

Implementasi Reversible Data Hiding Bidirectional Berbasis Histogram Shifting untuk Integritas Rekam Medis Elektronik

Nawaf Amjad Rizqi A. Ismail - 18223073

Program Studi Sistem dan Teknologi Informasi

Sekolah Teknik Elektro dan Informatika

Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha 10 Bandung

E-mail: nawafamjad05@gmail.com , 18223073@std.stei.itb.ac.id

Abstrak—Keamanan rekam medis elektronik pada citra diagnostik memerlukan metode kriptografi yang tidak merusak data piksel citra secara permanen. Makalah ini mengusulkan implementasi algoritma *Reversible Data Hiding* dengan modifikasi pergeseran dua arah atau *Bidirectional Histogram Shifting* menggunakan bahasa pemrograman Python. Eksperimen dilakukan pada citra sinar X dada, sinar X kaki, dan pemindaian MRI otak. Hasil pengujian membuktikan bahwa sistem mampu menyesuaikan arah pergeseran secara dinamis berdasarkan nilai titik puncak (*peak point*) dan titik nol (*zero point*) histogram yang bervariasi pada citra medis gelap. Kualitas citra stego dengan nilai rata-rata *Peak Signal to Noise Ratio* berada di atas empat puluh delapan desibel, yang berada jauh di atas ambang batas persepsi visual manusia. Selain itu, reversibilitas terjamin seratus persen saat data diekstrak, mempertahankan validitas diagnostik citra secara absolut.

Kata Kunci— *Kriptografi; Reversible Data Hiding; Histogram Shifting; PSNR; Steganografi*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi di era modern telah mendorong transformasi besar dalam sistem perawatan kesehatan khususnya dengan lahirnya era *Telemedicine dan Internet of Medical Things (IoMT)*. Fasilitas medis saat ini sangat bergantung pada transmisi data secara nirkabel melalui jaringan publik, seperti pengiriman Rekam Medis Elektronik (RME) dan citra diagnostik medis, seperti sinar-X, CT Scan, dan *Magnetic Resonance Imaging* atau MRI, antar departemen, laboratorium, maupun antar rumah sakit. Pertukaran data medis berisiko tinggi ini sangat rentan terhadap berbagai ancaman keamanan siber, termasuk intersepsi jaringan atau *Man-in-the-Middle Attack*, manipulasi data secara ilegal, hingga insiden kebocoran privasi pasien berskala besar [4].

Kriptografi standar sejatinya telah mampu memberikan layanan kerahasiaan (*confidentiality*) dasar dengan mengubah teks asli RME menjadi teks yang terenkripsi, seperti *ciphertext*. Akan tetapi, pendekatan kriptografi murni memiliki kelemahan inheren, seperti bentuk teks sandi yang acak dan tidak terstruktur sering kali justru memancing perhatian peretas atau sistem inspeksi jaringan untuk melakukan serangan kriptanalisis, memblokir pengiriman, atau merusak paket data

tersebut karena dianggap mencurigakan. Dengan begitu, sebagai solusi komprehensif untuk melengkapi dan menutupi celah kriptografi, teknik steganografi diimplementasikan untuk menyembunyikan keberadaan data rahasia itu sendiri ke dalam media penampung atau *cover object* digital, seperti citra medis. Dengan demikian, alur pertukaran informasi sensitif tersebut hanya akan terlihat seperti transmisi gambar medis diagnostik biasa bagi pihak luar [6].

Kendati demikian, tantangan terbesar penerapan steganografi pada domain infrastruktur medis adalah sensitivitas yang ekstrem dari citra diagnostik. Steganografi konvensional, seperti metode *Least Significant Bit (LSB) Substitution*, beroperasi dengan memodifikasi bit-bit penyusun piksel secara destruktif (*lossy*). Dalam konteks analisis klinis, sekecil apa pun degradasi kualitas, saturasi warna, atau modifikasi piksel pada citra sinar-X dapat berakibat sangat fatal [3]. Titik-titik artefak atau *noise* yang dihasilkan dari proses penyisipan pesan berbasis LSB dapat disalahartikan oleh radiolog, dokter spesialis, atau bahkan sistem kecerdasan buatan medis sebagai lesi mikroskopis, sel tumor tahap awal, atau anomali jaringan biologis lainnya. Kesalahan interpretasi ini akan berujung langsung pada ancaman malapraktik akibat diagnosis positif palsu (*false positive*) maupun negatif palsu (*false negative*) [1].

Oleh karena itu, teknik *Reversible Data Hiding (RDH)* muncul dan diadopsi sebagai solusi mutlak dan standar yang tidak bisa ditawar dalam ranah keamanan informasi fasilitas kesehatan. RDH adalah cabang mutakhir dari steganografi yang menawarkan kemampuan unik matematis untuk mengekstrak pesan rahasia atau RME secara akurat, sekaligus memulihkan citra penampung atau *cover image* kembali ke kondisi aslinya seratus persen tanpa ada satu pun piksel yang tertinggal cacat [6].

