

**PENERAPAN METODE *ARNOLD'S CAT MAP*, *GINGERBREADMAN MAP*,  
DAN *HENON MAP* UNTUK KRIPTOGRAFI CITRA**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**Regina Anastasya**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

## **ABSTRACT**

### **APPLICATION OF ARNOLD'S CAT MAP, GINGERBREADMAN MAP, AND HENON MAP METHODS FOR IMAGE CRYPTOGRAPHY**

**By**

**REGINA ANATASYA**

Mathematicians have introduced mathematical concepts in cryptography since the 19th century. The idea of mapping is one of the concepts in the field of mathematics that is often found in developing image/image cryptography methods using a mathematical approach. The research conducted and described in this thesis discusses using 3 (three) forms of mapping: Arnold's Cat Map, Gingerbreadman Map, and Henon Map. The research results obtained in the form of algorithms and corresponding Mathematica programs have been shown in the discussion results section of this thesis. Using the algorithms and programs created shows that the three methods provide significant results in image encoding efforts. These results are seen from the histogram diagram, which tends to be uniform, correlation measurements close to zero, entropy measurement results, and Number of Pixel Change Rate which show values towards 100%.

Keywords: cryptography, image, Arnold's Cat Map, Gingerbreadman Map, Henon Map

## **ABSTRAK**

### **PENERAPAN METODE ARNOLD'S CAT MAP, GINGERBREADMAN MAP, DAN HENON MAP UNTUK KRIPTOGRAFI CITRA Oleh**

**REGINA ANASTASYA**

Pemakaian konsep matematika dalam kriptografi telah diperkenalkan sejak abad ke 19 oleh matematikawan. Konsep pemetaan merupakan salah satu konsep dalam bidang matematika yang banyak dijumpai dalam perkembangan metode kriptografi citra/gambar menggunakan pendekatan matematika. Penelitian yang dilakukan dan dideskripsikan dalam skripsi ini membahas penggunaan 3 (tiga) bentuk pemetaan yaitu Arnold's Cat Map, Gingerbreadman Map, dan Henon Map. Hasil penelitian yang diperoleh berupa algoritma dan program Mathematica yang bersesuaian telah diperlihatkan dalam bagian hasil pembahasan skripsi ini. Pemakaian algoritma dan program yang dibuat menunjukkan bahwa ketiga metode memberikan hasil signifikan dalam upaya penyandian gambar. Hasil tersebut ditinjau dari diagram histogram yang cenderung seragam, pengukuran korelasi yang mendekati nilai nol, hasil pengukuran entropi, dan *Number of Pixel Change Rate* yang memperlihatkan nilai menuju 100%.

Kata kunci: kriptografi, citra, *Arnold's Cat Map*, *Gingerbreadman Map*, *Henon Map*

**PENERAPAN METODE ARNOLD'S CAT MAP, GINGERBREADMAN MAP,  
DAN HENON MAP UNTUK KRIPTOGRAFI CITRA**

**Oleh**

**REGINA ANASTASYA**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
SARJANA MATEMATIKA**

**Pada**

**Jurusan Matematika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Lampung**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

Judul : **PENERAPAN METODE ARNOLD'S CAT MAP,  
GINGERBREADMAN MAP, DAN HENON MAP  
UNTUK KRIPTOGRAFI CITRA**

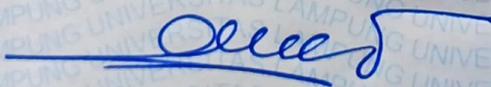
Nama Mahasiswa : **Regina Anastasya**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2017031063**

Program Studi : **Matematika**

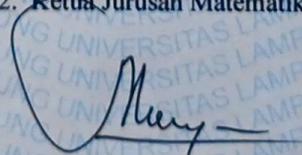
Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



  
**Prof. Ia Zakaria S.Si M.Sc.**  
NIP. 196902131994021001

  
**Dr. Agus Sutrisno S.Si M.Si.**  
NIP. 197008311999031002

2. Ketua Jurusan Matematika

  
**Dr. Aang Nuryaman S.Si. M.Si.**  
NIP. 19740316 200501 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

Prof. La Zakaria S.Si M.Sc

Sekretaris

Dr. Agus Sutrisno S.Si M.Si

Penguji

Bukan Pembimbing

Dr. Notiragayu, S.Si., M.Si

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Engi Heri Satria, S.Si., M.Si.

NIP. 19711001 200501 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 22 Mei 2024

## PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : **Regina Anastasya**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2017031063**

Jurusan : **Matematika**

Judul Skripsi : **PENERAPAN METODE ARNOLD'S CAT MAP,  
GINGERBREADMAN MAP, DAN HENON MAP  
UNTUK KRIPTOGRAFI CITRA**

Dengan ini menyatakan bahwa penelitian ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa skripsi ini merupakan salinan atau dibuat oleh orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 22 Mei 2024  
Penulis,



**Regina Anastasya**

## **RIWAYAT HIDUP**

Penulis bernama lengkap Regina Anastasya Manihuruk, dilahirkan pada tanggal 22 Oktober 2002 di Jakarta Barat. Penulis merupakan anak kedua dari empat bersaudara, buah cinta kasih dari pasangan Bapak Lasdien Simanihuruk dan Ibu Mastiur Tambun.

Penulis menempuh pendidikan anak usia dini di Taman Kanak-kanak (TK) Samaria Plus (Pinokio) pada tahun 2005-2008, pendidikan sekolah dasar di SDN 06 Pagi di Jakarta Barat pada tahun 2008-2014, pendidikan sekolah menengah pertama di SMPN 189 Jakarta Barat pada tahun 2014-2017, dan pendidikan sekolah menengah atas di SMA Budi Murni 2 Jakarta Barat pada tahun 2017-2020. Pada tahun 2020 penulis terdaftar sebagai mahasiswi Program Studi S1 Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi (SBMPTN).

Pada tahun 2020-2021 penulis aktif dalam kepengurusan Unit Kegiatan Mahasiswa Kristen (UKM Kristen) Universitas Lampung, penulis diamanahkan menjadi Anggota Divisi 1 (Informasi dan Dasar Kepemimpinan Kristen). Pada tahun 2023, penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di PT. Taspen Persero-KCU Bandar Lampung sebagai bentuk aplikasi bidang ilmu di dunia kerja. Pada tahun yang sama, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Restu Baru, Kecamatan Rumbia, Kabupaten Lampung Tengah, sebagai bentuk pengabdian kepada masyarakat.

