

## **BAB V** **PENUTUP**

### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pengujian sistem steganografi citra digital yang mengintegrasikan Elliptic Curve Cryptography (ECC), Algoritma Genetika (GA), dan Reed-Solomon (RS) pada metode Least Significant Bit (LSB) dan Discrete Cosine Transform (DCT), dapat disimpulkan bahwa sistem yang dikembangkan telah berhasil diimplementasikan dan diuji secara fungsional serta mampu memenuhi tujuan penelitian. Integrasi ECC sebagai mekanisme pengamanan pesan, GA sebagai penentu lokasi embedding yang optimal, dan Reed-Solomon sebagai koreksi error membentuk sistem steganografi yang aman dan adaptif.

Berdasarkan tabel komparatif kualitas citra, metode LSB menunjukkan performa kualitas citra yang jauh lebih unggul dibandingkan metode DCT. Hal ini ditunjukkan oleh nilai PSNR LSB yang berada pada rentang 75.94–81.96 dB dan MSE yang sangat kecil (0.0004–0.0016), menandakan bahwa perubahan citra stego hampir tidak terdeteksi secara visual. Sebaliknya, metode DCT menghasilkan PSNR lebih rendah (48.97–54.79 dB) dan MSE yang lebih besar (0.21–0.82) akibat modifikasi koefisien frekuensi, yang secara teori memang menimbulkan distorsi lebih besar dibandingkan perubahan pada domain spasial.

Pada aspek keandalan ekstraksi pesan, tabel menunjukkan bahwa metode LSB menghasilkan BER = 0 pada seluruh pengujian, yang berarti payload dapat dipulihkan secara sempurna tanpa kesalahan. Metode DCT menunjukkan BER yang sangat kecil hingga mendekati nol, namun pada beberapa kondisi tertentu masih muncul error minor akibat sensitivitas transformasi frekuensi. Dengan demikian, berdasarkan data pengujian, LSB lebih stabil dalam proses ekstraksi, sementara DCT memiliki reliabilitas tinggi tetapi lebih sensitif terhadap perubahan kecil pada citra.

Hasil pengujian Chi-Square pada tabel komparatif memperlihatkan perbedaan yang sangat signifikan antara kedua metode. Metode LSB menghasilkan nilai Chi-Square yang sangat rendah, menunjukkan bahwa distribusi piksel citra stego tetap menyerupai citra cover dan sulit dideteksi

menggunakan analisis statistik spasial. Sebaliknya, metode DCT menghasilkan nilai Chi-Square yang sangat besar, bahkan mencapai orde miliaran. Namun, hasil ini perlu ditafsirkan secara tepat, karena uji Chi-Square secara teoritis lebih relevan untuk domain spasial, sedangkan DCT bekerja pada domain frekuensi. Oleh karena itu, tingginya nilai Chi-Square pada metode DCT merupakan konsekuensi dari transformasi frekuensi dan bukan semata-mata indikasi kelemahan sistem.

Dari sisi efisiensi waktu, tabel menunjukkan bahwa metode LSB lebih cepat, dengan waktu *embedding* sekitar 0.50–0.55 detik, dibandingkan metode DCT yang membutuhkan 0.84–1.43 detik. Perbedaan ini disebabkan oleh kompleksitas metode DCT yang melibatkan pembagian blok, transformasi DCT, kuantisasi, serta optimasi berbasis Algoritma Genetika. Dengan demikian, LSB lebih efisien secara komputasi, sedangkan DCT membutuhkan sumber daya dan waktu yang lebih besar.

Berdasarkan tabel perubahan ukuran file stego, dapat disimpulkan bahwa pengaruh metode penyisipan terhadap ukuran file sangat bergantung pada karakteristik citra cover. Pada citra berukuran kecil dan bertekstur sederhana seperti *stegocover.png*, metode DCT dan LSB menyebabkan peningkatan ukuran file yang signifikan, masing-masing sebesar +94.0 KB dan +74.5 KB. Sebaliknya, pada citra dengan ukuran besar dan kompleksitas tinggi seperti *lena.png*, perubahan ukuran file relatif kecil, yaitu hanya sekitar +0.6 hingga +2.6 KB.

