

# Penyisipan *Handwriting Signature* Pada Karya Seni Digital Menggunakan Metode Steganografi *LSB Matching Revisited dan Huffman Coding*

Putu Arya Dharma Kesuma<sup>a1</sup>, I Ketut Gede Suhartana<sup>a2</sup>,  
I Gusti Agung Gede Arya Kadyanan<sup>a3</sup>, I Gusti Ngurah Anom Cahyadi Putra<sup>a4</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Informatika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas  
Udayana, Indonesia

<sup>1</sup>kesuma.2208561112@student.unud.ac.id

<sup>2</sup>ikg.suhartana@unud.ac.id

<sup>3</sup>gungde@unud.ac.id

<sup>4</sup>anom.cp@unud.ac.id

## Abstrak

Perlindungan hak cipta pada karya seni digital merupakan hal yang krusial. Penelitian ini bertujuan melindungi hak cipta karya seni digital melalui penyisipan handwriting signature menggunakan metode steganografi Least Significant Bit Matching Revisited (LSBMR) dan Huffman Coding. Informasi yang bertindak sebagai invisible watermark merupakan citra Handwriting signature dengan format PNG; citra cover memiliki dimensi 3000 x 3000 piksel. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa seluruh citra stegano melampaui batas bawah Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) sebesar 30 dB. Kualitas tertinggi dicapai oleh citra RGBA dengan nilai PSNR 79.34 dan Mean Square Error (MSE) terendah 0.0008. Sebaliknya, citra Grayscale menghasilkan PSNR terendah (73.39 dB) dan MSE tertinggi (0.0030), namun angka ini membuktikan citra tetap mampu mempertahankan kualitas visualnya dengan sangat baik. Adapun citra RGB dan Blue Monochromic memperoleh hasil yang identik (PSNR 78.09 dB ; MSE 0.0010). Proses ekstraksi juga berhasil mengembalikan citra tanda tangan secara sempurna tanpa kerusakan sedikitpun dengan nilai Bit Error Ratio sebesar 0.

**Kata Kunci** : Karya Seni Digital, Hak Cipta, Steganografi, *Handwriting signature*, *LSBMR*, *Huffman Coding*

## 1. Introduction

Karya seni digital mulai diakui oleh dunia, berdasarkan *The Art Basel and UBS Survey of Global Collecting 2025* yang melibatkan 3,100 *High-net-worth individuals*, karya seni digital menempati peringkat ketiga dalam total pengeluaran kolektor tepat setelah patung dan lukisan. Tercatat 51% responden membeli karya seni digital pada periode 2024-2025. Rata-rata kepemilikan karya seni digital dalam koleksi mereka meningkat drastis dari 3% menjadi 13%, mendekati angka puncak yaitu 15% yang pernah terjadi saat fenomena *NFT (Non-Fungible Token)* [1].

Dengan perkembangan minat pada karya seni digital, pelanggaran hak cipta tentunya menjadi masalah yang serius, salah satu contohnya yaitu kasus *Twisted Vacancy* melakukan pelanggaran hak cipta atas karya seni digital Kendra Ahimsa, *Twisted* memperjualkan karya seni digital dengan menggunakan karakteristik visual Kendra Ahimsa [2]. Maka dari itu diperlukan perlindungan hak cipta karya seni digital. Salah satu cara yang dapat dilakukan yaitu dengan menyisipkan identitas pada citra asli dari karya seni digital tersebut. *Citra Handwriting signature* merupakan biometrik yang memiliki korelasi tinggi dengan pemilikinya [3]. Sebagai karakteristik biometrik, tanda tangan memegang peranan vital dalam verifikasi identitas, khususnya pada sektor legal dan administratif [4]. Maka dari itu menjadikan citra *handwriting signature* menjadi pilihan ideal untuk perlindungan hak cipta karya seni digital.

*LSB Matching Revisited (LSBMR)*, memungkinkan penyisipan dua bit pesan dalam dua piksel dengan peluang modifikasi yang lebih kecil, sehingga distorsi dapat diminimalkan. Namun, kualitas citra stegano pada *LSBMR* tetap bergantung *trade-off* antara kapasitas dan kualitas visual; semakin

banyak bit yang disisipkan maka semakin menurun kualitas dari citra stegano [5]. Oleh karena itu diperlukan strategi sehingga bit citra *Handwriting Signature* dapat meminimalkan.

