ENKRIPSI CITRA DIGITAL MENGGUNAKAN KOMPOSISI TRANSPOSISI CAT MAP DAN SUBTITUSI *KEYSTREAM* LOGISTIC MAP

[1*]Rama Dian Syah, [2]Sarifuddin Madenda, [3]Ruddy J. Suhatril,[4]Suryadi Harmanto
[1,3]Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Gunadarma, ,
[2,4]Program Doktor Teknologi Informasi, Universitas Gunadarma
Jl. Margonda Raya No. 100, Depok 16424, Jawa Barat
[1*]rama_ds@staff.gunadarma.ac.id, [2]sarif@staff.gunadarma.ac.id,
[3]ruddyjs@staff.gunadarma.ac.id, [4]suryadi@gunadarma.ac.id

Abstrak

Transmisi pertukaran data digital melalui jaringan internat menjadi hal penting pada kemajuan teknologi. Risiko pembajakan oleh pihak yang tidak bertanggung jawab mungkin terjadi karena kemudahan dalam pertukaran data. Pengembangan metode enkripsi data yang andal dan kuat adalah solusi untuk risiko ini. Penelitian ini mengusulkan algoritma enkripsi data baru melalui komposisi enkripsi transposisi Cat Map dan enkripsi substitusi Logistic Map. Algoritma yang diusulkan secara bersamaan mengubah posisi data dan mengubah nilai data secara acak. Penelitian telah dilakukan dengan menggunakan beberapa citra dengan berbagai fitur dan ukuran yang berbeda. Analisis keacakan citra hasil enkripsi menunjukkan bahwa histogram intensitas warna piksel memiliki distribusi yang seragam dengan nilai korelasi rendah mendekati 0. Hasil analisis peak signal to noise ratio (PSNR) menunjukkan citra hasil dekripsi sama dengan citra asli . Algoritma yang diusulkan memiliki ruang kunci 3.24×10^{68}. Hasil NPCR, UACI dan Entropi menunjukkan algoritma yang diusulkan tahan terhadap serangan diferensial dan serangan entropi.

***Kata Kunci**: Enkripsi, Dekripsi, Citra Digital, Transposisi Cat Map, Subtitusi Keystream Logisitic Map*

Abstract

Digital data transmission through the internet network is important in technological advances. The risk of hijack by irresponsible parties may occur because of the ease in exchanging data. Development of reliable and strong data encryption methods is the solution to this risk. This research proposes a new data encryption algorithm through the composition of Cat Map transposition encryption and Logistic Map substitution encryption. The proposed algorithm simultaneously changes data positions and changes data values randomly. Research has been carried out using several images with different features and sizes. Analysis of the randomness of the encrypted image shows that the histogram of pixel color intensity has a uniform distribution with a low correlation value close to 0. The results of the peak signal to noise ratio (PSNR) analysis show that the decrypted image is the same as the original image. The proposed algorithm has a key space of 3.24×10^{68}. The NPCR, UACI and Entropy results show that the proposed algorithm is resistant to differential attacks and entropy attacks.

***Keywords**: Encryption, Decryption, Digital Image, Cat Map Transposition, Logistic Map Keystream Substitution*

PENDAHULUAN

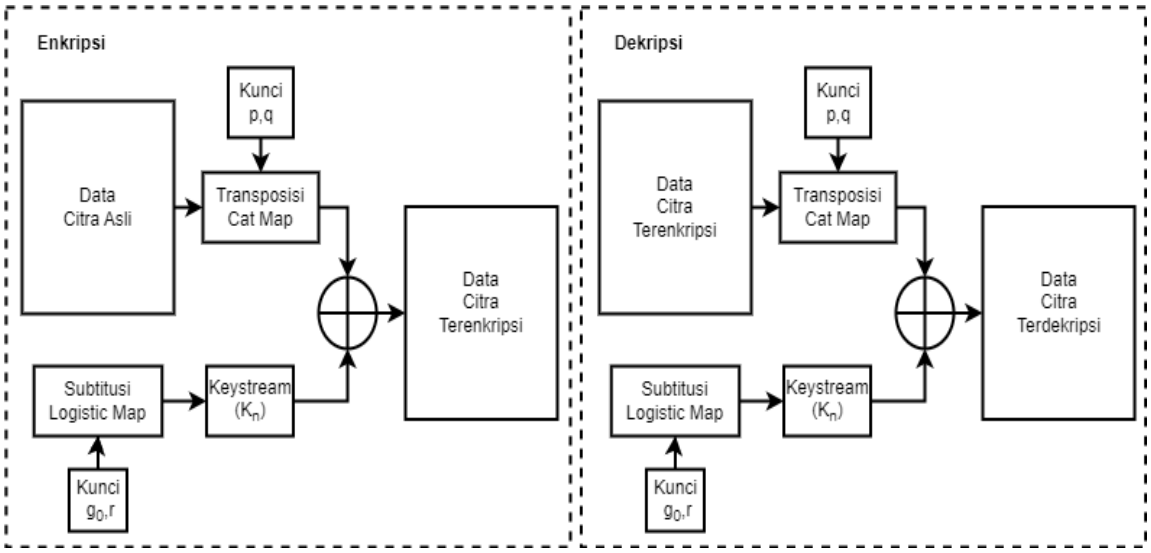
Saat ini data dan informasi citra digital dapat diperoleh dengan mudah melalui kamera atau internet. Citra digital yang mengandung data atau informasi pribadi membutuhkan sistem keamanan untuk mencegah kejahatan dunia maya. Citra digital yang ditransmisikan melalui internet dapat diakses dengan akses yang tidak sah. Metode kriptografi dapat diimplementasikan pada citra digital untuk mengatasi akses tidak sah seperti modifikasi konten, pelanggaran hak cipta dan sebagainya. Kriptografi citra digital menggunakan berbagai metode matematis untuk mengamankan informasi dalam citra [1].

