

STEGANOGRAFI BERBASIS HISTOGRAM DAN PREDICTION-ERROR PADA CITRA AGRIKULTUR

Chaidir Chalaf Islamy¹, Agung Kridoyono²

^{1,2} Teknik Informatika, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya
chaidirc@untag-sby.ac.id

ABSTRAK

Permasalahan utama pada pertanian digital adalah kerentanan data agrikultur terhadap pencurian dan manipulasi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan metode steganografi untuk melindungi data secara tersembunyi dalam citra digital. Metode yang digunakan memadukan prediction-error untuk meningkatkan akurasi prediksi piksel serta histogram shifting untuk mengatur distribusi nilai piksel dalam proses penyisipan. Mekanisme ini memungkinkan penyimpanan data tanpa menimbulkan perubahan visual yang mencolok. Hasil pengujian menunjukkan citra stego memiliki kualitas serupa dengan citra asli dengan nilai PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) konsisten di atas 30 dB. Temuan ini membuktikan efektivitas metode dalam menjaga kualitas citra sekaligus mengamankan data. Kesimpulannya, pendekatan ini mampu menyembunyikan data agrikultur secara aman tanpa menurunkan kualitas citra. Penelitian ini berkontribusi pada peningkatan keamanan sistem informasi pertanian yang berkelanjutan di era digital.

Keyword : *Steganografi, Histogram Shifting, Prediction-Error, Citra*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi digital telah mendorong pemanfaatan data multimedia secara luas di berbagai bidang, termasuk pertanian. Data agrikultur, seperti informasi kondisi tanaman, kebutuhan nutrisi, serta strategi pemupukan, memiliki nilai strategis karena dapat membantu pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam pengelolaan pertanian [1]. Namun, seiring dengan meningkatnya pertukaran data melalui jaringan internet, muncul risiko serius terkait keamanan, kerahasiaan, dan integritas data. Oleh karena itu, perlindungan data agrikultur menjadi isu penting dalam mendukung keberlanjutan sistem informasi pertanian di era digital.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk menjaga keamanan data, di antaranya kriptografi dan steganografi. Kriptografi melindungi data dengan cara enkripsi, tetapi masih menimbulkan kecurigaan karena keberadaan data terenkripsi mudah dikenali sehingga rentan terhadap serangan. Sebaliknya, steganografi menyembunyikan informasi di dalam media digital, seperti teks, gambar [2], video [3], maupun audio [4], sehingga keberadaan data sulit dideteksi. Metode steganografi sering diterapkan di bidang kritis yang membutuhkan kerahasiaan tinggi, seperti kejahatan, medis, dan perlindungan hak cipta. Dalam steganografi citra digital, data disembunyikan ke dalam citra sampul dengan meminimalkan tingkat distorsi. Ukuran data yang disisipkan pada cover image mempengaruhi tingkat deformasi stego image. Secara umum, kualitas stego image berbanding terbalik dengan jumlah data yang disembunyikan pada cover image [5]. Dalam ranah steganografi citra digital, sejumlah metode telah diperkenalkan, misalnya compress-and-append, expansion (EB), dan histogram shifting (HS) [6]. Tian

memperkenalkan metode difference expansion (DE) berbasis EB [7], sementara Thodi dan Rodriguez mengembangkan prediction-error expansion (PEE). Di sisi lain, Ni et al. memperkenalkan HS yang menghasilkan distorsi rendah pada citra stego [8].

Meskipun berbagai metode tersebut telah menunjukkan efektivitas masing-masing, masih terdapat beberapa kendala. Metode berbasis EB seperti DE dan PEE mampu menyediakan kapasitas penyisipan yang besar, tetapi menghasilkan distorsi yang relatif tinggi. Sebaliknya, metode HS menghasilkan distorsi rendah, tetapi kapasitas penyisipannya terbatas. Dengan demikian, terdapat kebutuhan untuk mengembangkan metode yang mampu menyeimbangkan antara kapasitas penyisipan dan kualitas citra stego.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan teknik steganografi berbasis kombinasi prediction-error dan histogram shifting untuk meningkatkan kualitas stego image sekaligus mempertahankan kapasitas penyisipan yang memadai. Keunggulan pendekatan ini terletak pada penggunaan histogram hasil prediction-error tanpa perlu pergeseran berlebihan, sehingga meminimalkan modifikasi histogram. Signifikansi penelitian ini adalah memberikan kontribusi pada pengembangan metode reversible data hiding yang lebih efisien dan aman untuk mendukung perlindungan data, khususnya di bidang agrikultur digital.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Ide untuk menyembunyikan data dengan modifikasi histogram dicetuskan pertama kali oleh [8]. Inti dari metode ini adalah memanfaatkan frekuensi piksel terbanyak (peak) dalam sebuah citra. Secara garis besar, penyisipan data dilakukan dalam tiga langkah. Langkah pertama, temukan piksel peak dan piksel minimum citra sampul. Kemudian kita

