

Robust Reversible Watermarking based on Polar Harmonic Transform using Logarithmic QIM

1st Lulu Balqis Zianka Faza

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

lulubalqiszianka@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Ledy Novamizanti

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

ledyaldn@telkomuniversity.ac.id

3rd Gelar Budiman

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

gelarbudiman@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Di era digital yang terus berkembang, perlindungan hak cipta menjadi semakin penting, terutama dalam distribusi konten multimedia. Salah satu teknik yang digunakan untuk melindungi hak cipta adalah watermarking, khususnya watermarking yang kuat dan dapat dibalik. Namun, tantangan tetap ada dalam menjaga kualitas gambar asli setelah proses penyematan dan ekstraksi watermark, serta memastikan bahwa watermark tidak terlihat dan tahan terhadap berbagai jenis serangan. Penelitian ini mengusulkan metode watermarking yang kuat dan reversibel dengan memanfaatkan Polar Harmonic Transform (PHT) dan Logarithmic Quantization Index Modulation (LQIM) serta teknik normalisasi adaptif. Proses dimulai dengan menerapkan PHT untuk memperoleh koefisien frekuensi yang lebih tahan terhadap distorsi. Selanjutnya, LQIM digunakan untuk menyematkan watermark ke dalam gambar host secara tidak kentara, dengan teknik normalisasi adaptif yang mengoptimalkan proses penyematan dan meminimalkan dampaknya terhadap kualitas gambar. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mempertahankan kualitas visual yang tinggi, dengan nilai Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) yang memadai, dan menunjukkan ketahanan yang kuat terhadap serangan seperti kompresi, noise, dan pemotongan. Selain itu, metode ini memungkinkan pemulihan gambar asli secara sempurna tanpa kehilangan informasi, sehingga efektif untuk aplikasi watermarking dalam lingkungan yang memerlukan keamanan dan kualitas gambar. Hasil eksperimen juga menunjukkan bahwa skema watermarking yang diusulkan mencapai tingkat imperceptibility yang tinggi dengan nilai PSNR rata-rata sebesar 33.44 dB.

Kata kunci— *watermarking, citra digital, reversible, robust, Polar Harmonic Transform*

I. PENDAHULUAN

Di era digital yang semakin maju, teknologi telah menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari kehidupan sehari-hari, membuat pertukaran informasi menjadi lebih efisien. Salah satu bentuk pertukaran informasi yang umum adalah melalui gambar digital. Namun, kemudahan akses dan pertukaran ini juga menimbulkan masalah keamanan seperti

modifikasi, penghapusan, akses, dan pemalsuan yang tidak sah. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengembangkan dan menerapkan langkah-langkah keamanan yang kuat untuk melindungi integritas dan privasi data. Langkah-langkah ini termasuk enkripsi data, otentikasi pengguna, dan teknologi lain yang dirancang untuk mencegah akses yang tidak sah dan memastikan bahwa hanya individu atau sistem yang berwenang yang dapat mengakses atau mengubah data. Terlepas dari tantangan keamanan yang ada, teknologi digital dan IoT dapat digunakan dengan aman dan efisien dengan perlindungan yang tepat. Selain itu, penelitian dan pengembangan yang berkelanjutan di bidang ini akan membantu mengatasi masalah keamanan dan memungkinkan pertukaran informasi yang lebih aman dan efisien di masa depan [1].

Watermarking adalah teknik umum untuk menyematkan informasi tambahan ke dalam gambar digital tanpa mengorbankan kualitas visual. Dalam bidang kesehatan, teknik ini digunakan untuk mengidentifikasi asal gambar, melacak perubahan, dan melindungi privasi pasien. Namun, watermarking dapat menurunkan kualitas gambar, yang sangat penting dalam bidang seperti pencitraan medis. Untuk mengatasi hal ini, teknik Robust Reversible Watermarking (RRW) telah dikembangkan. Skema RRW Coltuc dkk. menggunakan proses dua tahap: watermarking yang kuat untuk menghasilkan gambar perantara, diikuti dengan kompresi lossless dari perbedaan antara gambar asli dan gambar perantara, sehingga menghasilkan gambar yang sepenuhnya bertanda air [2].

Makalah ini mengeksplorasi Robust Reversible Watermarking berdasarkan metode Polar Harmonic Transform (PHT) dan Logarithmic Quantization Index Modulation (LQIM). Pendekatan ini memanfaatkan kemampuan PHT untuk menghasilkan koefisien yang tahan terhadap transformasi geometris dan distorsi lainnya. Metode LQIM kemudian digunakan untuk menyematkan watermark secara efisien ke dalam koefisien-koefisien ini, meminimalkan distorsi visual pada gambar bertanda air sambil mempertahankan kualitas gambar asli. Kombinasi dari teknik-teknik ini bertujuan untuk meningkatkan ketahanan watermark terhadap berbagai serangan sekaligus memungkinkan ekstraksi watermark secara lengkap tanpa kehilangan informasi dari gambar asli [5].