Proses dalam kriptografi citra digital adalah enkripsi dan dekripsi. Enkripsi citra digital adalah transformasi citra asli menjadi citra terenkripsi. Dekripsi citra digital adalah proses mengubah kembali citra terenkripsi menjadi citra asli. Transposisi dan substitusi merupakan dua teknik enkripsi dan dekripsi yang digunakan dalam penelitian ini. Teknik transposisi pada citra digital dilakukan dengan mengacak koordinat piksel, sedangkan teknik substitusi dilakukan dengan mengubah nilai intensitas warna piksel pada citra [2]. Kedua teknik ini digabungkan untuk meningkatkan keamanan algoritma enkripsi. Selain itu, studi terkait transposisi dan teknik substitusi telah dilakukan.

Penelitian [3] mengembangkan fungsi Cat Map sebagai transposisi dan Bernoulli Map sebagai metode substitusi dengan menggabungkan kedua metode tersebut secara berurutan atau sekuensial. Enkripsi citra berwarna dilakukan dengan meng-enkripsi setiap kanal warna (R, G, B) secara terpisah yang membutuhkan proses lebih lama. Penelitian [4] mengembangkan transposisi Cat Map 4D yang merupakan enkripsi citra berwarna menggunakan Cat Map 3D dan dilanjutkan dengan transposisi Cat Map 4D secara berurutan atau sekuensial. Proses secara sekuensial membutuhkan proses yang lebih banyak sehingga waktu proses lebih lama. Penelitian [5] mengembangan fungsi transposisi Henon Map yang dikomposisikan dengan subtitusi *keystream* Logistic Map. Proses yang dilakukan secara komposisi atau dilakukan dengan satu proses loop dapat mempercepat waktu proses enkripsi.

Pada penelitian ini enkripsi dan dekripsi dilakukan dengan komposisi Cat Map dan Logistic Map. Algoritma yang diusulkan ini dimaksudkan untuk mempercepat waktu pemrosesan pada enkripsi citra berwarna dengan komposisi Cat Map dan Logistic Map daripada menggunakan algoritma secara berurutan atau sekuensial. Algoritma juga memperbesar ruang kunci sehingga keamanan algoritma enkripsi dapat ditingkatkan. Kontribusi dari penelitian ini adalah mengembangkan algoritma enkripsi dan dekripsi yang kuat terhadap serangan statistik, diferensial, dan *brute force*. Kinerja algoritma yang diusulkan diuji menggunakan alat ukur histogram, korelasi, NPCR, UACI, entropi, PSNR, waktu proses, dan ruang kunci.

METODE PENELITIAN



Gambar 1. Metode Enkripsi dan Dekripsi

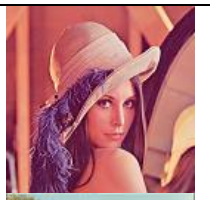
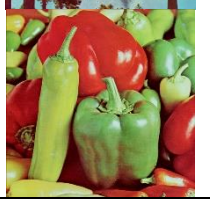
Metode enkripsi dan dekripsi citra berwarna pada penelitian ini menggunakan komposisi transposisi Cat Map dan substitusi Logisitic Map. Citra berwarna digital direpresentasikan sebagai fungsi matriks 3D I(x,y,c), dimana x dan y = (1, 2, …, N) keduanya didefinisikan sebagai koordinat piksel (elemen matriks) [6]. Variabel c mewakili channel warna yaitu Merah=1, Hijau=2, dan Biru=3. Gambar 1 adalah skema proses enkripsi dan dekripsi yang diusulkan.

Proses enkripsi dilakukan menggunakan Cat Map untuk mentranspose setiap koordinat piksel secara acak dan dilanjutkan dengan Logistic Map untuk mensubstitusi nilai intensitas warna piksel. Citra terenkripsi I'(x′,y′,c) merupakan hasil dari proses enkripsi. Proses dekripsi dilakukan dengan transposisi Cat Map untuk mengembalikan setiap koordinat piksel dan dilanjutkan dengan substitusi Logistic Map untuk mengembalikan nilai intensitas warna piksel. Citra dekripsi I(x,y,c) merupakan hasil proses dekripsi.

Pengumpulan Data

Data uji yang digunakan untuk pengujian yaitu citra berwarna berdimensi persegi N×N. Data uji tersebut adalah Lena berukuran 128×128, House berukuran 300×300, Couple 512×512, Sailboat 720×720, dan Pepper 1024×1024. Dataset diambil dari website sipi https://sipi.usc.edu.