## KATA INSPIRASI

*"Lakukanlah segala pekerjaanmu dengan kasih!"*

(1 Korintus 16:14)

*"Serahkanlah perbuatanmu kepada TUHAN, maka terlaksanalah segala rencanamu."*

(Amsal 16: 3)

*"Aku tahu, bahwa Engkau sanggup melakukan segala sesuatu, dan tidak ada rencana-Mu yang gagal."*

(Ayub 42 : 2)

*"Percayalah kepada Tuhan Yesus Kristus dan engkau akan selamat, engkau dan seisi rumahmu"*

(Kisah Para Rasul 16:31)

*"Have courage and be kind."*

## **PERSEMBAHAN**

Segala puji syukur dan kemuliaan bagi Tuhan Yesus Kristus, yang senantiasa melimpahkan anugerah dan kasih karunia-Nya bagi penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini guna memenuhi salah satu persyaratan untuk mencapai gelar Sarjana Matematika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

Terima kasih kepada kedua orang tua penulis atas segala doa, kesabaran, serta pengorbanan dengan setiap tetes air mata dan keringatnya yang telah membawa penulis hingga bisa sampai pada pencapaian ini.

Terima kasih kepada dosen pembimbing, pembahas, serta seluruh dosen Jurusan Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung atas ilmu dan nasihat yang diberikan kepada penulis, serta nilai-nilai luhur yang tidak ternilai harganya.

Terima kasih kepada sahabat-sahabat dan teman seperjuangan penulis atas kebersamaan, pengalaman, kenangan, dukungan, dan motivasi yang sangat berharga selama masa perkuliahan.

Terima kasih kepada almamater tercinta Universitas Lampung

## SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat, kasih, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Penerapan Metode Arnold’s Cat Map, Gingerbreadman Map, dan Henon Map untuk Kriptografi Citra” sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Matematika pada Jurusan Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, banyak pihak yang telah membantu memberikan bimbingan, arahan, dukungan, motivasi, serta saran sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. La Zakaria S.Si M.Sc. selaku Pembimbing I yang telah memberikan waktu, bimbingan, motivasi, arahan, dan masukan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Agus Sutrisno, S.Si., M.Si. selaku Pembimbing II yang telah memberikan waktu, bimbingan, arahan, dan masukan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
3. Ibu Dr. Notiragayu, S.Si., M.Si. selaku Pembahas yang telah memberikan evaluasi, masukan, serta kritik yang membangun kepada penulis selama penyusunan skripsi ini.
4. Bapak Dr. Ahmad Faisol, S.Si., M.Sc. selaku dosen pembimbing akademik.
5. Bapak Dr. Aang Nuryaman, S.Si., M.Si. selaku Ketua Jurusan Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
7. Seluruh dosen, staf, dan karyawan Jurusan Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
8. Kedua orang tua penulis Bapak Lasdien Simanihuruk dan Ibu Mastiur Tambun, kakak kandung penulis Febrianty melinda artauli Manihuruk, Adik kandung penulis Zefanya Margareth Manihuruk dan Christoper Lionel Ferdinand Simanihuruk, serta seluruh keluarga yang selalu mendoakan, memberikan nasihat, dan dukungan kepada penulis.
9. Abang Herlambang yang selalu memberikan masukan, motivasi, dan dukungan kepada penulis.
10. Sahabat baik penulis, yaitu Martha, Patricia, Dian, dan Rizka yang selalu menemani, memberikan motivasi, semangat, dan dukungan kepada penulis.
11. Nadabunda, Rizka, Demi, dan Jihad selaku teman seperbimbingan yang telah menemani dan menjadi tempat bertukar pikiran kepada penulis.
12. Bangtan Sonyeondan yang selalu memotivasi dan menemani penulis dengan karyanya.
13. Teman-teman seperjuangan di Jurusan Matematika angkatan 2020.
14. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah banyak membantu memberikan pemikiran demi kelancaran dan keberhasilan penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, Mei 2024

Penulis,

**Regina Anastasya**

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>x</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Manfaat Penelitian.....	3
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 <i>Arnold's Cat Map</i> (ACM).....	5
2.2 <i>Gingerbradman Map</i> (GM).....	6
2.3 Henon Map .....	6
2.4 Kriptografi .....	6
2.5 Citra Digital.....	8
2.4.1 Jenis-Jenis Citra digital .....	9
2.4.2 Interpretasi Citra .....	10
2.4.3 Elemen Citra Digital .....	11
2.6 Ketentuan Citra.....	11
2.7 Pengolahan Citra .....	12
2.6.1. Perbedaan Citra Analog dan Citra Digital.....	13
2.6.2. Teknik-Teknik Pengolahan Citra.....	13
2.8 <i>Number Of Pixel Change Rate</i> (NPCR) .....	14
2.9 Analisis Histogram .....	15
2.10 Entropi.....	15
2.11 Korelasi .....	16

<b>III. METODE PENELITIAN .....</b>	<b>17</b>
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	17
3.2 Metode Penelitian.....	17
<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>20</b>
4.1 Algoritma <i>Arnold's Cat Map</i> .....	20
4.2 Penyelesaian dengan metode <i>Arnold's Cat Map</i> .....	21
4.3 Algoritma <i>Gingerbreadman Map</i> .....	24
4.4 Penyelesaian dengan metode <i>Gingerbreadman Map</i> .....	25
4.5 Algoritma Henon Map.....	28
4.6 Penyelesaian dengan metode <i>Henon Map</i> .....	29
<b>V. KESIMPULAN .....</b>	<b>34</b>
5.1 Kesimpulan.....	34
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>35</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel</b>	<b>Halaman</b>
1. Hasil enkripsi dan dekripsi metode <i>Arnold's Cat Map</i> dengan nilai $a$ dan $b$ positif .....	21
2. Hasil enkripsi dan dekripsi metode <i>Arnold's Cat Map</i> dengan nilai $a$ dan $b$ negatif .....	22
3. Data Histogram, Korelasi, Entropi, NPCR hasil enkripsi kriptografi citra menggunakan metode <i>Arnold's Cat Map</i> dengan nilai $a$ dan $b$ positif .....	23
4. Data Histogram, Korelasi, Entropi, NPCR hasil enkripsi kriptografi citra menggunakan metode <i>Arnold's Cat Map</i> dengan nilai $a$ dan $b$ negatif .....	24
5. Hasil enkripsi dan dekripsi metode <i>Gingerbreadman Map</i> dengan nilai $a$ dan $b$ positif.....	25
6. Hasil enkripsi dan dekripsi metode <i>Gingerbreadman Map</i> dengan nilai $a$ dan $b$ negatif.....	26
7. Data Histogram, Korelasi, Entropi, NPCR hasil enkripsi kriptografi citra menggunakan metode <i>Gingerbreadman Map</i> dengan nilai $a$ dan $b$ positif .....	28
8. Data Histogram, Korelasi, Entropi, NPCR hasil enkripsi kriptografi citra menggunakan metode <i>Gingerbreadman Map</i> dengan nilai $a$ dan $b$ negatif .....	28
9. Hasil enkripsi dan dekripsi metode <i>Henon Map</i> dengan nilai $a$ dan $b$ positif .....	30
10. Hasil enkripsi dan dekripsi metode <i>Henon Map</i> dengan nilai $a$ dan $b$ negatif .....	30
11. Data Histogram, Korelasi, Entropi, NPCR hasil enkripsi kriptografi citra menggunakan metode <i>Henon Map</i> dengan nilai $a$ dan $b$ positif.....	32

