

Robust Reversible Watermarking berbasis Polar Harmonic Transform dan Multibit Spread Spectrum

1st Mirza Alifia Hanum

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

mirzaalifiahannum@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 — Pesatnya pertumbuhan teknologi digital telah menimbulkan risiko keamanan dalam pembuatan, pembagian, dan manipulasi citra digital. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih efektif dengan menggunakan teknik *Robust Reversible Watermarking* (RRW). *Robust* mengacu pada kemampuan watermark dalam menahan serangan, sedangkan *reversible* mengacu pada kemampuan sistem dalam mengembalikan citra ke keadaan semula. Penelitian ini mengusulkan teknik RRW berbasis *Polar Harmonic Transform* (PHT) dengan metode *Multibit Spread Spectrum* (MSS). Teknik ini bekerja dengan cara menyisipkan beberapa watermark sekaligus yang telah dipetakan ke dalam kode *Pseudo-random Noise* (PN), lalu kode PN ini yang akan disisipkan ke dalam nilai momen PHT. Di sisi penerima, dilakukan perhitungan korelasi maksimum untuk mengekstraksi watermark yang disisipkan. Teknik MSS ini menggunakan parameter α sebagai parameter untuk menyeimbangkan sifat *Imperceptibility* dan *Robustness* sistem *watermarking*. Pengujian dalam kondisi tanpa serangan menghasilkan BER 0 dan PSNR rata-rata 36,18 dB.

Kata kunci— *Watermarking*, *Reversible*, *Robust*, *Polar Harmonic Transform* (PHT), *Multibit Spread Spectrum* (MSS).

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi digital yang semakin meluas telah mempermudah penyebaran dan pertukaran informasi, termasuk gambar digital. Namun, hal ini juga menimbulkan tantangan baru, terutama dalam hal keamanan. Kemudahan dalam menggandakan, menyalin, mengedit, dan mendistribusikan citra digital telah menimbulkan kerentanan yang dapat dimanfaatkan oleh orang yang tidak berwenang [1]. Risiko yang ditimbulkan antara lain masalah keamanan seperti pemalsuan data, akses tidak sah, modifikasi, dan penipuan. Dengan semakin meningkatnya ancaman keamanan terhadap perlindungan hak cipta [2], terutama dalam konteks kepemilikan citra digital, telah mendorong pengembangan *watermarking* sebagai solusi untuk melindungi kepemilikan citra [3]. *Watermarking* melibatkan penyisipan *watermark* tersembunyi ke dalam citra digital, yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi asal, kepemilikan, dan keaslian citra. Dengan menyisipkan *watermark* ke dalam citra digital, *watermark* yang disisipkan menjadi tidak terlihat yang dapat dideteksi kemudian untuk

memverifikasi kepemilikan dan integritas citra. Penggunaan *watermark* berpotensi memberikan cara yang kuat dan andal untuk melindungi kepemilikan citra digital.

Teknik *watermarking* merupakan metode untuk menyisipkan beberapa informasi (*watermark*) ke dalam objek *host* seperti citra, video, audio atau data digital lainnya [4]. Teknik *watermarking* ini diharapkan dapat menyisipkan informasi *watermark* tambahan ke dalam gambar digital tanpa mengganggu kualitas visualnya. Namun teknologi *watermark* digital dapat menyebabkan penurunan kualitas pada citra asli. Meskipun penurunan kualitas tidak terlihat oleh pengguna, tetapi di beberapa bidang seperti penurunan kualitas digital tidak ditoleransi [5]. Oleh karena itu, beberapa teknik *Robust Reversible Watermarking* (RRW) diusulkan sebagai solusi untuk masalah ini. *Robust* mengacu pada kemampuan *watermark* yang disisipkan untuk bertahan bahkan setelah mengalami berbagai serangan [6], sementara *Reversible* memastikan ekstraksi *watermark* dan rekonstruksi yang akurat untuk mengembalikan citra *host* kembali ke aslinya [7]. RRW menantang karena dapat melakukan penyisipan dan ekstraksi *watermark* dalam berbagai skenario, termasuk tanpa serangan atau dengan serangan [8].

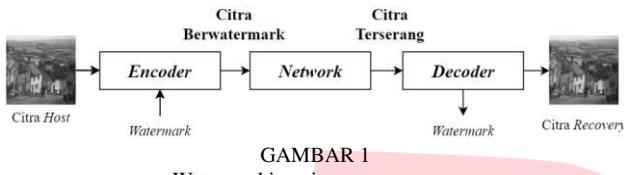
Di antara skema RRW yang diusulkan, Tang, dkk. mengusulkan skema RRW dua tahap yang memanfaatkan *Polar Harmonic Transform* (PHT). Skema yang diusulkan oleh Tang, dkk. menggunakan metode DC-QIM dimana satu bit *watermark* disisipkan ke dalam satu momen PHT [9]. Oleh karena itu, diusulkan metode *Multibit spread spectrum* untuk menyisipkan beberapa bit *watermark* ke dalam beberapa momen PHT agar dapat meningkatkan ketahanan sistem *watermarking* yang dirancang.