Tabel 1. Data Citra Berwarna

Nama	Citra Berwarna
Lena	
House	
Couple	
Sailboat	
Pepper	

Transposisi Cat Map

Transposisi Cat Map digunakan untuk mengubah koordinat piksel citra secara acak dan dapat diterapkan pada citra berukuran persegi dengan ukuran N×N [7]. Fungsi Cat Map ditunjukkan oleh persamaan (1) dan (2), dimana p dan q adalah parameter kunci yang memiliki bilangan bulat positif dengan range (p, q) ∈ $\mathbb{Z}^+$. Proses enkripsi fungsi transposisi Cat Map mengubah posisi piksel koordinat citra asli I(x,y,c) menjadi citra terenkripsi I(x′,y′,c) secara acak. Namun, proses dekripsi mengembalikan piksel koordinat citra terenkripsi I(x′,y′,c) menjadi citra dekripsi I(x,y,c).

$$I(\acute{x},\acute{y},c) \leftarrow I(x,y,c)\ dimana \begin{cases} \acute{x} = x + py\ mod\ (N) \\ \acute{y} = qx + (pq+1)y\ mod\ (N) \end{cases} \quad (1)$$

$$I(x,y,c) \leftarrow I(\acute{x},\acute{y},c)\ dimana \begin{cases} \acute{x} = 1 - x + py\ mod\ (N) \\ \acute{y} = qx + (pq+1)y\ mod\ (N) \end{cases} \quad (2)$$

Subtitusi Logistic Map

Logistic Map adalah fungsi yang memiliki perilaku acak tergantung pada nilai

awal dengan sifat non-periodik [7]. Proses penggantian nilai intensitas warna piksel menggunakan *keystream* yang dihasilkan oleh fungsi logistic map. Fungsi ini ditunjukkan oleh persamaan (3), dimana n = (0, 1,.., L-1), L= N×N sebagai jumlah piksel citra. Parameter kunci g_0 dan r adalah bilangan real positif dengan range $3.5699 < r \leq 4$ dan $0 < g0 < 1$ [8].

$$g_{n+1} = r \times g_n \times (1 - g_n) \quad (3)$$

Selanjutnya *keystream* dihitung dengan persamaan (4). *Keystream* direpresentasikan sebagai $k_n = (k_0, k_1, \ldots, k_{L-1})$, di mana k_n adalah angka acak positif dalam rentang $kn \in [0, 255]$. Substitusi intensitas warna piksel dilakukan dengan operasi XOR ($\oplus$) seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (5), di mana $I(x',y',c)_n$ adalah citra terenkripsi dari transposisi Cat Map dan $I'(x',y',c)_n$ adalah citra terenkripsi dari substitusi Logistic.

$$k_n = round(|g_n \times 10000|) \; mod \; 256 \quad (4)$$

$$\acute{I}(\acute{x},\acute{y},c)_n = k_n \oplus I(\acute{x},y',c)_n \quad (5)$$

Algoritma pembangkit *Keystream*

Keystream dihitung menggunakan fungsi Logistic Map pada persamaan (3) dan (4) dan dihasilkan sebanyak jumlah piksel pada citra. Parameter kunci dari algoritma pembangkitan keystream adalah g_0 dan r. Langkah-langkah algoritma pembangkit *keystream* [9] sebagai berikut.

Algoritma 1 merupakan fungsi pembangkit *keystream* Logistic Map. Nilai L merupakan ukuran citra. Nilai g_n merupakan nilai yang dihasilkan dari rumus Logistic Map. Nilai k_n merupakan *keystream* yang dibangkitkan dengan nilai antara 0 sampai 255. Fungsi dari pembangkit *keystream* ini digunakan dengan cara dipanggil pada algoritma enkripsi dan dekripsi.

Algoritma 1: Pembangkit Key Stream

1: *function* $Logistic(N, g_0, r)$
2: $L \leftarrow N \times N$
3: *for* $n \leftarrow 0$ *to* $L-1$ *do*
4: $g_{n+1} \leftarrow r \times g_n \times (1 - g_n)$
5: $k_n \leftarrow round(|g_{n+1} \times 10000|) \bmod (256)$
6: *end for*
7: *end function*

Algoritma Enkripsi

Proses enkripsi dilakukan dengan transposisi Cat Map dan substitusi Logistic. Proses tersebut akan mentranspose piksel koordinat dan diikuti dengan memodifikasi setiap intensitas piksel warna dari citra asli secara acak menjadi koordinat piksel baru dan intensitas warna citra terenkripsi. Enkripsi menggunakan persamaan (1), (5), dan *keystreams* k_n yang dihasilkan oleh algoritma 1. Algoritma enkripsi sebagai berikut.

Algoritma 2: Prosedur Enkripsi

Input: Kunci p, q, k_n, Citra asli $I(x,y,c)$

Output: Citra Terenkripsi $I'(x',y',c)$

$N \leftarrow ukuranI(x,y,c)$
$n \leftarrow 0$
$k_n \leftarrow Logistic(N, g_0, r)$
for $x \leftarrow 0$ *to* $N-1$ *do*
    for $y \leftarrow 0$ *to* $N-1$ *do*
        $x' \leftarrow (x+py) \bmod (N)$
        $y' \leftarrow (qx+(pq+1)y) \bmod (N)$
        $I'(x',y',c) \leftarrow k_n \oplus I(x,y,c)$
        $n \leftarrow n+1$
    end for
end for

Algoritma 2 merupakan prosedur enkripsi yang dilakukan pada semua piksel pada citra asli sehingga menjadi citra terenkripsi. Nilai x′ dan y′ merupakan koordinat baru hasil dari rumus persamaan Cat Map. Nilai I′ intensitas citra terenkripsi hasil dari operasi modulo dengan nilai *keystream* Logistic Map (k_n).