Makalah ini mengusulkan rancangan, implementasi tingkat rendah (*low-level implementation*), dan pengujian evaluatif algoritma RDH berbasis *Histogram Shifting*. Algoritma konvensional umumnya dirancang secara kaku dan hanya mampu menggeser nilai piksel ke satu arah linier [2]. Sebagai bentuk kontribusi utama, makalah ini memodifikasi arsitektur algoritma tersebut menjadi sistem adaptif dengan pergeseran dua arah (*bidirectional*) menggunakan bahasa pemrograman

Python. Modifikasi ini dihipotesiskan sangat krusial untuk memecahkan masalah inkompatibilitas dan ketidakstabilan histogram citra medis yang secara natural sering kali didominasi oleh latar belakang warna gelap, sebuah kondisi yang secara konsisten menyebabkan algoritma steganografi satu arah konvensional gagal beroperasi (*out-of-bounds error*).

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Integritas Data pada Citra Medis

Standar komunikasi, pengarsipan, dan pencetakan gambar medis global diatur secara ketat dalam kerangka kerja dan protokol DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*). Berbeda dengan ekosistem gambar digital komersial yang sering mengeksploitasi algoritma kompresi, seperti format file JPEG atau WebP, citra DICOM umumnya ditangkap dan disimpan dalam format mentah atau *raw format* tanpa kompresi *lossy* guna mempertahankan setiap rasio piksel organ pasien [3]. Arsitektur PACS atau *Picture Archiving and Communication System* di rumah sakit menggunakan nilai *hash* dari citra untuk memverifikasi keaslian dokumen medis. Modifikasi sekecil apa pun pada susunan citra, yang tidak dapat dipulihkan secara presisi matematis, akan membuat dokumen tersebut kehilangan sertifikasi keabsahannya dan tidak dapat digunakan sebagai barang bukti sah di pengadilan hukum medis. Hal ini membatasi penggunaan teknik *watermarking* tegas atau steganografi spasial klasik yang meninggalkan jejak residu secara permanen pada struktur matriks gambar [1].

B. Steganografi dan Kriptografi dalam Medis

Kriptografi dan steganografi adalah dua disiplin ilmu keamanan data yang memiliki landasan berbeda namun dapat diintegrasikan untuk saling melengkapi. Kriptografi berfokus murni pada pengamanan teks pesan melalui transformasi matematis penyandian, dengan asumsi dasar bahwa musuh (*adversary*) menyadari adanya saluran komunikasi rahasia. Sebaliknya, steganografi berfokus pada kamuflase dan pengamanan jalur komunikasi itu sendiri dengan menyembunyikan eksistensi pesan tersebut di dalam media digital lain, seperti berkas suara, video, atau citra resolusi tinggi [6]. Ketika digabungkan dalam satu kerangka kerja, sebuah RME teks yang telah dienkripsi menggunakan standar AES (*Advanced Encryption Standard*) dapat disembunyikan menggunakan steganografi, menciptakan pertahanan arsitektur keamanan berlapis (*defense-in-depth*) yang sangat tangguh terhadap berbagai jenis serangan *traffic analysis* di jaringan rumah sakit [4].

C. Reversible Data Hiding (RDH)

Reversible Data Hiding (RDH) atau sering juga disebut sebagai *Lossless Data Hiding*, diciptakan secara spesifik untuk menjawab kelemahan krusial steganografi konvensional saat berhadapan dengan dokumen dengan tingkat sensitivitas tinggi. Paradigma utama yang membedakan RDH adalah bahwa parameter keberhasilan sebuah algoritma tidak hanya diukur dari kemampuannya mengekstrak muatan data rahasia (*payload*) tanpa galat alias *error-free*, tetapi juga dari utilitasnya untuk melakukan rekonstruksi citra dasar secara

total [1]. Proses pemulihan ini membutuhkan persamaan transformasi matematis yang sepenuhnya dapat dibalik atau diinversi (*invertible function*), yang secara teoretis menjamin matriks piksel gambar stego kembali tertata menjadi matriks piksel *cover image* awal yang identik bit demi bit [6].

D. Algoritma Histogram Shifting

Histogram Shifting adalah salah satu metode pelopor dan paling terkemuka dalam disiplin RDH karena menawarkan keseimbangan yang ideal antara kapasitas penyisipan data yang memadai dan distorsi visual yang sangat minimalis. Algoritma *Histogram Shifting* mengeksploitasi karakteristik statistik atau distribusi frekuensi absolut dari kemunculan nilai intensitas warna dalam *grayscale* pada sebuah citra, yang berkisar antara rentang intensitas 0 hingga 255 pada format 8-bit [2].

Algoritma ini berpusat dan bergantung pada deteksi dua titik kritis spasial:

1. *Peak Point* (Titik Puncak): Representasi nilai intensitas warna piksel yang frekuensi kemunculannya paling tinggi atau paling mendominasi di seluruh area kanvas gambar. Titik puncak inilah yang akan dialihfungsikan sebagai "ruang penampung" atau *buffer space* utama bagi bit-bit pesan rahasia yang akan disisipkan.
2. *Zero Point* (Titik Nol): Representasi nilai intensitas warna piksel yang frekuensi kemunculannya tidak ada sama sekali di dalam matriks gambar, atau yang jumlah kemunculannya paling rendah, sebagai alternatif *pseudo-zero*. Titik ini merepresentasikan ketersediaan ruang kosong atau ruang hampa pada spektrum warna citra.