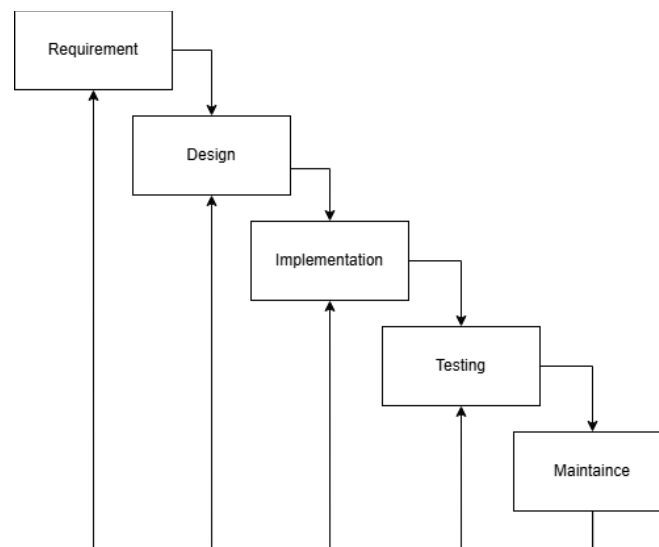
Dalam penelitian, Huffman coding digunakan sebagai tahap *preprocessing* untuk kompresi citra *Handwriting Signature*. *Huffman Coding* merupakan teknik kompresi lossless, teknik ini memanfaatkan frekuensi kemunculan karakter untuk membangun struktur *Huffman Tree* dengan bit optimal [6]. Dengan mengurangi payload *Handwriting signature*, penggunaan huffman coding bertujuan untuk mendukung proses penyisipan menggunakan LSBMR, sehingga kualitas visual citra karya seni digital tetap terjaga [7].

Penelitian ini bertujuan untuk menyisipkan identitas berupa *Handwriting Signature* dengan menggunakan metode steganografi *LSB Matching Revisited* dan *Huffman Coding*, dengan tujuan mempertahankan tingkat *imperceptibility* dari citra tersebut. *Handwriting signature* dipilih sebagai identitas dikarenakan memiliki korelasi tinggi dengan pemiliknya

## 2. Metode Penelitian.

### 2.1. Waterfall.

Pengembangan sistem dilakukan menggunakan metode *waterfall*. Metode *waterfall* merupakan *framework* pengembangan perangkat lunak yang memiliki pendekatan berurutan. Metode ini sangat cocok dengan sebuah proyek dengan kebutuhan yang sudah ditentukan secara detail. Dalam metode ini, terbagi menjadi lima tahapan yaitu *requirement*, *design*, *implementation*, *testing* dan *system maintenance* [8].



Gambar 1. Waterfall.

- Requirement.  
Pada tahapan ini dilakukan analisa kebutuhan sistem yang akan dikembangkan, mencakup kebutuhan fungsionalitas, kebutuhan non-fungsionalitas dan data yang digunakan.
- Design.  
Pada tahapan ini dilakukan pembuatan desain rancangan sistem yang akan dibuat dengan menggunakan *Unified modeling language* (UML), UML terdiri dari use case diagram, activity diagram, sequence diagram, flowchart dan rancangan antarmuka sistem yang akan dibangun.
- Implementation.  
Pada tahapan ini merupakan penerjemahan dari *flow* program yang telah dirancang sebelumnya ke dalam bahasa pemrograman. Tahapan ini berfokus pada realisasi dari tahapan *requirement* dan *design* yang sudah dilakukan sehingga menghasilkan sebuah sistem. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah Python.
- Testing.  
Pada tahapan ini dilakukan pengujian fungsionalitas dari fungsi yang tersedia pada sistem setelah berhasil dikembangkan. Pengujian dilakukan menggunakan pengujian black-box yang bertujuan evaluasi fungsi dari sistem yang telah dibuat.
- Maintenance.

Pada tahapan ini merupakan proses pemeliharaan (maintenance) yang meliputi perbaikan error yang didapati pada tahapan *Testing*.

**2.2. Analisis Kebutuhan.**

a. Kebutuhan Fungsional.

