BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi komunikasi digital dan multimedia telah meningkatkan penggunaan citra digital berwarna dalam berbagai bidang, seperti media sosial, sistem pengawasan, layanan kesehatan, dan penyimpanan data berbasis jaringan. Citra digital yang dikirimkan melalui jaringan terbuka memiliki risiko tinggi terhadap ancaman keamanan, seperti penyadapan, manipulasi, dan pemalsuan data. Diperlukan mekanisme pengamanan yang mampu menjaga kerahasiaan dan integritas citra digital secara efektif, khususnya pada citra berwarna yang memiliki kompleksitas tinggi dan korelasi antar-piksel yang kuat (Alghamdi & Munir, 2024; Wang dkk., 2024).

Selain aspek keamanan, efisiensi penyimpanan dan transmisi data juga menjadi faktor penting dalam pengolahan citra digital. Berbagai metode kompresi citra *lossy* telah berkembang, mulai dari format konvensional seperti JPEG dan JPEG 2000 hingga format modern seperti WebP, HEIC, dan AVIF yang menawarkan rasio kompresi lebih tinggi dengan kualitas visual yang lebih baik. Namun, proses kompresi *lossy* melibatkan transformasi dan kuantisasi yang dapat mengubah struktur data citra secara signifikan. Hal ini menjadi permasalahan ketika citra terenkripsi harus melalui proses kompresi dan dekompresi, karena dapat menyebabkan penurunan kualitas pada hasil dekripsi (Hamano dkk., 2023; Kryvenko dkk., 2024).

Algoritma enkripsi citra berbasis teori *chaos* berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir karena memiliki karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan kriptografi, seperti sensitivitas tinggi terhadap kondisi awal, perilaku acak semu, dan deterministik. Seiring perkembangan penelitian, sistem *chaos* berdimensi tinggi, khususnya sistem *hyperchaotic* empat dimensi (4D), mulai banyak digunakan karena memiliki dinamika yang lebih kompleks, ruang kunci yang luas, serta tingkat keamanan yang lebih tinggi dibandingkan sistem *chaos* sederhana. Berbagai penelitian telah mengusulkan beragam model *chaos* 4D dengan kombinasi sistem seperti Lorenz, Chen, Lü, dan sistem *hyperchaotic* lainnya untuk meningkatkan performa enkripsi citra (Alshehri, 2025; B. Zhang & Liu, 2023).

Meskipun demikian, kajian literatur menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian yang menggunakan sistem *chaos* 4D masih berfokus pada peningkatan kompleksitas algoritma dan analisis keamanan dasar, seperti entropi, korelasi piksel, serta ketahanan terhadap serangan statistik. Evaluasi terhadap kondisi nyata, khususnya ketika citra terenkripsi mengalami proses kompresi citra *lossy* modern, masih sangat terbatas. Padahal, dalam implementasi praktis, citra digital umumnya akan melalui proses kompresi sebelum disimpan atau ditransmisikan, sehingga ketahanan algoritma terhadap distorsi akibat kompresi menjadi aspek yang sangat penting.

Selain itu, meskipun telah banyak algoritma enkripsi berbasis *chaos* 4D yang diusulkan, belum terdapat kajian yang secara sistematis membandingkan performa berbagai algoritma tersebut dalam satu kerangka evaluasi yang konsisten, terutama

dalam konteks ketahanan terhadap berbagai format kompresi citra modern seperti WebP, HEIC, dan AVIF. Keterbatasan ini menyebabkan belum adanya pemahaman yang jelas mengenai algoritma *chaos* 4D mana yang paling optimal dalam menjaga keseimbangan antara keamanan, kualitas hasil dekripsi, dan efisiensi komputasi.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan analisis komparatif terhadap beberapa algoritma enkripsi citra berbasis sistem *chaos* 4D dengan pendekatan enkripsi spasial menggunakan skema permutasi dan difusi (XOR). Sistem *chaos* dilengkapi dengan mekanisme *burn-in* untuk mengurangi efek *transien* awal dan meningkatkan kualitas keacakan. Evaluasi dilakukan terhadap berbagai format kompresi citra, yaitu JPEG, JPEG 2000, WebP, HEIC, dan AVIF, dengan berbagai tingkat kualitas kompresi. Parameter yang digunakan meliputi metrik keamanan seperti entropi, korelasi piksel, NPCR, dan UACI, metrik kualitas dekripsi seperti PSNR dan MSSIM, serta efisiensi komputasi berupa waktu eksekusi (*runtime*).

