

# Penerapan Polar Harmonic Transform dalam Robust Reversible Watermarking pada Citra Berwarna

1<sup>st</sup> Syifa Dwi Sulistyowati

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

syifadwis@student.telkomuniversity.ac.id

2<sup>nd</sup> Ledy Novamizanti

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

ledyaldn@telkomuniversity.ac.id

3<sup>rd</sup> Gelar Budiman

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

gelarbudiman@telkomuniversity.ac.id

**Abstrak** — Dengan semakin meningkatnya akses terhadap informasi digital, maka kebutuhan akan perlindungan terhadap karya digital juga semakin mendesak. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi masalah keamanan data dengan mengusulkan skema watermarking RRW berbasis PHT. Skema ini memanfaatkan Polar Harmonic Transform (PHT) pada citra RGB untuk meningkatkan imperceptibility dan ketahanan watermark. Banyak teknik dalam watermarking yang lebih berfokus pada penggunaan gambar greyscale sebagai eksperimen. Oleh karena itu pada jurnal ini diterapkan citra RGB pada metode yang dikembangkan oleh Tang, dkk. Percobaan akan dilakukan dengan dua cara, yaitu citra RGB dengan menyisipkan watermark pada satu layer dan citra RGB dengan menyisipkan watermark di setiap layer. Dengan mengkombinasikan PHT, DC-QIM, dan PEE-HS, metode ini berhasil mencapai tingkat imperceptibility yang tinggi dan kemampuan pemulihan data yang baik. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa skema watermarking yang diusulkan mampu mencapai tingkat imperceptibility yang tinggi dengan nilai PSNR embedding tertinggi mencapai 44.95 db dan BER 0 serta mendapatkan nilai PSNR recovery image tertinggi mencapai 75.86 db.