Kebutuhan fungsional mencakup input, output, fitur atau fungsi apa saja yang harus disediakan oleh sistem itu sendiri [9]. Kebutuhan Fungsional dalam sistem ini mencakup penyisipan, ekstraksi dan download, lebih lanjut sebagai berikut :

**Tabel 1.** Kebutuhan Fungsional.

No.	Kebutuhan Fungsionalitas sistem
KF1	Sistem yang dibangun dapat menampilkan halaman yang menyediakan fungsi-fungsi yang tersedia pada sistem.
KF2	Sistem mampu menerima input file image dalam format *PNG.
KF3	Sistem mampu menghasilkan file hasil penyisipan (Citra stegano).
KF4	Sistem mampu menghasilkan file hasil ekstraksi (Citra extracted signature).
KF5	Sistem mampu melakukan pengunduhan file hasil penyisipan.
KF6	Sistem mampu melakukan pengunduhan file hasil ekstraksi.

b. Kebutuhan Non-Fungsional.

Kebutuhan non-fungsional adalah kebutuhan yang berada di luar aspek fungsionalitas, hal ini mencakup tentang komponen pendukung yang digunakan pada penelitian ini seperti hardware dan software. Kebutuhan non fungsional sebagai berikut:

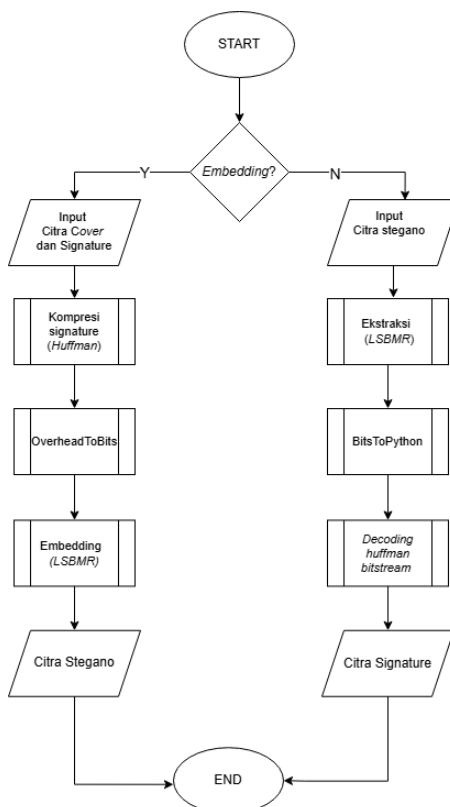
**Tabel 2.** Spesifikasi hardware.

No	Perangkat	Keterangan
1	Laptop	Lenovo Legion 5 15ACH6
2	Monitor	15.6 inch
3	Ram	16gb
4	SSD	512gb

**Tabel 3.** Spesifikasi Software.

No	Perangkat	Keterangan
1	Sistem Operasi	Windows 11
2	IDE	VScode
3	Bahasa	Python

### 2.3. Desain Sistem.



Gambar 2. Gambaran Umum sistem.

Saat Pertama kali user membuka program user akan diberikan pilihan apakah ingin melakukan penyisipan tanda tangan ataupun ekstraksi tanda tangan, ketika user memilih salah satu dari pilihan tersebut program akan menjalankan perintah sesuai dengan pilihan user, alur keseluruhan dapat dilihat pada gambar 2.

### 2.4. Data.

Data penelitian merupakan citra karya seni digital dengan format \*.PNG ; 4 variasi citra (*Grayscale*, *RGB*, *RGBA* dan *Blue monokrom*), Masing-masing kategori memiliki 60 varian citra dengan total keseluruhan mencapai 240 total data uji. Data payload merupakan citra handwriting signature grayscale dengan dimensi 100 x 200 ; berjumlah 1 data payload. Data uji diambil dari data yang sudah ada; data diambil dari website unsplash dengan keyword “Digital Art” ; kategori “Free License” ; orientasi Square. Data akan dikumpulkan secara manual dari sumber yang telah disebutkan sampai mencapai data jumlah yang ditentukan (60).

### 2.5. Preprocessing Data.

#### 2.5.1. Color Transformation.

Pada tahap ini dilakukan transformasi dari citra RGB menjadi 3 representasi berbeda, yaitu *Grayscale*, *RGBA*, dan *Blue Monochrome*. *Transformasi Grayscale* dilakukan dengan metode *luminosity* [10]. Konversi ke mode *RGBA* dilakukan dengan penambahan channel ke-empat yaitu alpha channel [11]. Sementara itu, Pembuatan citra *blue monochrome* dilakukan dengan cara isolasi chanel *blue*, channel *Red* dan *Green* akan diubah nilainya menjadi 0, sehingga menciptakan citra *Blue monochrome* [12]. Ketiga transformasi ini diterapkan pada citra yang sama guna memastikan konsistensi data dalam proses analisis perbandingan.