Algoritma Dekripsi

Proses dekripsi dilakukan dengan mengembalikan setiap koordinat piksel dan intensitas warna piksel. Parameter kunci dan *keystream* pada proses dekripsi sama dengan proses enkripsi. Algoritma dekripsi adalah sebagai berikut.

Algoritma 3 merupakan prosedur dekripsi yang dilakukan pada semua piksel pada citra terenkripsi sehingga kembali ke citra aslinya. Nilai x dan y merupakan koordinat asli citra. Nilai I′ intensitas citra asli hasil dari operasi modulo dengan nilai *keystream* Logistic Map (k_n).

Algoritma 3: Prosedur Dekripsi

Input: Kunci p, q, k_n, Citra Terenkripsi $I'(x',y',c)$

Output: Citra Asli $I(x,y,c)$

$N \leftarrow ukuranI(x,y,c)$
$n \leftarrow 0$
$k_n \leftarrow Logistic(N, g_0, r)$
for $x \leftarrow 0$ *to* $N-1$ *do*
    for $y \leftarrow 0$ *to* $N-1$ *do*
        $x' \leftarrow (x+py) \bmod (N)$
        $y' \leftarrow (qx+(pq+1)y) \bmod (N)$
        $I(x,y,c) \leftarrow k_n \oplus I'(x',y',c)$
        $n \leftarrow n+1$
    end for
end for

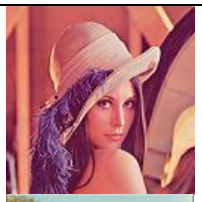
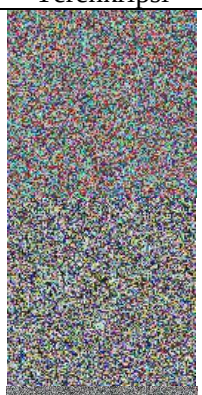
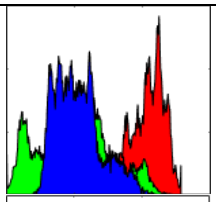
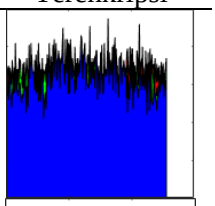
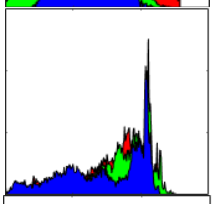
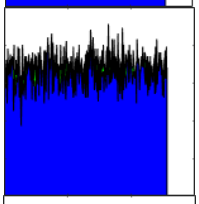
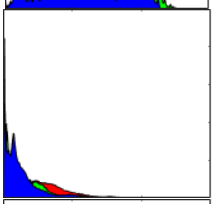
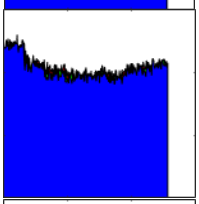
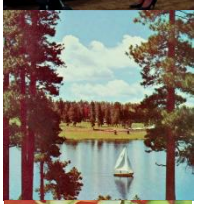
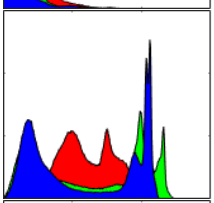
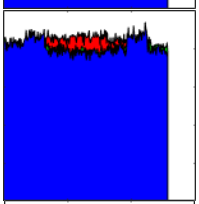
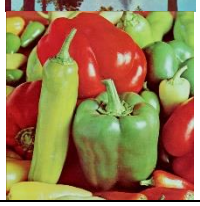
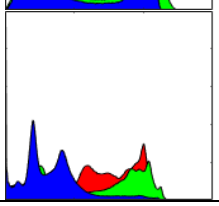
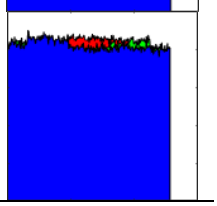
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan dengan menggunakan berbagai citra berwarna dengan ukuran (N×N) dengan fitur yang berbeda. Contoh parameter kunci yang digunakan adalah sebagai berikut: p = 30, q = 40, g_0 = 0.2 dan r = 3.7. Perangkat penelitian yang digunakan adalah Matlab R2018a yang berjalan di komputer dengan spesifikasi prosesor Intel (R) Core (TM) i7-4790 CPU 3.60 Ghz, RAM 16 GB, dan sistem operasi Microsoft Windows 10. Analisis hasil enkripsi dan dekripsi yang dilakukan yaitu analisis histogram, korelasi, NPCR, UACI, entropi, kualitas citra terdekripsi, ruang kunci, dan waktu proses enkripsi-dekripsi.

Analisis Histogram

Histogram digunakan untuk menunjukkan sebaran intensitas warna piksel pada citra [10]. Penelitian ini menggunakan histogram untuk merepresentasikan distribusi intensitas warna piksel yang dapat menunjukkan kinerja keacakan piksel pada citra terenkripsi yang dihasilkan oleh algoritma yang diusulkan.