sediakan tempat untuk data yang disisipkan dengan menggeser piksel antara piksel peak dan piksel minimum. Penyisipan data dilakukan dengan memodifikasi piksel peak. Piksel peak dipindahkan ke tempat kosong yang telah disediakan. Proses pergeseran piksel dapat diilustrasikan pada persamaan (1).

$$P'_{ij} = \begin{cases} P_{ij} + 1 & \text{if } M + 1 \leq P_{ij} \leq Z - 1 \text{ and } M < Z \\ P_{ij} - 1 & \text{if } Z + 1 \leq P_{ij} \leq M - 1 \text{ and } M > Z \end{cases} \quad (1)$$

Dimana piksel peak adalah M , dan piksel minimum adalah Z , P adalah piksel citra sebelum digeser, P' adalah piksel yang telah digeser, i dan j adalah posisi piksel. Sedangkan proses penyisipan data dapat dideskripsikan pada persamaan (2).

$$P''_{ij} = \begin{cases} P'_{ij} + 1 & \text{if } P'_{ij} = M \text{ and } w(n) = 1, M < Z \\ P'_{ij} - 1 & \text{if } P'_{ij} = M \text{ and } w(n) = 1, M > Z \\ P'_{ij} & \text{if } P'_{ij} = M \text{ and } w(n) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Dimana w merepresentasikan bit data rahasia dengan indeks n dan P''_{ij} adalah piksel yang telah disisipi data. Dapat kita lihat dari kedua ekuasi diatas, kelemahan dari metode ini adalah kapasitas data bergantung frekuensi piksel puncak (M).

Hong et al. mengembangkan metode penyisipan data HS dengan memanfaatkan histogram PE. Sebelum melakukan penyisipan data histogram PE dikalkulasi dengan menggunakan predictor. Predictor yang digunakan adalah Mean Edge Detection (MED) [9]. Proses kalkulasi direpresentasikan menggunakan persamaan (3).

$$D_{ij} = \begin{cases} \min(P_{i,j-1}, P_{i-1,j}) & \text{if } P_{i-1,j-1} \geq \max(P_{i,j-1}, P_{i-1,j}) \\ \max(P_{i,j-1}, P_{i-1,j}) & \text{if } P_{i-1,j-1} \leq \min(P_{i,j-1}, P_{i-1,j}) \\ P_{i,j-1} + P_{i-1,j} - P_{i-1,j-1} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

Dimana D adalah nilai error yang dihasilkan, P adalah piksel citra dan posisi nilai PE dan citra direpresentasikan dengan i dan j . Nilai error yang dimanfaatkan untuk tempat penyisipan adalah 0 dan -1.

Dalam penerapan metode HS terdapat resiko bahwa citra stego dapat terdeteksi adanya data yang disembunyikan. Hal tersebut dapat dideteksi apabila citra dirubah menjadi histogram. Selain itu penggunaan metode HS memiliki kapasitas yang bergantung pada frekuensi piksel peak pada histogram. Oleh karena itu, metode tersebut dimodifikasi untuk menangani kelemahan metode HS [10]. Pada penelitian tersebut, dua tetangga dari piksel puncak digunakan sebagai tempat penyisipan data pada histogram. Adapun proses penyisipan data

dilakukan dengan menggunakan multilayer. Sebelum dilakukan penyisipan data, citra sampul dipisah dalam blok yang tidak saling tumpang tindih dengan ukuran yang telah ditentukan kemudian data disisipkan ke dalam tiap blok tersebut. Setelah data disisipkan kemudian citra yang telah mengandung data tersebut dipisah kembali pada layer setelahnya. Tujuan dari penggunaan multilayer dan pemisahan sampul citra menjadi blok yang tidak saling overlap adalah untuk meningkatkan kapasitas data dan menyamarkan citra stego agar meminimalisir resiko penyerangan terhadap citra stego.

Kemudian, Histogram dan PE dikembangkan dengan memanfaatkan partisi histogram [11]. Metode ini memberikan imperceptibility citra stego yang lebih baik daripada beberapa penelitian sebelumnya. Seperti [10], sebelum fase penyisipan, citra sampul asli diubah menjadi PE. Langkah selanjutnya adalah membangkitkan histogram dari nilai PE dan membaginya menjadi beberapa partisi. Setelah itu, nilai puncak dari setiap partisi dipilih sebagai referensi untuk menyisipkan data. Selanjutnya, lebih banyak puncak dapat digunakan sebagai referensi untuk menyisipkan data, yang mengarah pada peningkatan kapasitas data.