Penelitian ini mengusulkan RRW berbasis *Polar Harmonic Transform* (PHT) dengan metode *Multibit Spread Spectrum* (MSS). Teknik ini bekerja dengan memetakan beberapa bit *watermark* sekaligus ke dalam kode PN (*Pseudo-random Noise*) tertentu, kemudian menyisipkan kode PN tersebut ke dalam momen PHT sinyal citra *host*. Di sisi penerima, kode PN diregenerasi dan korelasi maksimum digunakan untuk mendeteksi data yang disisipkan [10]. Dalam teknik MSS ini, parameter α digunakan untuk mengendalikan *trade-off* antara visibilitas *watermark* dan ketahanan *watermark*, yang disesuaikan menurut kebutuhan

[11]. Dengan memanfaatkan kode PN ini dalam sistem *watermarking* ini, maka ketahanan watermark akan meningkat, sehingga *watermark* sulit diserang.

II. KAJIAN TEORI

Skema *watermarking* secara umum digambarkan pada Gambar 1, dimana terdapat proses *encoder* (penyisipan) dan *decoder* (ekstraksi) [12].



GAMBAR 1
Watermarking citra secara umum

Berikut merupakan teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan

A. Polar Harmonic Transform

Yap, dkk. [13] memperkenalkan serangkaian transformasi 2D yang disebut *Polar Harmonic Transform* (PHT) berdasarkan serangkaian basis proyeksi ortogonal. *Polar Harmonic Transform* adalah serangkaian transformasi 2D yang didefinisikan di atas lingkaran satuan dalam sistem koordinat polar [14]. Dibandingkan dengan momen lainnya, PHT bekerja lebih baik dalam rekonstruksi gambar, stabilitas numerik, dan kompleksitas komputasi, dengan keunggulan termasuk sensitivitas noise yang lebih rendah dan kemampuan untuk memperoleh momen orde tinggi secara akurat [9,15]. M_{nl} adalah momen dari orde n ($-N \leq n \leq N$) dan repetisi l ($-L \leq l \leq L$), dimana N dan L menunjukkan orde maksimum dan repetisi maksimum. Sedangkan $-N$ dan $-L$ menunjukkan orde minimum dan repetisi minimum. Transformasi dapat dinyatakan sebagai

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

dimana Ω adalah konstan dan $[H_{nl}(x, y)]^*$ adalah konjugasi dari $H_{nl}(x, y)$. Fungsi kernel PHT terdiri dari komponen radial $R_n(r)$ dan komponen *circular* $e^{il\theta}$ sebagai berikut,

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

PHT adalah nama umum polar complex exponential transform (PCET), Komponen radial PCET sebagai berikut

$$R_n^E(r) = e^{i2\pi nr^2}. \quad (3)$$

B. Multibit Spread Spectrum

Multibit Spread Spectrum (MSS) adalah teknik di mana beberapa bit watermark disisipkan ke dalam sinyal citra *host*. Hal ini meningkatkan ketahanan dibandingkan dengan *spread spectrum* konvensional. *Spread spectrum* bekerja dengan menyebarkan bit watermark pada beberapa spectrum, Bit-bit tersebut tersebar dan berukuran kecil sehingga keberadaan watermark lebih sulit dideteksi [16]. MSS bekerja dengan memetakan bit watermark ke indeks kode PN (*Pseudorandom Noise*) tertentu dan kemudian menyisipkan kode PN ini ke dalam sinyal citra *host*. Di sisi penerima, kode PN dihasilkan kembali dan korelasi maksimum digunakan untuk mendeteksi data yang disisipkan.

Teknik ini dirancang untuk menyisipkan nb bit watermark ke dalam citra *host* X , sehingga diperoleh citra ber-watermark X' [10]. Teknik ini bekerja dengan

manfaatkan kode PN dengan membuat kode acak sepanjang 2^{nb} . Kemudian nb bit watermark akan dipetakan ke sebuah kode PN w_{pn} . Secara matematis, bit watermark yang telah dipetakan ke dalam kode PN dapat disisipkan ke citra *host* dengan menggunakan persamaan berikut

$$X' = X + \alpha w_{pn}, \quad (4)$$

dimana α adalah parameter untuk menyeimbangkan antara *imperceptibility* dan *Robustness*. Di sisi penerima, informasi yang tersisipkan dikodekan dalam indeks kode referensi m , yang merupakan korelasi maksimum dengan citra ber-watermark. Rekonstruksi m diformulasikan sebagai berikut [17]

$$m' = \operatorname{argmax}_{i \in \{0, \dots, M-1\}} \operatorname{Corr}(X', w_i). \quad (5)$$

Setelah watermark berhasil diekstraksi, untuk mengembalikan citra, dilakukan pemulihan dengan menggunakan persamaan berikut

