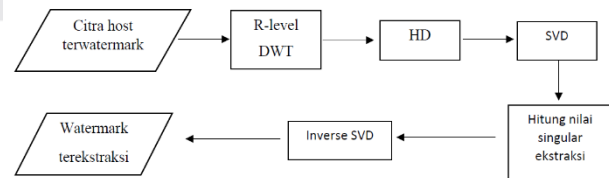
- Merekonstruksi *sub-band* LL' baru dengan melakukan invers Hessenberg decomposition:

$$LL' = PH'P^T \quad (12)$$

kemudian didapatkan citra *host* ter-*watermark* dengan melakukan invers DWT pada *sub-band* LL'

- Setelah proses penyisipan selesai hasilnya adalah citra *host* yang telah disematkan dengan *watermark*.

C. Proses Ekstraksi



GAMBAR 4

(Proses Ekstraksi *Watermark*)

Berikut penjelasan proses ekstraksi citra *host* ter-*watermark* pada Gambar 4:

1. Citra *host* yang telah di-*watermark* didekomposisi menggunakan transformasi DWT, menghasilkan empat *sub-band*: LLw, LHw, HLw, dan HHw.
2. Pada *sub-band* LLw, dilakukan dekomposisi Hessenberg dengan persamaan (1)

$$P_w H_w P_w^T = HD(LL_w) \quad (13)$$

hasilnya adalah matriks Hessenberg H_w dan matriks transformasi *orthogonal* P.

3. Melakukan *Singular Value Decomposition* (SVD) pada matriks H_w dengan persamaan (2):

$$HU'_w H S b'_w H V'^T_w = SVD(H_w) \quad (14)$$

menghasilkan tiga matriks yaitu matriks *left singular value* HU'_w , matriks *singular value* $H S b'_w$, dan matriks *right singular value* $H V'^T_w$.

4. Memperoleh *singular value watermark* yang diekstraksi S'_w :

$$S'_w = (H S b'_w - H S'_w) / \alpha \quad (15)$$

dimana $H S b'_w$ adalah matriks *singular value* citra ter-*watermark* dikurangi dengan matriks *singular value* pada proses *embedding* $H S'_w$ pada persamaan (10) kemudian dibagi dengan faktor skala α .

5. *Watermark* yang diekstraksi W' direkonstruksi dengan melakukan invers SVD matriks U_{w2} , S'_w , dan V_{w2}^T

$$W' = U_{w2} S'_w V_{w2}^T \quad (16)$$

hasilnya citra *watermark* terekstraksi sebagai output proses ekstraksi.

D. Spesifikasi Serangan

Pengujian serangan dilakukan untuk menguji ketahanan *watermark* terhadap serangan yang mungkin terjadi pada citra ter-*watermark* dan citra terekstraksi. Pengujian serangan pada *watermarking* membantu mengevaluasi kehandalan dan efektifitas metode *watermarking* dalam melindungi *watermark* dari serangan. Pada Tabel 1 berikut adalah jenis serangan dan spesifikasinya.

TABEL 1
(Spesifikasi Serangan)

Serangan	Spesifikasi
Serangan Noise	Gaussian noise (var = 0.01)
	Salt & peppers noise (0.01)
	Speckle noise (0.01)
Serangan Kompresi	JPEG compression (QF = 50)
	JPEG2000 compression (CR = 12)
Serangan Geometri	Rotasi (90°)
	Cropping 12%
	Rescale (0.25)
Serangan Filter	Rescale (4)
	Median Filter (3 × 3)
	Gaussian LPF (3 × 3)
Serangan Pemrosesan	Average Filter (3 × 3)
	Motion blur (theta = 4, len = 7)
	Sharpening 0.8

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

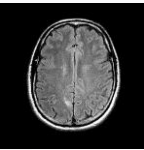
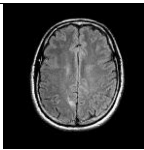
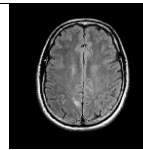
A. Analisis Imperseptibilitas