Reversible Extended Secret Image Sharing (RESIS) dikembangkan untuk meningkatkan keamanan data yang disisipkan [12]. Penelitian ini menggunakan metode SS dengan memanfaatkan Chinese Remainder Theorem (CRT) untuk memisah data menjadi bagian-bagian, atau disebut CRT-SS. Untuk menyembunyikan data rahasia pada citra sampul, mereka menggunakan 2 bit LSB. Hasil eksperimen menghasilkan kualitas citra stego yang sangat baik, dan semua citra stego memiliki PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) lebih dari 40 dB.

Kinerja optimal dari HS sangat bergantung pada pemilihan *expansion bin pairs* (EBP) atau pasangan piksel peak dan piksel minimum yang tepat. Namun, proses tersebut seringkali memiliki kompleksitas yang tinggi dan membutuhkan sumber daya komputasi yang besar, terutama ketika melibatkan banyak pasangan *expansion bins*. Tantangan tersebut menjadi fokus utama dalam upaya meningkatkan efisiensi dan performa teknik HS pada penelitian [13]. Hasil dari pendekatan ini menunjukkan bahwa sebagian dari EBP yang optimal dapat diidentifikasi secara langsung tanpa perlu proses komputasi yang rumit. Berdasarkan temuan tersebut, dikembangkanlah sebuah metode yang lebih efisien untuk menemukan EBP yang mendekati optimal dengan biaya komputasi yang minimal.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen kuantitatif yang berfokus pada implementasi dan pengujian metode steganografi berbasis kombinasi prediction-error (PE) dan

histogram shifting (HS). Pendekatan eksperimen digunakan karena penelitian ini menekankan pada pengujian performa metode dalam menyisipkan data rahasia pada citra digital serta mengevaluasi kualitas hasilnya.

3.2. Data Penelitian

Pada penelitian ini, digunakan 5 citra keabu-abuan dan 5 citra tanaman yang digunakan sebagai citra uji coba. Citra keabu-abuan berukuran 512x512 piksel yang kami dapatkan dari [14]. Payload atau data yang disisipkan kedalam citra berupa biner yang dihasilkan menggunakan fungsi MATLAB secara acak. Hasil dari proses pembuatan biner acak tersebut disimpan dan digunakan sebagai payload untuk semua citra yang diuji. Payload yang digunakan bukan dalam bentuk kata-kata atau paragraf tertentu karena pada penelitian ini, hasil yang diamati adalah pengaruh besaran Payload terhadap kualitas citra Stego yang dihasilkan, sehingga dibutuhkan ukuran payload yang presisi.

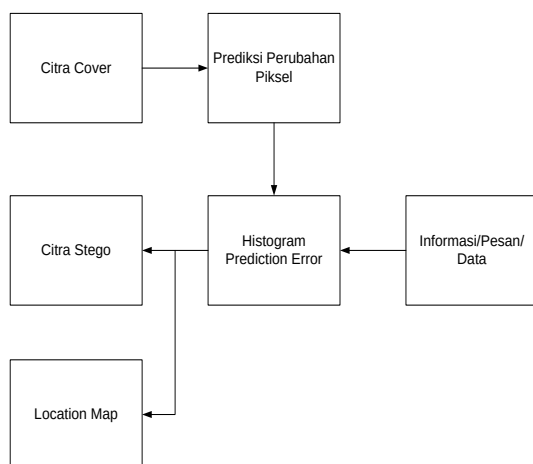
3.3. Teknik dan Alat Analisis

Metode yang digunakan adalah kombinasi prediction-error (PE) dan histogram shifting (HS) [11]. Justifikasi pemilihan metode ini adalah karena:

- Kompleksitas rendah, sehingga efisien secara komputasi.
- Kualitas citra baik, karena modifikasi histogram diminimalkan.
- Kapasitas penyimpanan tinggi, karena dapat memanfaatkan lebih dari satu nilai PE untuk penyisipan data.

Analisis kualitas citra hasil penyisipan dilakukan menggunakan parameter PSNR untuk menilai perbedaan antara citra asli dan citra stego.