**Kata kunci**— watermarking, digital image, reversible, robust, imperceptibility

## I. PENDAHULUAN

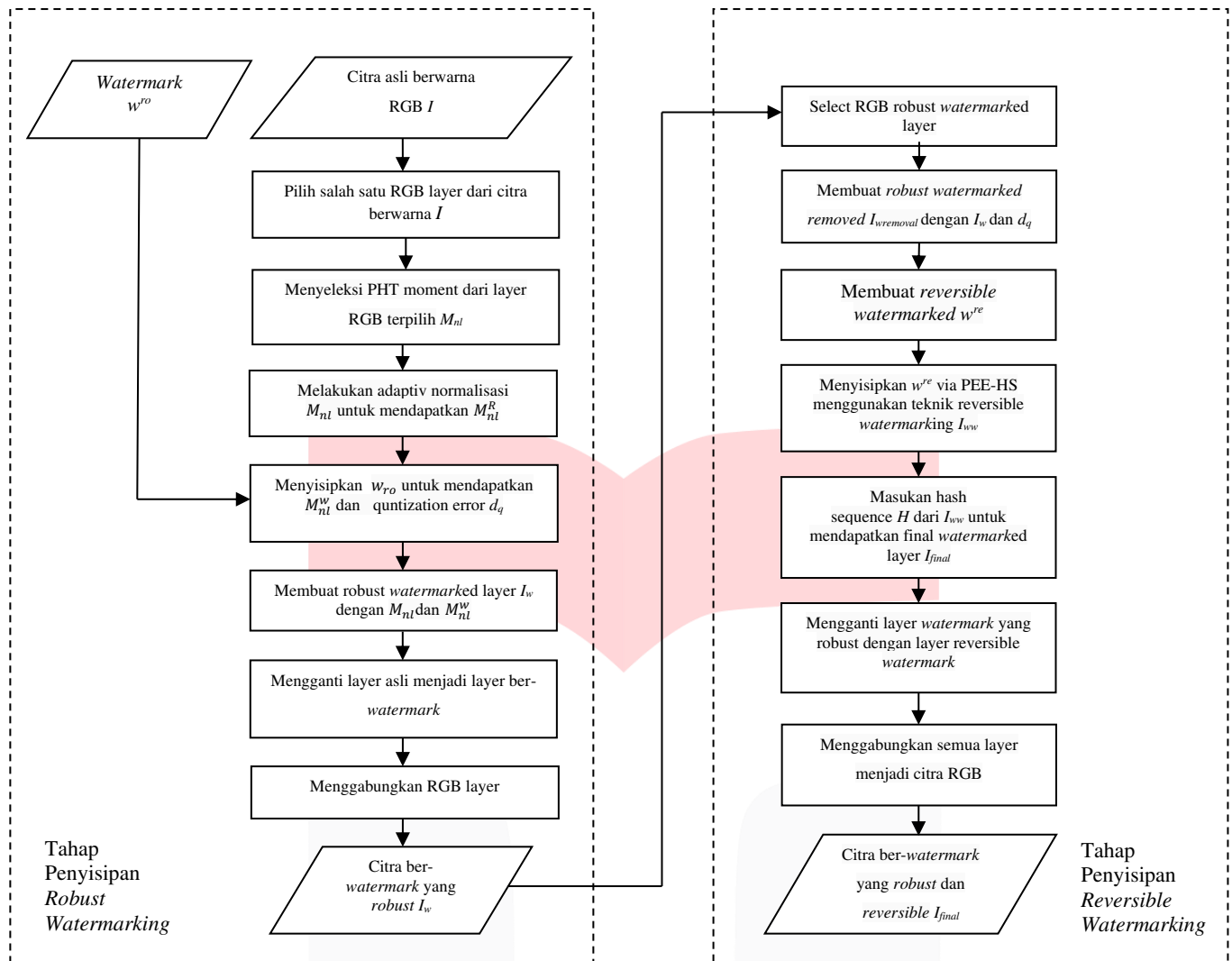
Di era digital yang semakin maju, penggunaan teknologi sudah menjadi hal yang sangat akrab dalam kehidupan sehari-hari, membuat pertukaran informasi menjadi lebih efisien. Namun, dengan semakin mudahnya akses dan pertukaran informasi digital, hal ini juga menimbulkan masalah keamanan seperti modifikasi, penghapusan, akses yang tidak sah, dan pemalsuan oleh orang yang tidak berkepentingan [1]. Salah satu metode yang umum digunakan untuk melindungi karya digital adalah dengan menggunakan teknik watermarking [2]. Digital watermarking adalah suatu metode penyisipan informasi (watermark) ke dalam host sehingga data watermark tersebut hanya dapat dideteksi oleh orang yang diberi otoritas [3]. Teknologi digital watermarking menjadi sangat penting untuk berbagai bidang karena menawarkan berbagai solusi ringkas untuk berbagai pendekatan dan metode [4]. Hasil watermarking tidak selalu sempurna seperti yang diharapkan. Pada umumnya, hal itu terjadi karena adanya noise yang dapat mengganggu atau mengubah

Agar watermark dapat melindungi hak cipta secara efektif, sistem watermarking harus dirancang dengan kuat

sehingga watermark tersebut sulit dihapus atau dirusak oleh pihak yang tidak berwenang. Selain robust, sistem watermark juga harus memiliki sifat imperceptibility dimana watermark tidak dapat dilihat oleh mata manusia dan tidak ada degradasi pada gambar dan juga harus bersifat aman untuk memastikan bahwa watermark yang disisipkan tidak mudah untuk diambil [5]. Robust watermarking adalah skema watermarking yang berfokus pada perlindungan hak cipta tanpa memperhatikan distorsi yang terjadi saat penyisipan. Di sisi lain, reversible watermarking mengutamakan penyematan data dengan cara yang memungkinkan ekstraksi atau pengambilan data secara utuh tanpa kehilangan informasi (lossless) [6].

Metode Robust Reversible Watermarking (RRW) menawarkan solusi yang menjanjikan untuk melindungi hak cipta dalam multimedia sambil menjaga integritas konten asli. Namun, metode RRW yang ada saat ini sering kali menghadapi tantangan yang signifikan dalam mencapai keseimbangan yang memuaskan antara ketahanan, reversibilitas, dan ketidaktampakan. Robust mengacu pada kemampuan watermark untuk menahan serangan, sementara reversible mengacu pada kemampuan sistem untuk mengembalikan gambar ke kondisi semula dan invisibility adalah metode RRW tertentu yang dapat memperkenalkan artefak atau distorsi yang terlihat pada gambar bertanda air, sehingga watermark dapat dideteksi dan berpotensi membahayakan konten asli. Keterbatasan ini menghalangi penerapan praktis dari banyak metode RRW yang ada. Mengatasi tantangan-tantangan ini sangat penting untuk mengembangkan solusi perlindungan hak cipta yang lebih efektif dan dapat diandalkan [7].