12. Data Histogram, Korelasi, Entropi, NPCR hasil enkripsi kriptografi citra menggunakan metode <i>Henon Map</i> dengan nilai $a$ dan $b$ negatif.....	32
13. Rangkuman analisis citra hasil enkripsi dan dekripsi .....	33

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar</b>	<b>Halaman</b>
2.1 Proses enkripsi dan deskripsi.....	7
2.2 Kriptografi Simetris.....	8
2.3 Kriptografi Asimetris.....	8
2.4 (a) Warna Citra Biner (b) Citra Biner.....	9
2.5 (a) Warna Citra <i>Grayscale</i> (b) Citra <i>Grayscale</i> .....	10
2.6 (a) Kode Warna RGB (b) Citra Warna.....	10
2.7 Koordinat Representasi Citra .....	12
3.1 Diagram Langkah-Langkah Penelitian Kriptografi Citra Dengan Metode <i>Arnold's Cat Map / Gingerbreadman Map / Henon Map</i> .....	18

# I. PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Dalam kehidupan manusia di era zaman sekarang informasi telah menjadi suatu hal penting yang dipakai di kehidupan manusia sehari-hari. Kemampuan untuk mengakses atau memberitahukan suatu informasi yang akurat pun sekarang menjadi sangat mudah dan dapat di akses oleh seluruh kalangan baik individual, organisasi, perusahaan maupun lembaga pemerintahan. Seiringnya perkembangan teknologi yang semakin pesat dan banyaknya informasi rahasia, maka banyak juga pihak-pihak yang berusaha mengetahui suatu isi informasi rahasia tersebut untuk kepentingan pribadinya. Seiring dengan hal tersebut, salah satu upaya pencegahannya ialah dengan meningkatkan suatu sistem keamanan untuk melindungi informasi rahasia tersebut.

Kriptografi merupakan ilmu yang mempelajari bagaimana cara mengamankan suatu pesan atau dokumen, agar tidak dibaca oleh pihak yang tidak berkepentingan. Pada dasarnya kriptografi memiliki dua proses, yaitu enkripsi dan dekripsi. Enkripsi merupakan suatu teknik dimana data awal yang disebut dengan *plaintext* dibuat menjadi data yang tidak dapat terbaca. Dekripsi merupakan merubah data yang sudah dienkripsi tersebut menjadi data awal. Data yang telah melewati tahap enkripsi disebut *cipher* (Irfan, 2016). Pada tahun 1963 David Kahn menulis sebuah buku yang berjudul *The Codebreaker* (FRY, 2023). Di dalam buku itu tertulis bahwa kriptografi pertama kali digunakan oleh bangsa mesir sekitar 4000 tahun yang lalu dan para

peminat dari buku tersebut dengan kemiliteran ataupun pemerintahan. Lalu pada abad ke 9 M kriptografi dipaparkan untuk pertama kalinya oleh seorang ilmuwan yang bernama Abu Yusuf Ya'qub ibn 'Ishaq as-Shabbah al Kindi atau dikenal dengan Al-Kindi yang menulis kitab tentang seni memecahkan kode. Seiring berjalannya waktu semakin banyak tentang aplikasi kriptografi. Selain kriptografi dalam bentuk teks, ada juga kriptografi dalam bentuk gambar / citra digital.

Citra digital merupakan suatu media yang digunakan untuk menyajikan suatu informasi dalam bentuk gambar ataupun visual. Informasi yang terdapat pada citra dapat berupa informasi yang bersifat rahasia. Sehingga keamanan dalam informasi tersebut sangat diperlukan. Purba, dkk., (2014), menyatakan bahwa proses enkripsi dalam citra digital adalah untuk membuat piksel dalam citra tidak saling berhubungan lagi, sehingga menyulitkan pihak-pihak lain dalam melakukan analisis statistiknya. Salah satu penerapan yang digunakan dalam citra digital ialah teori *Chaos*.

Teori *chaos* merupakan teori yang menggambarkan suatu sistem dinamis, yang keadaannya selalu berubah seiring dengan berubahnya waktu, dan sangat sensitif terhadap kondisi awalnya. Beberapa metode dari teori *chaos* antara lain *Logistic Map*, *Henon Map*, *Arnold's Cat Map*, *Duffing Map*, *Gingerbreadman Map*, dan lain sebagainya. Seiring berjalannya waktu maka berkembanglah penelitian tentang teori chaos pada citra digital. Dalam penelitian ini penulis akan memakai tiga metode, yaitu metode *Arnold's Cat Map*, *Gingerbreadman Map* dan *Henon Map*.

*Arnold's Cat Map* (ACM) merupakan suatu fungsi yang mengubah koordinat piksel  $(x,y)$  pada citra ke koordinat lain yang ada di dalam citra tersebut (Rahmawati & Liantoni, 2018). Metode ACM ini akan memanfaatkan suatu matriks untuk membangkitkan bilangan acak yang diinginkan. Sedangkan *Gingerbreadman Map* (GM) merupakan pemetaan yang bersifat dua dimensi. Dalam GM pemetaan yang dihasilkan akan bersifat acak pada enam wilayah heksagonal, dan *Henon Map*

merupakan suatu persamaan yang memelukan titik  $(x,y)$  dan memetakannya kembali menjadi sebuah titik baru.