3.4. Prosedur Penelitian



Gambar 1. Alur Penyisipan Data

Proses penyisipan data dilakukan dalam dua tahap, pembuatan histogram dan manipulasi histogram. Alur proses penyisipan data dapat dilihat pada Gambar 1. Setiap piksel pada citra cover

diprediksi perubahan nilainya dengan menggunakan predictor. Kemudian dari operasi tersebut dihasilkan nilai PE. Kemudian dibentuk sebuah histogram PE yang disisipi data rahasia.

3.5. Prediction-Error

Sebelum melakukan penyisipan data pada citra cover, histogram PE dibentuk dengan menggunakan MED. Kami menggunakan predictor MED Karena histogram PE yang dihasilkan memiliki distribusi yang merata. Hal tersebut sesuai dengan metode penyisipan yang kami usulkan, karena kami menggunakan nilai PE lebih dari satu. Selain itu, kami juga mencoba menggunakan nilai PE selain nilai 0 karena nilai tersebut merupakan nilai smooth pada citra. Nilai-nilai PE tersebut akan mempengaruhi citra stego apabila penyisipan data dilakukan pada nilai PE tersebut. Sehingga kami lebih memilih histogram PE dengan distribusi lebih merata. Ilustrasi lokasi prediksi dapat dilihat pada gambar 3.3 sedangkan ilustrasi proses prediksi dapat diamati pada gambar 3.4. Prediksi menggunakan MED dihitung dengan menggunakan persamaan (4) dengan $\hat{P}$ adalah nilai hasil prediksi dan $P_{i,j}$ adalah piksel citra cover. Nilai PE dihitung dengan menggunakan persamaan (5).

$$\hat{P}_{i,j} = \begin{cases} \min(P_{i,j-1}, P_{i-1,j}) & \text{if } I_{i-1,j-1} \geq \max(P_{i,j-1}, P_{i-1,j}) \\ \max(P_{i,j-1}, P_{i-1,j}) & \text{if } P_{i-1,j-1} \leq \min(P_{i,j-1}, P_{i-1,j}) \\ P_{i,j-1} + P_{i-1,j} - P_{i-1,j-1} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$D_{i,j} = P_{i,j} - \hat{P}_{i,j} \quad (5)$$

3.6. Penyisipan Data

Untuk meminimalisir modifikasi histogram kami tidak melakukan penggeseran histogram untuk menyediakan tempat penyisipan data. Data rahasia tidak kami letakkan di lokasi yang disediakan sebagai gantinya data rahasia yang hendak kami sisipkan kita letakkan ke nilai PE tetangga. Kapasitas data yang ditampung akan meningkat apabila tiap nilai prediksi dapat menampung lebih dari satu bit data. Data rahasia dipindai dan tiap dua bit data yang berdekatan akan dicek terlebih dahulu dan akan diletakkan di 4 kategori berbeda. Tiap kategori tersebut akan disisipkan kedalam nilai PE yang berbeda. Data rahasia berupa angka biner sehingga terdapat 4 pasang kategori yaitu (1, 1), (0, 0), (0, 1) dan (1, 0).

Kita anggap M adalah nilai PE puncak yang pada umumnya adalah 0. Pada proses pemindaian, jika dua bit yang berdekatan adalah (1, 1) maka nilai PE $M + 3$ akan ditambahkan 1. Proses penambahan nilai PE juga dilakukan pada nilai PE $M + 1$ apabila dua bit yang berdekatan adalah (0, 0). Apabila dua bit yang berdekatan adalah (0, 1) maka nilai PE $M -$

3 akan dikurangi 1. Jika (1, 0) adalah dua bit yang berdekatan proses pengurangan dilakukan pada nilai PE $M - 1$. Dua bit berikutnya akan diperiksa sesuai dengan kondisi yang telah kami sebutkan. Proses tersebut berlangsung hingga semua bit data rahasia telah disisipkan. Jika jumlah bit data rahasia yang disisipkan berjumlah ganjil, maka bit terakhir akan disisipkan ke nilai PE 0. Proses tersebut dapat dideskripsikan pada persamaan (6).