Citra *watermark* yang diterapkan pada citra *host* seharusnya tidak dapat terdeteksi secara visual (*imperceptible*). Evaluasi imperseptibilitas dilakukan menggunakan parameter seperti PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*) dan SSIM (*Structural Similarity Index*). PSNR dan SSIM digunakan untuk membandingkan citra ter-*watermark* dengan citra *host*. Analisis imperseptibilitas dilakukan tanpa adanya serangan. Semakin tinggi nilai PSNR dan SSIM, semakin baik kualitas citra ter-*watermark*, menandakan bahwa perubahan akibat penerapan *watermark* minim dan tidak terlihat secara kasat mata. Selain itu, parameter NC digunakan untuk mengetahui citra *watermark* hasil ekstraksi.

TABEL 2
(Imperseptibilitas Citra Ter-*watermark* X-Ray)

Ukuran Watermark	256 × 256	128 × 128	64 × 64
Citra Ter- <i>watermark</i>			
PSNR (dB)	38,2838	44,361	49,8469
SSIM	0,9978	0,99979	0,99991
Citra Hasil Ekstraksi			
NC	0,99997	0,99944	0,99532

TABEL 3
(Imperseptibilitas Citra Ter-*watermark* MRI)

Ukuran Watermark	256 × 256	128 × 128	64 × 64
Citra Ter- <i>watermark</i>			
PSNR (dB)	35,2935	41,3293	46,8611
SSIM	0,99145	0,99721	0,99942
Citra Hasil Ekstraksi			
NC	0,99722	0,99836	0,99895

Hasil simulasi yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran citra *watermark*

nilai PSNR dan SSIM semakin tinggi artinya kualitas citra ter-*watermark* semakin bagus. Secara umum dalam skema *watermark*, nilai PSNR melebihi 30 dB menandakan bahwa citra *watermark* tidak dapat terdeteksi secara kasat mata. Dapat disimpulkan bahwa citra *X-Ray* dan *MRI* ter-*watermark* *imperceptible*. Secara keseluruhan *watermarking* untuk citra *X-ray* dan *MRI* memiliki nilai parameter PSNR dan SSIM yang baik, artinya bahwa skema *watermarking* memiliki imperseptibilitas yang baik.

B. Analisis Ketahanan

Citra ter-*watermark* dilakukan uji serangan untuk mengetahui apakah citra *watermark* dapat diambil kembali dengan benar melalui proses ekstraksi. Parameter performansi yang digunakan untuk evaluasi ketahanan skema *watermark* adalah *Normalized Correlation*. Nilai *Normalized Correlation* (NC) memiliki rentang skala dari 0 hingga 1. Semakin tinggi nilai NC, semakin tinggi koefisien korelasi antara citra hasil ekstraksi dengan citra *watermark*.

TABEL 4
(Nilai NC Hasil Ekstraksi Citra Terserang *X-Ray*)

Klasifikasi		Nilai NC Hasil Ekstraksi Citra Terserang <i>X-Ray</i>		
Serangan	Serangan	Ukuran <i>Watermark</i>		
		64 × 64	128 × 128	256 × 256
Tanpa Serangan		0,99532	0,99944	0,99997
	Gaussian LPF	0,98552	0,97004	0,96875
	Median Filter	0,99017	0,98582	0,98406
Filter	Average Filter	0,98505	0,96932	0,96821
	Salt & Pepper	0,9924	0,99454	0,98833
Serangan Noise	Speckle Noise	0,99214	0,99279	0,98631
	Gaussian	0,9435	0,95876	0,95875
Serangan	JPEG2000	0,99058	0,97844	0,97991
Kompresi	JPEG	0,92793	0,97193	0,99041
Serangan	Sharpening	0,9791	0,98376	0,98708
Pemrosesan	Motion Blur	0,91349	0,90876	0,93874
Serangan Geometri	Rotasi	0,99532	0,99944	0,99997
	Cropping	0,6785	0,872	0,86187
	Rescale (0.25)	0,97427	0,9331	0,93613
Geometri	Rescale (4)	0,99555	0,99934	0,99937
	Rescale (4)	0,99555	0,99934	0,99937
Nilai NC rata-rata:		0,95592	0,96783	0,96985