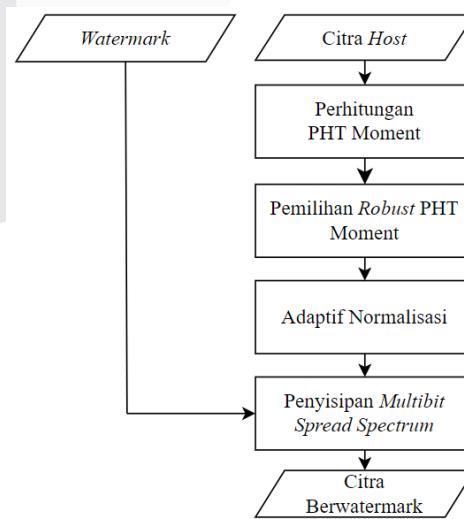
$$X = X' - \alpha w'_{pn}. \quad (7)$$

III. METODE

Metode ini menggunakan skema yang diusulkan oleh Tang, dkk. yaitu mengusulkan Robust Reversible menggunakan *Polar Harmonic Transform* (PHT), Dimana pada skema tersebut diterapkan metode DC-QIM untuk tahap penyisipannya. Metode DC-QIM menyisipkan satu bit watermark ke dalam satu momen PHT, maka metode *Multibit Spread Spectrum* (MSS) diusulkan untuk menggantikan metode DC-QIM guna meningkatkan *robustness* [9]. Dengan menerapkan metode ini, maka memungkinkan untuk menyisipkan beberapa bit watermark ke dalam blok momen PHT guna meningkatkan ketahanan sistem *watermarking*. Proses Penyisipan

A. Proses Penyisipan

Proses penyisipan adalah proses menggabungkan bit watermark ke dalam citra *host* dengan metode yang diusulkan. Gambar 2 adalah diagram alir proses penyisipan.



GAMBAR 2
Proses Penyisipan

Berikut merupakan penjelasan tentang setiap tahapan proses penyisipan dari metode yang diusulkan:

1. Hitung Momen PHT

Misalkan X adalah citra *host* dengan ukuran $L_R \times L_C$ dan M_{nl} adalah momen PHT dari orde n ($-N \leq n \leq N$) dan repetisi l ($-L \leq l \leq L$). Lalu fungsi kernel PHT $H_{nl}(x, y)$ dihitung berdasarkan persamaan (2) dan momen PHT, M_{nl} dihitung dengan persamaan (1).

2. Seleksi Momen PHT

Seleksi momen PHT dilakukan agar memberikan ketahanan yang baik dengan menggunakan $C = \{M_{nl}, n \leq N, \geq 0, \neq 4m, \geq G\}$, dimana G adalah *threshold* yang digunakan untuk menentukan apakah momen PHT cocok untuk *watermarking*. ketika $S \geq G$ berlaku, momen PHT yang akurat, $l \neq 4m$, cocok untuk penyematan *watermark*, dan sebaliknya [9]. *Watermark* yang telah dipetakan ke dalam kode PN w_{pn} , dimana L_w merupakan panjang *watermark* dalam kode PN. Lalu L_w momen PHT diseleksi berdasarkan syarat C, menghasilkan $M = \{M_{n1,l1}, M_{n2,l2}, \dots, M_{nL_w,lL_w}\}$.

3. Normalisasi Adaptif

Berdasarkan [7] adaptif normalisasi dilakukan untuk meningkatkan *robustness*, dengan persamaan

$$M_{ni,li}^R = \frac{M_{ni,li}}{M_{00}} \times T_i, \quad (8)$$

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

$$T_i = T_{init} - \gamma \times (|n_i| + |l_i|), \quad (9)$$

dimana T_{init} merupakan nilai awal bobot normalisasi adaptif. γ ($\gamma > 0$) menunjukkan parameter yang digunakan untuk menyesuaikan kekuatan penyisipan.

4. Penyisipan Multibit Spread Spectrum

Momen PHT dibagi menjadi blok-blok berukuran B yang tidak saling tumpang tindih. Hasilkan kode PN acak [-1, 1] sebanyak $2^{nb} \times B$, dimana nb adalah jumlah bit *watermark* pada setiap blok. Kemudian *watermark* akan dipetakan ke kode PN w_{pn} . Selanjutnya, bit *watermark* akan disematkan pada setiap blok momen PHT, dengan menggunakan persamaan berikut

$$|M_{ni,li}^{Rw}| = |M_{ni,li}^R| + \alpha \cdot w_{pn}. \quad (10)$$

Proses penyisipan dilakukan untuk setiap momen PHT, kemudian dilakukan Invers normalisasi dengan persamaan berikut

$$M_{ni,li}^W = \frac{|M_{ni,li}^{Rw}|}{|M_{ni,li}^R|} \times M_{ni,li}^R. \quad (11)$$