Beberapa studi terkini menunjukkan kemajuan dalam teknik watermarking yang dapat meningkatkan ketahanan dan kualitas watermarking, terutama dalam konteks gambar

medis. Novamizanti et al. (2023) mengembangkan teknik Robust Reversible Watermarking yang menggunakan domain embedding independen dan urutan nilai piksel untuk meningkatkan ketahanan watermark terhadap serangan dan distorsi [6]. Selain itu, teknik watermarking menggunakan transformasi wavelet stasioner dan spektrum penyebaran multibit pada gambar medis juga telah dikaji untuk meningkatkan ketahanan dan kualitas watermarking [7]. Penelitian lain menyoroti penggunaan modifikasi pasangan koefisien dalam watermarking untuk memastikan watermark yang tangguh dan tidak terlihat pada gambar medis [8]. Metode lain yang menggunakan transformasi diskret cosine (DCT) dan singular value decomposition (SVD) juga telah diperkenalkan untuk watermarking gambar medis [9]. Teknik sensing kompresi dalam domain wavelet stasioner juga telah diterapkan untuk meningkatkan kualitas watermarking [10]. Novamizanti dan tim juga telah mengkaji watermarking audio berbasis domain transformasi dan SVD, yang memberikan wawasan tambahan mengenai pendekatan watermarking yang tangguh dan efisien [11]. Terakhir, penelitian oleh Hafizhana et al. (2020) menunjukkan penerapan sensing kompresi berbasis transformasi wavelet stasioner untuk watermarking gambar medis, yang menunjukkan potensi dalam meningkatkan kualitas watermarking [12].

Dengan memanfaatkan teknik-teknik tersebut, penelitian ini bertujuan untuk secara signifikan meningkatkan ketahanan watermark dengan memanfaatkan teknik LQIM, memilih tingkat kuantisasi logaritmik yang optimal untuk menahan berbagai serangan geometris dan non-geometris. Selain itu, penelitian ini berusaha untuk meminimalkan kebutuhan akan informasi tambahan dalam proses penyematan dan ekstraksi dengan mengoptimalkan metode LQIM, sehingga meningkatkan efisiensi dan kapasitas sistem. Tujuan utamanya adalah untuk mengembangkan sistem watermarking berbasis LQIM dua tahap yang menggabungkan ketahanan dan kapasitas tinggi, dengan tetap mempertahankan ketidaktampakan dan reversibilitas, mengungguli metode tradisional.

II. KAJIAN TEORI

A. Polar Harmonic Transform

Yap dkk. [13] memperkenalkan serangkaian transformasi 2D yang dikenal sebagai Polar Harmonic Transform (PHT), yang didasarkan pada basis proyeksi ortogonal. Transformasi ini didefinisikan pada lingkaran satuan dalam sistem koordinat kutub [14]. Dibandingkan dengan metode berbasis momen lainnya, PHT unggul dalam rekonstruksi gambar, stabilitas numerik, dan efisiensi komputasi, menawarkan manfaat seperti berkurangnya sensitivitas terhadap noise dan kemampuan untuk menghitung momen orde tinggi secara akurat. [4, 18]. M_{nl} adalah moment PHT dari orde n ($-N \leq n \leq N$) dengan repetisi l ($-L \leq l \leq L$), dimana N dan L berturut-turut menyatakan orde maksimum dan repetisi maksimum. Kemudian fungsi kernel dari PHT $H_{nl}(x, y)$ dihitung berdasarkan persamaan (2) dan Moment PHT dihitung dengan persamaan (1).

$$M_{nl} = \Omega \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) [H_{nl}(x, y)] * dx dy \quad (1)$$

dimana Ω adalah konstanta dan $[H_{nl}(x, y)] *$ is adalah konjugasi $H_{nl}(x, y)$.

$$H_{nl}(x, y) = R_n(r) e^{il\theta} \quad (2)$$

PHT adalah nama umum dari *polar complex exponential transform* (PCET), *polar cosine transform* (PCT), dan *polar sine transform* (PST). Setiap jenis memiliki momen ortogonal yang berbeda dan juga mempunyai komponen radial yang berbeda pula. Komponen radial PCET, PCT, dan PST adalah

$$R_n^E(r) = e^{i2\pi nr^2}, R_n^C(r) = \cos(\pi nr^2), R_n^S(r) = \sin(\pi nr^2)$$

B. Logarithmic Quantization Index Modulation

Logarithmic Quantisation Index Modulation (LQIM) adalah teknik di mana beberapa bit data disisipkan ke dalam sinyal gambar host dengan menggunakan pendekatan logaritmik. Teknik ini memungkinkan penyisipan data dengan ketahanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode kuantisasi biasa. Bit data dipetakan ke dalam level kuantisasi yang ditentukan secara logaritmik, kemudian disisipkan ke dalam sinyal gambar host. Di sisi penerima, data yang disisipkan dapat diekstraksi menggunakan logika kuantisasi yang sama, yang memastikan ketahanan yang lebih baik terhadap serangan. [4]

Proses penghitungan delta dalam Modified Quantization Index Modulation berfungsi sebagai skala kuantisasi adaptif dan penting dalam menentukan kualitas watermarking. Delta dihitung menggunakan rumus:

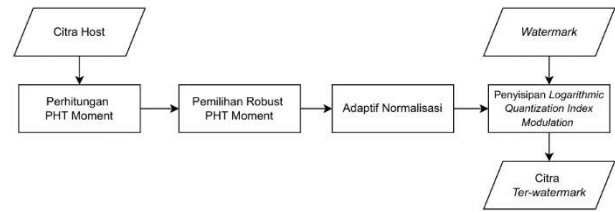
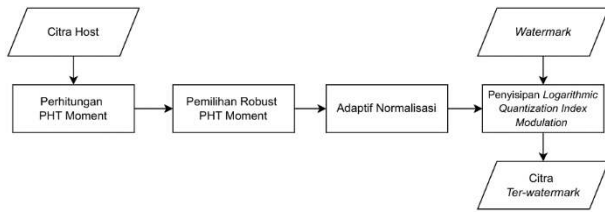
$$\Delta = \frac{\text{mean}(|\text{moment}_{saja}|)}{R} \quad (3)$$

Dimana $|\text{moment}_{saja}|$ adalah nilai absolut dari momen PHT (Polar Harmonic Transform) yang telah dipilih sebagai kandidat untuk penyisipan watermark. Fungsi rata-rata ($|\text{momentsaja}|$) digunakan untuk menghitung nilai rata-rata momen. Parameter R adalah faktor pembagi yang digunakan untuk menyesuaikan skala delta. Nilai R mempengaruhi ketahanan dan kualitas watermarking. Semakin besar R , semakin kecil delta yang dihasilkan, yang berarti kuantisasi menjadi lebih halus, tetapi dapat mengurangi ketahanan watermark terhadap serangan. Dalam proses penyisipan, delta adaptif mengacu pada nilai delta yang berubah berdasarkan karakteristik lokal dari gambar host. Setiap blok gambar memiliki nilai delta yang dihitung dari momen PHT di blok tersebut, membuat kuantisasi lebih sesuai dengan karakteristik lokal. Blok delta adaptif berarti bahwa di dalam setiap blok gambar, delta dihitung secara independen, sehingga memungkinkan penandaan air yang lebih fleksibel dan kuat terhadap serangan. Dengan cara ini, delta adaptif memastikan bahwa kuantisasi dapat beradaptasi dengan perubahan karakteristik gambar, sehingga meningkatkan kualitas dan ketahanan watermarking.

III. METODE

A. Robust Reversible Watermarking

Berikut ini adalah Diagram Alur Skema PHT RRW yang Diusulkan dengan Metode Modulasi Robust Logaritmik Quantization Index:



B. Robust Reversible Watermarking

Robust Reversible Watermarking (RRW) adalah teknik yang memungkinkan penyisipan dan ekstraksi watermark pada gambar digital tanpa menyebabkan kehilangan atau kerusakan permanen pada gambar asli. [3]

Teknik ini memanfaatkan redundansi antara piksel pada gambar untuk menyisipkan dan mengekstrak watermark, sehingga gambar asli dapat dipulihkan sepenuhnya tanpa serangan apa pun. Metode ini juga dikenal sebagai penyembunyian data reversibel atau penyembunyian informasi tanpa kehilangan, yang memungkinkan pemulihan gambar asli tanpa kehilangan dan dapat diterapkan untuk otentikasi yang membutuhkan akurasi tinggi.

Keuntungan utama dari metode ini adalah kemampuannya untuk menyisipkan dan mengekstrak tanda air tanpa merusak gambar asli secara permanen, sehingga ideal untuk aplikasi yang membutuhkan presisi tinggi, seperti pencitraan satelit, diagnosis medis, dan pemrosesan gambar mikro. Namun, ketahanannya terhadap serangan tertentu terbatas; meskipun dapat menangani distorsi geometris, mungkin masih rentan terhadap beberapa algoritma kompresi dan teknik pemrosesan gambar. Selain itu, reversibilitas watermark dapat dikompromikan jika perbedaan antara gambar asli dan gambar yang diberi watermark melebihi kapasitas metode ini.

Pengujian ini menggunakan skema yang diusulkan oleh Tang et al. dimana Tang et al. mengusulkan Robust Reversible Watermarking (RRW) dua tahap dengan menggunakan Polar Harmonic Transform (PHT). Pada tahap pertama, metode Distortion-Compensated Quantization Index Modulation (DC-QIM) digunakan untuk penyisipan watermark yang kuat. Karena metode DC-QIM hanya menyisipkan satu bit watermark ke dalam satu momen PHT, maka metode Logarithmic Quantization Index Modulation (LQIM) diusulkan untuk menggantikan metode DC-QIM untuk meningkatkan ketangguhannya.