Tabel 2. Analisis Histogram

Nama	Citra		Histogram	
	Asli	Terenkripsi	Asli	Terenkripsi
Lena (128×128)				
House (300×300)				
Couple (512×512)				
Sailboat (720×720)				
Pepper (1024×1024)				

Informasi citra dapat dengan mudah dibaca jika histogram membentuk pola tertentu. Sebaliknya, informasi sulit dibaca jika histogram membentuk pola yang seragam.

Pada Tabel 2, kolom 5 dan 6 menunjukkan histogram semua citra asli membentuk pola tertentu, sedangkan histogram semua citra terenkripsi membentuk pola seragam. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma yang diusulkan dapat mengubah semua koordinat piksel secara acak dan mengubah nilai intensitas warna pada citra terenkripsi. Informasi dalam citra terenkripsi menjadi sulit dibaca.

Analisis Korelasi

Korelasi adalah parameter untuk mengukur tingkat kesamaan antara dua piksel yang berdekatan secara horizontal [I(x,y) dan I(x+1,y)], secara vertikal [I(x,y) dan I(x,y+1)], dan secara diagonal [I(x,y) dan I(x+1,y+1)] dari sebuah citra. Jika nilai korelasi mendekati 1 atau -1 maka dua piksel yang berdekatan berkorelasi tinggi atau warna kedua piksel serupa. Sebaliknya, jika nilai korelasi mendekati 0 maka dua piksel yang berdekatan memiliki korelasi warna yang rendah atau kedua piksel diacak dengan baik.

Persamaan (6) sebagai rumus korelasi, dimana A dan B adalah citra yang sama mewakili dua piksel yang berdekatan secara horizontal, vertikal, dan diagonal. Variabel dan masing-masing merupakan nilai rata-rata dari semua piksel pada citra A dan B.

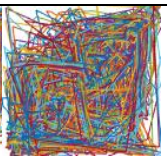
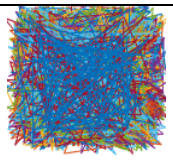
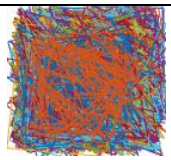
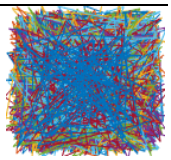
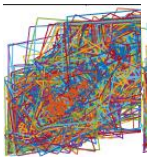
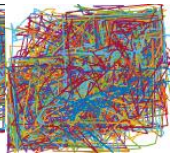
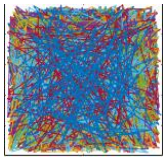
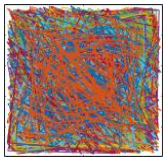
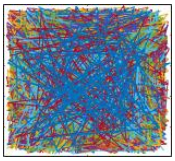
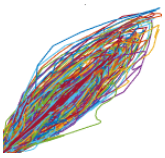
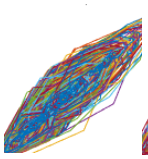
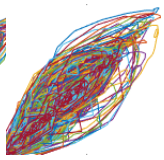
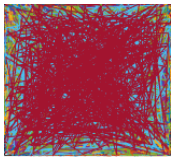
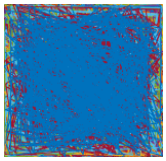
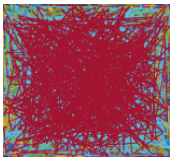
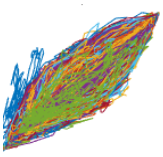
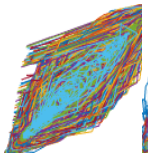
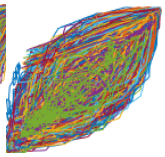
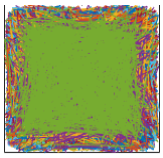
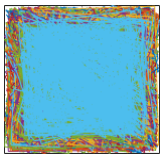
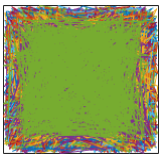
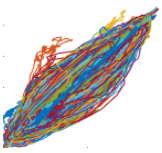
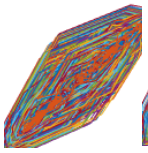
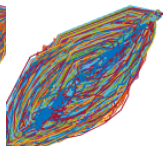
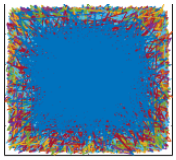
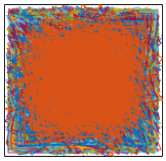
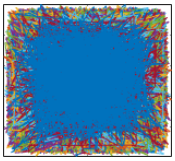
$$r = \frac{\sum_x^M \sum_y^N (A_{xy} - \bar{A})(B_{xy} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_x^M \sum_y^N (A_{xy} - \bar{A})^2)(\sum_x^M \sum_y^N (B_{xy} - \bar{B})^2)}} \quad (6)$$

Pada Tabel 3, kolom 5, 6, dan 7 menunjukkan korelasi nilai absolut citra terenkripsi antara 0.00015 dan 0.10032. Nilai korelasi citra terenkripsi lebih kecil dari citra asli pada kolom 2, 3 dan 4. Hal ini mengindikasikan algoritma yang diusulkan dapat mengacak semua informasi yang terdapat pada citra terenkripsi sehingga informasi tersebut tidak dapat terbaca.