5. Rekonstruksi citra berwatermark

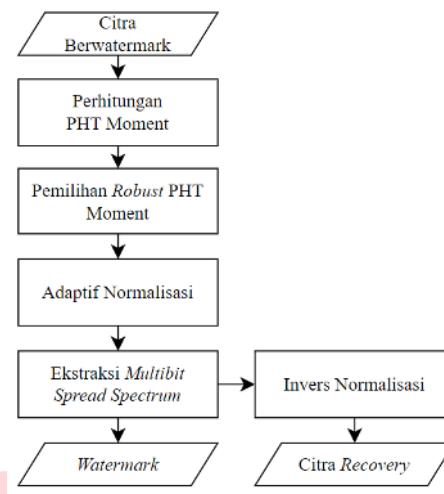
Tahapan ini merupakan tahapan terakhir, dilakukan perhitungan I_{error} untuk mendapatkan I_w dengan persamaan berikut

$$I_{error} = \left[\sum_{i=1}^{L_w} ((M_{ni,li}^W - M_{ni,li})H_{ni,li} + (M_{-ni,-li}^W - M_{-ni,-li})H_{-ni,-li}) \right], \quad (12)$$

$$I_w = I + I_{error}. \quad (13)$$

B. Proses Ekstraksi

Proses ekstraksi *watermark* merupakan proses pengambilan atau pemisahan *watermark* yang telah disisipkan ke dalam citra *host*. Berikut ini adalah skema yang diusulkan



GAMBAR 3
Proses Ekstraksi

Berikut adalah penjelasan rinci tentang tahapan ekstraksi dengan metode yang diusulkan

1. Hitung Momen PHT

Perhitungan momen PHT dilakukan dengan langkah dan persamaan yang sama seperti pada proses penyisipan. Citra ber-watermark dihitung ulang momennya dengan parameter dan Persamaan (1) dan Persamaan (2) pada proses penyisipan untuk mendapatkan hasil yang konsisten.

2. Seleksi momen PHT

Seleksi dilakukan dengan menggunakan kondisi yang sama dengan proses seleksi momen PHT *robust* pada saat penyisipan. Dengan tujuan memastikan bahwa *watermark* yang disisipkan dapat diidentifikasi dan diekstraksi dengan benar.

3. Normalisasi Adaptif

Selanjutnya, momen PHT *robust* yang dipilih dari citra ber-watermark akan dinormalisasi adaptif dengan persamaan (7) dan persamaan (8).

4. Ekstraksi Multibit Spread Spectrum

Dari M^{Rrw} dibagi menjadi blok-blok berukuran B yang tidak saling tumpang tindih. Kemudian akan dilakukan korelasi maksimum antara momen PHT ternormalisasi dengan kode PN, secara matematis ekstraksi dituliskan sebagai berikut:

$$m' = \operatorname{argmax}_{i \in \{0, \dots, M-1\}} \operatorname{Corr}(M^{Rrw}, w_i). \quad (14)$$

Setelah *watermark* berhasil didapatkan, gambar dapat dipulihkan menggunakan persamaan

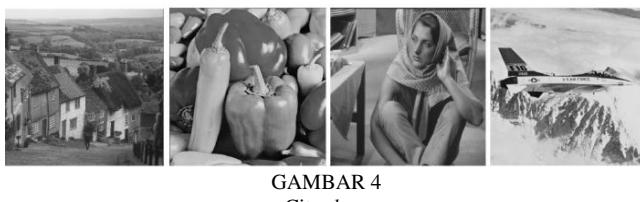
$$M^{Rr} = M^{Rrw} - \alpha w'_{pn}. \quad (15)$$

5. Rekonstruksi Citra Recovery

Jika I_{recv} tidak terserang, rekonstruksi citra *recovery* I' akan dilakukan. Namun jika I_{recv} terserang, citra *recovery* tidak dapat direkonstruksi secara sempurna. Setelah momen pemulihan dipulihkan, momen tersebut akan direkonstruksi kembali ke dalam bentuk citra.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem *watermarking* yang dirancang dengan format citra *host grayscale* berukuran 512x512 sedangkan *watermark* berupa bit kunci biner. Pengujian dilakukan pada empat citra meliputi Goldhills, Peppers, Barbara dan Airplane [22].



GAMBAR 4
Citra host

Peak signal to noise ratio (PSNR) menunjukkan kesamaan antara dua citra yaitu citra referensi dan citra yang telah terproses, PSNR dinyatakan dalam decibel (dB) [18]. PSNR adalah metrik pengukur distorsi, semakin tinggi PSNR maka semakin rendah distorsinya artinya semakin baik kualitas citra tersebut. X adalah citra *host* dan X' adalah citra yang telah melalui proses, dengan kedua citra tersebut berukuran $L_R \times L_C$. PSNR diukur dihitung dalam persamaan [10,19]

$$PSNR = 10 \log \frac{255^2 \times L_R \times L_C}{\sum_{i=1}^{L_R} \sum_{j=1}^{L_C} (X_{i,j} - X'_{i,j})^2}. \quad (16)$$

