



**PROGRAM SARJANA ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



MOHAMMAD THAREEQ IZZULHAQ

**PENGEMBANGAN TEKNIK *DIGITAL WATERMARKING*
PADA CITRA MEDIS DENGAN FITUR
PEMULIHAN GAMBAR**

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Pengembangan Teknik Digital Watermarking pada Citra Medis dengan Fitur Pemulihan Gambar” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir skripsi ini.

Dengan ini *saya* melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Mei 2025

Mohammad Thareeq Izzulhaq
G64180041

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbaikny sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



ABSTRAK

MOHAMMAD THAREEQ IZZULHAQ. Pengembangan Teknik *Digital Watermarking* pada Citra Medis dengan Fitur Pemulihan Gambar. Dibimbing oleh SHELVIE NIDYA NEYMAN.

Kemajuan teknologi telah mempercepat pemanfaatan gambar digital di berbagai bidang. Namun, kemudahan dalam mendistribusikan gambar digital turut meningkatkan risiko terhadap berbagai serangan, seperti pencurian kekayaan intelektual dan manipulasi data. Salah satu solusi untuk menjaga keaslian dan kepemilikan gambar digital adalah melalui teknik *watermarking*. Penelitian ini mengembangkan metode *digital watermarking* dengan fitur pemulihan gambar yang diterapkan pada citra medis. Metode yang diusulkan bertujuan untuk memverifikasi integritas data sekaligus memulihkan bagian gambar yang mengalami kerusakan. Implementasi menggunakan algoritma berbasis Least Significant Bit (LSB) dan Arnold's Map menunjukkan hasil yang baik, dengan nilai Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) di atas 44 dB dan nilai Structural Similarity Index (SSIM) di atas 0,92. Tingkat deteksi *watermark* mencapai 100%. Selain itu, pengujian juga membuktikan kemampuan algoritma dalam memulihkan gambar setelah mengalami berbagai jenis serangan, yang ditunjukkan melalui peningkatan nilai PSNR dan SSIM setelah proses pemulihan.

Kata Kunci: citra medis, *digital watermarking*, gambar digital, pemulihan gambar.

ABSTRACT

MOHAMMAD THAREEQ IZZULHAQ. Development of Digital Watermarking Technique on Medical Images with Image Recovery Feature. Supervised by SHELVIE NIDYA NEYMAN.

Technological advancements have significantly accelerated the adoption of digital imaging across various domains. Nevertheless, the ease with which digital images can be distributed has concurrently heightened the risk of malicious activities, including intellectual property theft and data tampering. Digital watermarking has emerged as a viable technique to safeguard the authenticity and ownership of digital images. This study proposes a fragile digital watermarking method equipped with an image recovery feature, specifically designed for application in medical imaging. The proposed approach aims to ensure data integrity verification while enabling the restoration of tampered image regions. The method employs a combination of Least Significant Bit (LSB) embedding and Arnold's Transform, yielding promising results. Experimental evaluations demonstrate that the method achieves Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) values exceeding 44 dB and Structural Similarity Index Measure (SSIM) values greater than 0.92. Moreover, the watermark detection rate consistently reached 100%. The robustness of the recovery mechanism was further validated through various attack scenarios, as evidenced by improvements in both PSNR and SSIM metrics following the restoration process.

Keywords: *digital images*, *digital watermarking*, *image recovery*, *medical images*.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
Mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbaiknya sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



**PROGRAM SARJANA ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
Mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Pengaji pada Ujian Skripsi:

- 1 Endang Purnama Giri S.Kom., M.Kom.
- 2 Firman Ardiansyah S.Kom., M.Si.



Judul Skripsi : Pengembangan Teknik *Digital Watermarking* pada Citra Medis dengan Fitur Pemulihan Gambar
Nama : Mohammad Thareeq Izzulhaq
NIM : G64180041

Disetujui oleh



Pembimbing:
Dr. Shelvie Nidya Neyman, S.Kom, M.Si.

Diketahui oleh



Ketua Program Sarjana Ilmu Komputer:
Dr. Sony Hartono Wijaya, S.Kom., M.Kom.
19810809 200812 1 002



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbarui sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *subhanaahu wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Juli 2022 sampai bulan September 2022 ini ialah pengembangan teknik digital *watermark* untuk menghasilkan perlindungan yang lebih baik pada gambar digital dengan judul “Pengembangan Teknik *Digital Watermarking* pada Citra Medis dengan Fitur Pemulihan Gambar”.

Penulis sampaikan ucapan terima kasih kepada pembimbing, Dr. Shelvie Nidya Neyman, S.Kom, M.Si. yang telah memberikan bimbingan dengan penuh kesabaran serta banyak memberi saran selama masa kuliah, penyiapan penelitian hingga penyempurnaan karya ilmiah. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada moderator seminar dan penguji luar komisi pembimbing yang telah memberikan masukan berharga dalam topik penelitian ini. Juga penghargaan dan terima kasih kepada seluruh para dosen khususnya di jurusan Ilmu Komputer IPB serta rekan-rekan mahasiswa yang telah memberi dukungan dan motivasi hingga penulis dapat menyelesaikan masa studi ini. Tak lupa, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-sebesarnya dengan irungan doa kepada abi, umi, adik-adikku yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Mei 2025

Mohammad Thareeq Izzulhaq



| | |
|---|------|
| DAFTAR TABEL | viii |
| DAFTAR GAMBAR | viii |
| I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Tujuan | 2 |
| 1.4 Manfaat | 2 |
| 1.5 Ruang Lingkup | 2 |
| II TINJAUAN PUSTAKA | 3 |
| 2.1 Gambar Digital dan Citra Medis | 3 |
| 2.2 <i>Watermarking</i> | 4 |
| 2.3 <i>Chaos Map</i> | 5 |
| 2.4 Teknik <i>Least Significant Bit (LSB)</i> | 5 |
| 2.5 Metrik Gambar | 6 |
| III METODE | 7 |
| 3.1 Tahapan Penelitian | 7 |
| 3.2 Metode Penyisipan <i>Watermark</i> | 7 |
| 3.3 Metode Ekstraksi Watermark | 9 |
| 3.4 Implementasi pemrograman | 11 |
| 3.5 Metode Pengujian | 11 |
| 3.6 Lingkungan Pengembangan | 12 |
| IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 13 |
| 4.1 Hasil penyisipan <i>watermark</i> | 13 |
| 4.2 Pengujian Gambar Sinar-X Dada | 17 |
| 4.3 Pengujian Gambar Sinar-X Siku 1 | 18 |
| 4.4 Pengujian Gambar Sinar-X Siku 2 | 19 |
| 4.5 Pengujian Gambar Sinar-X Telapak Tangan 1 | 20 |
| 4.6 Pengujian Gambar Sinar-X Telapak Tangan 2 | 21 |
| 4.7 Analisis Keseluruhan Tabel | 22 |
| 4.8 Hasil proses pemulihan | 23 |
| 4.9 Pengembangan selanjutnya | 24 |
| V SIMPULAN DAN SARAN | 25 |
| 5.1 Simpulan | 25 |
| 5.2 Saran | 25 |
| DAFTAR PUSTAKA | 26 |
| RIWAYAT HIDUP | 28 |

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Diliahang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbaiknya sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR TABEL

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Jumlah sub-blok dan waktu penyisipan dan ekstraksi | 15 |
| 2 | Hasil uji PSNR dan SSIM pada penyisipan <i>watermark</i> | 15 |
| 3 | Pengujian Gambar Sinar-X Dada | 18 |
| 4 | Pengujian Gambar Sinar-X Siku 1 | 19 |
| 5 | Pengujian Gambar Sinar-X Siku 2 | 20 |
| 6 | Pengujian Gambar Sinar-X Telapak Tangan 1 | 21 |
| 7 | Pengujian Gambar Sinar-X Telapak Tangan 2 | 22 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Ilustrasi pembuatan sub-blok | 7 |
| 2 | Ilustrasi pembagian MSB dan LSB | 7 |
| 3 | Ilustrasi pengacakan dengan arnold map | 8 |
| 4 | Tahapan penyisipan <i>watermark</i> | 8 |
| 5 | Tahapan ekstraksi <i>watermark</i> dan pemulihan gambar | 10 |
| 6 | Hasil sebelum dan sesudah disisipkan watermark | 13 |
| 7 | Grafik Waktu Penyisipan dan Ekstraksi | 15 |
| 8 | Ilustrasi gambar sebelum, setelah dilakukan serangan dan hasil pemulihan gambar | 16 |
| 9 | Ilustrasi pemulihan gambar | 23 |

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gambar digital telah menjadi salah satu media populer yang digunakan dalam berbagai aspek kehidupan, mulai dari pembelajaran, iklan produk, hingga undangan acara (Chroni *et al.* 2014). Ukuran file yang relatif kecil dan kemajuan teknologi yang pesat membuat gambar digital sangat mudah untuk disebarluaskan (Shehab *et al.* 2018). Namun, kemudahan ini juga menimbulkan dampak negatif. Gambar digital menjadi rentan terhadap serangan, seperti pencurian karya intelektual dan pemalsuan dokumen (Harahap *et al.* 2018). Serangan yang sering terjadi meliputi *cropping*, penambahan *noise*, rotasi, dan translasi (Poljicak 2011). Dampak serangan ini merugikan berbagai profesi, terutama yang bergantung pada gambar digital seperti desainer grafis, fotografer, arsitek, hingga sektor medis (Khamlich *et al.* 2006; Mehto dan Mehra 2016).