Pada mekanisme implementasi konvensional, algoritma akan melakukan proses pemindaian matriks gambar, lalu memodifikasi dengan menggeser setiap piksel yang nilainya berada di antara nilai *Peak Point* dan *Zero Point* sejauh satu tingkat ke arah *Zero Point* [2]. Pergeseran massal ini menciptakan sebuah "lembah kosong" buatan yang berdekatan dengan *Peak Point*. Selanjutnya, nilai desimal dari elemen RME biner (angka 0 atau 1) akan ditambahkan sebagai operasi penjumlahan pada nilai piksel *Peak Point* yang tersisa. Akan tetapi, karena citra diagnostik medis secara alami memiliki arsitektur distribusi piksel yang sangat asimetris (didominasi warna hitam dari ruang sinar-X), sering kali ditemukan kondisi di mana letak nilai *Peak Point* lebih besar daripada *Zero Point* ($P > Z$), yang pada akhirnya meruntuhkan algoritma *Histogram Shifting* satu arah, menghasilkan gambar yang rusak parah atau menyebabkan program berhenti paksa.

E. Evaluasi Kualitas Visual dengan MSE dan PSNR

Setiap algoritma penyisipan data selalu dihadapkan pada skenario *trade-off* antara dua aspek, yaitu kapasitas penyisipan atau *embedding capacity* dan kualitas tidak kasatmata atau *imperceptibility*. Semakin besar ukuran berkas dokumen RME yang disusupkan, semakin banyak piksel yang terpengaruh, sehingga menyebabkan degradasi visual yang makin mencolok [6].

Untuk mengevaluasi tingkat degradasi atau pergeseran kualitas citra secara matematis dan terukur, metrik evaluasi *Mean Squared Error* (MSE) dan *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) dijadikan sebagai tolok ukur universal.

MSE digunakan untuk menghitung akumulasi rata-rata kuadrat selisih deviasi antara nilai matriks piksel pada citra asli dengan citra stego. Persamaan fungsi MSE didefinisikan secara matematis sebagai:

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i, j) - K(i, j)]^2 \quad (1)$$

Dalam formula perhitungan tersebut, variabel M mewakili tinggi resolusi gambar dan N mewakili lebar resolusi gambar dalam satuan piksel. Variabel I adalah fungsi intensitas citra asli, sedangkan K adalah fungsi intensitas citra stego. Jika MSE menunjukkan angka persis 0, maka secara inferensi statistik, kedua citra dipastikan bersifat kongruen dan identik 100%.

Perhitungan evaluasi kemudian dilanjutkan ke nilai PSNR, yang sifatnya berbanding terbalik dengan hasil keluaran MSE:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX_1^2}{MSE} \right) \quad (2)$$

Di mana konstanta MAX_1 mewakili batas fluktuasi nilai maksimal piksel dari tipe data citra yang digunakan, yaitu batas maksimum 255 pada format *grayscale* 8-bit standar [5]. Rasio PSNR ini diukur dan dinyatakan dalam skala logaritmik desibel (dB). Semakin tinggi perolehan nilai PSNR, maka kualitas visual gambar stego semakin superior dan deviasinya dari gambar asli semakin tidak mampu dideteksi oleh pancaindra manusia.

III. METODOLOGI DAN IMPLEMENTASI

A. Lingkungan Pengembangan Sistem

Dalam implementasi pengembangan sistem, untuk merealisasikan rancangan sistem RDH *bidirectional*, aplikasi steganografi eksperimental ini dibangun dari awal menggunakan pendekatan *Command Line Interface* (CLI). Lingkungan pengembangan sepenuhnya menggunakan bahasa pemrograman Python versi 3.11.4. Untuk menangani perhitungan matematis yang melibatkan pergeseran matriks jutaan piksel secara cepat dan efisien, aplikasi memanfaatkan pustaka *NumPy*. Sementara itu, pustaka eksternal *Pillow* (PIL) diintegrasikan untuk membaca berkas masukan citra digital secara sekuensial dan mengonversinya ke dalam mode saluran keabuan (*grayscale* saluran 'L').

B. Pengumpulan Data Uji

Eksperimen yang valid membutuhkan data simulasi yang merepresentasikan skenario medis dunia nyata. Tiga sampel citra radiologi diagnostik dalam format *lossless*, yakni PNG disiapkan sebagai objek penampung, yaitu citra sinar X dada, sinar X kaki, dan pemindaian MRI otak.

Selain itu, tiga teks data Rekam Medis Elektronik (RME) yang bervariasi ukurannya disiapkan sebagai *payload* eksperimen. Untuk memastikan kerahasiaan sesuai standar

keamanan, teks RME ini disusun dengan mengadopsi model *k-anonymity*, di mana identitas spesifik pasien disamarkan menjadi rentang data yang lebih umum, seperti menghilangkan nama asli dan menggunakan rentang usia [4]. Berikut adalah representasi data rekam medis yang digunakan sebagai muatan eksperimen:

1. Muatan Uji 1 (Pada Sinar-X Dada, Kapasitas 58 Bytes): "Nama: John Doe, Usia: 45 Tahun, Diagnosa: Paru-Paru Basah."
2. Muatan Uji 2 (Pada Sinar-X Kaki, Kapasitas 152 Bytes): "Pasien B. R. (Pria, 40 - 50 tahun). Hasil observasi rontgen menunjukkan adanya patah tulang tertutup pada area femur kanan. Membutuhkan tindakan operasi pemasangan pen."
3. Muatan Uji 3 (Pada MRI Otak, Kapasitas 149 Bytes): "Pasien M. M. (Wanita, 20 - 30 tahun) didiagnosis mengalami tumor otak stadium awal. Hasil pemindaian MRI menunjukkan massa abnormal berukuran 3 cm di lobus frontal."