### 2.6. Evaluasi.

#### 2.6.1. Black-box testing.

Black box testing pada penelitian ini digunakan untuk menguji fungsionalitas dari sistem yang telah selesai dikembangkan dengan pendekatan demonstrasi setiap fitur yang sudah ditentukan pada kebutuhan fungsional. Tujuan dari pengujian ini adalah memastikan bahwa fungsi utama sistem sudah tersedia pada aplikasi.

**2.6.2. Compression Ratio.**

Compression Ratio (CR) adalah metrik pendukung untuk mengukur seberapa optimal ukuran citra handwriting signature dapat diperkecil. Semakin tinggi nilai CR, semakin besar tingkat kompresi maka semakin banyak tempat penyisipan yang dihemat [13].

$$CR = 100\% - \left( \frac{\text{Jumlahbitsetelahkompresi}}{\text{Jumlahbitsebelumkompresi}} \times 100\% \right) \quad (1)$$

**2.6.3. Mean Square Error.**

Mean Square Error (MSE) merupakan nilai yang digunakan untuk mengukur perubahan yang terjadi pada citra stegano, jika nilai MSE mendekati 0 maka semakin kecil perubahan yang terjadi pada gambar [14]. Berikut persamaan dari nilai MSE :

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

**2.6.4. Peak Signal Noise to Ratio.**

Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) merupakan nilai digunakan untuk evaluasi tingkat kualitas gambar, nilai PSNR yang tinggi, umumnya diatas 40 dB menunjukkan bahwa perbedaan visual antara citra asli dan stegano sangat kecil [6]. Berikut persamaan dari nilai PSNR

$$10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE} \quad (3)$$

**2.6.5. Bit Error Ratio.**

Matrik yang digunakan untuk mengukur kesesuaian hasil ekstraksi *Handwriting Signature* adalah *Bit Error Ratio (BER)* [15]. Semakin kecil nilai BER maka semakin mirip citra stegano dengan citra original, ketika nilai BER adalah 0 maka tidak ada perubahan yang terjadi pada citra.

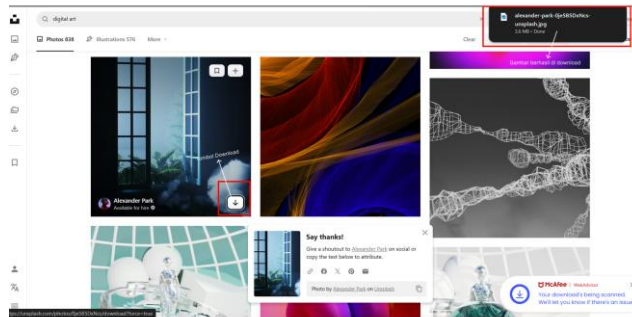
$$BER = \frac{\text{Jumlahbittidaksesuai}}{\text{Jumlahtotalbit}} \quad (4)$$

**3. Hasil dan Pembahasan.**

**3.1. Pengumpulan Data.**




**Gambar 3.** Spesifikasi Data



**Gambar 4** Proses pengumpulan citra karya seni.

Dapat dilihat pada gambar 3 dan 4 merupakan spesifikasi dan proses pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini, data menggunakan keyword “Digital Art”; Free License dan Orientasi Square; Penggunaan keyword tersebut digunakan agar gambar yang akan muncul kemudian nantinya akan didownload merupakan sebuah citra karya seni digital.

**Tabel 4.** Sampel Data Citra Karya Seni Digital.

No	Nama File	Gambar	Color mode	Format
1	citra_cover1		RGB	PNG

2	citra_cover2		RGB	PNG
3	citra_cover3		RGB	PNG

### 3.2. Preprocessing Data.





#### 3.2.1. Color Transformation.

Dapat dilihat pada tabel 5 merupakan proses yang dilakukan untuk mengubah citra *RGB* menjadi citra *Grayscale*, *RGBA* dan *Blue Monochrome*. Citra *RGB* diubah menjadi citra *grayscale* dengan metode *Luminosity*, metode tersebut memberikan bobot setiap channelnya dan kemudian dijumlahkan untuk merepresentasikan 1 piksel. Pada perubahan citra *RGB* menjadi *RGBA* dilakukan dengan cara menambahkan 1 channel tambahan yaitu channel alpha, seluruh *channel* pada *alpha channel* di set sebagai 255. Untuk menghasilkan citra *blue monochrome* selain *blue channel* maka seluruh piksel pada *channel* tersebut akan diberikan nilai 0, dengan demikian citra *Blue Monochrome* didapatkan.