Bidang medis merupakan salah satu bidang yang sangat membutuhkan perlindungan gambar digital, dimana sinar-X dan Magnetic Resonance Image (MRI) digunakan untuk menyimpan data sensitif. Citra medis yang digunakan untuk tujuan diagnosa dan juga sebagai data pendukung seperti informasi identitas pasien, data pasien, dan catatan medis pasien, dalam penyimpanan dan pendistribusinya diperlukan teknik untuk melindungi keaslian dan risiko penggunaan citra medis. Perubahan sekecil apa pun pada gambar ini dapat menyebabkan kesalahan diagnosis oleh dokter (Khamlich *et al.* 2006).

Perlindungan terhadap gambar digital sangat diperlukan. Perlindungan tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan teknik enkripsi dan *watermarking* (Surekha dan Swamy 2011). Teknik enkripsi akan mengubah format data menjadi format lain. Oleh karena itu, teknik ini menyebabkan gambar tidak bisa dengan mudah dilihat publik. Perlu adanya kunci untuk mendekripsi gambar digital sehingga dapat dilihat kembali (Chroni *et al.* 2014). Berbeda dengan teknik enkripsi teknik *watermarking* tidak akan mengubah sebuah format data menjadi format lainnya. Data *watermark* akan dimasukkan kedalam data tanpa mengubah format, meskipun pada implementasi *watermark*, ada beberapa teknik yang akan mengubah format data untuk memasukkan *watermark* dan mengembalikannya lagi. Seperti pada teknik *watermarking* gambar berbasis *discrete cosine transform* (DCT) (Assini *et al.* 2018).

Watermarking menawarkan perlindungan dengan cara menyisipkan tanda pada gambar tanpa mengubah bentuk dasarnya. Berbeda dengan teknik enkripsi, perubahan data yang dilakukan pada teknik *watermarking* tidak mengubah data menjadi bentuk lain. Hal ini dapat dilakukan karena pada dasarnya teknik *watermarking* hanya mengubah bagian data yang sulit sekali dilihat perbedaannya oleh manusia (Sarker *et al.* 2012). Teknik ini cocok untuk melindungi gambar digital karena gambar masih bisa dengan mudah dilihat publik namun gambar tersebut tetap memiliki perlindungan (Rahman 2013). Tanda atau informasi yang disisipkan dalam gambar digital akan dapat diperoleh kembali meskipun gambar digital telah diproses, disalin dan didistribusikan.

Teknik *watermarking* dapat berupa teknik *robust watermarking* dengan *fragile watermarking*. *Robust watermarking* digunakan sebagai tanda kepemilikan gambar dan *fragile watermark* yang digunakan sebagai penanganan keutuhan data.



Fragile watermarking adalah metode yang dirancang untuk mendeteksi perubahan pada data. Sifatnya yang sangat sensitif memungkinkan *watermark* menghilang atau berubah jika gambar dimanipulasi, sehingga dapat berfungsi sebagai alat untuk memverifikasi integritas data (Sharma 2013).

Dalam penelitian ini, *digital watermarking* yang diterapkan menggunakan teknik Least Significant Bit (LSB), yang memberikan perubahan minimal pada gambar sehingga hampir tidak terlihat oleh mata manusia (Tsui *et al.* 2008). Metode ini selain mendeteksi kerusakan juga mampu memulihkan gambar yang rusak, menjadikannya solusi yang efektif untuk menjaga integritas dan kualitas citra medis (Mehto dan Mehra 2016).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana cara menggunakan *watermark* pada gambar medis menggunakan teknik *digital watermarking* sebagai cara untuk mendeteksi keutuhan data dan juga mengimplementasi fitur pemulihan gambar.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- Mengembangkan teknik *digital watermarking* dengan pemulihan untuk gambar medis
- Menilai performa teknik *digital watermarking* dalam melindungi dan memulihkan gambar yang rusak.

1.4 Manfaat

Penelitian ini dapat membantu meningkatkan keamanan data sensitif, seperti hasil sinar-X dan MRI, dengan mendeteksi dan memulihkan kerusakan gambar. Hal ini berpotensi mengurangi risiko kesalahan diagnosis akibat manipulasi atau kerusakan data.

1.5 Ruang Lingkup

Gambar *host* yang digunakan pada penelitian ini berupa gambar *raster* dengan format PNG. Teknik *digital watermarking* menggunakan metode *least significant bit* (LSB) dan arnold chaos map. *Watermark* yang disisipkan dibangkitkan dari gambar *host*.



II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gambar Digital dan Citra Medis

Gambar digital makin banyak digunakan dalam sejumlah aplikasi, mulai dari pencitraan medis dan penegakan hukum hingga perbankan dan penggunaan konsumen sehari-hari. Saat ini kebanyakan data dan informasi disajikan dalam bentuk format digital, baik berupa teks, citra, audio, maupun video. Citra digital jauh lebih mudah diedit, disalin, disimpan, dikirim, dan digunakan. Citra digital, sebagaimana produk digital lainnya, mempunyai beberapa karakteristik, antara lain: (1) Penggandaan (copy) terhadap data digital juga mudah dilakukan dan hasilnya tepat sama dengan aslinya; (2) Mudah didistribusikan melalui *magnetic disk* maupun internet. Penyebaran data digital meningkat secara luar biasa seiring dengan perkembangan teknologi internet; (3) Perubahan yang sedikit pada citra tidak mudah dipersepsi oleh indra penglihatan (Munir).

Citra medis merupakan sesuatu yang sangat bernilai, dalam hal riset, maupun tujuan komersial. Namun, sayangnya, pada saat yang sama, citra digital menghadapi masalah perlindungan hak cipta dan autentifikasi konten. Sering kali terjadi penyalahgunaan terhadap citra tersebut, misalnya memperbanyak dan mempublikasikan citra tersebut untuk tujuan komersial, padahal citra medis merupakan data yang sifatnya sangat pribadi. Oleh karenanya, citra medis juga memerlukan hak cipta dan harus dilindungi. (Moonlight *et al.* 2021)

Sejak tahun 1990-an, perkembangan teknik penyembunyian informasi telah menyediakan cara untuk melindungi media digital. Teknik tersebut menanamkan sejumlah informasi rahasia seperti anotasi pribadi, logo perusahaan, dan intelijen penting ke dalam media sampul dalam bentuk yang tidak terlihat sehingga banyak aplikasi, seperti klaim kepemilikan konten digital, perlindungan hak cipta media, dan komunikasi rahasia antarpihak, dapat terpenuhi.

Gambar digital merupakan kumpulan piksel yang bisa didefinisikan sebagai fungsi dua dimensi $f(x,y)$. x dan y menyatakan posisi sebuah piksel dan f menyatakan nilai intensitas dari piksel tersebut. f , x dan y semu merupakan nilai terhingga dan diskrit (Gonzalez dan Woods 2017). Representasi gambar digital seperti ini merupakan representasi domain spasial. Gambar berwarna membutuhkan setidaknya 3 nilai intensitas yang umumnya berupa merah, biru, dan hijau yang dinamakan RGB *color channel*. ada berbagai macam *color channel* yang bisa digunakan pada gambar, yaitu RGB, YUV, CMYK, dan HSV. Color channel RGB banyak digunakan untuk gambar digital. CMYK banyak digunakan untuk gambar yang akan dicetak.