Pada paper ini digunakan metode Robust Reversible Watermarking (RRW) pada citra berwarna menggunakan skema Polar Harmonic Transform (PHT). Teknik robust watermarking hanya memungkinkan pemulihan sinyal watermark, tetapi sinyal host tidak dapat dipulihkan. Sementara pada skema RRW memungkinkan ekstraksi baik watermark maupun sinyal host, asalkan tidak ada serangan yang terjadi [8].



GAMBAR 1  
Proses Penyisipan Watermark

## II. KAJIAN TEORI

Diantara skema RRW yang telah diusulkan adalah oleh Coltuc dkk. Kerangka kerja RRW dua tahap yang diusulkan oleh Coltuc dkk. dapat menyembunyikan *watermark* pada gambar ini dengan cukup baik. Pada tahap pertama, *watermark* yang kuat disematkan untuk meningkatkan ketahanan, kemudian pada tahap kedua, informasi tambahan disematkan secara reversibel untuk memastikan gambar asli dapat dipulihkan. Kemudian ada juga skema RRW yang diusulkan oleh Wang dkk. Skema yang diusulkan oleh Wang dkk adalah RRW dua tahap yang didasarkan pada Embedding Domain (ED) yang independen. Gambar host pertama-tama diubah menjadi dua ED independen, dan kemudian *watermark* yang kuat dan dapat dibalik (reversible) ditanamkan ke dalam setiap domain secara terpisah. Pembawa yang berasal dari tahap penyematan pertama yang membawa *watermark* yang kuat tidak akan berubah setelah penyematan reversibel, dan dengan demikian, kekokohan dari tahap pertama tetap terjaga dengan baik [9].

Namun, metode sebelumnya masih memiliki kekurangan terhadap serangan geometrik seperti rotasi, scalling, dan kompresi. Sehingga pada makalah ini, digunakan metode

yang lebih robust terhadap serangan geometrik, yaitu polar harmonic transform. Metode *watermark* yang robust menggunakan Polar Harmonic Transform (PHT). Metode ini menyematkan bit ke dalam momen PHT menggunakan strategi kuantisasi baru dan menghitung informasi kompensasi untuk restorasi gambar. Metode yang diusulkan mencapai reversibilitas dan ketahanan yang kuat terhadap manipulasi pengawetan konten [10].

Metode RRW dikembangkan oleh Tang dkk. dengan memanfaatkan Polar Harmonic Transform (PHT) untuk meningkatkan ketahanan, kapasitas, imperceptibility, dan reversibilitas. Karena dirancang untuk ketahanan, *watermark* dan proses ekstraksinya mungkin masih rentan terhadap jenis serangan tertentu, seperti kompresi atau penyaringan gambar. Jika gambar mengalami perubahan yang signifikan setelah proses *watermarking*, mengekstraksi *watermark* secara akurat dapat menjadi tantangan [11].

Thabit et al. mengembangkan metode RRW dan mengaplikasikannya ke citra medis berwarna. Pada pengaplikasiannya ke dalam citra berwarna RGB, Thabit et al. memisahkan layer RGB dan melakukan proses penyisipan seperti pada citra greyscale biasa. Begitupula dengan proses

ekstraksi, layer RGB harus dipisahkan terlebih dahulu dan diproses seperti penggunaan pada citra greyscale [12].