Pada kolom 2, 3, dan 4 terlihat garis kurva dari citra asli bergerak dalam ruang diagonal yang menujukkan dua piksel yang berdekatan pada citra asli berkorelasi tinggi. Namun pada kolom 5, 6 dan 7 terlihat garis kurva citra terenkripsi bergerak secara acak dalam ruang kurva dua dimensi yang menunjukkan dua piksel yang berdekatan pada citra terenkripsi memiliki korelasi warna yang rendah.

Berdasarkan hasil nilai korelasi dan kurva korelasi pada Tabel 3 menunjukkan algoritma enkripsi citra yang diusulkan dapat mengacak posisi dan intensitas warna semua piksel sehingga pesan yang terkandung dalam citra terenkripsi sulit untuk dibajak.

Tabel 3. Analisis Korelasi

Name	Korelasi Citra Asli			Korelasi Citra Terenkripsi		
	Horizontal	Vertikal	Diagonal	Horizontal	Vertikal	Diagonal
Lena (128×128)						
	0.83670	0.91406	0.79908	0.00933	0.00217	-0.00726
House (300 ×300)						
	0.90081	0.91792	0.84436	-0.10032	-0.00345	-0.00645
Couple (512×512)						
	0.98370	0.98836	0.96388	0.08367	0.00022	-0.00440
Sailboat (720×720)						
	0.98895	0.98751	0.98761	-0.00192	0.00235	-0.00273
Pepper (1024 ×1024)						
	0.98120	0.99490	0.98953	-0.00132	-0.00015	-0.00142

Analisis NPCR dan UACI

NPCR (*Number of Pixel Change Rate*) adalah parameter untuk mengukur sensitivitas piksel yang berbeda pada citra asli yang mempengaruhi hasil citra terenkripsinya [11]. UACI adalah parameter untuk mengukur rata-rata persentase perubahan piksel pada citra terenkripsi. Nilai NPCR dan UACI menunjukkan tingkat keamanan algoritma yang tahan terhadap serangan diferensial [12].

Persamaan (7) dan (8) sebagai rumus NPCR dan UACI dimana C1 dan C2 adalah dua buah citra terenkripsi. Koefisien D_{xy} adalah nilai kesamaan piksel dalam koordinat yang sama dari citra C1 dan C2. $C1_{xy}$ dan $C2_{xy}$ adalah nilai intensitas warna dari C1 dan C2 pada posisi (x,y).

$$NPCR = \frac{1}{M \times N} \sum_x^M \sum_y^N D_{xy} \times 100\% \quad (7)$$

$$UACI = \frac{1}{M \times N} \sum_x^M \sum_y^N \frac{|C1_{xy} - C2_{xy}|}{255} \times 100\% \quad (8)$$

Tabel 4. NPCR, UACI, dan Entropi Citra Terenkripsi

Name	NPCR (%)	UACI (%)	Entropi
Lena	99.61344	33.34840	7.99598
House	99.65210	33.34663	7.99637
Couple	99.60620	34.13334	7.99665
Sailboat	99.59812	33.34154	7.99968
Pepper	99.60715	33.39355	7.99976

Tabel 4 menunjukkan nilai NPCR terbesar adalah 99.65210% dan nilai UACI terbesar adalah 34.13334%. Kedua nilai tersebut berada di atas standar 99.6% dari nilai NPCR dan 33.3% dari nilai UACI yang menunjukkan bahwa algoritma yangdiusulkan tahan terhadap serangan diferensial [7] dan memiliki kepekaan terhadap perubahan piksel pada citra asli masukan yang berpengaruh terhadap hasil citra terenkripsi.

Analisis Entropi

Entropi adalah parameter untuk mengukur rata-rata minimum jumlah bit yang diperlukan untuk mendekodekan suatu simbol dalam rangkaian bit. Nilai entropi menunjukkan kinerja tingkat keamanan dalam algoritma yang tahan terhadap serangan entropi dan tingkat keacakan dalam citra terenkripsi [13]. Persamaan (9) sebagai rumus entropi dimana Pi adalah probabilitas kemunculan suatu piksel dengan nilai i. Nilai maksimum entropi adalah 8 [7].

$$H = \sum_{i=0}^{i=255} P_i Log_2 \left(\frac{1}{P_i}\right)$$

(12)

Tabel 4 menunjukkan nilai entropi terbesar adalah 7.99976. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma yang diusulkan tahan terhadap serangan entropi dan mampu mengacak koordinat piksel dan memodifikasi nilai intensitas warna piksel pada citra terenkripsi [10].

Analisis Kualitas Citra Terdekripsi

Kualitas citra hasil dekripsi diukur dengan PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*) dan MSE (*Mean Square Error*). Persamaan (10) sebagai formula PSNR yang dihitung mengacu pada nilai MSE antara citra asli dan citra dekripsi [14] menggunakan persamaan (9).

$$PSNR = 20\ Log_{10}\ \frac{255}{MSE}$$

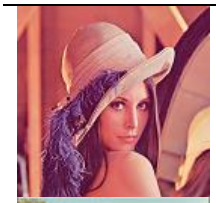
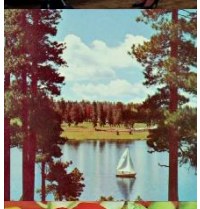
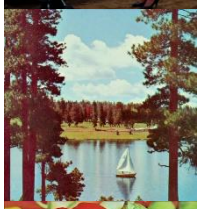
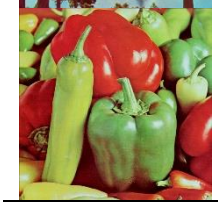
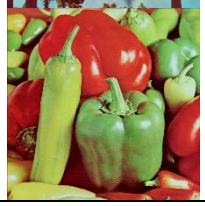
(9)