Selain dapat direpresentasikan dengan domain spasial, gambar juga bisa direpresentasikan sebagai domain frekuensi. Ada beberapa cara untuk mengubah gambar dari domain spasial ke domain frekuensi, yaitu dengan *discrete cosine transform* (DCT), *discrete wavelet transform* (DWT) dan *discrete fourier transform* (DFT). Dengan mengubah gambar menjadi domain frekuensi banyak sekali potensi yang dapat dilakukan pada gambar, seperti melakukan *watermarking*, kompresi gambar, juga dapat melakukan *denoising* dan *deblurring*. JPG salah satu format gambar yang umum menggunakan teknik DCT untuk melakukan kompresi dan sudah terbukti efektif.

Watermarking

Watermarking adalah teknik yang digunakan untuk menyisipkan informasi tertentu ke dalam suatu media digital, seperti gambar, audio, video, atau dokumen, dengan tujuan melindungi hak cipta, memastikan keaslian, dan mencegah pemalsuan (Dhar *et al.* 2010; Budiman *et al.* 2019). Teknologi watermarking telah berkembang pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan perlindungan data dalam dunia digital.

Watermarking memiliki beberapa karakteristik, yaitu *imperceptibility*, *robustness*, *security*, dan *capacity*. *Imperceptibility* artinya watermark tidak boleh mengurangi kualitas media asli secara signifikan. *Robustness* berarti watermark harus tetap dapat dideteksi meskipun media mengalami berbagai transformasi, seperti kompresi, rotasi, atau pemangkasan. *Security* adalah watermark harus sulit untuk dihapus atau dimodifikasi tanpa akses ke informasi kunci. *Capacity* adalah jumlah data yang dapat disisipkan dalam watermark harus cukup untuk memenuhi tujuan aplikasi tertentu.

Watermark dapat dikategorikan berdasarkan tiga aspek, yaitu berdasarkan domain penyisipan, berdasarkan visibilitasnya dan berdasarkan ketahanan terhadap serangan. Berdasarkan domain penyisipannya watermark terbagi menjadi dua domain spasial dan domain frekuensi. Domain spasial merupakan teknik penyisipan langsung pada gambar tanpa melakukan transformasi, salah satu contohnya adalah metode LSB. Sedangkan domain frekuensi adalah teknik penyisipan yang melakukan transformasi gambar menjadi domain frekuensi terlebih dahulu seperti *discrete cosine transform* (DCT), *discrete wavelet transform* (DWT) dan *discrete fourier transform* (DFT).

Berdasarkan visibilitasnya, watermark juga terbagi menjadi dua, yaitu *visible* dan *invisible watermark*. *Visible* adalah watermark yang secara langsung dapat terindra oleh panca indra manusia. *Watermark* jenis ini adalah watermark paling sederhana sehingga dapat dengan mudah diaplikasikan pada data. Seperti pada gambar terdapat sebuah tulisan semi-transparan yang merupakan bentuk dari watermark ini. *Invisible* adalah watermark yang tidak bisa langsung dapat terindra dan membutuhkan serangkaian algoritma terlebih dahulu untuk dideteksi. *Watermark* ini lebih sulit untuk di implementasikan dikarenakan membutuhkan teknik yang lebih maju dibandingkan *visible* watermark.

Berdasarkan kemampuannya terhadap serangan, watermarking dibagi menjadi tiga yaitu *robust*, *fragile*, *semi-fragile*. *Robust watermarking* merupakan teknik watermarking yang dirancang untuk tahan terhadap serangan. *Robust*

Gambar digital banyak digunakan pada dunia medis sebagai mendi untuk menyimpan citra sinar-X. Sinar-X merupakan gelombang dengan panjang sebesar 10nanometer hingga 10 pikometer, mempunyai frekuensi dari 30 petahertz hingga 30 exahertz, dan energi setiap foton dari 100 elektron volt (eV) hingga 100 kiloelektron volt (keV). Sinar-X dapat menembus beberapa benda tergantung dari bahan penyusunnya, semakin padat bahan penyusunnya semakin sulit sinar-X untuk menembus. Pada tubuh manusia, sinar-X bisa menembus beberapa bagian dengan mudah contohnya pada kulit dan daging yang memiliki atom penyusun karbon. Sinar-X sulit menembus tulang karena bahan penyusunnya kalsium. Hal tersebut yang menghasilkan gambar sinar-X dapat mengetahui bila ada kerusakan yang berada di dalam tubuh manusia.



watermark sangat cocok sebagai cara untuk memberikan *copyright* atau tanda kepemilikan karena sifatnya yang tahan terhadap serangan. *Fragile watermarking* merupakan teknik *watermarking* yang memiliki sifat serentan mungkin terhadap perubahan pada data. Karakteristik ini digunakan untuk mendeteksi perubahan. Salah satu contoh penggunaan *fragile* watermark pada *file* yaitu sebagai tanda keaslian sebuah *file* dan integritas data (Sharma 2013). *Semi-fragile watermark* merupakan *watermark* yang berada di antara kedua jenis *watermark*. Jenis *watermark* ini mengizinkan sedikit perubahan pada data. Jenis *watermark* ini biasanya digunakan untuk verifikasi data yang perubahan sedikit masih bisa dianggap valid. Contohnya pada sebuah gambar dimungkinkan untuk mengubah format gambar dari PNG ke JPG namun data tersebut tetap dikatakan valid, karena perubahan format harusnya tidak mengubah konten gambar. (Lu & Guo 2017)

Watermark juga dapat dikategorikan menjadi reversibel dan irreversibel. Reversibel mengacu kepada teknik *watermarking* yang dapat mengembalikan data asli setelah dimasukkan sebuah *watermark*. Sedangkan irreversibel merupakan *watermark* satu arah, yang berarti ketika *watermark* sudah disisipkan kedalam sebuah data, data asli tersebut sudah tidak bisa lagi dikembalikan (Atta-ur-Rahman *et al.* 2018).

2.3 Chaos Map

Chaos map merupakan suatu fungsi matematis yang digunakan untuk memodelkan sistem dinamis nonlinier yang bersifat deterministik tetapi memiliki sensitivitas tinggi terhadap kondisi awal. *Chaos map* banyak digunakan dalam berbagai bidang, termasuk kriptografi, pemrosesan citra, dan pengolahan sinyal. Salah satu jenis *chaos map* yang populer adalah Arnold's Cat Map atau lebih dikenal sebagai Arnold Chaos Map (Chen dan Cheng 2014).

Arnold Chaos Map, atau Arnold's Cat Map, diperkenalkan oleh Vladimir Arnold pada tahun 1960-an sebagai contoh dari sistem dinamis yang menunjukkan sifat *chaos*. Peta ini bekerja dengan cara menerapkan transformasi linier pada koordinat suatu titik dalam bidang dua dimensi. Arnold Chaos Map sering digunakan dalam pengacakan citra (*image scrambling*), karena transformasi ini dapat mendistribusikan piksel dalam suatu gambar secara acak, tetapi tetap dapat dibalik dengan jumlah iterasi tertentu. Dengan demikian, metode ini memiliki aplikasi luas dalam keamanan digital dan enkripsi gambar.

2.4 Teknik Least Significant Bit (LSB)

LSB adalah teknik yang umum digunakan dalam enkripsi dan deskripsi informasi rahasia. Cara kerja metode LSB yaitu mengubah bit *redundant cover image* yang tidak berpengaruh signifikan dengan bit dari pesan rahasia. Penerapan LSB menggunakan media gambar berbasis piksel dengan nilai 8 bit (*gray value*). Setiap piksel yang terdiri dari 8 bit dibagi menjadi 2 bagian yaitu, 4 bit MSB (*most significant bit*) dan 4 bit LSB (*least significant bit*). Bagian LSB tersebut yang akan diubah menjadi nilai dari pesan yang akan disisipkan. Setelah dibubuhinya pesan rahasia, setiap piksel dibangun kembali menjadi gambar yang utuh menyerupai dengan media gambar semula. Keuntungan LSB adalah kurang mencurigakan di mata manusia, mudah untuk diimplantasikan dan *high perpetual transparency*. Kekurangan LSB antara lain *robustness*, dan sensitif terhadap *filtering*, serta



scaling, rotasi, penambahan *noise* pada gambar, dan *cropping* dapat merusak pesan rahasia (Cheddad *et al.* 2010).

2.5 Metrik Gambar

Metrik gambar adalah sebuah nilai untuk menilai sebuah gambar. Metrik yang umum digunakan untuk gambar adalah *Peak Signal to Noise Ratio* (PSNR). PSNR adalah ukuran kualitas citra yang mengukur seberapa dekat citra yang dihasilkan oleh sistem ke citra aslinya. Nilai PSNR yang lebih tinggi menunjukkan kualitas citra yang lebih baik.