Ada beberapa penelitian yang sudah meneliti tentang ketiga metode tersebut, misalnya (Suryadi & Gunawan., 2014), berhasil membuat aplikasi tentang enkripsi citra digital menggunakan algoritma *gingerbreadman map*. Kemudian (Sahid dkk., 2021) telah berhasil meneliti sistem kriptografi *Stream Cipher* berbasis fungsi *Chaos* untuk keamanan informasi. Kemudian (Suhatri dkk., 2020) telah berhasil menganalisis integritas data pada kriptografi citra digital dengan menggunakan penggabungan 2 algoritma, yaitu algoritma *Arnold's cat map*, dan algoritma *Bernoulli Map*. Selanjutnya (Zakaria et al., 2021) berhasil menemukan pemetaan persamaan diferensial parsial linier dua dimensi dan mengaplikasikannya ke dalam kriptografi gambar digital dan pada tahun 2022 (Irawan & Rachmawanto, 2022) juga berhasil mengimplementasikan kriptografi dengan menggunakan Algoritma *Arnold's cat map* dan *henon Map*.

Dari penelusuran literatur, belum ada penelitian tentang citra digital dengan 3 metode, yaitu metode *Arnold's Cat Map*, *Gingerbreadman Map*, dan *Henon Map*. Sehingga dalam penelitian ini akan dibahas penerapan metode *Arnold's Cat Map*, *Gingerbreadman Map*, dan *Henon Map* untuk kriptografi citra.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil enkripsi dan dekripsi pada citra digital dengan metode *Arnold's Cat Map*, *Gingerbreadman Map*, dan *Henon Map* serta menganalisis keamanan pada metode tersebut.

## 1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah :

1. Mendapatkan hasil perbandingan dari proses enkripsi dan dekripsi pada citra digital dengan metode *Arnold's Cat Map*, *Gingerbreadman Map*, dan *Henon Map*.
2. Mendapatkan hasil analisis keamanan dari mengenkripsi gambar atau *plainimage* pada kriptografi citra.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 *Arnold's Cat Map* (ACM)

Metode ACM adalah sebuah konsep dalam matematika yang terkait dengan transformasi linear pada bidang torus. Transformasi ini dikenal juga sebagai "peta kucing Arnold" atau "peta kucing". Metode ini pertama kali ditemukan oleh seorang matematikawan bernama Vladimir I. Arnold pada tahun 1960. Vladimir I. Arnold mendemonstrasikan algoritmanya dengan menggunakan citra kucing (Rachmawanto & Irawan, 2019). Formula pemetaan yang dipakai dalam proses enkripsi ACM ini adalah

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & b \\ c & bc + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \text{ mod } (N) \quad (1)$$

Dimana  $(x, y)$  dalam persamaan (1) merupakan posisi piksel dalam citra berukuran  $N \times N$  dan  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  merupakan posisi piksel yang baru dimana  $i$  merupakan indeks yang dimulai dari 0 hingga  $N-1$  ( $0 \leq x < N$  dan  $0 \leq y < N$ ),  $b$  dan  $c$  adalah sembarang bilangan real. Dalam algoritma yang menggunakan persamaan (1) koordinat piksel dalam dimensi  $N \times N$  dikalikan dengan matriks  $2 \times 2$  untuk mendapatkan koordinat  $x$  dan  $y$  yang baru. Untuk proses dekripsi menggunakan *Arnold's Cat Map* (1) diperlukan prapetanya (invers matriks koefisien) pada persamaan (1), yaitu

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} bc + 1 & -b \\ -c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} \text{ mod } (N) \quad (2)$$

## 2.2 *Gingerbradman Map (GM)*

Pemetaan GM merupakan suatu pemetaan diskrit nonlinier yang didefinisikan sebagai berikut (Gafar dkk., 2020):

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= 1 - y_n + |x_n| \\y_{n+1} &= x_n\end{aligned}\tag{3}$$

Pemetaan (3) memiliki enam bagian heksagonal yang khas dan bersifat acak (Susanto, 2009) Pemetaan yang digunakan dalam metode GM ini menghasilkan diagram yang indah dengan lima segi enam pada diagram. Salah satu keistimewaan metode GM ini adalah orbit setiap segi enam terus berputar dan saling mengimbangi. Sama seperti metode ACM dimana iterasi dijalankan secara terus menerus.

## 2.3 *Henon Map (HM)*

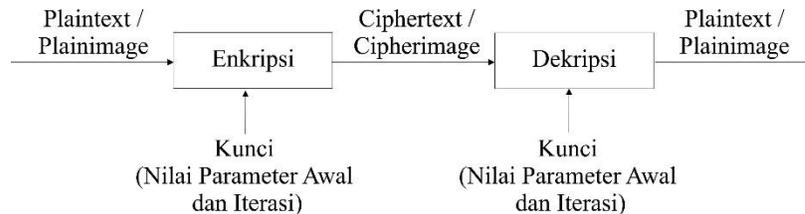
Pemetaan HM diperkenalkan oleh Michel Henon pada tahun 1978 dan dikenal sebagai sistem dinamik diskrit non linier (Irawan & Rachmawanto, 2022). Pemetaan HM ditunjukkan dalam bentuk:

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= y_n + 1 - ax_n^2 \\y_{n+1} &= bx_n\end{aligned}\tag{4}$$

## 2.4 **Kriptografi**

Kriptografi berasal dari bahasa Yunani “*kryptos*” yang artinya tersembunyi, rahasia dan “*graphien*” yang artinya menulis. Arti umum dari kriptografi adalah ilmu yang mempelajari bagaimana mengamankan pesan dan dokumen agar orang yang tidak berkepentingan tidak dapat membacanya. Di dalam kriptografi terdapat 2 proses, yaitu

proses enkripsi dan proses dekripsi. Enkripsi merupakan proses mengolah *plaintext* / *plainimage* (pesan yang dapat terbaca) menjadi *ciphertext* / *cipherimage* (pesan acak yang sudah tidak bisa dibaca). Dekripsi merupakan merubah data yang sudah dienkripsi tersebut menjadi data awal.