**Tabel 5** Implementasi Code *Color Transformation*.

Kode Program
<pre>img_grayscale = img_pil.convert("L")  # Konversi Ke RGBA &amp; Blue Monokrom menggunakan NumPy img_np = np.array(img_pil) tinggi, lebar, _ = img_np.shape  # Pembuatan RGBA A_channel = np.ones((tinggi, lebar), dtype=np.uint8) * 255 rgba_np = np.dstack([img_np[:, :, 0], img_np[:, :, 1], img_np[:, :, 2], A_channel]) img_rgba = Image.fromarray(rgba_np, mode="RGBA")  # Pembuatan Blue Monokrom zero_channel = np.zeros((tinggi, lebar), dtype=np.uint8) blue_monokrom_np = np.dstack([zero_channel, zero_channel, img_np[:, :, 2]]) img_blue_monokrom = Image.fromarray(blue_monokrom_np, mode="RGB")</pre>

**Tabel 6.** Hasil *Color Transformation*.

<i>Grayscale</i>	<i>RGB</i>	<i>Blue Monochrome</i>	<i>RGBA</i>	Format
				PNG
1 Channel	3 Channel	3 Channel	4 Channel	

Tabel 6 merupakan sampel citra yang telah melewati proses *Color Transformation* terdiri dari citra *Grayscale*, *RGB*, *Blue Monochrome* dan citra *RGBA*.

**3.3. Evaluasi.**

**3.3.1. Black-box testing.**

**Tabel 7.** Pengujian *Black-Box*

Harapan	Kesimpulan
Menampilkan halaman yang menyediakan fungsi embedding dan ekstraksi.	Sesuai
Mampu menerima input image dalam format *PNG.	Sesuai
Mampu menghasilkan file citra stegano.	Sesuai
Mampu menghasilkan file <i>extracted signature</i> .	Sesuai
Mampu melakukan pengunduhan file citra stegano.	Sesuai
Mampu melakukan pengunduhan citra <i>extracted signature</i>	Sesuai

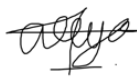
Seluruh pengujian black box berjalan dengan sesuai kebutuhan fungsional, yang artinya program berhasil memenuhi kebutuhan fungsional yang telah ditetapkan sebelumnya, dengan demikian program telah berhasil dibuat dengan fungsi-fungsi penting yang telah direncanakan.

**3.3.2. Compression Ratio.**

**Tabel 8.** Pengujian *Compression Ratio*.

Code Program
<pre> jumlahbit_sebelumKompresi = (signatureHeight * signatureWidth) * 8 jumlahbit_setelahKompresi = len(HuffmanBitstream)  Compression_ratio = 1 - (jumlahbit_setelahKompresi / jumlahbit_sebelumKompresi)  print("sebelum kompresi : ", + jumlahbit_sebelumKompresi) print("setelah kompresi : ", + jumlahbit_setelahKompresi) print(f"Persentase penghematan : {Compression_ratio:.2f}")                     </pre>

**Tabel 9.** Hasil Kompresi Signature.

Signature	Ukuran sebelum kompresi (bit)	Ukuran setelah Kompresi (bit)	<i>Compression Ratio</i>
	160000	33744	79%

Berdasarkan tabel 9 Huffman Coding mendapatkan nilai kompresi yang sangat tinggi yaitu 79% pada skenario yang telah dijalankan, dengan tingginya nilai kompresi maka semakin kecil juga pesan yang perlu disisipkan, maka dari itu *huffman coding* turut berpartisipasi dalam meningkatkan kualitas citra steganografi dikarenakan menekan ukuran payload yang harus disisipkan bahkan sampai 79% yang nantinya berpengaruh pada kerusakan yang terjadi pada citra.