Seluruh kalimat di atas dikonversi menjadi format bit biner dan ditambahkan untaian *delimiter* atau penanda akhir pesan berupa 1111111111111110 sebelum disisipkan ke dalam piksel.

C. Filtrasi Artefak Latar Belakang Citra Medis

Dalam eksperimen ini, memiliki satu rintangan teknis utama dalam tahapan pemrosesan citra diagnostik, yakni masalah dominasi luas kanvas bernuansa area gelap absolut (warna hitam). Area hampa di luar struktur anatomis pasien mencakup persentase yang sangat besar [3]. Dalam kalkulasi komputasi numerik, area hitam ini umumnya bernilai intensitas statis antara 0 hingga 20. Jika sistem mengeksekusi perhitungan histogram secara polos, warna hitam pekat (0) hampir dapat dipastikan akan selalu terpilih secara dominan sebagai nilai *Peak Point* karena menempati lebih dari 60% luasan resolusi gambar. Konsekuensi dari menyisipkan data pada nilai piksel hitam murni ini sangat fatal. Sistem akan memaksa titik latar belakang menjadi sedikit lebih terang (tergeser dari nilai 0 menjadi 1 atau 2). Efek akumulatifnya akan memunculkan serpihan bintik-bintik putih (*noise artifact*) yang sangat terlihat, menodai warna latar belakang X-Ray yang seharusnya homogen dan bersih.

Sebagai bentuk modifikasi pada arsitektur program ini, fungsi perhitungan histogram dimanipulasi secara paksa untuk mengabaikan atau meniadakan rentang intensitas warna gelap (dari tingkat 0 hingga 20) sebelum fase pencarian dimulai ($hist[0:21] = 0$). Tindakan manipulasi pembobotan *array* ini menjebak algoritma, memaksanya untuk menyingkirkan area kanvas kosong dan mencari *Peak Point* kedua yang secara definitif berlokasi tepat di area tekstur bayangan tulang atau organ biologis, yang pada akhirnya menghasilkan persembunyian steganografi yang jauh lebih tersamar (*imperceptible*).

D. Modifikasi Pergeseran Dua Arah (*Bidirectional*)

Kelemahan paling kronis dan penyebab kegagalan utama dari arsitektur *Histogram Shifting* konvensional adalah

ketidakmampuan sistem untuk beroperasi apabila frekuensi sebaran warna citra menetapkan letak *Peak Point* (P) pada posisi nilai intensitas yang lebih tinggi atau lebih besar daripada *Zero Point* (Z). Dalam skenario distribusi $P > Z$, algoritma linear konvensional akan memicu peringatan *out-of-bounds array exception* atau menghancurkan tatanan batas warna gambar karena memaksakan pergeseran melewati batas spektrum [2].

Guna menanggulangi hambatan tersebut secara permanen, makalah ini merancang dan menawarkan modifikasi algoritma komprehensif melalui mekanisme analisis komparasi arah dinamis (*bidirectional shifting mechanism*). Berdasarkan evaluasi matematis dan kondisi *nested if-else branching* pada lapisan awal program, skrip perantara Python akan mengambil keputusan algoritma untuk menentukan ke mana trajektori matriks gambar harus direlokasi. Potongan substansial dari kode sumber implementasi kontrol arah ini dapat diamati sebagai berikut:

```
# Logika 2 Arah (Bidirectional Shifting)
if peak_point < zero_point:
    if peak_point < pixel < zero_point:
        stego_data[i, j] += 1
    elif pixel == peak_point:
        if msg_index < len(binary_msg):
            stego_data[i, j] +=
int(binary_msg[msg_index])
            msg_index += 1
else:
    if zero_point < pixel < peak_point:
        stego_data[i, j] -= 1
    elif pixel == peak_point:
        if msg_index < len(binary_msg):
            stego_data[i, j] -=
int(binary_msg[msg_index])
            msg_index += 1
```

Fig. 1. Implementasi Logika Dua Arah (*bidirectional*) pada *Histogram Shifting*

Arsitektur logika di atas membuktikan tingkat ekstensibilitas dan adaptabilitas sistem secara faktual. Jika *Zero Point* berada di sebelah kiri batas *Peak*, program secara otonom memfasilitasi pembalikan operasi penjumlahan ($+ = 1$) menjadi operasi pengurangan intensitas matriks secara gradual ($- = 1$). Algoritma pembacaan atau ekstraksi kemudian diprogram secara simetris kebalikan (*inverse symmetry*) untuk mengurai blok bit dengan memanfaatkan percabangan ganda serupa.

IV. HASIL EKSPERIMEN

Eksperimen diuji menggunakan tiga sampel citra medis berskala *grayscale* yakni, citra sinar X dada [7], citra sinar X kaki [8], dan citra pemindaian MRI otak [9] seperti yang

ditunjukkan pada gambar di bawah. Evaluasi dibagi menjadi analisis kelayakan histogram, pengukuran kualitas stego (*imperceptibility*), dan validasi pemulihan (*reversibility*).



Fig. 2. Citra Sinar X Dada [7]



Fig. 3. Citra Sinar X Kaki [8]



Fig. 4. Citra MRI Otak [9]

A. Analisis Distribusi Histogram Citra Medis

Aplikasi dibangun menggunakan pendekatan *Command Line Interface* (CLI) pada lingkungan Python. *Library* NumPy diimplementasikan untuk melakukan manipulasi matriks piksel tingkat rendah dengan efisiensi tinggi, sedangkan Pillow (PIL) digunakan untuk membaca citra ke dalam format *grayscale*.