Gambar 2.1. Proses Enkripsi dan Dekripsi

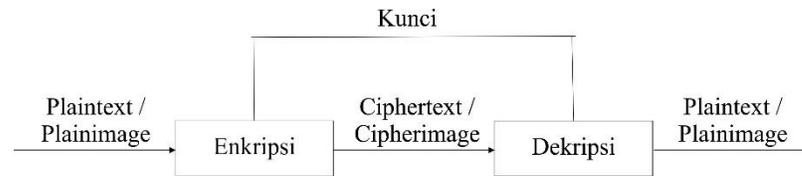
Pada tahun 1963, David Kahn menulis sebuah buku yang berjudul *The Codebreaker*. Di dalam buku itu tertulis bahwa kriptografi pertama kali digunakan oleh bangsa mesir sekitar 4000 tahun yang lalu dan para peminat dari buku tersebut berhubungan dengan kemiliteran ataupun pemerintahan. Pada perang dunia ke II, kemiliteran merasakan manfaat dari kriptografi tersebut. Kriptografi membuat komunikasi menjadi lebih aman dengan cara membuatnya tidak bisa dibaca oleh musuh. Hingga pada akhir perang dunia ke II kriptografi semakin berkembang pesat. Lalu pada abad ke 9 M, kriptografi pertama kali dijelaskan oleh seorang ilmuwan bernama Abu Yusuf Yaqub ibn Ishaq as-Shabaa al-Kindi atau al-Kindi, yang menulis buku tentang seni pemecahan kode.

- **Jenis-Jenis Kriptografi**

Algoritma kriptografi terdiri dari beberapa jenis, yaitu:

1. Simetris

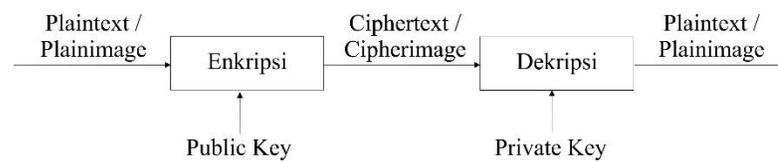
Kriptografi simetris merupakan kriptografi yang menggunakan satu kunci, yaitu kunci yang digunakan saat proses enkripsi sama dengan kunci yang digunakan untuk mendekripsi.



Gambar 2.2. Kriptografi Simetris

## 2. Asimetris

Kriptografi asimetris merupakan pasangan kunci-kunci yang salah satu kunci dipakai untuk enkripsi dan kunci satunya dipakai untuk dekripsi pesan tersebut (Basri, 2016).



Gambar 2.3. Kriptografi Asimetris

Tujuan dari kriptografi adalah untuk menjaga isi dari suatu informasi dan menjaga perubahan-perubahan data yang tidak sah dari upaya para hacker yang tidak bertanggung jawab.

## 2.5 Citra Digital

Citra digital merupakan sebuah media yang digunakan untuk menyajikan suatu informasi dalam bentuk gambar ataupun visual. Informasi yang terdapat pada citra merupakan informasi yang bersifat rahasia sehingga keamanan dalam informasi tersebut sangat diperlukan. Seperti yang dikatakan oleh Purba, dkk., 2014, bahwa proses enkripsi dalam citra digital adalah untuk membuat piksel dalam citra tidak saling berkaitan lagi, sehingga pihak-pihak yang tidak berkepentingan tidak dapat menebak analisis statistiknya. piksel sendiri memiliki arti, yaitu representasi dari titik terkecil citra digital dan dihitung per inci (satuan metrik).

### 2.4.1 Jenis-Jenis Citra digital

Menurut Kaswidjanti dkk. (2011), jenis-jenis citra dikelompokkan menjadi 3, yaitu:

#### 1. Citra Biner (*Monokrom*)

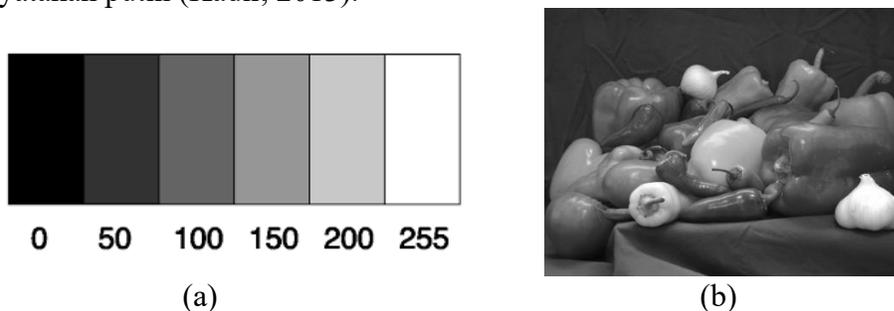
Citra Biner (*Monokrom*) adalah citra yang hanya memiliki 2 warna, yaitu warna hitam dan putih. Citra ini menyimpan tiap piksel dalam bit tunggal, yaitu 0 atau 1. Citra biner sendiri dapat diartikan sebagai himpunan bagian dari kekisi bilangan bulat dua dimensi  $Z^2$



Gambar 2.4. (a) Warna Citra Biner (b) Citra Biner

#### 2. Citra Skala Keabuan (*Grayscale*)

Citra Skala Keabuan merupakan gambar yang menggunakan gradasi warna abu-abu. Skala abu-abu mewakili intensitas setiap piksel sebagai satu nilai sehingga warna biru, merah, dan hijau mempunyai intensitas yang sama. Intensitas nilai *grayscale* berkisar antara 0 sampai 255, dimana 0 menyatakan hitam dan 255 menyatakan putih (Kadir, 2013).



Gambar 2.5. (a)Warna Citra *Grayscale* (b) *Citra Grayscale*

### 3. Citra Warna (*True Color*)

Citra warna merupakan citra dengan campuran warna, di mana setiap piksel yang terdapat pada citra merupakan kombinasi dari tiga warna dasar RGB (*Red Green Blue*) (Kadir, 2013). Dalam setiap warna panjang gelombangnya pun berbeda, panjang gelombang tertinggi ada pada warna merah dan panjang gelombang terendah ada pada warna ungu.

<b>Yellow</b> R = 255 G = 255 B = 0	<b>Orange</b> R = 255 G = 102 B = 0	<b>Green</b> R = 0 G = 255 B = 0
<b>Cyan</b> R = 0 G = 255 B = 255	<b>Violet</b> R = 204 G = 102 B = 204	<b>White</b> R = 255 G = 255 B = 255
<b>Black</b> R = 0 G = 0 B = 0	<b>Turquoise</b> R = 102 G = 255 B = 204	<b>Brown</b> R = 153 G = 102 B = 51



(a)

(b)

Gambar 2.6. (a) Kode Warna RGB (b) Citra Warna

## 2.4.2 Interpretasi Citra

Interpretasi gambar digital melibatkan tiga fase, yaitu:

### 1. Deteksi

Tahap deteksi adalah kegiatan mengamati objek dalam rekaman gambar digital. Fase ini menentukan apakah suatu objek hadir dalam gambar.