Selain menggunakan PSNR, metrik yang bisa digunakan yaitu *Structural Similarity Index* (SSIM). SSIM adalah metrik yang sering digunakan untuk menilai kualitas gambar dengan mengukur tingkat kesamaan antara dua gambar. SSIM memperhitungkan tiga komponen utama: luminansi, kontras, dan struktur, yang mencerminkan bagaimana sistem visual manusia merasakan perbedaan antara gambar. Berbeda dengan metrik tradisional seperti *Mean Squared Error* (MSE), SSIM lebih sensitif terhadap informasi lokal dan memberikan evaluasi kualitas yang lebih relevan secara perceptual. Versi lanjutannya, seperti Multi-Scale SSIM (MS-SSIM), memungkinkan penilaian pada berbagai resolusi, sehingga cocok untuk berbagai aplikasi dalam pemrosesan citra dan visi komputer

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilang mengumumkan dan memperbarui sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

III METODE

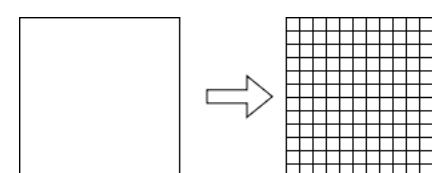
3.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini berfokus pada penerapan teknik *digital watermarking* untuk melindungi gambar digital, khususnya citra sinar-X medis. Proses penelitian mencakup tiga tahapan utama yaitu perancangan algoritma, implementasi menggunakan bahasa Python, serta pengujian dan evaluasi hasil.

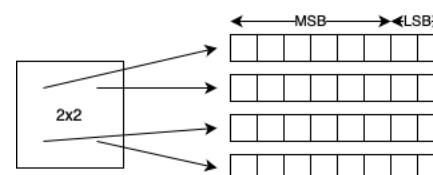
Perancangan algoritma merupakan tahapan pertama dalam penelitian ini. Tahapan ini berfokus pada perancangan metode untuk melakukan penyisipan *watermark* dengan metode LSB, ekstraksi *watermark* yang terdapat pada gambar dan juga dalam melakukan pemulihan gambar. Tahapan selanjutnya yaitu implementasi menjadi program sederhana, yaitu algoritma yang sudah dirancang pada tahapan sebelumnya ditulis ke dalam bahasa program Python. Tahapan terakhir yaitu pengujian dan evaluasi yang akan menilai algoritma yang sudah dirancang dan implementasi efektif atau tidak terhadap permasalahan yang ingin diselesaikan. Teknik yang dikembangkan terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu teknik penyisipan *watermark* dan teknik ekstraksi *watermark* beserta pemulihan gambar.

3.2 Metode Penyisipan Watermark

Teknik penyisipan terdiri dari beberapa modul, yaitu modul konstruksi sub-blok (MKS), modul perhitungan bit pemulihan (PPB), modul perhitungan bit autentikasi (PBA), modul penyisipan *watermark* (MPW), dan modul Arnold Map (MAP). Proses dimulai dengan membagi gambar *host* menjadi sub-blok kecil berukuran 2x2 yang seragam menggunakan MKS seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Setiap sub-blok terdiri atas 4 piksel. Masing-masing piksel 6 bit awal ditandai sebagai MSB dan 2 bit sisanya sebagai LSB seperti ilustrasi pada Gambar 2. Sehingga dihasilkan 8 bit LSB sebagai tempat penyisipan data *watermark*. Dari 8 bit tersebut, 6 bit akan digunakan untuk menyimpan bit pemulihan dan 2 bit sisanya untuk penyimpanan bit autentikasi.

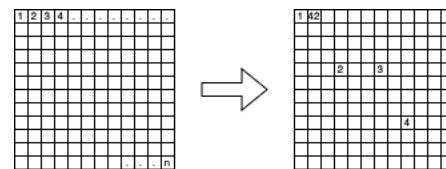


Gambar 1 Ilustrasi pembuatan sub-blok



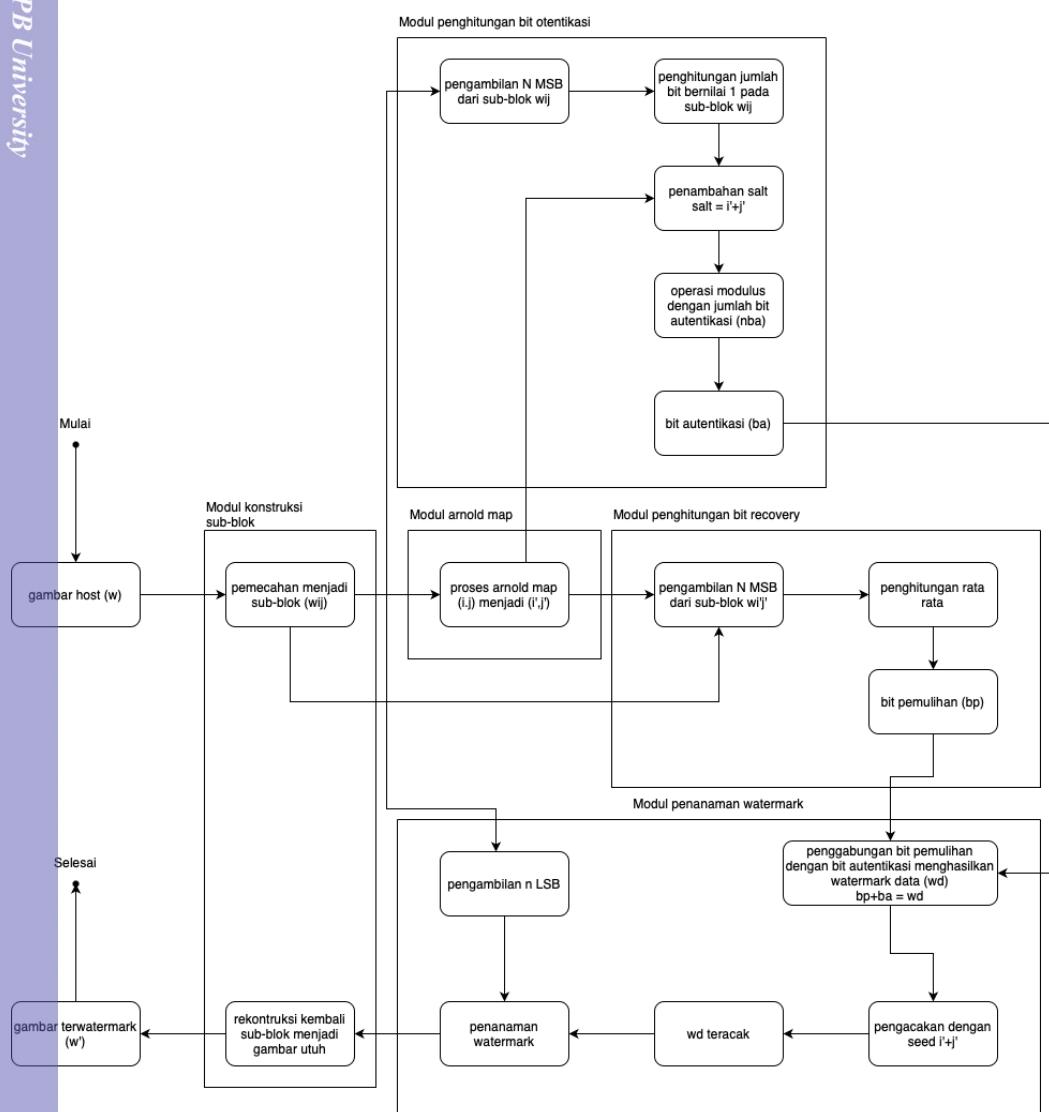
Gambar 2 Ilustrasi pembagian MSB dan LSB

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
 1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbarui sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 3 Ilustrasi pengacakan dengan arnold map

Setiap sub-blok akan diproses dengan MAP, PBP dan PBA. PBP menghasilkan bit pemulihan (BP), yang bertugas memulihkan data jika terjadi kerusakan pada sub-blok. Bit pemulihan didapatkan dari rata-rata nilai bit MSB. Hasilnya didapatkan 6 bit pemulihan.