Logarithmic Quantization Index Modulation (LQIM) adalah teknik di mana beberapa bit data disisipkan ke dalam sinyal gambar host dengan menggunakan pendekatan logaritmik. Teknik ini memungkinkan penyisipan data dengan ketahanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode kuantisasi biasa. Bit data dipetakan ke dalam level kuantisasi yang ditentukan secara logaritmik dan kemudian disisipkan ke dalam sinyal gambar host. Di sisi penerima, data yang disisipkan dapat diekstraksi menggunakan logika kuantisasi yang sama, yang memastikan ketahanan yang lebih baik terhadap serangan. [4]

C. Watermark Embedding

Berikut ini adalah Diagram Alur Skema PHT RRW yang Diusulkan dengan Metode Modulasi Robust Logaritmik Quantization Index:

Berdasarkan flowchart pada gambar tersebut, menggunakan skema RRW PHT yang sebelumnya diusulkan oleh Tang dkk. Lalu kami mengusulkan modifikasi pada tahapan Robust Embedding dengan menerapkan metode *Logarithmic Quantization Index Modulation* (LQIM). Penyematan *Watermark* terdiri atas dua tahapan yaitu Tahap Robust Embedding dan Tahap Reversible Embedding. Berikut penjelasan detail mengenai tahapan metode yang diusulkan :

1. Memilih momen PHT Robust

Percobaan selanjutnya menunjukkan bahwa jumlah nilai absolut orde n momen PHT dan pengulangan l berhubungan dengan tingkat robustness, $S = |n| + |l|$. Seperti yang ditunjukkan pada penelitian oleh Tang, dkk., momen PHT dengan S kecil tidak cocok untuk penyematan watermark. Jadi, momen PHT, $C = \{M_{nl}, n \leq N, \geq 0, \neq 4m, \geq G\}$, digunakan untuk robust watermarking, dimana G adalah threshold yang digunakan untuk menentukan apakah momen PHT cocok untuk robust watermarking. ketika $S \geq G$ berlaku, momen PHT yang akurat, $l \neq 4m$, cocok untuk watermark embedding, dan sebaliknya.

$$M = \{M_{n1,l1}, M_{n2,l2}, \dots, M_{nL_w,lL_w}\} \quad (4)$$

2. Normalisasi Adaptif

Normalisasi adaptif seperti yang akan diilustrasikan oleh simulasi eksperimental oleh Tang, dkk, momen PHT dengan S lebih besar umumnya menyebabkan ketahanan yang lebih lemah terhadap JPEG2000 dan rotasi. Hal ini berarti bahwa momen PHT dengan S yang lebih besar harus diterapkan dengan kekuatan *embedding* yang lebih besar untuk meningkatkan *robustness*-nya. Maka dilakukan normalisasi adaptif pada PHT moment yang terpilih menggunakan persamaan (5) untuk mendapatkan $M_{ni,li}^r$

$$M_{ni,li}^R = \frac{M_{ni,li}}{M_{00}} \times T_i \quad (5)$$

dimana $M_{ni,li}^R$ adalah momen PHT yang dinormalisasi, M_{00} adalah momen PHT orde nol, dan T_i adalah bobot normalisasi adaptif yang orde dan repetisi. Untuk mencapai ketahanan yang lebih tinggi dengan cara adaptif, ditetapkan T_i sebagai ;

$$T_i = T_{init} - \gamma \times (|n_i| + |l_i|) \quad (6)$$

3. Tahap Embedding

DC-QIM diimplementasikan dalam konteks skema *watermarking* dua tahap yang menggunakan momen PHT. Pada tahap pertama, *watermark* disisipkan ke dalam momen PHT yang dipilih berdasarkan eksperimen untuk mencapai ketahanan tinggi. Setelah proses kuantisasi dan pembulatan, distorsi yang terjadi dimasukkan ke dalam citra untuk mencapai reversibilitas. Karena DC-QIM yang diterapkan

merupakan salah satu metode penyisipan *watermark* dengan kinerja yang diinginkan, maka menerapkan *watermarking* yang kuat. Secara khusus, *watermarking* DC-QIM didefinisikan sebagai:

$$|M_{ni,li}^{Rj}| = Q^j[|M_{ni,li}^R|, \Delta], i = 1, 2, \dots, L_w, j \in \{0, 1\} \quad (7)$$

dimana Δ sebagai *quantization step* dan persamaan $Q^j(\cdot)$ dinyatakan sebagai berikut :

$$Q^j(|M_{ni,li}^R|, \Delta) = \left\lceil \frac{|M_{ni,li}^R| - \beta(j)}{\Delta} \right\rceil \times \Delta + \beta(j) \quad (8)$$

dimana $\beta(i)$ mewakili nilai yang memenuhi $\beta(i) = \beta(i) + \Delta/2$. Pada paper Tang dkk juga dinyatakan bahwa $\beta(0) = 0$ dan $\beta(1) = \Delta/2$. Selanjutnya diperlukan kuantisasi error untuk $|M_{ni,li}^R|$ yang dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$d_{qi}^j = |M_{ni,li}^{Rj}| - |M_{ni,li}^R| \quad (9)$$

Karena kesalahan terkuantisasi dimasukkan ke dalam citra yang diberi *watermark* untuk reversibilitas, maka bilangan riil tersebut merupakan kuantisasi *error* memerlukan sejumlah besar bit untuk merepresentasikan, yang berakibat penurunan kapasitas penyisipan secara signifikan dan bahkan membuat tahap *reversible embedding* menjadi sulit dilakukan.