### 3.3.3. Mean Square Error dan Peak Signal to Ratio.

**Tabel 10.** Pengujian *MSE* dan *PSNR*.

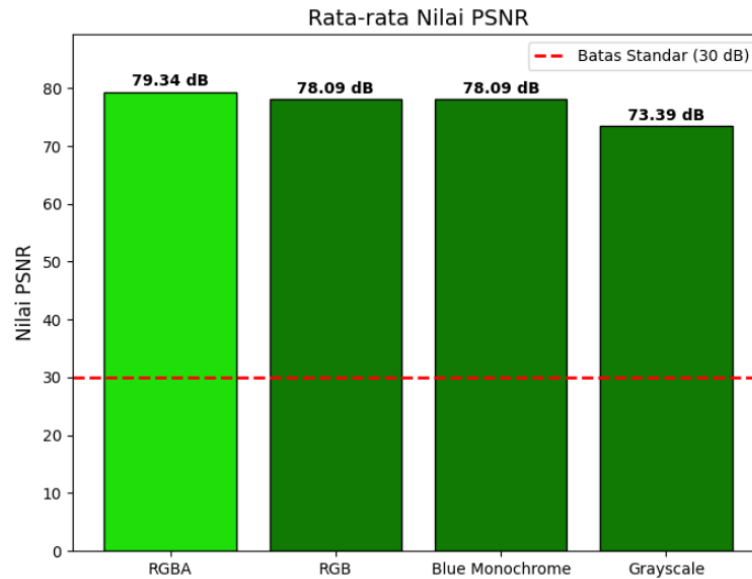
Code Program
<pre> limit = 1 all_mse = [] all_psnr = []  while limit &lt;= 60:     citra_asli = Image.open(f"dataset_3000/RGB/cover_{limit}_3000.png")     citra_extract = Image.open(         f"output_3000/stegano_image/RGB/stegano_image{limit}.png"     )      asli = np.array(citra_asli, dtype=np.float64)     extract = np.array(citra_extract, dtype=np.float64)      mse = np.mean((asli - extract) ** 2)      if mse == 0:         psnr = float('inf')     else:         psnr = 10 * math.log10((255 ** 2) / mse)      print(f"{mse:.4f}")     # print(f"{psnr:.2f}")     all_mse.append(mse)     all_psnr.append(psnr)      limit += 1  print("=== RATA-RATA ===") print(f"Rata-rata MSE : {sum(all_mse)/len(all_mse):.4f}") print(f"Rata-rata PSNR : {sum(all_psnr)/len(all_psnr):.2f}") </pre>

Kode diatas merupakan proses pengujian *MSE* dan *PSNR*, Pengujian *MSE* dilakukan dengan mencari selisih error dari piksel citra sebelum disisipkan tanda tangan dengan nilai piksel citra setelah dilakukan penyisipan tanda tangan, setelah pengujian *MSE* selesai pengujian *PSNR* dilakukan yang dimana jika nilai *MSE* 0 yang berarti tidak ada perubahan pada citra sedikitpun maka nilai *PSNR*nya adalah infinity selain itu nilai *PSNR* dihitung seperti biasa.

**Tabel 11.** Nilai rata-rata *MSE*.

Rata-Rata <i>MSE</i>			
<i>Grayscale</i>	<i>RGB</i>	<i>RGBA</i>	<i>Blue Monochromic</i>
0.0030	0.0010	<b>0.0008</b>	0.0010

Pada tabel diatas menunjukkan bahwa nilai *MSE* terbesar didapatkan oleh citra grayscale sedangkan nilai *MSE* terkecil didapatkan oleh citra *RGBA*, citra *RGBA* mendapatkan nilai *MSE* terkecil dari yang lainnya dikarenakan citra *RGBA* satu-satunya citra yang memiliki 4 *channel* yang artinya nilai rata-rata kerusakannya akan lebih kecil dibanding gambar yang memiliki lebih sedikit channel seperti citra *Grayscale*. Meskipun citra *grayscale* mendapatkan nilai *MSE* tertinggi akan tetapi nilai tersebut masih tergolong kecil.



**Gambar 5.** Perbandingan Nilai *PSNR*.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa keempat jenis citra memiliki nilai *pSNR* diatas ambang batas 30 dB. Citra *RGBA* dengan nilai tertinggi (79, 34 dB), dan citra *grayscale* terendah (73,39 dB). Di sisi lain, citra *RGB* dan *Blue Monochrome* memperoleh nilai *PSNR* yang sama (78, 09 dB). Hal ini disebabkan oleh penyisipan difokuskan pada blue channel. karena seluruh citra termasuk *Blue Monochrome* merupakan hasil modifikasi citra *RGB* dimana *channel* lainnya diberi nilai 0; hal tersebut tidak mempengaruhi hasil perhitungan *MSE* dan *PSNR* karena perubahan murni terjadi di *Blue Channel*.