TABEL 5
(Nilai NC Hasil Ekstraksi Citra Terserang *MRI*)

Klasifikasi		Nilai NC Hasil Ekstraksi Citra Terserang <i>MRI</i>		
Serangan	Serangan	Ukuran <i>Watermark</i>		
		64 × 64	128 × 128	256 × 256
Tanpa Serangan		0,99895	0,99836	0,99722
	Gaussian LPF	0,89936	0,97004	0,90069
	Median Filter	0,98254	0,98582	0,95814
Filter	Average Filter	0,89768	0,96932	0,89927
	Salt & Pepper	0,98324	0,99454	0,98003
Serangan Noise	Speckle Noise	0,99205	0,99279	0,99382
	Gaussian	0,87119	0,95876	0,96253
Serangan	JPEG2000	0,95143	0,97844	0,95886
Kompresi	JPEG	0,92142	0,97193	0,9833
Serangan	Sharpening	0,9792	0,98376	0,97974
Pemrosesan	Motion Blur	0,77194	0,90876	0,80658
Serangan Geometri	Rotasi	0,99895	0,99944	0,99722
	Cropping	0,59974	0,872	0,95471
	Rescale (0.25)	0,85224	0,9331	0,82446
Geometri	Rescale (4)	0,99672	0,99934	0,99279
	Rescale (4)	0,99672	0,99934	0,99279
Nilai NC rata-rata:		0,91311	0,91908	0,94595

Berdasarkan pada parameter untuk mengetahui ketahanan *Normalized Correlation* skema *watermarking* tahan terhadap serangan *filter*, *noise*, *kompresi*, *motion blur*, *sharpening* dan beberapa serangan geometri yaitu serangan rotasi dan *rescale*. Pada serangan *cropping* skema *watermarking* tidak dapat mengambil kembali citra *watermark* dengan benar ditandai dengan nilai NC yang rendah. Serangan *cropping* bekerja dengan merusak citra ter-*watermark* dengan cara menghapus sebagian citra. Bagian citra yang dihapus berisi informasi penting yang mempengaruhi koefisien transformasi untuk melakukan proses ekstraksi secara penuh dan benar.

V. KESIMPULAN

Penggunaan parameter PSNR dan SSIM digunakan untuk mengevaluasi imperseptibilitas citra ter-*watermark* pada citra *host*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran citra *watermark*, semakin tinggi nilai PSNR dan SSIM, menandakan kualitas citra ter-*watermark* yang semakin baik dan imperseptibel. Dalam konteks citra medis yang memerlukan detail tinggi, penggunaan *watermark* dengan rasio kecil antara citra *watermark* dan citra *host* dapat dipilih. Citra hasil ter-*watermark* dilakukan uji serangan untuk mengevaluasi ketahanan skema *watermarking*. Parameter untuk analisis ketahanan yang digunakan adalah *Normalized Correlation* (NC). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa skema *watermarking* memiliki ketahanan yang baik terhadap serangan *noise*, *kompresi*, *filter* dan beberapa serangan geometri seperti rotasi dan *rescale*.

REFERENSI.