Untuk mengatasi masalah ini, yaitu dengan mengkuantifikasi bagian bilangan bulat $|M_{ni,li}^{Rj}|$. Secara khusus, operasi pembulatan pertama kali dilakukan pada $|M_{ni,li}^{Rj}|$, dan perbedaan antara versi bulat dan versi asli dihitung, yaitu

$$D_{dec_j} = \left| |M_{ni,li}^{Rj}| - \lfloor |M_{ni,li}^{Rj}| \rfloor \right| \quad (10)$$

dimana D_{dec_i} adalah bagian desimal dari $|M_{ni,li}^{Rj}|$ yang dihasilkan oleh $|M_{ni,li}^R| = |M_{ni,li}^{Rj}| - D_{dec_j}$ lalu keduanya $|M_{ni,li}^R|$ dan d_{qi}^j merupakan bilangan bulat yang memfasilitasi penurunan jumlah bit yang mewakili kesalahan terkuantisasi. Dengan demikian, DC-QIM standar dapat dioptimalkan sebagai

$$|M_{ni,li}^{Rj}| = Q^j(|M_{ni,li}^R| - D_{dec_j}, \Delta) \quad (11)$$

Persamaan tersebut menunjukkan *watermarking* DC-QIM yang dioptimalkan, di mana kuantisasi error d_{qi}^j disesuaikan menjadi bilangan bulat yang akan sangat mengurangi informasi tambahan untuk *reversible watermark embedding*. Setelah mendapatkan $|M_{ni,li}^{Rj}|$ momen PHT yang diberi *watermark* $M_{ni,li}^w$ diperoleh dengan *invers normalization*, yaitu

$$M_{ni,li}^w = \frac{|M_{ni,li}^{Rj}|}{|M_{ni,li}^R|} \times M_{ni,li}^R \quad (12)$$

Untuk memastikan piksel dari citra yang diberi *watermark* kuat adalah bilangan riil, proses yang sama juga harus dilakukan pada $M_{ni,li}$

4. Citra Robust Watermarked

Tahapan ini merupakan tahapan terakhir, dilakukan perhitungan I_{error} untuk mendapatkan I_w dengan rumus berikut :

$$I_{error} = \left[\sum_{i=1}^{L_w} \left((M_{ni,li}^w - M_{ni,li})H_{ni,li} + (M_{-ni,-li}^w - M_{-ni,-li})H_{-ni,-li} \right) \right] \quad (13)$$

$$I_w = I + I_{error} \quad (14)$$

Citra yang sudah ber*watermark* dan *robust* I_w akan digunakan sebagai pembawa untuk menyisipkan informasi tambahan dalam tahap *reversible embedding*.

5. Watermarked-removed image generation

Tahap ini tetap sama dengan yang dijelaskan di jurnal Tang, dkk. yaitu menghitung perbedaan antara citra *Host* (I) dan citra *Robust* ber-*watermark* (I_w) untuk menghasilkan citra *watermarked-removed* I_w *removal* yang lebih dekat dengan citra asli I . Pertama, lakukan perhitungan PHT *moment* pada I_w untuk mendapatkan $M_{ni,li}^{Rw}$. Selanjutnya gunakan rumus berikut untuk mendapatkan $M_{ni,li}^{Rr}$

$$|M_{ni,li}^{Rr}| = |M_{ni,li}^{Rw}| - d_{qi}^j \quad (15)$$

Setelah $M_{ni,li}^{Rr}$ diperoleh lakukan invers normalisasi dan rekonstruksi $I_{wremoval}$

$$M_{ni,li}^r = \frac{|M_{ni,li}^{Rr}|}{|M_{ni,li}^{Rw}|} \times M_{ni,li}^{rw} \quad (16)$$

$$I_{wremoval} = I_w + \left[\sum_{i=1}^{L_w} \left((M_{ni,li}^w - M_{ni,li})H_{ni,li} + (M_{-ni,-li}^w - M_{-ni,-li})H_{-ni,-li} \right) \right] \quad (17)$$

6. Reversible watermark construction

Hitung selisih antara $I_{wremoval}$ dan citra host (I) untuk mendapatkan d_r

$$d_r = I - I_{wremoval} \quad (18)$$

Selain itu, untuk menentukan apakah gambar yang diterima telah diserang, dibuat urutan *hash* dari *watermark* tersebut gambar dengan *robust* dan *reversible watermark*, yaitu H , lalu masukkan H ke dalam bit paling tidak signifikan (LSB) dari L_H pertama (e.g., $L_H = 256$) piksel gambar yang tidak diberi *watermark*, dengan L_H menunjukkan panjang H . Untuk memulihkan L_H piksel gambar ini dengan sempurna, pertama L_H LSB, sebut saja b_{LSB} , juga harus diekstraksi dan kemudian *embedding* sebagai bagian dari *reversible watermark* ke dalam citra *robust terwatermark*. Singkatnya, *reversible watermark* untuk reversibilitas dibuat sebagai $w^r = \{d_r, b_{LSB}\}$, ini juga disebut *auxiliary information for reversibility*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem *watermarking* dirancang untuk bekerja dengan gambar host grayscale dengan ukuran 512×512 piksel, sedangkan *watermark* adalah kunci bit biner. Sistem ini akan diuji dengan menggunakan empat buah gambar grayscale: Goldhills, Peppers, Barbara, dan Baboon [15]. Evaluasi

sistem akan berfokus pada kriteria watermarking termasuk imperceptibility, reversibility, dan robustness.