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam mengidentifikasi performa berbagai algoritma *chaos* 4D dalam menghadapi skenario kompresi citra modern, serta memberikan dasar dalam pemilihan metode enkripsi citra yang optimal untuk aplikasi keamanan digital di lingkungan nyata.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dari penelitian ini dapat diformulasikan sebagai berikut:

1. Bagaimana perbandingan tingkat keamanan algoritma enkripsi citra berbasis *chaos* 4D setelah citra terenkripsi mengalami proses kompresi menggunakan berbagai format kompresi citra?
2. Bagaimana kualitas citra hasil dekripsi dari algoritma *chaos* 4D setelah citra terenkripsi mengalami proses kompresi menggunakan berbagai format kompresi citra?
3. Bagaimana perbandingan efisiensi waktu eksekusi (*running time*) antar algoritma enkripsi citra berbasis *chaos* 4D pada keseluruhan *pipeline* pengujian?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, tujuan dari penelitian ini di antaranya sebagai berikut:

1. Membandingkan tingkat keamanan algoritma enkripsi citra berbasis *chaos* 4D setelah citra terenkripsi mengalami proses kompresi menggunakan berbagai format kompresi citra.
2. Mengevaluasi dan membandingkan kualitas citra hasil dekripsi dari masing-masing algoritma *chaos* 4D setelah mengalami proses kompresi menggunakan berbagai format kompresi citra.
3. Membandingkan efisiensi waktu eksekusi (*running time*) antar algoritma enkripsi citra berbasis *chaos* 4D pada keseluruhan *pipeline* pengujian.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman mengenai tingkat keamanan algoritma enkripsi citra berwarna berbasis *chaos* 4D terhadap berbagai format kompresi citra modern.
2. Menyajikan analisis perbandingan kualitas citra hasil dekripsi dari beberapa algoritma *chaos* 4D setelah mengalami proses kompresi citra.
3. Menjadi referensi ilmiah bagi mahasiswa dan peneliti dalam bidang kriptografi citra, khususnya terkait evaluasi algoritma *chaos* 4D.
4. Memberikan informasi praktis mengenai performa algoritma *chaos* 4D dalam menjaga kualitas dan keamanan citra setelah kompresi.
5. Memberikan rekomendasi pemilihan algoritma *chaos* 4D yang optimal berdasarkan keseimbangan antara keamanan, kualitas dekripsi, dan efisiensi komputasi.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini ditetapkan agar pembahasan tetap terfokus dan sesuai dengan tujuan penelitian. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Objek penelitian dibatasi pada citra digital berwarna dua dimensi (2D) dengan format citra umum, seperti TIFF dan PNG, yang diproses dalam domain spasial.
2. Algoritma yang digunakan terbatas pada empat algoritma enkripsi citra berbasis *chaos* 4D, tanpa melibatkan sistem *chaos* berdimensi lain maupun algoritma kriptografi konvensional sebagai pembanding.

3. Proses enkripsi citra dilakukan menggunakan pendekatan enkripsi spasial yang terdiri dari tahap permutasi piksel dan difusi menggunakan operasi XOR.
4. Setiap sistem *chaos* dilengkapi dengan mekanisme *burn-in* untuk menghilangkan efek transien awal dan meningkatkan kualitas keacakan.
5. Pengujian dilakukan terhadap pengaruh kompresi citra menggunakan format JPEG, JPEG 2000, WebP, HEIC, dan AVIF dengan beberapa tingkat kualitas kompresi (tinggi, sedang, rendah).
6. Evaluasi keamanan dibatasi pada metrik statistik, yaitu entropi, korelasi piksel (horizontal, vertikal, diagonal), serta NPCR dan UACI.
7. Evaluasi kualitas citra hasil dekripsi dibatasi pada metrik PSNR dan MSSIM.
8. Penelitian tidak membahas aspek keamanan jaringan, protokol komunikasi, maupun sistem enkripsi *end-to-end*.
9. Penelitian ini berfokus pada aspek kerahasiaan konten visual citra (*visual confidentiality*) melalui pendekatan enkripsi, bukan pada pencegahan akses atau perolehan berkas citra terenkripsi oleh pihak lain.
10. Evaluasi efisiensi dilakukan berdasarkan *runtime* total *pipeline* yang mencakup proses enkripsi, kompresi, *load* atau dekompresi, dan dekripsi pada lingkungan pengujian yang seragam.
11. Analisis metadata citra tidak menjadi fokus utama dalam penelitian ini.