### III. METODE

Metode ini memperbaiki skema Tang et al. dengan menggunakan citra greyscale menjadi citra RGB. Secara spesifik, gambar berwarna RGB terdiri dari tiga lapisan yang saling berhubungan, di mana salah satu lapisan akan menjadi tempat untuk menanamkan *watermark* yang kuat dan reversibel. *Watermark* disematkan dalam bentuk biner 256 bit untuk meningkatkan ketidaktampakan gambar. Melalui metode ini, kualitas gambar setelah disisipi *watermark* akan menjadi lebih baik karena dibantu oleh layer lain yang tidak melakukan proses penyisipan yang mempertahankan layer aslinya.

#### A. Penyisipan Watermark

Proses penyisipan *watermark* akan dilakukan seperti pada Gambar 1 dimana citra berwarna akan diubah menjadi citra grayscale dengan cara memisahkan tiap kanal menjadi satu kanal yaitu red channel, green channel, dan blue channel. Setelah pemisahan dilakukan, kanal akan diperlakukan sama seperti citra grayscale pada proses embedding yang dilakukan secara bertahap. Salah satu kanal akan dilakukan embedding *watermark* sebanyak 256 bit untuk meningkatkan kualitas atau imperceptibility dari suatu citra.

Hitung dan pilih moment PHT. Untuk mengetahui lokasi penyematan, dilakukan perhitungan dan pemilihan momen PHT ini. Misalkan bahwa  $I$  adalah Citra Host dengan ukuran  $L_M \times L_N$  dan  $M_{nl}$  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 persama (2) dan Moment PHT dihitung dengan persamaan dan Momen 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  $\Omega$  adalah konstanta dan  $[H_{nl}(x, y)]^*$  adalah konjugasi  $H_{nl}(x, y)$

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

Seperti yang ditunjukkan dalam penelitian Tang, dkk., persyaratan pemilihan momen PHT adalah  $C = \{M_{nl}, n \leq N, \geq 0, \neq 4m, \geq G\}$  di mana  $G$  adalah ambang batas yang digunakan untuk menentukan apakah momen PHT cocok untuk *watermark* yang robust.

Step 1. Penyisipan Robust *Watermark*. Untuk menyematkan *watermark* yang robust, pertama-tama dilakukan normalisasi adaptif sebagai berikut:

$$M_{ni,li}^R = \frac{M_{ni,li}}{M_{00}} \times T_i \quad (3)$$

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 berikut;

$$T_i = T_{init} - \gamma \times (|n_i| + |l_i|) \quad (4)$$

Penyisipan robust *watermark* dilakukan dengan menambahkan *watermark* ke dalam momen PHT menggunakan metode DC-QIM embedding dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q^j(|M_{ni,li}^R|, \Delta) = \left\lceil \frac{|M_{ni,li}^R| - \beta(j)}{\Delta} \right\rceil \times \Delta + \beta(j) \quad (5)$$

dimana  $\beta(j)$  mewakili nilai yang memenuhi  $\beta(1) = \beta(0) + \Delta/2$ . 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

$$d_{qi}^j = |M_{ni,li}^{Rj}| - |M_{ni,li}^R| \quad (6)$$

Untuk melakukan robust reversible *watermarking*, dilakukan kuantisasi bagian bulat dari  $|M_{ni,li}^{Rj}|$  dan melakukan pengurangan antara bilangan bulat dan bilangan aslinya seperti pada persamaan berikut :

$$D_{dec-j} = \left\lfloor |M_{ni,li}^{Rj}| - \left\lfloor |M_{ni,li}^{Rj}| \right\rfloor \right\rfloor \quad (7)$$

Dimana  $D_{dec-j}$  merupakan nilai desimal dari  $|M_{ni,li}^{Rj}|$ . setelah mendapatkan nilai  $D_{dec-j}$ , DC-QIM dapat di optimalkan menggunakan persamaan berikut

$$|M_{ni,li}^{Rj}| = Q^j(|M_{ni,li}^R| - D_{dec-j}, \Delta) \quad (8)$$

Setelah mendapatkan nilai  $|M_{ni,li}^{Rj}|$ , kita dapat memperoleh PHT moment yang ber*watermark* dengan melakukan *invers normalization* dengan cara berikut :

$$M_{ni,li}^w = \frac{|M_{ni,li}^{Rj}|}{|M_{ni,li}^R|} \times M_{ni,li}^R \quad (9)$$