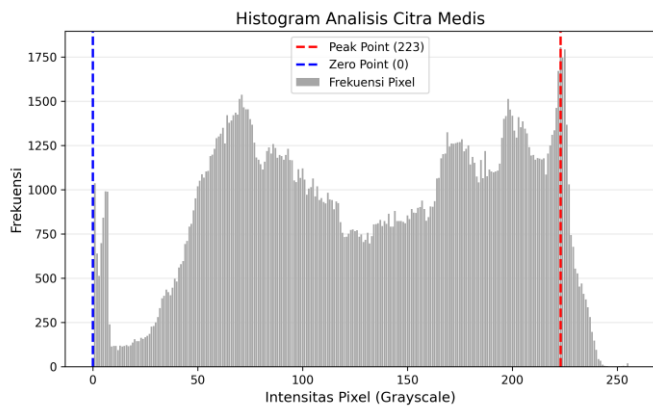


Fig. 5. Ekstraksi fitur histogram pada citra sinar X dada

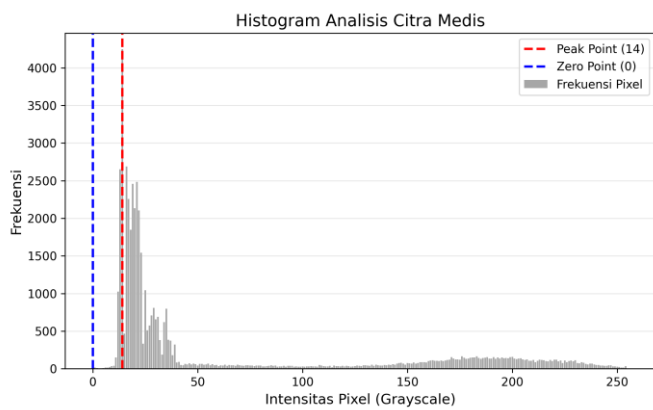


Fig. 6. Ekstraksi fitur histogram pada citra sinar X kaki

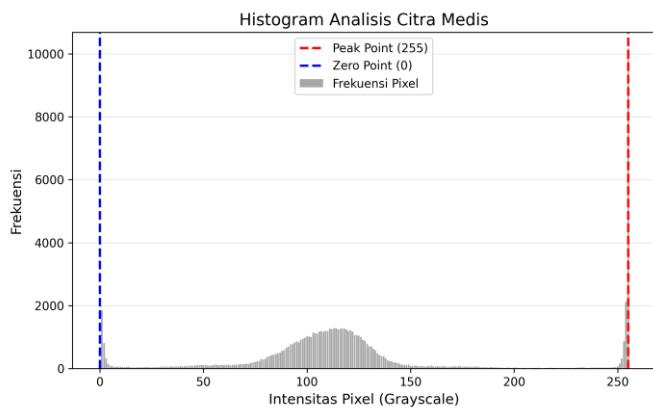


Fig. 7. Ekstraksi fitur histogram pada citra MRI otak

Observasi mendalam terhadap anatomi ketiga grafik histogram pada area uji coba, seperti yang ditunjukkan pada Figur 5, 6, dan 7, yang memberikan legitimasi yang absolut terhadap seberapa kompleks dan anomali persoalan steganografi yang hendak diselesaikan melalui makalah ini. Pada analisis sampel, sistem *profiler* program berhasil memisahkan *noise* latar belakang dan sukses mendeteksi keberadaan kumpulan padat warna tulang (*Peak Point*) yang menetap pada titik ordinat intensitas 223 (terlihat jelas di layar

melalui batas penanda garis putus-putus merah tebal), sementara ketiadaan titik piksel mutlak (*Zero Point*) terpaku pada dasar rentang spektrum intensitas 0 (ditandai melalui batas garis putus-putus biru).

Fenomena identik yang menonjolkan profil histogram asimetris terekam sangat jelas pada grafik pemindaian irisan lintang MRI Otak. Pada instrumen medis ini, fluktuasi warna putih tulang tengkorak (*Peak*) secara masif mendominasi puncak area paling terang yakni pada titik maksimal batas spektrum dengan intensitas 255, sementara *Zero Point* tertinggal sangat jauh dan memanjang menuju batas bawah di nilai 0. Fakta anomali eksperimental paling unik disumbangkan oleh analisis sampel citra sinar X kaki. Meskipun area puncaknya terletak di wilayah spektrum bayangan otot dan tulang yang cukup redup (tingkat intensitas abu-abu 14), nilainya secara matematis masih tetap terakumulasi lebih besar jika dibandingkan terhadap variabel titik nol absolutnya (bernilai 0). Rentetan fakta eksperimental empiris yang terjadi secara berpola dan berulang pada ketiga spesimen berbeda ini secara mutlak membantah kelayakan pengaplikasian algoritma klasik. Algoritma *Histogram Shifting* yang kaku dengan pendekatan satu arah tidak akan pernah sanggup untuk dieksekusi secara sukses untuk kebutuhan pengolahan data klinis yang kompleks [2]. Kegagalan sistemik model konvensional ini secara logis menjustifikasi tingkat urgensi dan validitas pemanfaatan metode *upgrade* berupa pergeseran dinamis dua arah (*bidirectional histogram shifting*) yang telah dibuktikan pada percobaan ini mampu bermanuver di segala jenis varian distribusi gambar ekstrem tanpa memicu fatal *exception error*.