Karena metode kami tidak menggunakan proses shifting sebelum penyisipan data, kami menggunakan Location Map (LM) untuk membantu proses ekstraksi data. Pada proses penyisipan, data LM digunakan untuk menyimpan lokasi bit data yang disisipkan untuk proses ekstraksi data rahasia dan pengembalian citra asli. Kekurangan penggunaan LM adalah data tidak dapat diekstrak tanpa menggunakan LM, namun hal tersebut dapat membuat LM berfungsi sebagai kunci untuk ekstraksi citra stego dan membuatnya menjadi lebih aman. LM digunakan dalam bentuk vektor, lokasi sumbu x disimpan di vektor $x(n)$ dan sumbu y di vektor $y(n)$, dengan n adalah indeks data rahasia. Lokasi nilai PE disimpan dengan menggunakan persamaan (7) dan (8).

$$D'_{i,j} = \begin{cases} D_{i,j} + 1 & \text{if } D_{i,j} = M + 3 \text{ and } w(n) = 1 \text{ and } w(n+1) = 1 \\ & \text{or } D_{i,j} = M + 1 \text{ and } w(n) = 0 \text{ and } w(n+1) = 0 \\ D_{i,j} - 1 & \text{if } D_{i,j} = M - 3 \text{ and } w(n) = 0 \text{ and } w(n+1) = 1 \\ & \text{or } D_{i,j} = M - 1 \text{ and } w(n) = 1 \text{ and } w(n+1) = 0 \\ D_{i,j} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$x(n) = i \quad (7)$$

$$y(n) = j \quad (8)$$

Untuk data rahasia dengan jumlah bit ganjil, jika bit rahasia terakhir adalah 0 maka nilai PE M dikurangi satu. Jika bit terakhir adalah 1 maka nilai PE M ditambah satu. Penyisipan data pada bit terakhir dapat dideskripsikan dengan persamaan (9). Lokasi nilai prediksi juga disimpan menggunakan persamaan (7) dan (8).

$$D'_{i,j} = \begin{cases} D_{i,j} + 1 & \text{if } D_{i,j} = M \text{ and } w(n) = 1 \\ D_{i,j} - 0 & \text{if } D_{i,j} = M \text{ and } w(n) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Setelah modifikasi histogram PE dilakukan, nilai PE dimodifikasi menggunakan persamaan (10).

$$P'_{i,j} = \hat{P}_{i,j} - D'_{i,j} \quad (10)$$

3.7. Ekstraksi Data dan Pengembalian Citra Cover

Proses ekstraksi dilakukan untuk memperoleh data yang disisipkan ke dalam citra. Langkah pertama dalam proses ekstraksi data dengan merubah citra stego ke nilai PE yang telah disisipi data dengan menggunakan persamaan (11).

$$D'_{i,j} = \hat{P}_{i,j} - P'_{i,j} \quad (11)$$

Pindai citra prediksi jika menemukan nilai PE $M + 4$ dan lokasi nilai PE sesuai dengan $x(n)$ dan $y(n)$, maka untuk mengembalikan nilai PE ke keadaan sebelum modifikasi, piksel tersebut dikurangi 1. Bit rahasia $w(n)$ dan $w(n+1)$ yang diekstraksi adalah (1,1). Bit rahasia yang diekstraksi bergantung kepada nilai PE yang ditemukan, $M + 2$ untuk (0,0), $M - 2$ untuk (1, 0) dan $M - 4$ untuk (0, 1). Deskripsi langkah tersebut dapat dilihat pada persamaan (12), (13) dan (14).

$$D_{i,j} = \begin{cases} D'_{i,j} - 1 & \text{if } D'_{i,j} = M + 4 \text{ or } D'_{i,j} = M + 2 \\ D'_{i,j} + 1 & \text{if } D'_{i,j} = M - 4 \text{ or } D'_{i,j} = M - 2 \end{cases} \quad (12)$$

$$w(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } D'_{i,j} = M + 4 \text{ and } x(n) = i \text{ and } y(n) = j \text{ or} \\ & D'_{i,j} = M - 2 \text{ and } x(n) = i \text{ and } y(n) = j \\ 0 & \text{if } D'_{i,j} = M + 2 \text{ and } x(n) = i \text{ and } y(n) = j \text{ or} \\ & D'_{i,j} = M - 4 \text{ and } x(n) = i \text{ and } y(n) = j \end{cases} \quad (13)$$

$$w(n+1) = \begin{cases} 1 & \text{if } D'_{i,j} = M + 4 \text{ and } x(n) = i \text{ and } y(n) = j \text{ or} \\ & D'_{i,j} = M - 4 \text{ and } x(n) = i \text{ and } y(n) = j \\ 0 & \text{if } D'_{i,j} = M + 2 \text{ and } x(n) = i \text{ and } y(n) = j \text{ or} \\ & D'_{i,j} = M - 2 \text{ and } x(n) = i \text{ and } y(n) = j \end{cases} \quad (14)$$

Jika jumlah bit rahasia adalah ganjil maka lokasi bit rahasia terakhir ada pada $M - 1$ untuk bit 0 dan $M + 1$ untuk bit 1. Untuk mengembalikan nilai PE ke kondisi semula digunakan persamaan (15). Sedangkan ekstraksi bit rahasia dideskripsikan menggunakan persamaan (15).