Gambar 4 Tahapan penyisiran watermark

MAP adalah modul arnold map, pada modul ini akan dilakukan pengacakan sub-blok seperti pada Gambar 3. Hasilnya setiap sub-blok memiliki dua posisi, posisi awal dan posisi pengacakan. Contohnya pada sub-blok 2 posisi awalnya



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbarui sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

berada di bagian atas kiri sebuah gambar, setelah dilakukan pengacakan arnold map sub-blok 2 berada di tengah gambar. Selanjutnya, PBA menghasilkan bit autentikasi (BA) yang digunakan untuk memastikan keaslian sub-blok. Bit autentikasi didapatkan dari menghitung jumlah bit bernilai 1 dari bit MSB kemudian ditambah dengan *salt* yang didapatkan dari posisi pengajakan sub-blok tersebut, dan terakhir dilakukan operasi modulus dengan angka 4 yang didasarkan pada jumlah bit yang akan digunakan sebagai bit autentikasi yang berjumlah 2 bit.

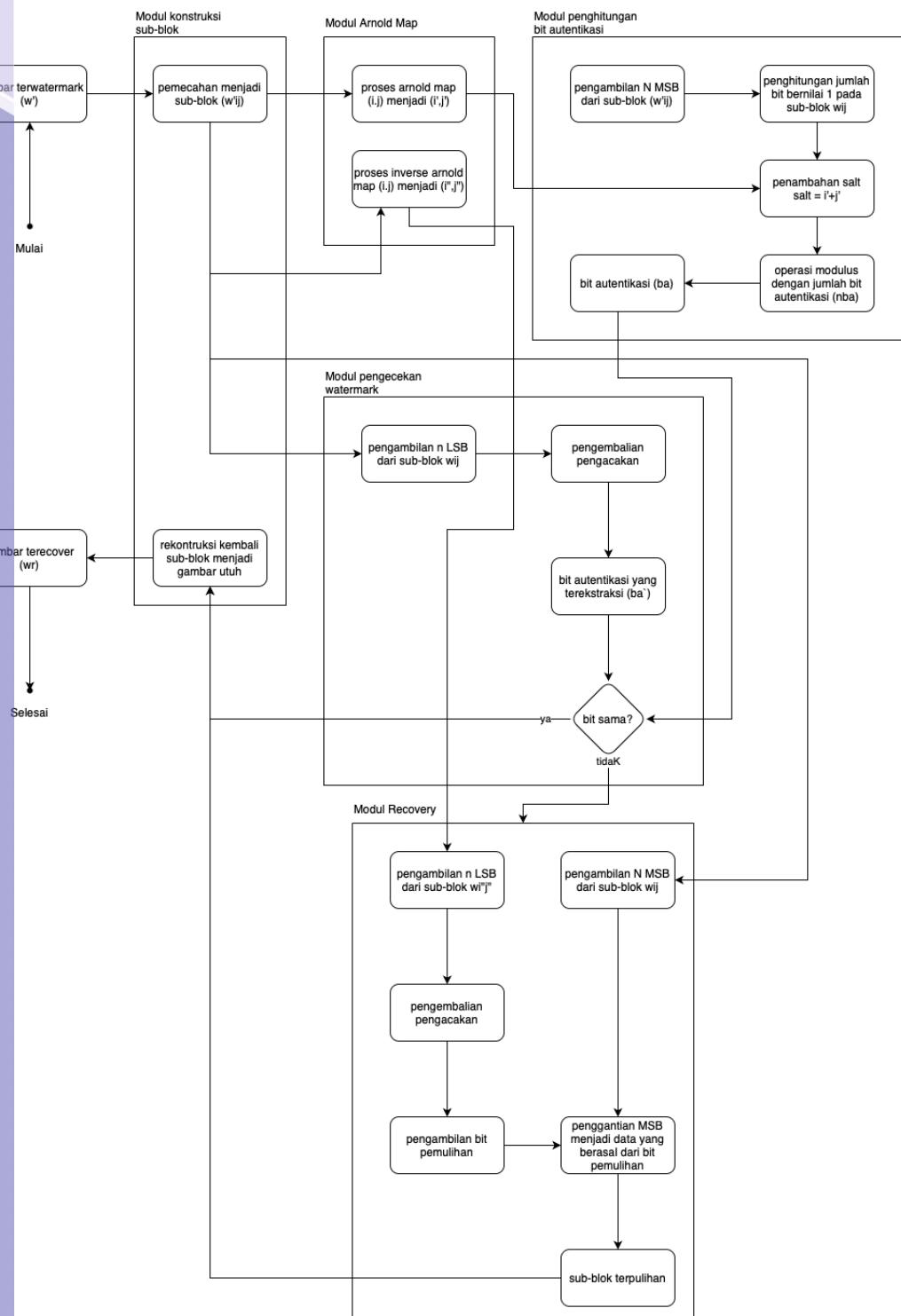
BP dan BA kemudian digabungkan. BP yang diambil berasal dari sub-blok di posisi pengacakan dan BA diambil dari sub-blok di posisi asli. Contohnya posisi asli sub-blok 2 sama dengan posisi pengacakan sub-blok 42, maka pada sub-blok 2 BP yang diambil berasal dari sub-blok 42 dan BA yang diambil berasal dari sub-blok 2. Setelah proses penggabungan tersebut, posisi bit tersebut diacak dengan *seed* yang didapatkan dari posisi pengacakan sub-blok tersebut sehingga menghasilkan data *watermark* (WD). WD kemudian disisipkan ke dalam *least significant bit* (LSB) sub-blok tersebut dengan mengganti data bit paling belakang dengan data *watermark*.

Setelah seluruh sub-blok selesai diproses, sub-blok yang telah ditanami *watermark* dirangkai kembali menggunakan MKS sehingga menghasilkan gambar yang tersisipi *watermark* yang siap diuji. Teknik ini memastikan setiap bagian gambar memiliki perlindungan, dan jika terjadi kerusakan pada satu sub-blok, data dapat dipulihkan tanpa mengorbankan keutuhan gambar secara keseluruhan. Tahapan penyisipan *watermark* digambarkan dengan *flowchart* sebagaimana Gambar 4.

3.3 Metode Ekstraksi Watermark

Teknik pengecekan *watermark* digunakan untuk memverifikasi keaslian dan integritas gambar yang telah ditanami *watermark* (W'). Teknik ini menggunakan beberapa modul yang sama dari proses penyisipan *watermark*, yaitu modul konstruksi sub-blok, modul Arnold Map, dan modul pengambilan *watermark*. Namun ditambah dengan modul pengecekan data *watermark* dan modul pemulihan gambar. Tahapan ekstraksi digambarkan pada *flowchart* seperti pada Gambar 5.

Proses pengecekan dimulai dengan membagi gambar yang tersisipkan *watermark* (W') menjadi sub-blok berukuran 2×2 (W'_{ij}) yang di proses menggunakan modul konstruksi sub-blok. Setiap sub-blok kemudian diproses melalui modul pengambilan data *watermark* untuk mengambil *watermark* yang disimpan pada sub-blok tersebut. Posisi *watermark* berada pada 2 bit LSB dengan total mempunyai 8 bit. Data *watermark* ini berisikan bit autentikasi dan bit pemulihan. Pada saat penyisipan, bit autentikasi dan pemulihan diacak dengan *seed* berupa posisi pengajakan sub-blok tersebut. Karena itu perlu dilakukan proses pengembalian pengacakan untuk mengambil dan memisahkan antara bit autentikasi dan bit pemulihan. Bit autentikasi yang diambil langsung dari sini dilambangkan dengan BA'. BA' kemudian dibandingkan dengan bit autentikasi yang dihitung langsung dari sub-blok tersebut seperti pada proses penyisipan *watermark*. Bit autentikasi ini disimbolkan dengan BA. Proses pengecekan dilakukan dengan cara membandingkan setiap bitnya. Jika salah satu saja bit tidak sama, maka sub-blok tersebut ditandakan sebagai tidak valid yang berarti sub-blok tersebut telah mengalami modifikasi.



Gambar 5 Tahapan ekstraksi watermark dan pemulihan gambar

Sub-blok yang ditandakan tidak valid, selanjutnya akan di proses dengan modul pemulihan gambar. Modul ini bertugas memperbaiki sub-blok yang rusak. Langkah pertama adalah mencari lokasi sub-blok lain yang menyimpan bit pemulihan sub-blok ini. Cara mencari lokasi dengan menggunakan modul arnold map, yaitu posisi asli ditransformasikan menjadi posisi pengacakan terbalik. Posisi



yang didapatkan ini merupakan posisi sub-blok yang menyimpan bit pemulihan. Setelah itu, modul pengambilan data *watermark* digunakan kembali untuk mengambil data pemulihan dari sub-blok terkait. Data pemulihan yang berhasil diambil digunakan untuk mengganti MSB sub-blok yang rusak, sehingga integritas sub-blok dapat dipulihkan.