GAMBAR 3.
gambar (a) Goldhills, (b) Peppers, (c) Barbara, (d) Baboon

Gambar 3 menunjukkan empat gambar yang digunakan sebagai host dalam sistem watermarking. Gambar-gambar tersebut akan disisipkan menggunakan metode yang telah dirancang. Proses penyisipan watermark dilakukan untuk menyisipkan informasi bit biner ke dalam gambar host.

NILAI PSNR DAN BER

Host	PSNR ₁	PSNR ₂	BER
Goldhills	33.5898	33.5710	0
Peppers	31.9958	31.5298	0
Barbara	33.6037	33.5599	0
Baboon	34.5785	34.5347	0

A. Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)

Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) mengukur kesamaan dua sinyal, sinyal referensi dan yang diproses dalam desibel (dB) [16]. PSNR adalah metrik pengukur distorsi, semakin tinggi PSNR maka semakin rendah distorsinya artinya semakin baik kualitas citra tersebut. I adalah citra host dan I' adalah citra yang telah melalui proses baik penyisipan ataupun ekstraksi. dengan kedua citra tersebut berukuran $L_R \times L_C$, PSNR diukur dihitung dalam persamaan: . [3]

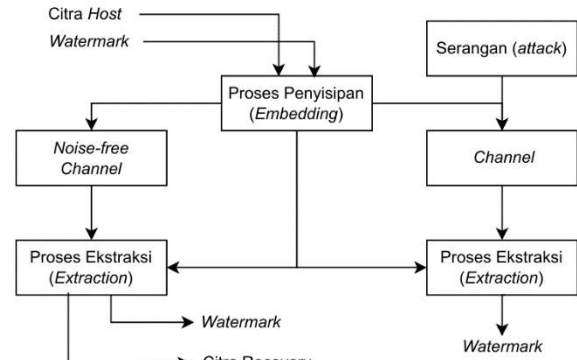
$$PSNR(X, X') = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE(X, X')} \right)$$

B. Bit Error Rate (BER)

Bit Error Rate (BER) merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui tingkat ketahanan sistem yang dibuat. Nilai BER hasil pengujian ketahanan *watermark* menunjukkan kualitas gambar *watermark* yang diekstraksi dari citra yang diserang. Makin tinggi nilai BERnya maka makin buruk kualitas *watermark* hasil ekstraksi [17]. Berikut merupakan formula yang digunakan dalam menghitung BER [18]:

$$BER = \frac{\sum_{i=1}^{L_w} |w' - w|}{L_w}$$

dimana w adalah bit *watermark* asli, w' adalah bit *watermark* yang diekstraksi dan L_w adalah jumlah bit *watermark* yang disisipkan. Pengukuran tersebut dilakukan dengan skema sistem ideal dan skema dengan serangan, sebagai berikut:



GAMBAR 4.

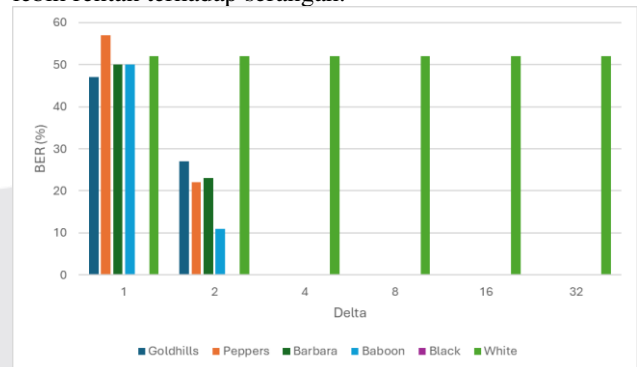
Skema diagram pengujian Sistem Watermarking

C. Evaluasi Parameter

Evaluasi parameter melibatkan penilaian metrik spesifik untuk menentukan kinerja dan efektivitas sistem atau metode. Proses ini membantu mengidentifikasi seberapa baik sistem memenuhi tujuannya, seperti akurasi, ketahanan, dan efisiensi, dalam berbagai kondisi atau skenario.

1. Analisis Nilai Delta (Δ)

Parameter delta mengacu pada ukuran langkah kuantisasi yang digunakan selama proses penyematan data dengan metode seperti DC-QIM atau Modulasi Indeks Kuantisasi Logaritmik (LQIM). Delta mengontrol sensitivitas kuantisasi, yang secara langsung memengaruhi keseimbangan antara ketahanan watermark terhadap serangan dan distorsi yang terjadi pada gambar host. Nilai delta yang lebih besar meningkatkan ketahanan watermark terhadap serangan, tetapi juga menimbulkan lebih banyak distorsi pada gambar host. Sebaliknya, nilai delta yang lebih kecil mengurangi distorsi gambar tetapi membuat watermark lebih rentan terhadap serangan.



GAMBAR. 5.