$$D_{i,j} = \begin{cases} D'_{i,j} - 1 & \text{if } D'_{i,j} = M + 1 \\ D'_{i,j} + 1 & \text{if } D'_{i,j} = M - 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$w(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } D'_{i,j} = M + 1 \text{ and } x(n) = i \text{ and } y(n) = j \\ 0 & \text{if } D'_{i,j} = M - 1 \text{ and } x(n) = i \text{ and } y(n) = j \end{cases} \quad (16)$$

Setelah proses ekstraksi data dan pengembalian nilai PE, citra cover didapatkan dengan menggunakan persamaan (17).

$$P_{i,j} = \hat{P}_{i,j} + D_{i,j} \quad (17)$$

3.8. Analisis Data

Hasil citra stego dibandingkan dengan citra asli menggunakan PSNR. Nilai PSNR di atas 30 dB menunjukkan kualitas citra hasil penyisipan masih sangat baik dan sulit dibedakan secara visual dari citra aslinya. Analisis ini digunakan untuk membuktikan bahwa metode yang diusulkan mampu menyeimbangkan antara kapasitas penyisipan dan kualitas citra.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah proses ekstraksi, penting untuk memastikan data yang diekstrak dari citra stego identik dengan data asli sebelum disisipkan ke dalam citra. Jika data yang diekstrak identik maka metode yang digunakan bekerja dengan baik dan dapat dipercaya. Pada bab ini kinerja metode yang diusulkan dievaluasi dengan mengukur level distorsi yang dihasilkan oleh citra stego dan berapa banyak data yang dapat disematkan. Hasil dari eksperimen kami sajikan dalam bentuk tabel. Selain itu, untuk memperjelas hasil eksperimen kami menggunakan grafik dan gambar.

4.1. Lingkungan Pengujian

Pada lingkungan pengujian, kami menggunakan MATLAB sebagai compiler untuk mengimplementasi algoritma yang telah kami buat. MATLAB memiliki banyak fungsi dan fitur yang menunjang pengujian yang kami lakukan. Semua eksperimen dilakukan dengan menggunakan PC yang memiliki spesifikasi: Windows 11 Home 64-bit, AMD Ryzen 5 3600 6 Cores 12 Threads CPU @3.6 GHz, Nvidia RTX 3060 Ti GPU dan dengan kapasitas penyimpanan SSD 1TB.

4.2. Skenario Pengujian

Kami menggunakan beberapa skenario dalam pengujian untuk mengamati perubahan yang terjadi pada citra yang diujikan. Terdapat tiga skenario pengujian yaitu dua skenario pengujian kualitas citra pada citra medis dan non medis dan skenario pengujian kapasitas maksimal.

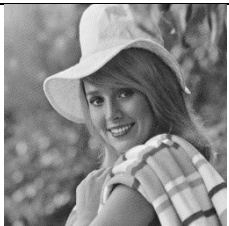
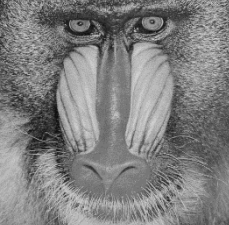
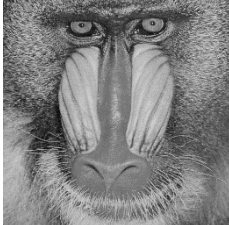
Tabel 1. Hasil PSNR Metode yang Diusulkan Pada Citra Keabu-abuan

Citra	Metode yang diusulkan	
	Payload (Kb)	PSNR (dB)
Baboon	5	68.34
	10	65.33
	15	63.57
	20	62.32
Lena	5	67.26
	10	64.98
	15	62.69
	20	61.72
Pepper	5	67.66
	10	65.40
	15	64.13
	20	62.77
Elaine	5	67.00
	10	65.78
	15	63.53
	20	62.22
Boat	5	67,03
	10	65,79
	15	63.26
	20	62.02