Setelah semua sub-blok selesai diproses, modul konstruksi sub-blok digunakan untuk menyusun kembali sub-blok menjadi gambar utuh yang telah dipulihkan. Proses ini memastikan bahwa kerusakan pada sub-blok tertentu tidak mempengaruhi keseluruhan gambar, karena data pemulihan disimpan di lokasi yang terpisah. Dengan pendekatan ini, gambar yang rusak dapat diperbaiki secara efektif, sekaligus diverifikasi keasliannya untuk memastikan integritas data tetap terjaga.

3.4 Implementasi pemrograman

Implementasi teknik ini dilakukan menggunakan bahasa Python dengan memanfaatkan berbagai pustaka sumber terbuka. Penelitian ini menggunakan lima gambar dengan ukuran beragam, tetapi seluruhnya berbentuk persegi. Bentuk persegi diperlukan karena adanya keterbatasan pada Arnold Map, di mana fungsi ini memerlukan ukuran persegi untuk memastikan proses inversinya dapat dilakukan. Fungsi inversi ini penting untuk menentukan lokasi sub-blok yang menyimpan bit pemulihan.

Untuk membaca gambar, digunakan fungsi dari *library* Pillow. Gambar yang dibaca kemudian diubah menjadi *array* dua dimensi, di mana setiap elemen *array* merepresentasikan nilai piksel gambar. Jika gambar berwarna, nilai setiap elemen *array* merupakan *array* lain yang menyimpan nilai untuk setiap saluran warna. *Array* dua dimensi yang merepresentasikan gambar ini selanjutnya dipecah menjadi sub-blok kecil menggunakan operasi *array* sederhana. Proses penyisipan *watermark* dilakukan pada setiap sub-blok secara berurutan hingga seluruh sub-blok selesai diproses. Setelah itu, semua sub-blok digabungkan kembali menjadi gambar utuh yang telah disisipkan *watermark*. Pendekatan ini memastikan proses berjalan efisien dan kompatibel dengan teknik Arnold Map yang digunakan.

3.5 Metode Pengujian

Pengujian *watermark* dilakukan menggunakan rumus 1 PSNR dan rumus 2 SSIM.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) \quad (1)$$

Dimana,

MAX adalah nilai maksimum piksel

MSE adalah rata-rata kuadrat perbedaan antara 2 gambar

$$SSIM = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (2)$$

Dimana,

μ_x dan **μ_y** adalah nilai rata-rata piksel gambar x dan y

σ_{xy} adalah kovarian dari gambar x dan y



σ_x^2 dan σ_y^2 adalah varian dari gambar x dan y
 C_1 dan C_2 adalah konstanta

3.6 @Hakimini University

Lingkungan Pengembangan

Spesifikasi perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini yaitu menggunakan laptop MacBook Air tahun 2022 yang memiliki prosesor Apple M2 dengan *memory* sebesar 8GB. Perangkat lunak yang digunakan untuk penelitian ini menggunakan Python untuk bahasa program pada awal pengembangan versi yang digunakan yaitu 3.10 namun seiring waktu pengembangan program versi yang digunakan mengalami kenaikan hingga terakhir berada di versi 3.12, tetapi kenaikan versi ini tidak berpengaruh terhadap penelitian ini. Penggunaan bahasa program Python dipilih karena banyaknya *library* yang tersedia pada internet yang membantu penelitian ini. *Code editor* yang digunakan yaitu Visual Studio Code. Gambar yang digunakan pada penelitian ini berjumlah 5 gambar yang semua didapatkan dari website radiopaedia.org. Website ini merupakan salah satu rujukan yang biasa digunakan orang yang sedang mempelajari ilmu kedokteran.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilang mengumumkan dan memperbaik sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil penyisipan watermark

Gambar yang digunakan dalam penelitian ini merupakan citra medis sinar-X dengan berbagai ukuran piksel, yang terdiri atas: gambar sinar-X dada berukuran 1024×1024 piksel, gambar sinar-X siku berukuran 1440×1440 piksel dan 2140×2140 piksel, serta gambar sinar-X telapak tangan berukuran 2012×2012 piksel dan 1888×1888 piksel. Informasi mengenai ukuran masing-masing gambar dapat dilihat pada Tabel 1, sementara contoh visual dari kelima gambar tersebut ditampilkan pada Gambar 6.

Pemilihan kelima gambar sinar-X tersebut didasarkan pada keberagaman fitur visual yang terkandung di dalamnya. Terdapat tiga kategori utama, yaitu gambar sinar-X dada, siku, dan telapak tangan. Gambar sinar-X dada umumnya menampilkan struktur organ internal seperti paru-paru, sedangkan gambar sinar-X siku dan telapak tangan digunakan dalam dua kondisi berbeda untuk menguji konsistensi metode terhadap variasi visual. Selanjutnya, pada setiap gambar dilakukan proses penyisipan watermark menggunakan teknik Least Significant Bit (LSB) yang dikombinasikan dengan transformasi Arnold Map. Hasil dari proses watermarking ini ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar sinar-X Dada 1



Gambar setelah disisipkan watermark



Gambar sinar-X Siku 1



Gambar setelah disisipkan watermark

Gambar 6 Hasil sebelum dan sesudah disisipkan watermark

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilang mengumumkan dan memperbaiknya sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar sinar-X Siku 2



Gambar setelah disisipkan watermark



Gambar sinar-X Telapak Tangan 1



Gambar setelah disisipkan watermark



Gambar sinar-X Telapak Tangan 2



Gambar setelah disisipkan watermark

Gambar 6 Hasil sebelum dan sesudah disisipkan watermark (*lanjutan*)

Hasil pengujian teknik *digital watermarking* pada lima gambar dengan resolusi yang bervariasi menunjukkan performa yang sangat baik. Berdasarkan Tabel 1, resolusi gambar yang diuji berkisar antara 1024×1024 piksel hingga 2140×2140 piksel, dengan jumlah sub-blok terkecil sebanyak 262.144 dan terbesar mencapai 1.144.900. Waktu yang dibutuhkan untuk proses penyisipan dan ekstraksi *watermark* menunjukkan tren peningkatan yang hampir linear seiring dengan bertambahnya jumlah sub-blok, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 7.

Namun, pada kisaran jumlah sub-blok antara 1.012.036 hingga 1.144.900, ditemukan sedikit anomali berupa penurunan waktu ekstraksi sekitar 0,5 detik.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar IPB University.

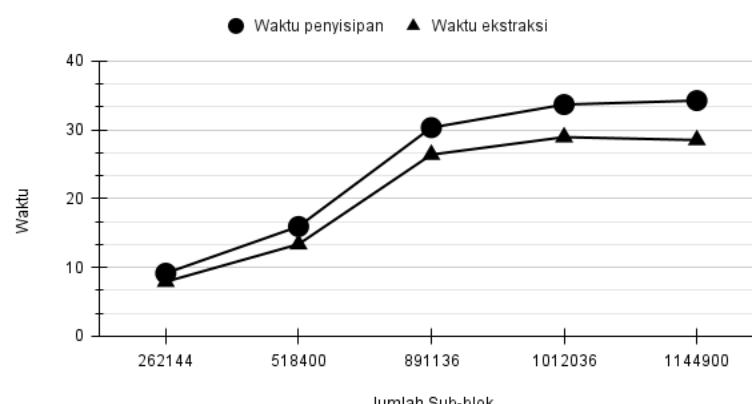
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Untuk memastikan keakuratan hasil, pengujian waktu dilakukan sebanyak lima kali pengulangan. Secara umum, proses penyisipan *watermark* memerlukan waktu lebih lama dibandingkan dengan proses ekstraksi. Hal ini disebabkan karena pada tahap ekstraksi tidak dilakukan perhitungan bit pemulihan, sehingga prosesnya lebih ringan secara komputasional.