Proses rekonstruksi citra dilakukan dengan menghasilkan  $I_{error}$  yang sesuai dengan *watermark robust* dan kemudian menambahkan  $I_{error}$  ke gambar asli untuk menghasilkan citra *robust watermarked*  $I_w$  menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$I_{error} = \left[ \sum_{i=1}^{L_w} \left( (M_{ni,li}^w - M_{ni,li}) H_{ni,li} + (M_{-ni,-li}^w - M_{-ni,-li}) H_{-ni,-li} \right) \right], \quad (10)$$

$$I_w = I + I_{error}. \quad (11)$$

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

Step 2. Penyisipan Reversible *Watermark*. Pertama-tama, menghitung perbedaan antara citra Host ( $I$ ) dan citra *Robust* ber-*watermark* ( $I_w$ ) untuk menghasilkan citra *watermarked-removed* ( $I_{wremoval}$ ) 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  $M_{ni,li}^{Rr}$

$$|M_{ni,li}^{Rr}| = |M_{ni,li}^{Rw}| - d_{qi}^j \quad (12)$$

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

$$M_{ni,li}^r = \frac{|M_{ni,li}^{Rr}|}{|M_{ni,li}^{rw}|} \times M_{ni,li}^{rw}, \quad (13)$$

$$I_{wremoval} = I_w + \left[ \sum_{i=1}^{L_w} \left( (M_{ni,li}^w - M_{ni,li}) H_{ni,li} + (M_{-ni,-li}^w - M_{-ni,-li}) H_{-ni,-li} \right) \right]. \quad (14)$$

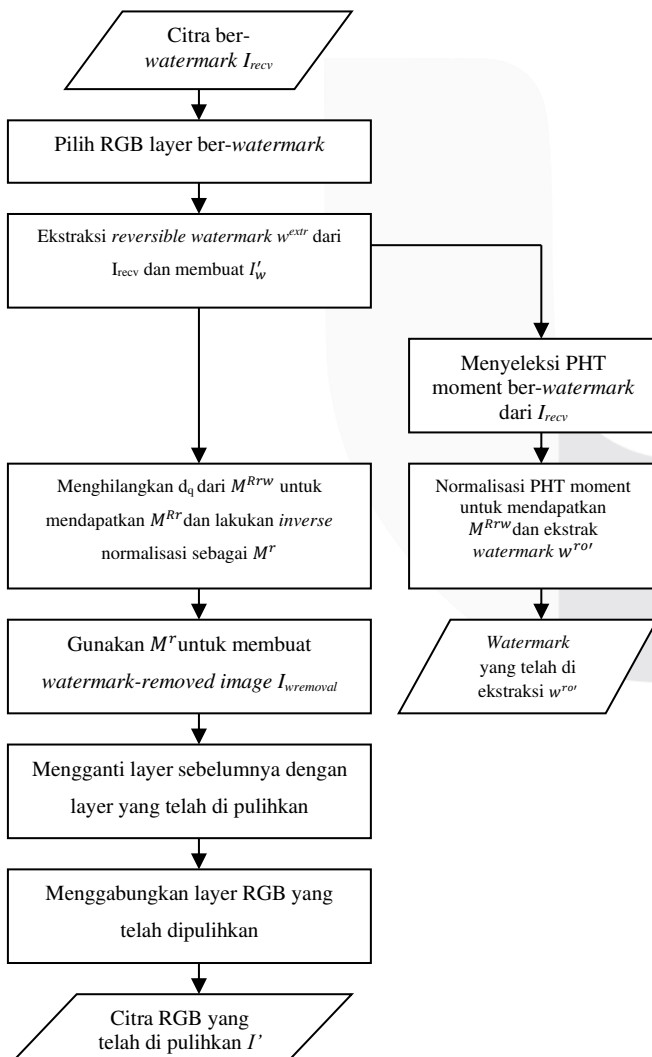
Kesalahan yang dibulatkan, yaitu  $dr$ , dihitung sebagai perbedaan antara gambar asli dan gambar yang telah dihapus dengan *watermark*, yaitu

$$d_r = I - I_{wremoval} \quad (15)$$

Reversible *watermark* dibuat sebagai  $w^{re} = \{d_r, b_{LSB}\}$ , ini juga disebut informasi tambahan untuk reversibilitas. Setelah tanda air yang dapat dibalik dibuat, tanda air tersebut disematkan ke dalam gambar  $I_w$  melalui teknik penandaan air yang dapat dibalik. Teknik penandaan air reversibel berbasis PEE-HS yang sangat baik diadopsi untuk penyematan tanda air reversibel.