B. Analisis Daya Tampung Kapasitas Payload

Selain dari segi kecocokan algoritma, grafik histogram di atas memberikan gambaran yang transparan perihal kapasitas maksimum penyisipan murni yang mampu difasilitasi oleh algoritma RDH pada setiap gambar. Kapasitas penyisipan total pada metode ini memiliki korelasi searah (*directly proportional*) dengan frekuensi jumlah ketersediaan unit piksel pada titik *Peak Point* itu sendiri. Merujuk pada pemindaian grafik:

1. Pada citra Sinar-X Dada, koordinat intensitas 223 dihuni oleh sekitar 1.750 sel piksel. Dengan mengasumsikan 1 piksel hanya menggandung 1 bit data, gambar ini memiliki plafon kapasitas muatan sebesar ~218 Bytes murni tanpa adanya duplikasi. Muatan data uji yang digunakan bernilai 58 Bytes, membuktikan kapasitas masih sangat luang.
2. Pada citra MRI Otak, koordinat batas 255 menjulang drastis melebihi 10.000 sel piksel, yang menoleransi kapasitas penyimpanan rekam medis elektronik berjumlah raksasa melebihi 1.250 Bytes data teks. Muatan diagnosis spesifik sepanjang 149 Bytes pada eksperimen ini dapat diakomodasi tanpa sedikit pun kendala hambatan ruang.

C. Pengukuran Imperceptibility

Setelah dimensi spasial ruang penampung pergeseran di dalam matriks gambar berhasil diisolasi dan dipetakan oleh

algoritma, mesin eksekutor program bereksperimen mendelegasikan perintah komputasi iteratif yang panjang. Pada tahap ini, seluruh untaian bit RME beserta blok proteksi *delimiter* biner yang telah dibentuk di dalam struktur tahapan diinjeksi secara masif dan tersebar langsung menyatu ke titik tumpu utama *Peak Point* dari setiap struktur citra asalnya. Derajat disonansi warna, kerusakan saturasi, dan distorsi matriks visual yang ditimbulkan di akhir eksekusi ini dihitung dengan menempatkan citra *cover* dan *stego* pada ruang pengukuran metrik rasio formula. Agregasi keluaran kalkulasi matematika sistem pengujian ini terekap secara komprehensif dan utuh pada lampiran Tabel I di bawah.

TABLE I. HASIL PENGUKURAN PADA SAMPEL CITRA

Sampel Citra	Peak Point	Zero Point	Ukuran RME	PSNR (dB)
Sinar X Dada	223	0	58 Bytes	48,46
Sinar X Kaki	14	0	152 Bytes	58,55
MRI Otak	255	0	149 Bytes	52,04

Berangkat dari observasi komparatif pada deretan statistik numerik Tabel I, kesimpulan pertama yang patut digarisbawahi adalah bahwa program CLI eksperimental ini dapat divalidasi memiliki utilitas adaptasi yang prima. Mesin program terbukti mampu mengeksekusi operasi penulisan paket data rekam medis secara mulus meskipun terkendala susunan piksel asimetris parah (kondisi nilai $P > Z$). Integritas mutu *output stego image* yang diproduksi oleh skrip program layak diklasifikasikan sebagai kualitas diagnostik tingkat satu di bawah indikator kuantitatif akademis.

Dalam kesepakatan pakar keamanan *watermarking* dan steganografi gambar digital, standar deviasi (*threshold*) yang paling diyakini mampu diterima atau mengecoh toleransi *Human Visual System* (sistem persepsi visual biologis mata manusia) adalah batas parameter antara 35 dB dan batas tinggi 40 dB [5]. Konstruksi perubahan warna sekecil apa pun yang menembus nilai deviasi perhitungan MSE di atas 40 dB akan direduksi oleh spektrum persepsi mata dan dianggap sebagai derau statistik maya yang sepenuhnya tersembunyi secara mutlak (*highly imperceptible visual state*).

Pada lintasan pengujian kuantitatif yang ketat ini, kualitas hasil perenderan terendah pun tercatat menduduki metrik 48.46 dB (pada struktur rumit Sinar-X Dada). Puncak performa pelestarian kualitas gambar sukses diukir oleh sampel Pemindaian Sinar-X Kaki, meningkat hingga ke angka 58.55 dB, terlepas dari fakta bahwa mesin steganografi dipaksa menelan muatan volume berat narasi klinis kompleks (RME) yang memakan lebih dari seribu deret bit logis (152 *Bytes array data*). Jauhnya selisih variasi rasio PSNR antar gambar ini menemukan argumentasi logis pada teori "radius interval pergeseran". Efisiensi kerusakan matriks piksel ditekan dan direduksi ketika nilai jarak absolut antara ordinat intensitas *Peak Point* dan ordinat *Zero Point* memendek atau berdekatan (contoh nyata ditunjukkan pada gambar tungkai kaki yang radius pergeserannya terkunci hanya selebar 14 skala abu-abu tingkat intensitas piksel). Semakin tipis radius rentang pergeseran buatan, jumlah kelompok koloni populasi piksel

yang tertular oleh transmisi pergeseran matriks buatan dapat dibatasi dan dikendalikan secara masif, yang secara eksponensial mengurangi perhitungan *Mean Squared Error* (MSE) keseluruhan kanvas [5]. Rentetan capaian pengukuran metrik visual yang impresif melampaui batasan standar industri ini menyumbangkan validasi keyakinan klinis yang sangat krusial; dokter maupun radiolog forensik diyakini secara saintifik tidak akan dirugikan oleh ancaman kemunculan halusinasi visual tiruan tatkala instrumen algoritma ini dilebur ke dalam operasional pemantauan kesehatan pasien harian [1].