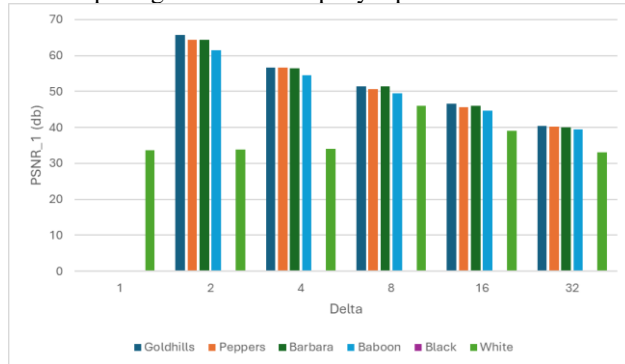
Pengaruh Delta terhadap nilai BER

Dari Gambar. 5, dapat disimpulkan bahwa nilai delta yang lebih tinggi menghasilkan BER yang lebih rendah, sedangkan nilai delta yang lebih rendah menghasilkan BER yang lebih tinggi. Nilai BER yang tinggi pada gambar putih dan nilai BER yang tak terbatas pada gambar hitam terjadi karena intensitas piksel yang seragam. Pada gambar putih, di mana semua piksel berada pada intensitas maksimum, modifikasi selama penyisipan watermark menyebabkan distorsi yang signifikan, yang menyebabkan kesalahan ekstraksi dan peningkatan BER. Pada gambar hitam, di mana intensitas piksel minimal, modifikasi apa pun membuat ekstraksi watermark menjadi sulit, sering kali menghasilkan BER yang

tak terbatas, karena semua bit yang diekstraksi berbeda dari yang disisipkan.

2. Analisis Pengaruh Delta terhadap $PSNR_1$

$PSNR_1$ mengukur kualitas gambar yang diberi tanda air dengan membandingkannya dengan gambar asli. Ini mencerminkan seberapa dekat gambar yang diberi tanda air menyerupai gambar aslinya. $PSNR_1$ diukur dalam desibel (dB), dan nilai yang lebih tinggi menunjukkan lebih sedikit distorsi pada gambar setelah penyisipan watermark

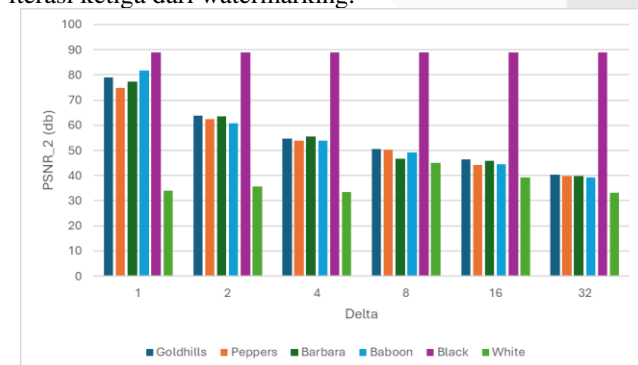


GAMBAR. 6
Pengaruh Delta Terhadap nilai $PSNR_1$

Berdasarkan Gambar 6 tersebut terlihat nilai $PSNR_1$ cenderung menurun seiring dengan meningkatnya nilai delta, menunjukkan bahwa peningkatan delta menyebabkan penurunan kualitas citra yang di-watermark. Untuk citra hitam dan putih, terlihat adanya perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan citra lainnya. Pada delta kecil, $PSNR_1$ untuk citra putih relatif rendah, namun seiring dengan meningkatnya delta, $PSNR_1$ cenderung meningkat. Sebaliknya, citra hitam memiliki nilai $PSNR_1$ yang relatif tinggi untuk delta kecil namun menurun drastis pada delta yang lebih besar.

3. Analisis Pengaruh Delta terhadap $PSNR_2$

$PSNR_2$ mengacu pada pengukuran kualitas citra setelah watermarking menggunakan metode iterative watermarking pada tahap ketiga. Ini menilai dampak kumulatif dari penyisipan watermark berulang kali pada citra, dengan penekanan pada bagaimana kualitas citra menurun setelah iterasi ketiga dari watermarking.



GAMBAR. 7
Pengaruh Delta Terhadap nilai $PSNR_2$

Berdasarkan Gambar 7 tersebut terlihat nilai $PSNR_2$ tertinggi adalah citra hitam, terutama pada nilai delta yang lebih besar (misalnya, 16 dan 32), di mana $PSNR_2$ mencapai sekitar 90 dB. Citra-citra lainnya memiliki nilai $PSNR_2$ yang

lebih rendah dan cenderung menurun seiring dengan peningkatan delta. Pola penurunan $PSNR_2$ terlihat lebih jelas pada citra dengan tekstur dan detail tinggi, seperti Baboon dan Barbara, sementara citra sederhana seperti hitam dan putih memiliki perubahan yang lebih bervariasi.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini mengusulkan metode Robust Reversible Watermarking (RRW) yang menggunakan Polar Harmonic Transform (PHT) dan Logarithmic Quantization Index Modulation (LQIM) untuk melindungi hak cipta dalam distribusi konten multimedia. Metode ini memanfaatkan kemampuan PHT untuk menghasilkan koefisien frekuensi yang tahan terhadap distorsi, kemudian menggunakan LQIM untuk menyematkan watermark secara efisien ke dalam koefisien-koefisien tersebut. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode ini mempertahankan kualitas visual yang tinggi dengan nilai Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) yang memadai, serta menunjukkan ketahanan yang kuat terhadap serangan seperti kompresi, noise, dan pemotongan. Selain itu, metode ini memungkinkan pemulihan gambar asli secara sempurna tanpa kehilangan informasi, sehingga efektif untuk aplikasi watermarking yang memerlukan keamanan dan kualitas gambar tinggi.