### B. Ekstraksi Watermark

Pada tahap ekstraksi proses dilakukan dengan cara melakukan kebalikan dari proses *embedding* yang telah dilakukan sebelumnya. Berikut merupakan *Flowchart*



GAMBAR 2  
Proses Ekstraksi Watermark

ekstraksi pada usulan pengaplikasian citra RGB menggunakan metode RRW PHT

Sama seperti pada proses *embedding*, pada proses ekstraksi juga harus dilakukan pemisahan kanal RGB. Setelah pemisahan dilakukan salah satu kanal akan masuk ke proses ekstraksi *reversible* dengan menggunakan metode PEE-HS dimana PEE-HS merupakan metode yang juga dipakai untuk melakukan *reversible embedding*. Setelah mendapatkan  $RGB'_w$ , akan dilakukan perhitungan dan penyeleksian PHT moment dari Momen PHT ini kemudian dinormalisasi melalui Persamaan (12 - 14) menghasilkan  $M^{Rrw} = \{M_{n1,l1}^{Rrw}, M_{n2,l2}^{Rrw}, \dots, M_{nl_w,li_w}^{Rrw}\}$ , untuk melakukan ekstraksi *robust watermark* bisa dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut

$$|M_{ni,li}^{Rj}| = Q^j[|M_{ni,li}^R|, \Delta], i = 1, 2, \dots, L_w, j \in \{0, 1\} \quad (16)$$

$$w_i^{ro'} = \begin{cases} 0, & \text{if } |M_{ni,li}^{Rrw}| - |M_{ni,li}^{Rr0}| \leq |M_{ni,li}^{Rrw}| - |M_{ni,li}^{Rr1}| \\ 1, & \text{if } |M_{ni,li}^{Rrw}| - |M_{ni,li}^{Rr0}| \geq |M_{ni,li}^{Rrw}| - |M_{ni,li}^{Rr1}| \end{cases} \quad (17)$$

Setelah *robust watermark* diekstraksi, gambar asli dipulihkan dengan cara menghasilkan  $I_{wremoval}$  dengan menggunakan  $I'_w$  dan  $d_q$  mengikuti persamaan (3.14 – 3.16). Kemudian, gambar asli  $I'$  dapat dipulihkan dengan  $d_r$ , seperti pada persamaan berikut.

$$I' = I_{wremoval} + d_r. \quad (18)$$

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Skema eksperimen ini akan dikembangkan dengan menggunakan gambar berwarna berukuran standar dengan resolusi  $512 \times 512$  piksel. *Watermark* yang digunakan adalah kunci biner 256 bit. Empat gambar yang digunakan sebagai host adalah Airplane, Baboon, Barbara, Goldhill. Hal ini akan dioperasikan dengan menggunakan perangkat lunak yang mendukung dalam perhitungan matriks yang mampu menyelesaikannya secara tepat dan lebih akurat, yaitu Matlab (Matrix Laboratory). Matlab (Matrix Laboratory) adalah sebuah program untuk analisis dan komputasi numerik, bahasa pemrograman matematika tingkat lanjut yang dibentuk dengan menggunakan sifat-sifat dan bentuk matriks.