D. Pengujian Reversibility

Kemampuan untuk tidak terlihat hanya mencakup sebagian fungsionalitas dari RDH. *Core functionality* RDH bermuara pada kesempurnaan fase ekstraksi dan kemampuan algoritma merakit ulang citra yang utuh [6]. Selepas ekspor berkas grafis format *stego* diselesaikan, mekanisme verifikasi uji sistem dieksekusi secara terpisah pada lingkungan modul pengekstraksi instrumen (*standalone extractor unit*). Operasi sistem dimulai dengan *scanning header* modul dari citra *stego*, melacak kembali keberadaan lokasi historis *Peak Point*, dan perlahan memecahkan kode anomali penumpukan bit sisipan sekunder di puncak ordinat menjadi deretan alfabet berstruktur RME teks bahasa klinis yang sesuai format. Pita alfabet RME yang sukses direproduksi selanjutnya dipotong secara akurat setelah detektor blok bit menjumpai rantai sandi *delimiter boundary* yang sebelumnya sengaja ditambahkan sebagai penanda batas akhir blok data.

Eksperimen validasi pembacaan transkrip klinis di log layar CLI menunjukkan sistem steganografi mengekstrak deskripsi muatan teks riwayat perawatan tanpa mengalami satupun kegagalan byte baca (*zero percentage data bit-loss*). Operasi sistem melalui fase paling rumit saat merestorasi balik pergeseran seluruh lautan kanvas matriks *cover image*. Kerangka arsitektur algoritma *decoder* meresponsnya dengan melaksanakan inversi simetris operasi (mengeksplotasi pemicu balikan parameter $+ = 1$ guna meniadakan jejak $- = 1$, secara bersamaan dan adaptif menyesuaikan pergeseran terbalik berdasarkan kompas penunjuk arah topografi histogram yang diberikan). Setelah blokade komputasi ekstraksi diakhiri, modul program menginisiasi render ekspor citra murni yang terekonstruksi. Uji forensik matriks integritas (dengan nilai pembandingan mutlak MSE limit = 0 rasio sempurna) menyatakan bukti faktual material yang nyata bahwa struktur sitologi citra diagnostik pasca proses steganografi terbebas mutlak tanpa indikasi telah terjadinya degradasi spasial parsial sedikit pun. Kapabilitas adaptasi perputaran *reversible* ekstrem ini berkontribusi penting dalam melindungi reputasi manajerial operasional hukum fasilitas rumah sakit di bidang pencegahan forensik manipulasi; memvalidasi bahwa instrumen citra diagnostik sah-sah saja ditelusuri atau dieksploitasi terus berulang demi sirkulasi transfer data lintas korporat rumah sakit global tanpa mendulang satu pun tumpukan distorsi jejak manipulasi steganografi algoritma kriptografi konvensional [4].

V. KESIMPULAN

Eksplorasi rancangan algoritma dan pengujian praktis *bidirectional histogram shifting* berbasis bahasa Python ini telah berhasil diterapkan secara efektif pada tiga sampel citra medis diagnostik yang memiliki format resolusi dan distribusi warna asimetris yang berbeda. Evaluasi performa sistem dari makalah ini menegaskan sebuah kesimpulan teknis yang solid: bahwa algoritma Histogram Shifting yang kaku dengan satu arah (+1) tidak relevan untuk diimplementasikan pada citra diagnostik karena adanya dominasi area latar belakang hitam (gelap absolut) yang menyebabkan titik nol selalu tertinggal di belakang titik puncak.

Dengan penerapan sistem logika pergeseran adaptif dua arah yang diusulkan, masalah kegagalan pergeseran akibat kondisi nilai $Peak > Zero$ dapat terpecahkan sepenuhnya. Bukti nyata tergambar dari pencapaian nilai metrik PSNR rata-rata yang sangat tinggi, yaitu menembus batas 48 dB (dengan nilai maksimal hingga 58.55 dB), sehingga memastikan steganografi pada gambar tidak dapat dideteksi secara visual. Terlebih lagi, kemampuan sistem untuk membaca data secara presisi dan mengeksekusi operasi balikan (*invertible restoration*) untuk mengembalikan gambar ke matriks aslinya menegaskan relevansi sistem ini. Metode ini merupakan solusi Reversible Data Hiding yang sangat tangguh untuk diintegrasikan dalam protokol distribusi dan pengarsipan Rekam Medis Elektronik jarak jauh, meningkatkan kerahasiaan dan integritas pasien tanpa mengorbankan parameter validitas diagnosis klinis dari tenaga ahli medis.