REFERENSI

- [1] F. Umar, H. Darwis, "Watermarking Citra Digital Berwarna Menggunakan Stationary Wavelet Transform (SWT)", *ILKOM Jurnal Ilmiah*, vol. 11, pp. 1-10, 2019, doi: 10.33096/ilkom.v11i1.409.1-10
- [2] Y. Hafizhana, I. Safitri, L. Novamizanto, & N. Ibrahim, "Image Watermarking pada Citra digital menggunakan Compressive Sensing berbasis Stationary Wavelet Transform", *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 8, no. 1, pp. 43-57, 2020, doi: 10.26760/elkomika.v8i1.43
- [3] L. Novamizanti, A. B. Suksmono, D. Danudirdjo, & G. Budiman, "Robust Reversible Watermarking using Stationary Wavelet Transform and Multibit Spread Spectrum in Medical Images", *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 15, no. 3, pp. 343-354, 2022, doi: 10.22266/ijies2022.0630.29
- [4] Y. Tang, K. Li, C. Wang, S. Bian, & Q. Huang, "A two-stage robust reversible watermarking using polar harmonic transform for high robustness and capacity", *Information Sciences*, 2024, doi: 10.1016/j.ins.2023.119786
- [5] N. K. Kalantari and S. M. Ahadi, "A Logarithmic Quantization Index Modulation for Perceptually Better Data Hiding," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 8, no. 9, pp. 1456-1468, Sept. 2013, doi: 10.1109/TIFS.2013.2271146.

- [6] L. Novamizanti, A. B. Suksmono, D. Danudirdjo, & G. Budiman. "Robust Reversible Image Watermarking based on Independent Embedding Domain and Pixel Value Ordering." In 2023 IEEE 8th International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE) (pp. 1-6). IEEE, December, 2023.
- [7] L. Novamizanti, A. B., Suksmono, D. Danudirdjo, & G. Budiman, "Robust reversible watermarking using stationary wavelet transform and multibit spread spectrum in medical images. International Journal of Intelligent Engineering and Systems, vol. 15, no. 3, pp. 343-354, 2020.
- [8] L. Novamizanti, Suksmono, A.B., Danudirdjo, D., & Budiman, G. "Robust and Imperceptible Watermarking on Medical Images using Coefficient Pair Modification." IIUM Engineering Journal, vol. 24, no. 1, pp. 88-105, 2023.
- [9] L. Novamizanti, I. Wahidah, and N. Wardana, "A Robust Medical Images Watermarking Using FDCuT-DCT-SVD," Int. J. Intell. Eng. Syst., vol. 13, no. 6, pp. 266–278, 2020, doi: 10.22266/ijies2020.1231.24.
- [10] Y. Yunawan, I. Safitri, and L. Novamizanti. "Compressive sensing for image watermarking discrete wavelet transform and spread spectrum." In 2018 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC), pp. 99-103. IEEE, 2018.
- [11] L. Novamizanti, G. Budiman, and E. N. F. Astuti, "Robust audio watermarking based on transform domain and SVD with compressive sampling framework," TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control, vol. 18, no. 2, pp. 1079-1088, 2020, doi: 10.1093/icon/moab009
- [12] Y. Hafizhana, I. Safitri, L. Novamizanti, and N. Ibrahim, Image Watermarking pada Citra Medis menggunakan Compressive Sensing berbasis Stationary Wavelet Transform. ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika, 8(1), p.43, 2020.
- [13] P. T. Yap, X. Jiang, A.C. Kot, "Two dimensional polar harmonic transforms for invariant image representation," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. vol. 32, no. 7, pp. 1259–1270, 2010.
- [14] Y. N. Li, "Quaternion Polar Harmonic Transforms for Color Image," IEEE Signal Processing Letters, vol. 20, no. 8, pp. 1070 9908, August 2013.
- [15] P. Bas, T. Filler, Break our watermarking system, July, 2007. Available: <http://bows2.ec.lille.fr/>
- [16] A. H. Allaf & M. A. Kbir, "A Review of Digital Watermarking Applications for Medical Image Exchange Security," Springer International Publishing, 2019.
- [17] Y. O. Xin, M. I. Pawlak, "M -Ary Phase Modulation for Digital Watermarking," International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, vol. 18, no. 1, pp. 93104, 2008.
- [18] G. Budiman, A. B. Suksmono, & D. Danudirdjo, "Compressive sampling with multiple bit spread spectrum-based data hiding," Applied Sciences, vol. 10, no. 12, 2020.