(a) (b) (c) (d)

GAMBAR 3  
Citra Host (a) Airplane, (b) Baboon, (c) Barbara, (d) Goldhill

Eksperimen telah dilakukan untuk mengevaluasi empat persyaratan dasar dari skema *watermarking*, yaitu Invisibility, robust, keamanan, dan reversibilitas. Invisibility

mengacu pada kemampuan menyembunyikan *watermark* sehingga tidak menurunkan kualitas visual gambar. Rasio sinyal-ke-noise puncak (PSNR) adalah parameter umum yang telah digunakan untuk mengevaluasi invisibilitas. Robust mengacu pada kemampuan *watermark* untuk menahan distorsi gambar

#### A. Evaluasi Invisibility

Untuk mengevaluasi kualitas *watermark* dengan citra grayscale, dihitung menggunakan parameter Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR). Parameter ini mengukur perbedaan antara gambar asli dan gambar bertanda air.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{255 \times 255}{MSE} \right), \quad (19)$$

Di mana Mean Square Error (MSE) menunjukkan sebagai

$$MSE = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |c(x, y) - s(x, y)|^2 \quad (20)$$

Untuk mengevaluasi kualitas *watermark* dengan citra berwarna menggunakan PSNR<sub>C</sub> seperti pada persamaan berikut [13]:

$$PSNR_C = \frac{\sum_{i=1}^3 PSNR_i}{3}, \quad (21)$$

di sini  $i = 1$  untuk layer R,  $i = 2$  untuk layer G, dan  $i = 3$  untuk layer B. PSNR<sub>i</sub> menunjukkan rasio sinyal puncak terhadap derau pada lapisan ke- $i$ , yang dihitung sebagai berikut:

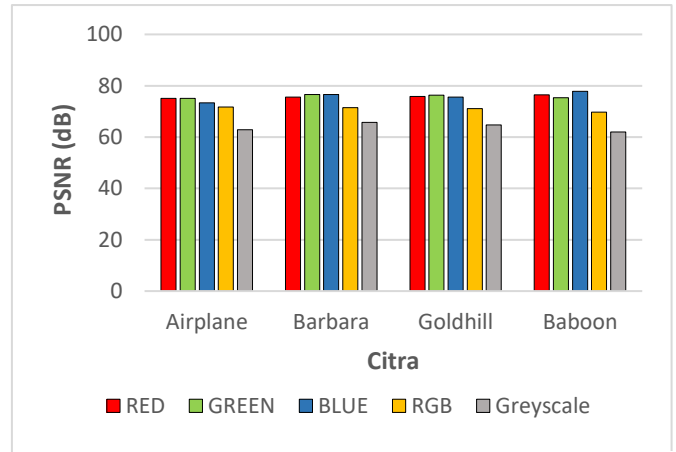
$$PSNR_i = 10 \log \frac{M \times N \times \max \{ [M_{nl}(x, y, i)]^2 \}}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [M_{nl}(x, y, i) - M_{nl}^w(x, y, i)]^2}, \quad (22)$$

Di mana  $M_{nl}(x, y, i)$  dan  $M_{nl}^w(x, y, i)$  adalah nilai piksel dari gambar asli dan gambar yang diberi tanda air pada lokasi  $(x, y)$  pada lapisan ke- $i$  yang ditentukan.

#### B. Efek dari penyisipan pada RGB Layer

Citra RGB merupakan jenis citra yang tersusun dari komponen warna merah, hijau, dan biru. Eksperimen akan dilakukan dengan membandingkan PSNR *Embedding* dan PSNR *Recovery* citra dari hasil embedding yang dilakukan pada empat citra RGB dengan penyisipan *watermark* pada

layer merah (*RED*), citra RGB dengan penyisipan *watermark* pada layer hijau (*GREEN*), citra RGB dengan penyisipan



GAMBAR 5

Hasil perbandingan PSNR *Recovery* pada tiap layer *watermark* pada layer biru (*BLUE*), citra RGB yang seluruh layernya disisipkan, dan citra *greyscale*.