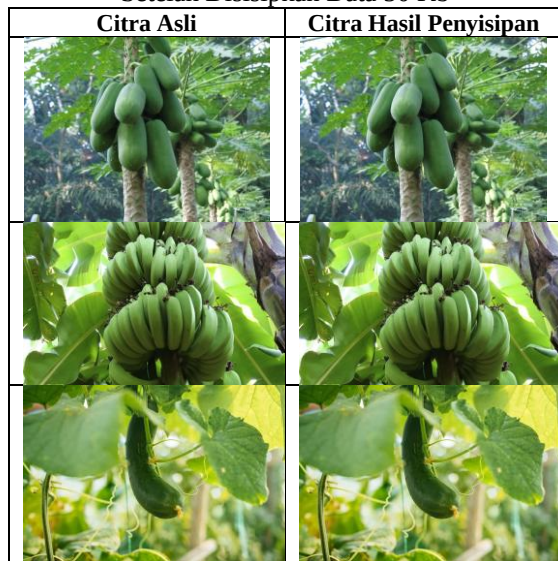
Tabel 2. Hasil PSNR Metode yang Diusulkan Pada Citra Tanaman

Citra	Metode yang diusulkan	
	Payload (Kb)	PSNR (dB)
Papaya	4	69.75
	8	66.60
	12	64.76
	16	62.47
Banana	4	69.31
	8	66.30
	12	64.53
	16	63.29
Cucumber	4	69.42
	8	66.41
	12	64.72
	16	63.47
Tomato	4	69.83
	8	66.74
	12	64.96
	16	63.68
Sugarcane	4	69.33
	8	66.31
	12	64.55
	16	63.40

Tabel 3. Perbandingan Antara Citra Asli dan Citra Hasil Penyisipan Data Rahasia Pada Citra Keabu-abuan Setelah Disisipkan Data 50 Kb

Citra Asli	Citra Hasil Penyisipan
	
	
	

Tabel 4. Perbandingan Antara Citra Asli dan Citra Hasil Penyisipan Data Rahasia Pada Citra Tanaman Setelah Disisipkan Data 50 Kb



4.3. Skenario Pertama

Skenario pertama adalah pengujian metode pada citra keabu-abuan. Terdapat lima data rahasia yang digunakan pada pengujian citra non medis, yaitu data rahasia berukuran 20 Kb, 30 Kb, 40 Kb dan 50 Kb. Tujuan dari skenario ini untuk mengetahui bagaimana kualitas stego yang dihasilkan pada metode. Selain itu pengujian ini juga mengetahui perubahan kualitas citra stego seiring dengan bertambahnya ukuran data rahasia yang disembunyikan. Perubahan yang diamati adalah besar kecilnya penurunan kualitas citra stego, apakah metode yang diujikan mampu mempertahankan kualitas citra stego atau semakin bertambah kapasitas data rahasia semakin signifikan penurunan kualitas citra.

4.4. Skenario Kedua

Pada skenario kedua kami menguji ketiga metode tersebut pada citra tanaman. Data rahasia yang digunakan pada pengujian citra non medis adalah 20 Kb, 30 Kb, 40 Kb dan 50 Kb. Tujuan skenario ini juga sama dengan skenario pertama, yaitu untuk membandingkan kualitas citra stego dan mengetahui besar degradasi kualitas yang terjadi.

4.5. Hasil dan Pembahasan

Hasil eksperimen pada skenario pertama ditunjukkan pada Tabel 1 dan skenario kedua ditunjukkan pada Tabel 2. Dari hasil pengujian pada kedua skenario tersebut dapat kita lihat bahwa metode kami memiliki nilai PSNR yang lebih tinggi 30 dB. Untuk mengamati perubahan yang dihasilkan oleh citra stego, Tabel 3 memperlihatkan perbandingan citra asli non medis beserta dengan citra stego dan Tabel 4 menunjukkan perbandingan citra asli tanaman dan citra stego. Pada tabel 3 dan Tabel 4 citra stego yang dibandingkan telah

disisipkan data rahasia 50 Kb. Pada kedua tabel tersebut citra stego yang dihasilkan sulit dibedakan dengan citra asli, ini berarti metode yang kami usulkan mampu mempertahankan kualitas citra stego yang dihasilkan dalam hal perseptibilitas. Untuk mengetahui secara pasti kemiripan citra stego, Tabel 1 dan 2 menunjukkan secara keseluruhan dari semua citra yang diujikan, metode yang diusulkan mampu meningkatkan kualitas citra stego. Pada kedua tabel tersebut juga dapat diamati, bahwa semakin besar data yang disembunyikan akan berdampak kepada menurunnya kualitas citra stego yang dihasilkan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini telah mengembangkan metode steganografi berbasis kombinasi prediction-error (PE) dan histogram shifting (HS) untuk menyembunyikan data dalam citra digital. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu menjaga kualitas citra stego dengan nilai PSNR di atas 30 dB, sehingga data dapat disisipkan secara tersembunyi tanpa menimbulkan perbedaan visual yang signifikan. Temuan ini sekaligus menjawab tantangan utama dalam steganografi, yaitu menyeimbangkan antara kapasitas penyisipan data dan kualitas citra.