Tabel 1 Jumlah sub-blok dan waktu penyisipan dan ekstraksi

| Nama Gambar | Ukuran | Jumlah Sub-blok | Waktu penyisipan (s) | Waktu ekstraksi (s) |
|--------------------------|-----------|-----------------|----------------------|---------------------|
| Sinar-X Dada | 1024x1024 | 262144 | 9.16 | 7.912 |
| Sinar-X Siku 1 | 1440×1440 | 518400 | 15.95 | 13.38 |
| Sinar-X Siku 2 | 2140×2140 | 1144900 | 34.24 | 28.51 |
| Sinar-X Telapak Tangan 1 | 2012×2012 | 1012036 | 33.67 | 28.93 |
| Sinar-X Telapak Tangan 2 | 1888×1888 | 891136 | 30.32 | 26.39 |

Grafik Waktu Penyisipan dan Ekstraksi



Gambar 7 Grafik Waktu Penyisipan dan Ekstraksi

Tabel 2 Hasil uji PSNR dan SSIM pada penyisipan *watermark*

| Nama Gambar | PSNR | SSIM | Percentase Tingkat Deteksi |
|--------------------------|-------|--------|----------------------------|
| Sinar-X Dada | 44.16 | 0.9700 | 100 |
| Sinar-X Siku 1 | 44.7 | 0.9288 | 100 |
| Sinar-X Siku 2 | 45.33 | 0.9403 | 100 |
| Sinar-X Telapak Tangan 1 | 44.08 | 0.9505 | 100 |
| Sinar-X Telapak Tangan 2 | 44.13 | 0.9689 | 100 |

Pada Tabel 2, *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) yang diperoleh tetap tinggi pada kelima gambar yaitu antara 44,08 dB hingga 45,33 dB, yang mengindikasikan bahwa kualitas visual gambar setelah proses *watermarking* hampir tidak mengalami perubahan signifikan dibandingkan dengan gambar aslinya. Hasil pengujian juga menunjukkan tingkat deteksi mencapai 100% pada semua gambar yang hal ini berarti *watermark* dapat dikenali sepenuhnya tanpa kehilangan data pada kondisi

gambar belum terkena serangan. Hasil ini membuktikan bahwa teknik *digital watermarking* yang digunakan tetap mempertahankan kualitas visualnya, meskipun membutuhkan waktu lebih lama untuk gambar berukuran besar.



Kondisi sebelum dilakukan serangan



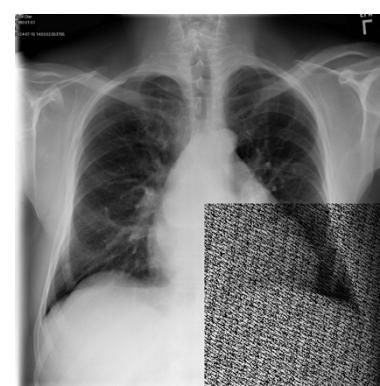
Kondisi setelah dilakukan serangan
copy-paste



Kondisi setelah dilakukan pemulihan

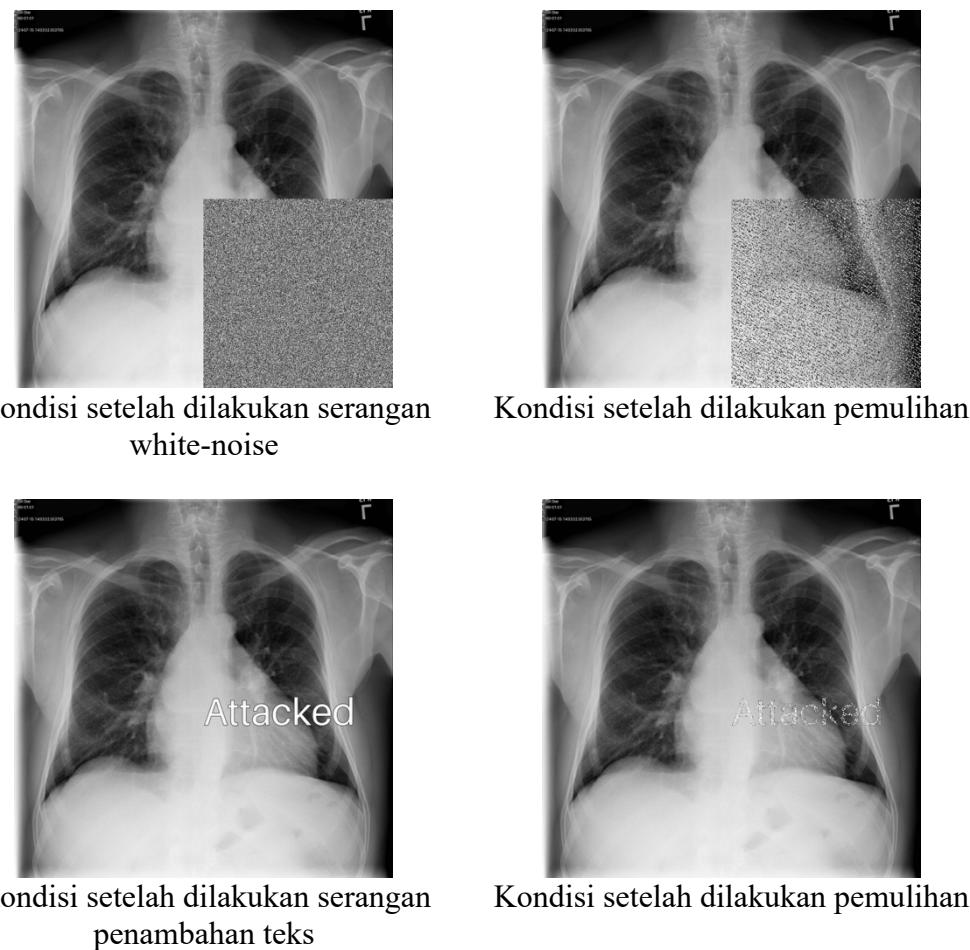


Kondisi setelah dilakukan serangan
remove



Kondisi setelah dilakukan pemulihan

Gambar 8 Ilustrasi gambar sebelum, setelah dilakukan serangan dan hasil pemulihan gambar



Gambar 8 Ilustrasi gambar sebelum, setelah dilakukan serangan dan hasil pemulihan gambar (*lanjutan*)

Pada tahap berikutnya dilakukan serangkaian proses pengujian yang dilakukan dengan menyimulasikan serangan pada gambar, diikuti dengan proses pendekripsi *watermark* dan pemulihannya. Setelah gambar dipulihkan, nilai *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) dan *Structural Similarity Index Measure* (SSIM) dihitung sebelum dan sesudah pemulihannya untuk mengevaluasi perubahan yang terjadi. Jika nilai PSNR dan SSIM menunjukkan peningkatan, maka proses pemulihannya dianggap berhasil. Ada empat serangan yang dilakukan, yaitu *copy-paste*, *remove*, *white noise*, dan penambahan teks seperti pada Gambar 8.

4.2 Pengujian Gambar Sinar-X Dada

Pengujian terhadap gambar sinar-X dada bertujuan untuk mengevaluasi kinerja metode *watermarking* dalam mendekripsi serta memulihkan gambar yang telah mengalami modifikasi pada berbagai tingkat serangan. Berdasarkan Tabel 3, metode menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap perubahan gambar, bahkan pada tingkat modifikasi kecil seperti serangan *copy-paste* sebesar 0.25% yang menghasilkan tingkat deteksi sebesar 99.81%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu mengidentifikasi adanya manipulasi dengan akurasi tinggi.

Nilai PSNR yang relatif stabil sebelum dan sesudah pemulihan (43.7635 dB menjadi 44.0366 dB) menunjukkan bahwa pemulihan berhasil memperbaiki kualitas visual. SSIM juga tetap stabil pada 0.9693, menandakan bahwa struktur citra tidak banyak berubah. Namun, pada serangan yang lebih luas, seperti serangan copy-paste 25%, tingkat deteksi menurun drastis menjadi 82.16%. Walaupun nilai PSNR meningkat dari 33.5778 menjadi 36.2424 dB, nilai SSIM justru menurun, menunjukkan bahwa kemampuan pemulihan semakin terbatas seiring bertambahnya area kerusakan. Ini mengindikasikan bahwa metode memiliki keterbatasan dalam memperbaiki kerusakan masif secara struktural.