Menariknya, pada beberapa citra lain seperti *camera.png*, *boat.png*, dan *pepper.png*, kedua metode justru menghasilkan penurunan ukuran file stego. Penurunan ini disebabkan oleh mekanisme kompresi lossless PNG yang menjadi lebih efisien akibat perubahan pola bit citra setelah *embedding*. Secara umum, tabel menunjukkan bahwa metode LSB cenderung lebih konsisten menghasilkan ukuran file stego yang stabil atau lebih kecil, sedangkan metode DCT memiliki variasi ukuran file yang lebih besar tergantung struktur citra.

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian dan tabel komparatif, dapat disimpulkan bahwa metode LSB lebih unggul dalam aspek kualitas citra, kestabilan statistik, efisiensi waktu, dan konsistensi ukuran file, sedangkan

metode DCT memiliki kompleksitas struktural lebih tinggi dan relevan untuk skenario yang memerlukan transformasi domain frekuensi, meskipun dengan konsekuensi distorsi dan fluktuasi ukuran file. Dengan demikian, pemilihan metode penyisipan harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi, di mana LSB lebih cocok untuk aplikasi yang mengutamakan kualitas visual dan efisiensi, sementara DCT lebih sesuai untuk lingkungan yang memerlukan kompleksitas dan ketahanan berbasis domain frekuensi.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan serta kesimpulan yang diperoleh, terdapat beberapa saran yang dapat menjadi acuan untuk mengatasi keterbatasan yang masih muncul serta sebagai rekomendasi bagi penelitian selanjutnya. Saran-saran berikut disusun berdasarkan ruang lingkup penelitian dan aspek-aspek yang dinilai masih memiliki peluang untuk dikembangkan lebih lanjut.

Pertama, penelitian ini belum melakukan pengujian ketahanan sistem secara komprehensif terhadap berbagai bentuk kompresi dan manipulasi citra, meskipun metode DCT secara teoritis memiliki keunggulan dalam kondisi tersebut. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengujian lanjutan menggunakan berbagai platform media sosial atau skenario kompresi lain untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai ketahanan pesan terhadap distorsi citra yang lebih beragam.

Kedua, mekanisme keamanan yang digunakan pada penelitian ini, yaitu kombinasi ECC dan Reed-Solomon, telah terbukti efektif dalam menjaga integritas pesan. Namun, untuk meningkatkan keamanan secara keseluruhan, penelitian selanjutnya disarankan menambahkan mekanisme verifikasi autentikasi, seperti digital signature atau hashing, sehingga pesan tidak hanya tersimpan dengan aman tetapi juga dapat dipastikan keasliannya.

Ketiga, proses pemrosesan pada metode DCT memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan metode LSB karena adanya tahapan transformasi dan optimasi berbasis Algoritma Genetika. Untuk meningkatkan efisiensi sistem,

penelitian mendatang perlu mempertimbangkan optimasi komputasi, misalnya melalui pemanfaatan paralelisasi GPU atau algoritma evolusioner alternatif yang lebih ringan namun tetap efektif dalam menemukan lokasi embedding yang optimal.

Keempat, penelitian ini masih berfokus pada ketahanan terhadap analisis statistik dasar, seperti uji Chi-Square. Untuk meningkatkan tingkat ketidakterdeteksian pada lingkungan yang lebih modern, penelitian berikutnya dapat mengintegrasikan pendekatan berbasis machine learning untuk memodelkan pola steganalisis terkini, sehingga proses embedding dapat diarahkan untuk menghindari pola yang mudah terdeteksi oleh sistem forensik digital modern.

Terakhir, pengembangan antarmuka pengguna atau sistem otomatisasi yang lebih terstruktur diperlukan agar metode steganografi yang dibangun dapat diterapkan secara langsung oleh pengguna umum maupun instansi yang membutuhkan. Hal ini akan meningkatkan nilai praktis penelitian dan memperluas cakupan penggunaannya di bidang keamanan informasi.

Dengan demikian, saran-saran tersebut diharapkan dapat membantu peneliti selanjutnya dalam mengembangkan sistem steganografi yang lebih kuat, efisien, dan adaptif, sekaligus mengatasi keterbatasan yang belum dapat dicapai dalam penelitian ini.