Kontribusi penelitian ini adalah menawarkan pendekatan penyisipan data yang lebih efisien dengan memanfaatkan histogram PE tanpa pergeseran berlebihan, sehingga mampu mengurangi distorsi pada citra sekaligus menyediakan kapasitas penyimpanan relatif besar. Secara praktis, metode ini dapat diaplikasikan dalam perlindungan data digital yang membutuhkan keamanan tinggi, termasuk data agrikultur yang sensitif.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada kapasitas maksimum data yang dapat disisipkan, yang belum optimal untuk kebutuhan skala besar.

Sebagai rekomendasi, penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada peningkatan kapasitas penyisipan data dengan cara memanfaatkan lebih banyak bit pada nilai PE atau mengombinasikan metode ini dengan teknik kompresi. Selain itu, pengujian dapat diperluas pada berbagai jenis citra dan skenario aplikasi dunia nyata, sehingga efektivitas metode dapat lebih terukur dan aplikatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Andrianto, Suhardi, A. Faizal, N. Budi Kurniawan, and D. Praja Purwa Aji, "Performance evaluation of IoT-based service system for monitoring nutritional deficiencies in plants," *Inf. Process. Agric.*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.10.001>.
- [2] Y. Wang, G. Xiong, and W. He, "High-capacity reversible data hiding in encrypted images based on pixel-value-ordering and

- histogram shifting,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 211, p. 118600, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118600>.
- [3] C.-T. Huang, J.-X. Song, and T. T.-H. Dang, “Hybrid prediction error and histogram shifting method for reversible data hiding in video system,” *J. Inf. Secur. Appl.*, vol. 89, p. 104007, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2025.104007>.
- [4] J. Wang and K. Wang, “A novel audio steganography based on the segmentation of the foreground and background of audio,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 123, p. 110026, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.110026>.
- [5] M. Hussain, A. W. A. Wahab, Y. I. Bin Idris, A. T. S. Ho, and K.-H. Jung, “Image steganography in spatial domain: A survey,” *Signal Process. Image Commun.*, vol. 65, pp. 46–66, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.image.2018.03.012>.
- [6] I. J. Kadhim, P. Premaratne, P. J. Vial, and B. Halloran, “Comprehensive survey of image steganography: Techniques, Evaluations, and trends in future research,” *Neurocomputing*, vol. 335, pp. 299–326, 2019, doi: [10.1016/j.neucom.2018.06.075](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.06.075).
- [7] J. Tian, “Reversible Data Embedding Using a Difference Expansion,” *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 13, no. 8, pp. 890–896, 2003, doi: [10.1109/TCSVT.2003.815962](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2003.815962).
- [8] Z. Ni, Y. Q. Shi, N. Ansari, and W. Su, “Reversible data hiding,” *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 354–362, 2006, doi: [10.1109/TCSVT.2006.869964](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2006.869964).
- [9] M. J. Weinberger, G. Seroussi, and G. Sapiro, “The LOCO-I lossless image compression algorithm: principles and standardization into JPEG-LS,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 9, no. 8, pp. 1309–1324, 2000, doi: [10.1109/83.855427](https://doi.org/10.1109/83.855427).
- [10] Z. Pan, S. Hu, X. Ma, and L. Wang, “Reversible data hiding based on local histogram shifting with multilayer embedding,” *J. Vis. Commun. Image Represent.*, vol. 31, pp. 64–74, 2015, doi: [10.1016/j.jvcir.2015.05.005](https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2015.05.005).
- [11] C. C. Islamy and T. Ahmad, “Enhancing Quality of the Stego Image by Using Histogram Partition and Prediction Error,” *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 511–520, 2021, doi: [10.22266/ijies2021.0430.46](https://doi.org/10.22266/ijies2021.0430.46).
- [12] K. Meng, F. Miao, Y. Xiong, and C. C. Chang, “A reversible extended secret image sharing scheme based on Chinese remainder theorem,” *Signal Process. Image Commun.*, vol. 95, p. 116221, 2021, doi: [10.1016/j.image.2021.116221](https://doi.org/10.1016/j.image.2021.116221).
- [13] M. Xiao, X. Li, W. Lu, and Y. Zhao, “Histogram shifting based reversible data hiding with multiple expansion bin pairs,” *Displays*, vol. 83, p. 102674, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.displa.2024.102674>.
- [14] USC-SIPI, “SIPI Image Database.” Accessed: Mar. 01, 2021. [Online]. Available: <http://sipi.usc.edu/database/database.php?volume=misc>