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{x}^{M} \sum_{y}^{N} (I(x,y) - \acute{I}(x,y)^2)$$

(10)

Secara visual pada Tabel 5 kolom 1 dan 2 direpresentasikan sebagai citra asli dan citra dekripsi dimana tidak ada perbedaan antara kedua citra atau kualitas citra dekripsi sama dengan citra aslinya. Kolom 4 dan 5 adalah nilai MSE = 0 dan PSNR = ∞ pada semua citra yang didekripsi. Hal ini menandakan bahwa informasi pada citra hasil dekripsi sama dengan citra aslinya [15].

Tabel 5. Analisis Kualitas Citra Terdekripsi

Citra Asli	Citra Terdekripsi	MSE	PSNR
		0	∞
		0	∞
		0	∞
		0	∞
		0	∞

Analisis Ruang Kunci

Algoritma yang diusulkan adalah komposisi transposisi Cat Map dan substitusi Logistic Map. Parameter kunci yang digunakan adalah p, q, g_0, dan r. Rentang nilai p, q $\in \mathbb{Z}^+$. Rentang nilai r dan g_0 adalah $3.5699 < r \leq 4$ dan $0 < g0 < 1$ dimana g0, r $\in \mathbb{R}^+$ [7]. Rentang nilai bilangan bulat pada Matlab adalah 1.8×10^{19} dan nilai mantissa adalah 10^{15} [13]. Pada Tabel 6, ruang kunci algoritma yang diusulkan lebih besar dari Cat Map dan Logistic Map. Hal ini menunjukkan algoritma yang diusulkan lebih tahan terhadap serangan brute force [15] karena nilai ruang kunci yang besar dapat memperlama waktu dalam pencarian kunci secara brute force.

Tabel 6. Ruang Kunci

Fungsi	**Parameter Kunci**	**Ruang Kunci**
Cat Map	p, q $\in \mathbb{Z}^+$	3.24×10^{38}
Logistic Map	g0 $\in$ [0, 1]; r $\in$ [3.5699, 4]	10^{30}
Usulan Algoritma	p, q $\in \mathbb{Z}^+$; g0 $\in$ [0, 1]; r $\in$ [3.5699, 4]	3.24×10^{68}

Tabel 7. Waktu Enkripsi dan Dekripsi (detik)

Nama	Ukuran	Enkripsi		Dekripsi	
		Cat & Logistic Map Sekuensial	Usulan Algoritma	Cat & Logistic Map Sekuensial	Usulan Algoritma
Lena	128×128	0.06	0.04	0.06	0.04
House	300×300	0.06	0.04	0.06	0.03
Couple	512×512	0.96	0.56	0.96	0.55
Sailboat	720×720	1.81	1.21	1.81	1.18
Pepper	1024×1024	3.92	2.29	3.87	2.22

Tabel 8. Perbandingan NPCR, UACI, dan Entropi

Referensi	NPCR (%)	UACI (%)	Entropi
[7]	99.43080	33.52930	7.99720
[16]	99.61000	33.46000	7.99920
[17]	99.61720	33.45160	7.99750
[18]	99.64000	33.51000	7.99700
Usulan Algoritma	99.65210	34.13334	7.99976

Analisis Waktu Proses

Waktu proses enkripsi dan dekripsi menunjukkan rata-rata waktu yang dibutuhkan oleh algoritma untuk melakukan proses enkripsi dan dekripsi. Tabel 7 menunjukkan perbandingan waktu proses enkripsi dan dekripsi. Proses waktu algoritma yang diusulkan lebih cepat dibandingkan algoritma kombinasi Cat dan Logistic secara berurutan atau sekuensial.

Perbandingan

Perbandingan algoritma didasarkan pada prinsip *chaos comparative* menurut aspek NPCR, UACI, dan Entropy [10]. Tabel 8 menunjukkan algoritma yang diusulkan menunjukkan performa algoritma yang terbaik karena nilai NPCR, UACI, dan Entropi memiliki nilai yang paling besar daripada referensi lain.

KESIMPULAN DAN SARAN

Algoritma yang diusulkan dapat mengubah koordinat piksel dengan transposisi Cat Map dan memodifikasi intensitas warna piksel dengan substitusi Logistic Map secara acak dan simultan yang ditunjukkan dalam kurva histogram dan korelasi citra terenkripsi. Analisis NPCR, UACI dan entropi menunjukkan algoritma yang diusulkan tahan terhadap serangan entropi dan serangan diferensial. Ruang kunci algoritma yang diusulkan dapat diperbesar, dan proses waktu lebih cepat daripada kombinasi algoritma Cat Map dan Logistic Map secara berurutan atau sekuensial. Algoritma yang diusulkan memiliki hasil terbaik dari prinsip *chaos comparative* yang dibandingkan dengan algoritma lainnya.