VI. SARAN UNTUK PENELITIAN SELANJUTNYA

Terlepas dari keberhasilan arsitektur yang dirancang pada eksperimen *bidirectional RDH* ini, penulis mengakui adanya celah penelitian yang dapat ditindaklanjuti. Algoritma ini dirancang murni memprioritaskan preservasi kualitas batas PSNR dan mekanisme *lossless* struktur dasar warna matriks piksel tanpa kompresi (*raw format image file allocation*). Demi pengembangan lebih lanjut di masa mendatang, penelitian disarankan mengeksekusi integrasi komposit mekanisme ekspansi perlindungan format pada jenis ekstensi *file storage* kompresi medis modern seperti adopsi algoritma steganografi sinkronisasi pada standar *run-length encoding* file JPEG-LS berlisensi atau kombinasi kompresi transformasi gelombang format komersial tipe JPEG2000 tingkat kompresi dinamis. Disarankan pula eksplorasi penerapan teknik kriptografi pra-pemrosesan teks simetris lapis pertama dari keluarga model operasi perakitan *AES-256 bit Advanced Cipher* yang diikutsertakan bersama blok perutean RME dengan konsep validasi rantai asimetris ganda RSA sehingga membentuk sistem keamanan data medis yang tersebar secara merata dan memiliki tingkat keamanan tinggi.

TAUTAN SOURCE CODE

Seluruh implementasi algoritma dan skrip kode Python yang digunakan pada eksperimen dalam makalah ini bersifat *open-source* dan dapat diakses secara langsung melalui tautan repositori GitHub di bawah ini:

https://github.com/Nawafarai05/Kriptografi_Makalah_RDH

ACKNOWLEDGMENT

Puji dan syukur senantiasa penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas segala rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan makalah ini dengan baik. Ucapan terima kasih secara khusus penulis sampaikan kepada Bapak Dr. Ir. Rinaldi Munir, M.T., atas segala bimbingan dan ilmu yang telah diberikan selama masa studi penulis hingga semester enam ini, khususnya pada mata kuliah II4021 Kriptografi, yang sangat berperan penting dalam keberhasilan penyelesaian makalah ini. Selain itu, rasa terima kasih yang mendalam juga penulis sampaikan kepada kedua orang tua atas segala dukungan, doa, dan motivasi yang tidak pernah putus diberikan kepada penulis. Tidak lupa juga terima kasih penulis sampaikan kepada rekan-rekan kelas II4021 Kriptografi 2026 yang telah membantu dan menjadi inspirasi bagi penulis.

REFERENSI

- [1] Z. Ni, Y. Q. Shi, N. Ansari, and W. Su, "Reversible data hiding," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 354-362, Mar. 2006. [Online]. Tersedia di Semantic Scholar: <https://www.semanticscholar.org/paper/Reversible-data-hiding-Ni-Shi/9ac638b129487b688dc8d7f4b6dc2fd15c9e9bd5>
- [2] S. Kumar, et al., "An efficient technique for reversible data hiding using bidirectional histogram shifting and multistage embedding," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 156, p. 110986, 2024. [Online]. Tersedia di ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/395139887_An_efficient_technique_for_reversible_data_hiding_using_bidirectional_histogram_shifting_and_multistage_embedding
- [3] J. -C. Yeh, C. -H. Lin, and C. -M. Wu, "A reversible data hiding method by histogram shifting in high quality medical images," *Journal of Systems and Software*, vol. 86, no. 3, pp. 716-727, Mar. 2013. [Online]. Tersedia di Semantic Scholar: <https://www.semanticscholar.org/paper/Reversible-Data-Hiding-for-Medical-Images-in-Cloud-Li-Chin-Huang/622310f128b310edd3a076b50856a822af7c58d7>
- [4] Y. -C. Chen, et al., "Two-Bit Embedding Histogram-Prediction-Error Based Reversible Data Hiding for Medical Images with Smooth Area," *MDPI Computers*, vol. 10, no. 11, p. 152, Nov. 2021.. [Online]. Tersedia di: <https://www.mdpi.com/2073-431X/10/11/152>
- [5] C. -C. Lin and N. -L. Hsueh, "High capacity lossless data hiding based on histogram modification," *IEICE Electronics Express*, vol. 4, no. 7, pp. 205-210, 2006. [Online]. Tersedia di: https://www.jstage.jst.go.jp/article/elex/4/7/4_7_205/article/-char/ja/
- [6] C. K. Suseela and P. C. Reghu Raj, "A High-Capacity Reversible Data-Hiding Scheme for Medical Image Transmission Using Modified Elias Gamma Encoding," *MDPI Electronics*, vol. 11, no. 19, p. 3101, 2022. [Online]. Tersedia di: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/19/3101>
- [7] Radiology Masterclass, "Normal Chest X-ray - Male," *Radiology Masterclass Gallery*. [Online]. Tersedia di: <https://www.radiologymasterclass.co.uk/gallery/chest/quality/normal-chest-x-ray-male>.
- [8] Centrul de Diagnostic German, "Radiografia Full-Leg diagnostic ortopedic avansat," *CDG Blog*. [Online]. Tersedia di: <https://cdg.md/en/blog/radiografia-full-leg-diagnostic-ortopedic-avansat-cu-multix-impact-siemens>.
- [9] Radiopaedia, "Normal CT Brain," *Radiopaedia Cases*. [Online]. Tersedia di: <https://radiopaedia.org/cases/normal-ct-brain-1>.

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa makalah yang saya tulis ini adalah tulisan saya sendiri, bukan saduran, atau terjemahan dari makalah orang lain, dan bukan plagiasi.

Bandung, 19 Juni 2026

A handwritten signature in black ink, consisting of a long horizontal line followed by stylized cursive letters that appear to be 'A', 'R', 'I', 'A', 'I', 'S', 'M', 'A', 'I', 'L'.

Nawaf Amjad Rizqi A. Ismail
18223073