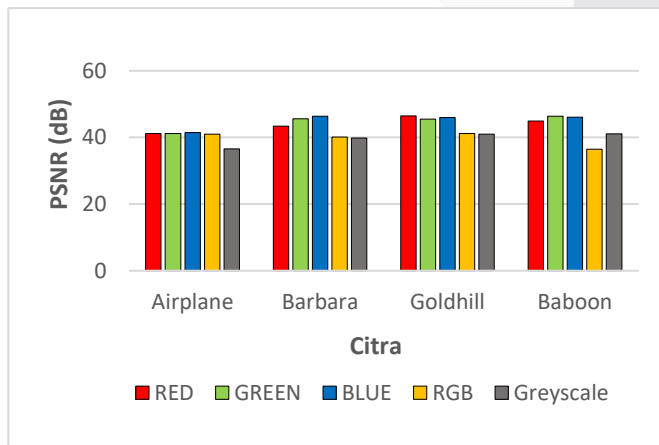
TABEL 1  
HASIL RATA – RATA PSNR DAN BER DARI EMPAT CITRA

| Color Layer | PSNR Robust | PSNR Recovery | BER |
|-------------|-------------|---------------|-----|
| RED         | 43.9699     | 75.7479       | 0   |
| GREEN       | 44.9559     | 75.8672       | 0   |
| BLUE        | 44.6395     | 75.8039       | 0   |
| RGB         | 39.6853     | 70.9750       | 0   |
| Greyscale   | 39.6358     | 63.8352       | 0   |

Gambar 3 dan 4 menunjukkan bahwa embedding pada salah satu layer RGB maupun pada semua layer RGB dan citra *greyscale* mempengaruhi imperceptibility citra. Hal ini dapat dilihat dari nilai PSNR yang didapatkan pada saat pengujian, dimana embedding yang dilakukan pada semua layer RGB dan citra *greyscale* memiliki PSNR yang lebih kecil dibandingkan dengan nilai PSNR yang melakukan embedding pada salah satu layer RGB saja. Hal ini terjadi karena embedding ke salah satu layer RGB memiliki 2 layer cadangan yang tidak terpengaruh oleh proses embedding sehingga ketika disatukan kembali gambar masih dapat terlihat dengan sangat baik tanpa adanya perubahan.

## V. KESIMPULAN

Pada paper ini citra RGB diaplikasikan dengan metode yang dikembangkan oleh Tang dkk. Percobaan akan dilakukan dengan dua cara, yaitu citra RGB dengan penyisipan *watermark* pada satu layer dan citra RGB dengan penyisipan pada tiap layer. Citra yang digunakan adalah empat buah citra RGB berukuran standar 512×512 yang akan disisipkan ke dalam *watermark* bertipe biner sebesar 256 bit. Untuk melakukan proses embedding, pertama-tama pisahkan layer RGB sehingga menjadi gambar dua dimensi dengan piksel yang berbeda untuk setiap layernya. Hasil imperceptibility dari kedua percobaan tersebut akan dibandingkan dengan citra *greyscale* dengan menggunakan parameter PSNR. Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa imperceptibility menggunakan citra RGB meningkat dibandingkan dengan



GAMBAR 4

Hasil perbandingan PSNR *Embedding* pada tiap layer

menggunakan citra greyscale. Namun, metode ini masih perlu ditingkatkan lagi ketahanannya dalam penggunaan citra RGB.

#### REFERENSI

1. 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
2. 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.
3. 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.
4. L. Novamizanti, Suksmono, A.B., Danudirdjo, D., & Budiman, G. "Robust and Imperceptible Watermarking on Medical Images using Coefficient Pair Modification." IJUM Engineering Journal, vol. 24, no. 1, pp. 88-105, 2023.
5. 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.
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. X. Liu et al., "A Novel Robust Reversible Watermarking Scheme for Protecting Authenticity and Integrity of Medical Images," in IEEE Access, vol. 7, pp. 76580-76598, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921894.
8. 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.
9. X. Wang, X. Li, & Q. Pei, "Independent Embedding Domain Based Two-Stage Robust Reversible Watermarking", IEEE Trans, Circuit and System for Video Technology, vol. 30, no. 8, pp. 2406-2417, 2020, doi: 10.1109/TCSVT.2019.2915116
10. R. Hu, S. Xiang, "Lossless Robust Image Watermarking By Using Polar Harmonic Transform" Digital Signal Processing 179, 2021, doi: 10.1016/j.sigpro.2020.107833.
11. Y. Tang, K. Li, C. Wang, et al, "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.
12. R. Thabit, B.E. Khoo, A new robust lossless data hiding scheme and its application to color medical images, Digit. Signal Process. 38 (2015) 77-94, <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2014.12.005>.