Bit Error Rate (BER) merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui tingkat ketahanan sistem. Nilai BER menunjukkan ketahanan *watermark* yang diekstraksi dari citra yang diserang. Makin tinggi nilai BER maka makin buruk kualitas *watermark* hasil ekstraksi [20]. Berikut merupakan formula untuk menghitung BER [21]

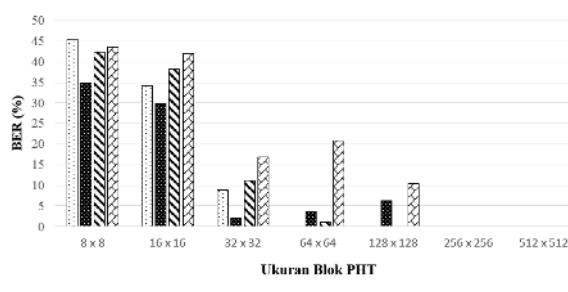
$$BER = \frac{\sum_{i=1}^{L_w} |w_i - w'_i|}{L_w}, \quad (17)$$

dimana w adalah bit *watermark* asli, w' adalah bit *watermark* yang diekstraksi dan L_w adalah jumlah bit *watermark* yang disisipkan.

A. Analisis Implementasi Parameter

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai analisis dalam pengajaran implementasi sistem terkait pemilihan parameter-parameter yang digunakan dalam sistem tersebut. hal ini dilakukan untuk mengevaluasi dan memahami bagaimana sistem tersebut ditentukan.

1. Analisis ukuran Blok PHT

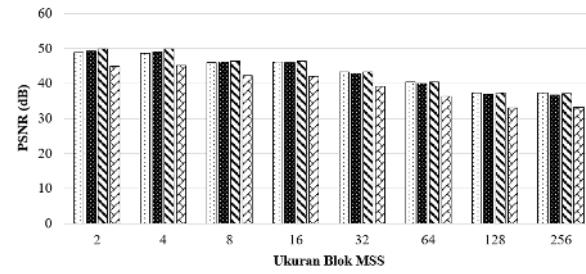


GAMBAR 5
Pengaruh ukuran blok terhadap BER

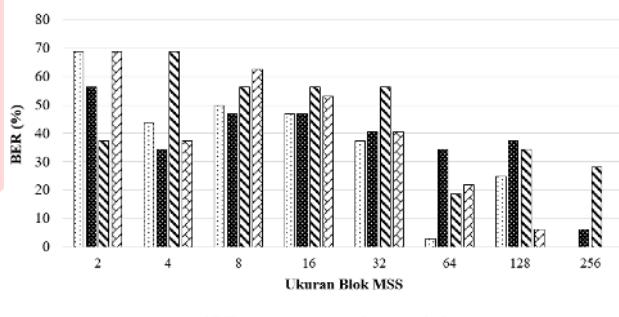
Berdasarkan hasil pengujian pengaruh ukuran blok PHT terhadap nilai BER, terlihat bahwa ada ukuran blok PHT optimal yang menghasilkan nilai BER terendah. Grafik menunjukkan bahwa penggunaan ukuran blok PHT 256 × 256 dan 512 × 512 menghasilkan nilai BER 0, yang berarti tidak ada kesalahan yang terjadi dalam proses pendekripsi *watermark* di penerima. Namun, seiring bertambah besarnya ukuran blok PHT yang digunakan, kapasitas bit *watermark* akan semakin menurun. Hal ini dikarenakan semakin besar ukuran blok PHT, semakin banyak bit piksel yang dibutuhkan untuk merepresentasikan informasi *watermark*,

sehingga mengurangi kapasitas data yang dapat disisipkan. Oleh karena itu, berdasarkan grafik diatas maka ukuran blok PHT 256 × 256 lebih optimal.

2. Analisis ukuran blok MSS



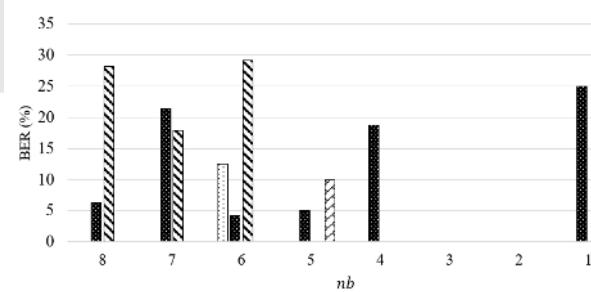
GAMBAR 6
Pengaruh ukuran blok MSS terhadap PSNR



GAMBAR 7
Pengaruh ukuran blok MSS terhadap BER

Dalam pengujian ini menunjukkan bahwa ukuran blok yang digunakan berpengaruh terhadap PSNR dan BER. Semakin besar ukuran blok yang digunakan maka nilai PSNR akan semakin rendah artinya kualitas gambar akan semakin berkurang seiring dengan peningkatan ukuran blok yang digunakan. Sedangkan pengaruhnya terhadap BER adalah semakin besar ukuran blok maka nilai BER yang diperoleh akan semakin baik atau ketahanan sistem akan semakin meningkat seiring pertambahan ukuran blok. Dari grafik tersebut diketahui ukuran blok 256 yang memiliki nilai BER yang paling optimal untuk diimplementasikan. Namun dengan semakin besarnya ukuran blok yang digunakan maka kapasitas akan semakin menurun.