### 3.3.4. Bit Error Ratio.

**Tabel 12.** Implementasi pengujian *BER*.

Kode Program.
<pre> limit = 1 rata_ber = 0  all_ber = [] while limit &lt;= 60 :     error = 0     total = 0      citra_asli = Image.open("arya_signature/arya_signature.png")     citra_extract = Image.open(f"output_3000/extracted_signature/Grayscale/extracted_signature{limit}.png")      citra_asli = np.array(citra_asli).flatten()     citra_extract = np.array(citra_extract).flatten()      for a, b in zip(citra_asli, citra_extract):         bin_a = format(a, '08b')         bin_b = format(b, '08b')         for bit_a, bit_b in zip(bin_a, bin_b):             total += 1             if bit_a != bit_b:                 error += 1      Bit_error_ratio = error / total                     </pre>

```
print(f"{Bit_error_ratio}")
all_ber.append(Bit_error_ratio)
limit = limit + 1

rata_ber= sum(all_ber) / len(all_ber)
print(f"rata-rata nilai BER adalah : {rata_ber}")
```

**Tabel 13.** Nilai Rata-Rata *BER*.

Rata-Rata <i>BER</i>			
<i>Grayscale</i>	<i>RGB</i>	<i>RGBA</i>	<i>Blue Monochromic</i>
0.0	0.0	0.0	0.0

Berdasarkan dari tabel 13 yang dibuat berdasarkan output program pengujian *BER*, didapati bahwa tidak ada perubahan pada citra signature bahkan pada level terkecil (bit), ini berarti program berhasil mempertahankan citra *signature* yang telah disisipkan tanpa adanya kerusakan bahkan pada level terkecil. Hal ini dapat dicapai karena sifat dari *Huffman Coding* yang merupakan *Lossless Compression* dan tidak adanya kesalahan dalam proses ekstraksi maupun embedding yang telah dilakukan.

#### 4. Kesimpulan.

Berdasarkan hasil pengujian pada penelitian yang telah dilakukan, berikut merupakan kesimpulan yang dapat:

- Berdasarkan hasil pengujian, metode yang diajukan yaitu *LSB Matching Revisited* dan *Huffman Coding* menunjukkan hasil mampu menyisipkan invisible watermarking berupa *handwriting signature* ke dalam citra karya seni digital dengan kualitas yang baik. Seluruh citra yang diujikan menghasilkan nilai *PSNR* yang melampaui batas bawa (30 dB), dengan nilai tertinggi pada citra *RGBA* (79,34 dB) dan yang terendah pada citra *Grayscale* (73,39 dB), sementara itu citra *RGB* dan *Blue Monochromic* menghasilkan yang sama (73, 39 dB). Nilai *MSE* terendah diperoleh oleh citra *RGBA* (0,0008) dan yang tertinggi pada citra *Grayscale* (0,0030), akan tetapi citra *Grayscale* tetap mampu mempertahankan kualitas visualnya sebagaimana ditunjukkan oleh nilai *PSNR* yang masih berada jauh di atas ambang batas.
- Penerapan *Huffman Coding* dalam proses kompresi signature menghasilkan *Compression Ratio* sebesar 79%, yang berarti kompresi signature sebelum penyisipan berkontribusi positif terhadap peningkatan nilai *PSNR*. Hal ini konsisten dengan prinsip trade-off dalam steganografi, dimana semakin sedikit data yang disisipkan maka semakin kecil distorsi yang ditimbulkan pada citra cover, sehingga kualitas visual dari citra tetap terjaga. Selain itu, hasil pengujian ekstraksi menunjukkan bahwa sistem mampu mengekstraksi seluruh signature tanpa kehilangan data, dibuktikan dengan nilai *Bit Error Rate* sebesar 0 pada hasil citra ekstraksi, yang berarti tidak ada kerusakan pada signature yang telah disisipkan sebelumnya setelah diekstraksi bahkan dalam level bit.
- Penelitian ini masih memiliki keterbatasan, yaitu pengujian *Compression Ratio* hanya dilakukan pada satu jenis citra signature sebagai variabel kontrol, penelitian selanjutnya disarankan menguji tingkat *COmpression Ratio* pada berbagai variasi citra signature guna mengukur tingkat *compression ratio* secara komprehensif.