### 2. Identifikasi

Langkah ini dilakukan untuk mendeteksi objek pada gambar. Berdasarkan fitur-fitur yang dapat terdeteksi oleh sensor, objek ini dapat dikenali menggunakan stereoskop.

### 3. Analisis

Tahap analisis ini berkaitan dengan proses informasi selanjutnya. Informasi ini dikumpulkan dengan mengamati penampakan objek secara dekat.

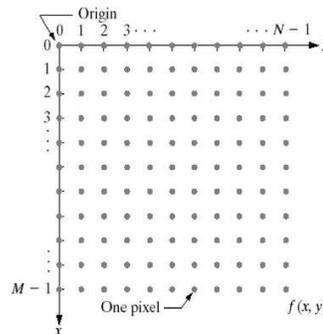
### 2.4.3 Elemen Citra Digital

Berikut merupakan elemen yang berada dalam citra digital (Sutoyo, dkk. 2009):

1. Kecerahan (*Brightness*) merupakan cahaya dari piksel yang terdapat di dalam citra yang dapat ditangkap oleh sistem penglihatan. Kecerahan pada suatu titik (piksel) yang terdapat dalam citra merupakan intensitas rata-rata dari suatu area yang melingkupinya.
2. Kontras (*Contrast*) kontras merupakan distribusi terang dan gelap pada suatu gambar. Gambar yang baik memiliki komposisi terang dan gelap yang merata.
3. Kontur (*Contour*) adalah kondisi yang disebabkan oleh perubahan intensitas piksel yang berdekatan. Perubahan yang terjadi ini memungkinkan mata mampu mendeteksi tepi objek pada gambar.
4. Warna dalam citra berfungsi sebagai persepsi visual terhadap panjang gelombang cahaya yang dipantulkan suatu benda.
5. Bentuk (*Shape*) merupakan adalah sifat intrinsik benda tiga dimensi, dan berasumsi bahwa bentuk adalah sifat intrinsik terpenting dari elemen visual yang ada pada manusia.
6. Tekstur (*Texture*) merupakan keteraturan dari suatu pola tertentu yang terbentuk dari susunan piksel pada suatu gambar digital. Tekstur pada suatu gambar dapat digunakan untuk membedakan sifat permukaan suatu benda, apakah teksturnya kasar atau halus. Manusia juga dapat membedakan sifat spesifik dari kekasaran dan kehalusan dari warna permukaan benda tersebut.

## 2.6 Ketentuan Citra

Dalam buku yang ditulis oleh Sulistiyanti dkk. (2016), yang berjudul Pengolahan Citra Dasar dan Contoh Penerapannya, variabel  $x$  berada di arah horizontal dan variabel  $y$  berada di arah vertikal, maka citra dapat disajikan sebagai  $f(x, y)$ . dengan kesesuaian di komputer, versi diskrit citra adalah  $f(m, n)$ , dengan  $m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$  dan  $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ . Dengan demikian sebanyak  $M \times N$  posisi diskrit, yang menjadi ukuran ketelitian data citra.



Gambar 2.7. Koordinat Representasi Citra

## 2.7 Pengolahan Citra

Pengolahan memiliki arti suatu proses membentuk sesuatu guna mengubah wujud, unsur atau suatu hal dengan tujuan mendapatkan hal yang lebih jelas. Pengolahan citra adalah suatu metode atau teknik yang dapat digunakan untuk memproses suatu data gambar yang diisikan untuk mendapatkan suatu informasi tertentu mengenai obyek yang diamati (Putri, 2016). Teknik dalam pengolahan citra ini meliputi tentang *enhancement*, restorasi, segmentasi, pemampatan citra dan morfologi matematika.

Berkembangnya teknik pengolahan citra, pertama kali pada tahun 1921 dikarenakan keberhasilan pengiriman foto secara digital. Sistem transmisi ini ditemukan oleh Harry G. Bartholomew dan Maynard D. McFarlane dan dikenal dengan nama *Bartlane cable picture transmission system*. Dalam sistem ini, foto dikirim dalam format digital dan diterima oleh printer *telegraph* untuk diubah menjadi gambar cetak. Awalnya, sistem ini hanya dapat mengodekan gambar dengan lima warna, tapi pada tahun 1929 sistem

ini meningkat mampu mengkodekan gambar dalam 15 tingkat keabuan. Lalu pada tahun 1960, muncul komputer yang memiliki kemampuan pemrosesan berkecepatan tinggi dan kapasitas penyimpanan yang dibutuhkan untuk pemrosesan gambar. Pada awalnya, pengolahan citra digital hanya berfungsi untuk mengubah citra analog menjadi citra digital dan meningkatkan kualitas citra. Dengan berkembangnya peralatan pengolahan citra, penggunaan pengolahan citra digital juga semakin beragam.

### **2.6.1. Perbedaan Citra Analog dan Citra Digital**

#### **1. Citra Analog**

Citra analog adalah citra yang bersifat kontinu, seperti pada gambar monitor televisi, lukisan, dan lain-lain. Citra analog tidak dapat diinterpretasikan dengan komputer, sehingga komputer tidak dapat memproses secara langsung. Oleh sebab itu, agar citra analog bisa diproses oleh komputer maka proses konversi dari analog ke digital pun harus dilakukan terlebih dahulu.

#### **2. Citra Digital**

Citra digital merupakan representatif yang dari citra yang diambil oleh mesin dengan bentuk pendekatan berdasarkan kuantisasi dan sampling. Sampling pada citra menyatakan besar kecil ukuran piksel pada citra dan kuantisasi menyatakan jumlah warna yang terdapat pada citra.

### **2.6.2. Teknik-Teknik Pengolahan Citra**

Teknik pengolahan citra terbagi menjadi 3 bagian, yaitu:

#### **1. Pengolahan Tingkat Rendah (*Low-Level Processing*)**

Pengolahan tingkat rendah ini merupakan operasional-operasional dasar dalam pengolahan citra, seperti pengurangan noise (*noise reduction*), perbaikan citra (*image enhancement*), dan restorasi citra (*image restoration*).