3. Analisis jumlah bit pada setiap blok MSS



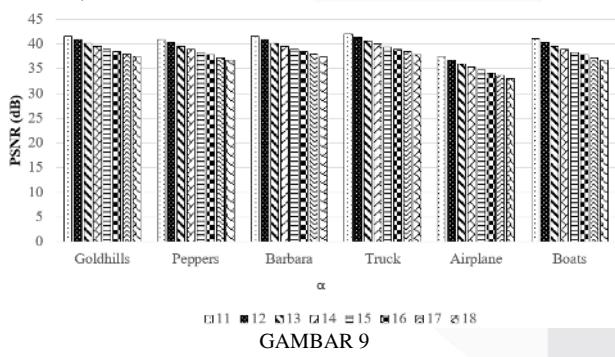
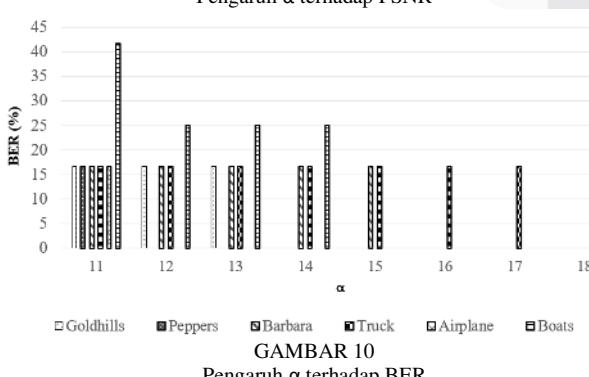
GAMBAR 8
Pengaruh jumlah bit terhadap BER

Berdasarkan grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin banyak bit yang disisipkan pada setiap blok, maka BER akan semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena

semakin banyak bit yang disisipkan, maka semakin besar kemungkinan terjadi kesalahan dalam proses penyisipan. Secara keseluruhan, grafik tersebut menunjukkan bahwa jumlah bit yang disisipkan pada setiap blok memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa sistem watermarking. Semakin banyak bit yang disisipkan, maka BER akan semakin tinggi. Berdasarkan pengujian tersebut menunjukkan bahwa menyisipkan 3 bit pada setiap bloknya mendapatkan hasil yang paling optimal di antara yang lain. Optimal karena BER yang didapatkan pada keempat citra yang diuji sudah 0.

4. Analisis parameter α

Gambar 9 dan Gambar 10 menunjukkan pengaruh α terhadap PSNR dan BER. Gambar 0 menunjukkan bahwa α berpengaruh terhadap visibilitas watermark. Dapat dilihat dari nilai PSNR yang didapatkan saat pengujian. Berdasarkan data, semakin besar nilai α maka nilai PSNR akan semakin menurun. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas gambar akan semakin menurun seiring dengan peningkatan nilai α . Selain berpengaruh terhadap nilai PSNR, α juga berpengaruh terhadap nilai BER yang dihasilkan. Berdasarkan Gambar 19, semakin besar nilai α maka nilai BER yang diperoleh semakin kecil atau semakin baik. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat kesalahan bit semakin kecil seiring dengan peningkatan nilai α , sehingga sistem watermarking yang dirancang akan semakin robust. Maka perlu dilakukan penyesuaian nilai α agar kedua parameter baik PSNR atau BER yang diperoleh sama-sama baik. Dari hasil data yang diperoleh, didapatkan nilai α optimal yang digunakan adalah $\alpha = 18$ sebagai nilai terbaik untuk proses watermarking, pada nilai α tersebut menghasilkan nilai BER 0 dan nilai rata-rata PSNR pada nilai 36,18 dB.

GAMBAR 9 Pengaruh α terhadap PSNRGAMBAR 10 Pengaruh α terhadap BER

B. Evaluasi Imperceptibility

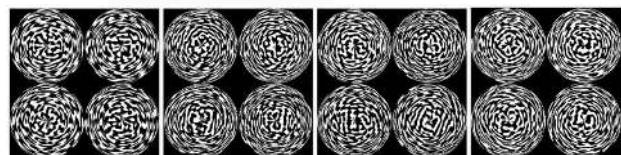
Penyesuaian parameter yang optimal secara praktis untuk PHT DC-QIM dan PHT MSS diberikan dalam Tabel 1. Pengaturan optimal yang diberikan oleh penelitian terkait diadopsi [7], yang juga tercantum dalam Tabel 2. PSNR rata-rata untuk semua pengaturan parameter ini adalah sekitar 36 dB.