#### References

- [1] C. McAndrew, "The Art Basel and UBS Survey of Global Collecting 2025," Art Basel & UBS, Report, 2025.
- [2] E. T. Amukti, E. Susanti, L. Triyana, Universitas Mulawarman, and Universitas Mulawarman, "PERLINDUNGAN HAK CIPTA SENIMAN ATAS PEMBAJAKAN ILUSTRASI

DIGITAL DALAM BENTUK NON-FUNGIBLE TOKEN,” *JIPRO J. Intellect. Prop.*, vol. 6, no. 2, Dec. 2023, doi: 10.20885/jipro.vol6.iss2.art4.

[3] M. Fan, “Blind Dual Image Watermarking for Copyright Protection, Tamper Proofing and Self-Recovery,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 82, pp. 1–16, May 2023, doi: 10.1007/s11042-023-15261-9.

[4] L. G. Hafemann, R. Sabourin, and L. S. Oliveira, “Offline Handwritten Signature Verification - Literature Review,” *2017 Seventh Int. Conf. Image Process. Theory Tools Appl. IPTA*, pp. 1–8, Nov. 2017, doi: 10.1109/IPTA.2017.8310112.

[5] M. Fateh, M. Rezvani, and Y. Irani, “A New Method of Coding for Steganography Based on LSB Matching Revisited,” *Secur. Commun. Netw.*, vol. 2021, pp. 1–15, Feb. 2021, doi: 10.1155/2021/6610678.

[6] C. A. Sari, G. Ardiansyah, D. R. I. M. Setiadi, and E. H. Rachmawanto, “An improved security and message capacity using AES and Huffman coding on image steganography,” *TELKOMNIKA Telecommun. Comput. Electron. Control*, vol. 17, no. 5, Art. no. 5, Oct. 2019, doi: 10.12928/telkomnika.v17i5.9570.

[7] M. A. Majeed, R. Sulaiman, Z. Shukur, and M. K. Hasan, “A Review on Text Steganography Techniques,” *Mathematics*, vol. 9, no. 21, Art. no. 21, Jan. 2021, doi: 10.3390/math9212829.

[8] A. DemiRag, E. N. DemiRkol Öztürk, and C. Ünal, “Analysis and Comparison of Waterfall Model and Agile Approach in Software Projects,” *AJIT-E Acad. J. Inf. Technol.*, vol. 14, no. 54, pp. 183–203, Aug. 2023, doi: 10.5824/ajite.2023.03.002.x.

[9] A. Iskandar and C. Ratnasari, “Analisis Kebutuhan Fungsional Sistem Informasi Manajemen Konfeksi Berbasis Web (Studi Kasus Shofa Collection Tasikmalaya),” *Appl. Technol. Comput. Sci. UNJSA*, Sep. 2020.

[10] Z. N. Khudhair *et al.*, “Color to Grayscale Image Conversion Based on Singular Value Decomposition,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 54629–54638, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3279734.

[11] A. Nawar S., I. Tarik Z., and S. Firas A., “High Capacity Steganography Method Based upon RGBA Image,” *SSRN Electron. J.*, 2024, doi: 10.2139/ssrn.4847308.

[12] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital image processing*, Fourth edition, Global edition. New York: Pearson, 2017.

[13] E. Priyono and H. Mustafidah, “Text Compression Using the Shannon-Fano, Huffman, and Half-Byte Algorithms,” *ResearchGate*, vol. 12, no. 09, pp. 1422–1427, Aug. 2024, doi: 10.18535/ijsrm/v12i09.ec01.

[14] S. Rezaei and A. Javadpour, “Bio-Inspired algorithms for secure image steganography: enhancing data security and quality in data transmission,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 83, no. 35, pp. 82247–82280, Oct. 2024, doi: 10.1007/s11042-024-18776-x.

[15] F. Alyousuf, R. Din, and A. Qhasim, “Analysis review on spatial and transform domain technique in digital steganography,” *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 9, no. 2, Apr. 2020, doi: 10.11591/eei.v9i2.2068. F. M. Last Name, “Thesis Title”, University Name, Year.