## 2. Pengolahan Tingkat Menengah (*Mid-Level Processing*)

Pengolahan tingkat menengah ini meliputi segmentasi pada citra, deskripsi objek, dan klasifikasi objek secara terpisah.

## 3. Pengolahan Tingkat Tinggi (*High-Level Processing*)

Pengolahan tingkat tinggi meliputi analisis citra.

Tujuan dari pengolahan citra digital antara lain, yaitu memperbaiki kualitas gambar dari segi *radiometric* dan *geometric*, melakukan proses penarikan informasi atau dekripsi objek yang terdapat dalam citra, melakukan pemilihan citra yang optimal, melakukan kompresi untuk menyimpan data.

### 2.8 *Number Of Pixel Change Rate (NPCR)*

NPCR mengukur persentase piksel yang berbeda antara citra asli dan citra terenkripsi. Semakin tinggi persentase NPCR, maka tingkat perbedaan antara citra asli dan citra terenkripsi akan lebih besar. Metrik ini penting untuk mengukur sejauh mana sebuah algoritma enkripsi dapat mempengaruhi citra asli dan seberapa baik keamanan enkripsi tersebut dalam menjaga integritas data. Rumus yang digunakan untuk mengetahui nilai NPCR adalah sebagai berikut (Irfan, 2016):

$$NPCR = \frac{\sum_{i,j} D(i,j)}{W \times H} \times 100\% \quad (5)$$

Dengan ketentuan:

$$D(i,j) = \begin{cases} 0, & \text{jika } C_1(i,j) = C_2(i,j) \\ 1, & \text{jika } C_1(i,j) \neq C_2(i,j) \end{cases}$$

Keterangan:

$D$  : Variabel banyaknya perbedaan piksel

$C1$  : Piksel *plainimage*

$C2$  : Piksel *cipherimage*

$W$  : Lebar citra

$H$  : Tinggi citra

## 2.9 Analisis Histogram

Analisis histogram pada citra diperlukan untuk mengetahui penyebaran nilai piksel antara *plainimage* dan gambar *cipherimage*. Jika distribusi dalam histogram yang ditampilkan *cipherimage* masih memiliki banyak keberagaman dan perbedaan yang signifikan dengan *plainimage*, maka *cipherimage* masih memberikan kemudahan untuk melakukan serangan statistik pada *cipherimage* yang didapatkan.

## 2.10 Entropi

Nilai entropi merupakan keteracakan distribusi derajat keabuan suatu citra (Aisyah dkk., 2015). Semakin acak distribusi derajat keabuan yang dienkripsi, maka semakin tinggi juga nilai entropi yang akan dihasilkan. Rumus yang digunakan untuk menghitung nilai entropi adalah sebagai berikut:

$$H_e = - \sum_{k=0}^{G-1} P(k) \log(P(k)) \quad (6)$$

Keterangan:

$H_e$  : Nilai entropi

$G$  : Nilai keabuan dari citra (0,225)

$P(k)$  : Peluang munculnya simbol ke-k

## 2.11 Korelasi

Analisis korelasi merupakan suatu metode untuk mengukur kemiripan antara dua variabel atau gambar. Semakin rendah korelasi antar piksel maka semakin aman sistem enkripsinya (Irfan, 2016). Rumus yang digunakan dalam mencari korelasi:

$$r = \frac{n \sum(xy) - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum(x^2) - (\sum(x))^2][n \sum(y^2) - (\sum(y))^2]}} \quad (7)$$

Keterangan:

$r$  : Nilai korelasi

$n$  : Jumlah data

$\sum xy$  : Jumlah perkalian  $xy$

$\sum x$  : Jumlah data  $x$

$\sum y$  : Jumlah data  $y$

$\sum(x^2)$  : Jumlah kuadrat data  $x$

$\sum(y^2)$  : Jumlah kuadrat data  $y$

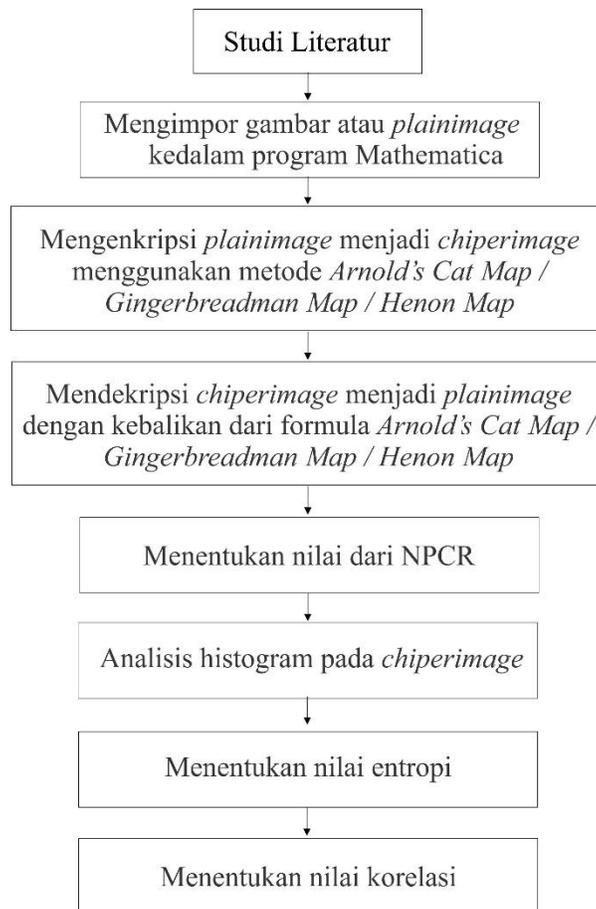
### **III. METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini dilaksanakan di Jurusan Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung pada semester ganjil tahun ajaran 2023/2024.

#### **3.2 Metode Penelitian**

Penelitian ini merupakan penelitian tentang kriptografi citra dengan menggunakan metode *Arnold's Cat Map*, *Gingerbreadman Map*, dan *Henon Map*. Secara keseluruhan tahapan Penerapan Metode *Arnold's Cat Map*, *Gingerbreadman Map*, dan *Henon Map* untuk kriptografi citra disajikan dalam diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Langkah-langkah Penelitian Kriptografi Citra dengan Metode *Arnold's Cat Map*, *Gingerbreadman Map*, dan *Henon Map*

Berikut langkah yang dilakukan pada penelitian ini:

1. Studi literatur buku, jurnal dan artikel ilmiah yang berkaitan dengan penelitian ini.
2. Mempelajari metode yang relevan dengan kasus atau permasalahan yang berkaitan dengan penelitian.
3. Mengimpor gambar atau *plainimage* kedalam program.
4. Mengkripsi gambar menjadi *cipherimage* dengan memasukan formula dari metode *Arnold's Cat Map*, *Gingerbreadman Map*, dan *Henon Map*.
5. Mendeksripsi *cipherimage* menjadi *plainimage* dengan kebalikan dari *Arnold's Cat Map*, *Gingerbreadman Map*, dan *Henon Map*.