TABEL 1
Parameter Settings

Metode	Parameter Settings
PHT DC-QIM	$G = 9, \Delta = 38, \gamma = 45, N = 20, T_{init} = 6400$
PHT MSS	$G = 9, \Delta = 32, \gamma = 30, N = 20, T_{init} = 8500, \text{Blok PHT} = 256 \times 256, \alpha = 18, B = 256, nb = 3$

TABEL 2
Perbandingan PSNR dengan Metode yang telah diusulkan

Metode	PSNR (dB)			
	Goldhills	Peppers	Barbara	Airplane
Tang dkk. [7]	36.36	36.24	36.30	33.04
Metode yang diusulkan	37.45	36.79	37.42	33.08

GAMBAR 11
Citra ber-watermarkGAMBAR 12
Perbedaan antar citra host dan citra berwatermark

Hasil penelitian menunjukkan bahwa skema yang diusulkan memperoleh nilai PSNR rata-rata sebesar 36,18 dB. Hasil proses penyisipan watermark ditunjukkan pada Gambar 11, pada gambar tersebut menunjukkan bahwa watermark telah berhasil disisipkan ke dalam host image tanpa menyebabkan perubahan yang signifikan pada citra host.

Gambar 12 menunjukkan perbedaan antara citra host dan citra ber-watermark. Citra tersebut menghasilkan pola melingkar karena adanya penyisipan pada domain polar. PHT merupakan transformasi matematika yang digunakan untuk mengubah nilai dari sistem koordinat kartesius ke sistem koordinat polar. Pada Gambar tersebut terdapat 4 pola lingkaran karena ukuran blok PHT yang digunakan adalah 256×256 pada citra host berukuran 512×512 . Pola lingkaran tersebut bergantung pada ukuran blok PHT yang digunakan. Gambar 12 bergantung pada nilai PSNR yang dihasilkan, semakin menurun nilai PSNR maka akan semakin terlihat perbedaan antara citra host dengan citra ber-watermark. Hal sebaliknya juga berlaku, semakin tinggi nilai PSNR, semakin tidak ketara perbedaan antara citra host dan citra ber-watermark.

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini diusulkan skema RRW berbasis *Polar Harmonic Transform* (PHT) dengan *Multibit Spread Spectrum* (MSS). Teknik PHT MSS ini merupakan teknik yang bekerja dengan memanfaatkan kode PN (*Pseudorandom Noise*) untuk menyisipkan beberapa bit data sekaligus ke dalam momen PHT. Pada sisi penerima, kode PN diregenerasi dan korelasi maksimum digunakan untuk mendeteksi data yang disisipkan. Hasil akhir sistem watermarking berbasis *Polar Harmonic Transform* dengan *Multibit Spread Spectrum* dipengaruhi oleh interaksi parameter seperti ukuran blok, jumlah bit, dan α . α digunakan sebagai parameter untuk menyeimbangkan *imperceptibility* dan *robustness*. Hasil yang diperoleh dengan parameter paling optimal menghasilkan BER = 0 dan nilai PSNR rata-rata sebesar 36,18 dB dengan kondisi tanpa serangan.