- [1] I. Cox *et al.*, "Digital Watermarking and Steganography," 2008.
- [2] R. Munir, "Sekilas Image Watermarking untuk Memproteksi Citra Digital dan Aplikasinya pada Citra Medis," 2006.
- [3] G. Chawla, R. Saini, and R. Yadav, "Classification of Watermarking Based upon Various Parameters," 2012. [Online]. Available: www.ijcait.com
- [4] M. Begum and M. S. Uddin, "Digital image watermarking techniques: A review," *Information (Switzerland)*, vol. 11, no. 2. MDPI AG, Feb. 01, 2020. doi: 10.3390/info11020110.
- [5] P. Kadian, S. M. Arora, and N. Arora, "Robust Digital Watermarking Techniques for Copyright Protection of Digital Data: A Survey," *Wireless Personal Communications*, vol. 118, no. 4. Springer, pp. 3225–3249, Jun. 01, 2021. doi: 10.1007/s11277-021-08177-w.
- [6] P. Garg and R. R. Kishore, "Performance comparison of various watermarking techniques," *Multimed Tools Appl*, vol. 79, no. 35–36, pp. 25921–25967, Sep. 2020, doi: 10.1007/s11042-020-09262-1.
- [7] F. Ernawan and D. Ariatmanto, "A recent survey on image watermarking using scaling factor techniques for copyright protection," *Multimed Tools Appl*, 2023, doi: 10.1007/s11042-023-14447-5.

- [8] C. C. Lai and C. C. Tsai, "Digital image watermarking using discrete wavelet transform and singular value decomposition," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Nov. 2010, pp. 3060–3063. doi: 10.1109/TIM.2010.2066770.
- [9] N. Muhammad and N. Bibi, "Digital image watermarking using partial pivoting lower and upper triangular decomposition into the wavelet domain," *IET Image Process*, vol. 9, no. 9, pp. 795–803, Sep. 2015, doi: 10.1049/iet-ipr.2014.0395.
- [10] A. Alzahrani and N. A. Memon, "Blind and Robust Watermarking Scheme in Hybrid Domain for Copyright Protection of Medical Images," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 113714–113734, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3104985.
- [11] S. E. Naffouti, A. Kricha, and A. Sakly, "A sophisticated and provably grayscale image watermarking system using DWT-SVD domain," *Visual Computer*, 2022, doi: 10.1007/s00371-022-02587-y.
- [12] Ş. Y. Altay and G. Ulutaş, "Self-adaptive step firefly algorithm based robust watermarking method in DWT-SVD domain," *Multimed Tools Appl*, vol. 80, no. 15, pp. 23457–23484, Jun. 2021, doi: 10.1007/s11042-020-10251-7.
- [13] J. Liu *et al.*, "An Optimized Image Watermarking Method Based on HD and SVD in DWT Domain," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 80849–80860, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2915596.
- [14] A. M. Abduldaim, J. Waleed, and A. N. Mazher, "An Efficient Scheme of Digital Image Watermarking Based on Hessenberg Factorization and DWT," in *2020 International Conference on Computer Science and Software Engineering (CSASE)*, IEEE, Apr. 2020, pp. 180–185. doi: 10.1109/CSASE48920.2020.9142096.
- [15] H. Seddik, M. Sayadi, and F. Fnaiech, "IMAGE WATERMARKING BASED ON THE HESSENBERG TRANSFORM," 2009. [Online]. Available: www.worldscientific.com
- [16] F. Li, L. Gao, J. Wang, and R. Yan, "Strong Robustness Watermarking Algorithm Based on Lifting Wavelet Transform and Hessenberg Decomposition," *International Journal of Web Services Research*, vol. 19, no. 1, pp. 1–19, Dec. 2022, doi: 10.4018/ijwsr.314948.
- [17] Y. Shi and R. Eberhart, "A Modified Particle Swarm Optimizer," 1998. doi: <https://doi.org/10.1109/ICEC.1998.699146>.
- [18] J. McCaffrey, "Artificial Intelligence - Particle Swarm Optimization | Microsoft Learn," MSDN Magazine Issues. Accessed: Feb. 06, 2024. [Online]. Available: <https://learn.microsoft.com/en-us/archive/msdn-magazine/2011/august/artificial-intelligence-particle-swarm-optimization>