Penelitian ini menghasilkan algoritma yang hanya berlaku pada citra berdimensi

persegi N×N (Tinggi = Lebar). Penelitian lanjutan yang dapat dilakukan dengan mengembangan fungsi transposisi Cat Map agar dapat berlaku pada semua ukuran citra. Keamanan data enkripsi dapat ditingkatkan mengembangankan fungsi transposisi Cat Map yang dikomposisikan pada fungsi transposisi Henon Map dan disubtitusikan dengan fungsi pembangkit *keystream* agar variabel kunci lebih banyak.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. R. Joshi and R. A. Karkade, "Network Security with Cryptography," *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput.*, 2015.

[2] Y. P. K. Nkandeu and A. Tiedeu, "An image encryption algorithm based on substitution technique and chaos mixing," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 78, no. 8, pp. 10013–10034, 2019, doi: 10.1007/s11042-018-6612-2.

[3] R. D. Syah and R. J. Suhatril, "Digital Image Cryptography Using Combination of Arnold's Cat Map and Bernoulli Map Based on Chaos Theory," *Int. Res. J. Adv. Eng. Sci.*, vol. 4, no. 2, pp. 258–262, 2019, doi: 10.5281/zenodo.3153337.

[4] B. J. Saha, K. K. Kabi, and C. Pradhan, "A new approach on color image encryption using arnold 4D cat map," *Adv. Intell. Syst. Comput.*, vol. 410, pp. 131–138, 2016, doi: 10.1007/978-81-322-2734-2_14.

[5] R. D. Syah, S. Madenda, R. J. Suhatril, and S. Harmanto, "Hybrid Digital Image Cryptography Using Composition of Henon Map Transposition and Logistic Map Substitution," in *2022 IEEE International Conference of Computer Science and Information Technology (ICOSNIKOM)*, 2022, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICOSNIKOM56551.2022.10034926.

[6] S. Madenda, *Pengolahan Citra dan Video Digital: Teori, Aplikasi, dan Pemrograman Menggunakan MATLAB*. Erlangga, 2015.

[7] P. N. Lone, D. Singh, and U. H. Mir, "A novel image encryption using random matrix affine cipher and the chaotic maps," *J. Mod. Opt.*, vol. 68, no. 10, pp. 507–521, 2021, doi: 10.1080/09500340.2021.1924885.

[8] R. D. Syah, S. Madenda, R. J. Suhatril, and S. Harmanto, "Digital Image Encryption using Composition of RaMSH-1 Map Transposition and Logistic Map Keystream Substitution," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 14, no. 3, pp. 565–571, 2023, doi: 10.14569/IJACSA.2023.0140365.

[9] E. Sukirman, S. MT, and M. A. Mubarak, "The Implementation of Henon Map Algorithm for Digital Image Encryption," *TELKOMNIKA*

(Telecommunication Comput. Electron. Control., vol. 12, no. 3, p. 651, 2014, doi: 10.12928/telkomnika.v12i3.83.

[10] A. Benlashram, M. Al-ghamdi, R. Altalhi, and P. Kaouther, "A novel approach of image encryption using pixel shuffling and 3D chaotic map A novel approach of image encryption using pixel shuffling and 3D chaotic map," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1447, doi: 10.1088/1742-6596/1447/1/012009.

[11] Y. Liu and Y. C. Ko, "Image Processing Method Based on Chaotic Encryption and Wavelet Transform for Planar Design," *Adv. Math. Phys.*, vol. 2021, pp. 1–12, 2021, doi: 10.1155/2021/7511245.

[12] P. Ping, F. Xu, Y. Mao, and Z. Wang, "Designing permutation substitution image encryption networks with Henon map," *Neurocomputing*, vol. 283, pp. 53–63, 2018, doi: 10.1016/j.neucom.2017.12.048.

[13] L. Zhang, L. Zhang, and L. Zhang, "Application Research of Digital Media Image Processing Technology Based on Wavelet Transform," *J Image Video Proc*, vol. 138, no. 2018, 2018, doi: 10.1186/s13640-018-0383-6.

[14] A. M. Eskicioglu and P. S. Fisher, "Image Quality: Measures and Visual Performance," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 12, pp. 70–90, 1995, doi: 10.1007/978-94-011-7062-8_4.

[15] S. B. Kembaren, S. Suryadi, and T. Triswanto, "Implementasi Algoritma Enkripsi Citra Digital Berbasis Chaos Menggunakan Fungsi Komposisi Logistic Dan Gauss," in *Seminar Nasional Edusintek*, 2018, pp. 263–272.

[16] S. Kanwal *et al.*, "An Effective Color Image Encryption Based on Henon Map, Tent Chaotic Map, and Orthogonal Matrices," *Sensors*, vol. 22, no. 12, p. 4359, 2022, doi: 10.3390/s22124359.

[17] Y. Chen, S. Xie, and J. Zhang, "A Hybrid Domain Image Encryption Algorithm Based on Improved Henon Map," *Entropy*, vol. 24, no. 2, pp. 1–28, 2022, doi: 10.3390/e24020287.

[18] N. Munir, M. Khan, A. Al Karim Haj Ismail, and I. Hussain, "Cryptanalysis and Improvement of Novel Image Encryption Technique Using Hybrid Method of Discrete Dynamical Chaotic Maps and Brownian Motion," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 81, no. 5, pp. 6571–6584, 2022, doi: 10.1007/s11042-021-11810-2.