REFERENSI

- [1] N. S. Kamaruddin, A. Kamsin, L. Y. Por, and H. Rahman. (2018, Jan.). "A review of Text Watermarking: Theory, Methods, and Applications." *IEEE Access*. [online]. Vol. 6, p. 8011–8028. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2796585> [Sep. 10, 2024].
- [2] W. Wan, J. Wang, Y. Zhang, J. Li, H. Yu, and J. Sun. (2022). "A Comprehensive Survey on Robust Image Watermarking." *Neurocomputing*. [online]. Vol. 488, p. 226-247. Available: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.02.083> [Sep. 10, 2024].
- [3] L. Novamizanti, G. Budiman, and E. N. F. Astuti. (2020, Apr.). "Robust audio watermarking based on transform domain and SVD with compressive sampling framework." *TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control*. [online]. Vol. 18, no. 2, p. 1079-1088. Available: <http://doi.org/10.12928/telkomnika.v18i2.14773> [Sep. 10, 2024].
- [4] A. H. Allaf and M. A. Kbir. (2019). "A Review of Digital Watermarking Applications for Medical Image Exchange Security." *Innovations in Smart Cities Applications Edition 2: The Proceedings of the Third International Conference on Smart City Applications*. Springer International Publishing. [online]. p. 472-480.
- [5] Y. Hafizhana, I. Safitri, L. Novamizanto, and N. Ibrahim. (2020, Jan.). "Image Watermarking pada Citra Medis menggunakan Compressive Sensing berbasis Stationary Wavelet Transform." *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*. [online] Vol. 8, no. 1, p. 43-57. Available: <http://doi.org/10.26760/elkomika.v8i1.43> [Sep. 10, 2024].
- [6] S. Wadhera, D. Kamra, A. Rajpal, A. Jain, and V. Jain. (2021, May). "A Comprehensive Review on Digital Image Watermarking." *CEUR Workshop Proceedings*. [online]. Vol. 1, no. 14, p. 2889, 2021. Available: <http://doi.org/10.48550/arXiv.2207.06909> [Sep. 10, 2024].
- [7] M. Begum and M. S. Uddin. (2020, Feb.). "Digital Image Watermarking Techniques : A review." *MDPI*. [online]. Vol. 11, no. 2, p. 110, Available: <https://doi.org/10.3390/info11020110> [Sep. 10, 2024].
- [8] L. Novamizanti, A. B. Suksmono, D. Danudirdjo, and G. Budiman. (2023). "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, Available: <https://doi.org/10.1109/ICRAIE59459.2023.10468312> [Sep. 10, 2024].
- [9] Y. Tang, K. Li, C. Wang, S. Bian, and Q. Huang. (2023, Oct.). "A two-stage robust reversible watermarking using polar harmonic transform for high robustness and capacity." *Information Sciences*. [online]. Vol. 654, p.119786. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119786> [Sep. 10, 2024].
- [10] L. Novamizanti, A. B. Suksmono, D. Danudirdjo, and G. Budiman. (2022). "Robust Reversible Watermarking using Stationary Wavelet Transform and Multibit Spread Spectrum in Medical Images." *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*. [online]. Vol. 15, no. 3, p. 343–354. Available: <https://doi.org/10.22266/ijies2022.0630.29> [Sep. 10, 2024].
- [11] I. J. Cox, J. Kilian, T. Leighton, and T. Shamoon. (1997, Dec.). "Secure spread spectrum watermarking for multimedia." *IEEE Transaction on image Processing*. [online]. Vol. 6, no. 12, p. 1673-1687. Available: <https://doi.org/10.1109/83.650120> [Sep. 10, 2024].
- [12] P. T. Yap, X. Jiang, and A.C. Kot. (2010, Jul.). "Two-dimensional polar harmonic transforms for invariant image representation." *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* [online]. Vol. 32, no. 7, p. 1259–1270. Available: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.119> [Sep. 10, 2024].
- [13] Y. N. Li. (2013, Aug.). "Quaternion Polar Harmonic Transforms for Color Image." *IEEE Signal Processing Letters*. [online]. Vol. 20, no. 8, p. 803-806. Available: <https://doi.org/10.1109/LSP.2013.2267775> [Sep. 10, 2024].
- [14] W. Xiang-yang, L. Yu-nan, L. Shuo, Y. Hong-ying, N. Pan-pan, and Z. Yan. (2015). "A New Robust Digital Watermarking using Local Polar Harmonic Transform." *Computers and Electrical Engineering*. [online]. Vol. 46, p. 403-418. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compleceng.2015.04.001> [Sep. 10, 2024].
- [15] Y. Yunawan, I. Safitri, and L. Novamizanti. (2018). "Compressive sensing for image watermarking discrete wavelet transform and spread spectrum." In *2018 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*. IEEE. [online]. p. 99-103. Available: <http://doi.org/10.1109/ICCEREC.2018.8712090> [Sep. 10, 2024].
- [16] Y. O. Xin and M. I. Pawlak. (2008). "M-Ary Phase Modulation for Digital Watermarking." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. [online]. vol. 18, no. 1, p. 93-104. Available: <http://doi.org/10.2778/v10006-008-0009-8> [Sep. 10, 2024].

- [17] P. Bas and T. Filler. "Break our watermarking system". July, 2007. <http://bows2.ec-lille.fr/> [Accesed Dec. 30, 2023]
- [18] J. J. Garcia-Hernandez, C. Feregrino-Uribe, A. Menendez-Ortiz, and D. W. Robledo-Cruz. (2022, Jul.). "Evaluation of a Framework for Robust Image Reversible Watermarking." *Applied Sciences*. [Online]. Vol. 12, no. 14, Available: <https://doi.org/10.3390/app12147242> [Sep. 10, 2024].
- [19] L. Novamizanti, A. B. Suksmono, D. Danudirdjo and G. Budiman. (2023, Jan.). "Robust and Imperceptible Watermarking on Medical Images using Coefficient Pair Modification." *IIUM Engineering Journal*. [Online]. Vol. 24, no. 1, p. 88-105, Available: <https://doi.org/10.31436/iiumej.v24i1.2597> [Sep. 10, 2024].
- [20] G. Budiman, S. Aulia, and I. N. A. Ramatryana. (2019, May). "Penyisipan Citra pada Audio dengan Kode PN Terdistribusi Gaussian." *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.* [Online]. Vol. 7, no. 2, p. 209-223. Available: <http://dx.doi.org/10.26760/elkomika.v7i2.209> [Sep. 10, 2024].
- [21] G. Budiman, A. B. Suksmono, and D. Danudirdjo. (2020, Jun.). "Compressive sampling with multiple bit spread spectrum-based data hiding." *Applied Sciences*. [Online]. Vol. 10, no. 12, p. 4338. Available: <http://dx.doi.org/10.26760/elkomika.v7i2.209> [Sep. 10, 2024].