6. Menentukan nilai dari NPCR (*Number of Pixel Change Rate*)
7. Menganalisis histogram pada *cipherimage*
8. Menentukan nilai entropi
9. Menentukan nilai korelasi

## **V. KESIMPULAN**

### **5.1 Kesimpulan**

Dari bagian hasil dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa algoritma yang ditulis dan dikonstruksi dapat digunakan untuk melakukan proses kriptografi citra, selain itu ketiga metode tersebut memberikan nilai hasil kriptografi citra yang hampir sama.

### **5.2 Saran**

Algoritma yang dikonstruksikan meliputi proses enkripsi - dekripsi pada sebuah citra / gambar. Algoritma tersebut dapat dikembangkan pada penelitian lanjutan, misalnya penggunaan algoritma yang dibahas pada konsep Stegonografi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aisyah, E. S. N., Hayat, A. W., Widanti, P., Prasetya, S. Y., & Iskandar, H. (2015). Analisis Kemiripan Pola Citra Digital Menggunakan Metode Euclidean. *Seminar Nasional Teknologi Informasi Dan Multimedia*, 6–8.
- Basri. 2016. Kriptografi Simetris dan Asimetris dalam Perspektif Keamanan Data dan Kompleksitas Komputasi. *Jurnal Ilmiah Ilmu Komputer*. **2**(2), 15-23.
- Gaffar, A., Joshi, A. B., & Kumar, D. 2020. *Image Encryption using Gingerbreadman Map And RC4A Stream Cipher. Applications and Applied Mathematics: An Internatioanl Journal (AAM)*. **15**(2), 1230-1244.
- Irawan, C., & Rachmawanto, E. H. (2022). Implementasi Kriptografi dengan Menggunakan Algoritma Arnold's Cat Map dan Henon Map. *Jurnal Masyarakat Informatika*, *13*(1), 15–32. <https://doi.org/10.14710/jmasif.13.1.43312>
- Irfan, P. (2016). Aplikasi Enkripsi Citra Menggunakan Algoritma Kriptografi. *Jurnal Matrik*, *16*(1), 96–104.
- Kadir, A. 2013. Pengertian MySQL. Tersedia dalam : Buku Pintar Programer Pemula PHP. Yogyakarta. Mediakom.
- Kahn, D., 1967, *The Codebreakers*, published by *The New American Library*.

- Kaswidjanti, W., Jayadianti, H., & Malik, E. A. (2011). Aplikasi pengenalan bendera negara menggunakan histogram citra. *Seminar Nasional Informatika UPN "Veteran" Yogyakarta*, 42–49.
- Khan, M., & Asghar, Z. (2018). A novel construction of substitution box for image encryption applications with Gingerbreadman chaotic map and S8 permutation. *Neural Computing and Applications*, 29(4), 993–999. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2511-5>
- Purba, R., Halim, A., & Syahputra, I. 2014. Enkripsi Citra Digital Menggunakan *Arnold's Cat Map* dan *Nonlinier Chaotic Algorithm*. *Jurnal Jsm Stmik Mikroskil*. 15(2), 61-71.
- Putri, A. R. (2016). Pengolahan Citra dengan Menggunakan Web Cam pada Kendaraan Bergerak di Jalan Raya. *JUPI (Jurnal Ilmiah Penelitian Dan Pembelajaran Informatika)*, 1(01), 1–6. <https://doi.org/10.29100/jipi.v1i01.18>
- Rachmawanto, E. H., & Irawan, C. (2019). Enkripsi dan Dekripsi Citra Rgb Menggunakan Algoritma Arnold ' S Cat Map. *Prosiding SENDI\_U 2019, ISBN: 978-979-3649-99-3, 1*, 978–979.
- Rahmawati, W. M., & Liantoni, F. (2018). Penggunaan Arnold Cat Map dan Beta Chaotic Map pada Enkripsi Data Citra. *Jurnal ELTIKOM*, 2(2), 50–57. <https://doi.org/10.31961/eltikom.v2i2.85>
- Sahid, S., Dhoruri, A., Lestari, D., Ratna Sari, E., & Fauzan, M. (2021). Sistem Kriptografi Stream Cipher Berbasis Fungsi Chaos untuk Keamanan Informasi. *Jurnal Sains Dasar*, 8(1), 6–12. <https://doi.org/10.21831/jsd.v8i1.38666>
- Sulistiyanti, R., S., Setyawan, A., F., & Komarudin, M. 2016. pengolahan citra dasar dan contoh penerapannya, Teknosain.
- Sutoyo, T., Mulyanto, E., & Suhartono, V. 2009, Teori Pengolahan Citra Digital, Penerbit Andi: Yogyakarta.
- Suhatri, R. J., Syah, D., Gunadarma, U., Margonda, J., & No, R. (2020). Analisis

Integritas Data pada Kriptografi Citra Digital Menggunakan Penggabungan Arnold's Cat Map dan Bernoulli Map. *Jurnal Ilmiah Komputasi*, 19(1), 121–126.  
<https://doi.org/10.32409/jikstik.19.1.163>

Suryadi, M.T., & Gunawan, T. 2014. Aplikasi Enkripsi Citra Digital Menggunakan Algoritma *Gingerbreadman Map*. *Prosiding Seminar Ilmiah Nasional Komputer Dan Sistem Intelijen*. **8**, 370-375.

Susanto, A. 2009. Penerapan Teori Chaos di Dalam Kriptografi, *Program Studi Teknik Informatika, Institut Teknologi Bandung*.  
<https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Kriptografi/2008-2009/Makalah2/MakalahIF3058-2009-b031.pdf>

Zakaria, L., Yuliani, E., & Asmiati, A. (2021). A two-dimensional mkdv linear map and its application in digital image cryptography. *Algorithms*, 14(4).  
<https://doi.org/10.3390/a14040124>