Tabel 3 Pengujian Gambar Sinar-X Dada

| Jenis Serangan | Percentase Tingkat Deteksi | PSNR (dB) | PSNR* (dB) | SSIM (%) | SSIM* (%) |
|--------------------------|----------------------------|-----------|------------|----------|-----------|
| Copy Paste attack 0.25% | 99.81 | 43.7635 | 44.0366 | 0.9693 | 0.9693 |
| Copy Paste attack 1% | 99.25 | 42.7984 | 43.6973 | 0.9667 | 0.9649 |
| Copy Paste attack 4% | 97.01 | 39.8845 | 42.2947 | 0.9465 | 0.9362 |
| Copy Paste attack 25% | 82.16 | 33.5778 | 36.2424 | 0.8249 | 0.7381 |
| Remove attack 0.25% | 99.80 | 43.6420 | 43.9992 | 0.9669 | 0.9672 |
| Remove attack 1% | 99.26 | 42.4968 | 43.5394 | 0.9591 | 0.9597 |
| Remove attack 4% | 97.03 | 39.5524 | 41.9542 | 0.9287 | 0.9302 |
| Remove attack 25% | 81.27 | 33.3901 | 36.0599 | 0.7277 | 0.7368 |
| White noise attack 0.25% | 99.80 | 43.7283 | 44.0246 | 0.9670 | 0.9673 |
| White noise attack 1% | 99.26 | 42.6642 | 43.6669 | 0.9592 | 0.9604 |
| White noise attack 4% | 97.04 | 39.9486 | 42.2923 | 0.9290 | 0.9321 |
| White noise attack 25% | 81.23 | 33.6254 | 36.4262 | 0.7267 | 0.7333 |
| Add text attack | 98.97 | 42.3900 | 43.5597 | 0.9521 | 0.9546 |

Keterangan:

PSNR adalah nilai setelah diserang

PSNR* adalah nilai setelah dipulihkan

SSIM adalah nilai setelah diserang

SSIM* adalah nilai setelah dipulihkan

4.3 Pengujian Gambar Sinar-X Siku 1

Pengujian pada gambar sinar-X siku pertama memperlihatkan pola performa yang serupa. Seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4, serangan dengan cakupan 0.25% tetap memberikan tingkat deteksi tinggi sebesar 99.81%. Proses pemulihan berhasil meningkatkan PSNR dari 44.6131 menjadi 44.6429 dB dan sedikit meningkatkan nilai SSIM dari 0.9283 ke 0.9286.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilang mengumumkan dan memperbarui sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Namun, ketika cakupan serangan mencapai 25%, kinerja sistem menurun secara signifikan. Tingkat deteksi menjadi 81.51%, dengan SSIM turun drastis dari 0.7854 menjadi 0.7164. Hal ini menegaskan bahwa sistem lebih efektif digunakan untuk deteksi dan pemulihan kerusakan berskala kecil hingga sedang, sementara efektivitasnya menurun pada kerusakan berskala besar.

Tabel 4 Pengujian Gambar Sinar-X Siku 1

| Jenis Serangan | Persentase Tingkat Deteksi | PSNR (dB) | PSNR* (dB) | SSIM (%) | SSIM* (%) |
|--------------------------|----------------------------|-----------|------------|----------|-----------|
| Copy Paste attack 0.25% | 99.81 | 44.6131 | 44.6429 | 0.9283 | 0.9286 |
| Copy Paste attack 1% | 99.25 | 43.3966 | 44.1295 | 0.9247 | 0.9253 |
| Copy Paste attack 4% | 96.98 | 39.9041 | 41.8837 | 0.8970 | 0.8947 |
| Copy Paste attack 25% | 81.51 | 33.6254 | 36.4262 | 0.7854 | 0.7164 |
| Remove attack 0.25% | 99.81 | 44.0943 | 44.5097 | 0.9260 | 0.9264 |
| Remove attack 1% | 99.23 | 42.8532 | 43.9557 | 0.9183 | 0.9193 |
| Remove attack 4% | 96.97 | 40.1761 | 41.9242 | 0.8875 | 0.8906 |
| Remove attack 25% | 81.04 | 38.5345 | 40.2478 | 0.8743 | 0.8799 |
| White noise attack 0.25% | 99.81 | 44.2256 | 44.5646 | 0.9260 | 0.9263 |
| White noise attack 1% | 99.26 | 43.0374 | 44.1331 | 0.9184 | 0.9194 |
| White noise attack 4% | 96.99 | 40.1129 | 42.6744 | 0.8890 | 0.8910 |
| White noise attack 25% | 81.21 | 33.6611 | 36.6868 | 0.6988 | 0.7005 |
| Add text attack | 99.10 | 43.3322 | 44.0653 | 0.9521 | 0.9546 |

Keterangan:

PSNR adalah nilai setelah diserang

PSNR* adalah nilai setelah dipulihkan

SSIM adalah nilai setelah diserang

SSIM* adalah nilai setelah dipulihkan

4.4 Pengujian Gambar Sinar-X Siku 2

Gambar sinar-X siku kedua digunakan untuk menguji kestabilan performa algoritma dalam skenario lain dengan resolusi gambar yang lebih besar. Berdasarkan Tabel 5, sistem menunjukkan respons yang baik terhadap serangan minor, dengan PSNR meningkat dari 44.8031 menjadi 45.0567 dB dan SSIM dari 0.9384 ke 0.9390 setelah proses pemulihan pada serangan 0.25%.

Namun, hasil menunjukkan adanya paradoks ketika cakupan serangan meningkat. Meskipun PSNR meningkat dari 36.9428 ke 38.8052 dB setelah pemulihan, SSIM justru menurun dari 0.8167 ke 0.7371. Ini menandakan bahwa meskipun kualitas sinyal meningkat, struktur citra masih mengalami distorsi yang

tidak sepenuhnya diperbaiki. Artinya, peningkatan numerik PSNR belum tentu merepresentasikan perbaikan perceptual secara keseluruhan.

Tabel 5 Pengujian Gambar Sinar-X Siku 2

| Jenis Serangan | Persentase Tingkat Deteksi | PSNR (dB) | PSNR* (dB) | SSIM (%) | SSIM* (%) |
|--------------------------|----------------------------|-----------|------------|----------|-----------|
| Copy Paste attack 0.25% | | 99.81 | 44.8031 | 45.0567 | 0.9384 |
| Copy Paste attack 1% | | 99.25 | 43.3781 | 44.4018 | 0.9330 |
| Copy Paste attack 4% | | 96.98 | 40.5256 | 42.9049 | 0.9105 |
| Copy Paste attack 25% | | 81.21 | 36.9428 | 38.8052 | 0.8167 |
| Remove attack 0.25% | | 99.81 | 44.7975 | 45.0615 | 0.9376 |
| Remove attack 1% | | 99.23 | 43.5405 | 44.4356 | 0.9299 |
| Remove attack 4% | | 96.94 | 40.8884 | 43.0433 | 0.9063 |
| Remove attack 25% | | 80.85 | 39.0446 | 41.1650 | 0.8820 |
| White noise attack 0.25% | | 99.81 | 44.7759 | 45.0468 | 0.9376 |
| White noise attack 1% | | 99.25 | 43.4561 | 44.4609 | 0.9300 |
| White noise attack 4% | | 96.99 | 40.3166 | 42.9524 | 0.9003 |
| White noise attack 25% | | 81.23 | 33.6944 | 36.7885 | 0.7084 |
| Add text attack | | 99.18 | 44.2752 | 44.9152 | 0.9285 |
| | | | | | 0.9289 |

Keterangan:

PSNR adalah nilai setelah diserang

PSNR* adalah nilai setelah dipulihkan

SSIM adalah nilai setelah diserang

SSIM* adalah nilai setelah dipulihkan

4.5 Pengujian Gambar Sinar-X Telapak Tangan 1

Gambar keempat, yaitu sinar-X telapak tangan pertama, memperlihatkan konsistensi teknik terhadap serangan dengan skala kecil. Seperti ditunjukkan pada Tabel 6, serangan 0.25% tetap memberikan hasil deteksi sangat tinggi (99.82%) dengan nilai SSIM tetap tinggi (0.9670 menjadi 0.9673), menunjukkan struktur gambar berhasil dipertahankan. Pemulihan pada area kecil menunjukkan efektivitas yang tinggi.

Namun, ketika serangan meningkat hingga 25%, deteksi menurun ke 81.32%, dan meskipun PSNR meningkat dari 34.1835 ke 36.4262 dB, nilai SSIM masih rendah (0.7267 menjadi 0.7333). Hal ini memperkuat hipotesis bahwa meskipun sistem dapat memperbaiki nilai sinyal secara kuantitatif, secara struktural (perceptual) pemulihan tidak selalu berhasil memperbaiki tampilan visual secara sempurna.



Tabel 6 Pengujian Gambar Sinar-X Telapak Tangan 1

| Jenis Serangan | Percentase Tingkat Deteksi | PSNR (dB) | PSNR* (dB) | SSIM (%) | SSIM* (%) |
|--------------------------|----------------------------|-----------|------------|----------|-----------|
| Copy Paste attack 0.25% | 99.82 | 43.8989 | 44.0246 | 0.9670 | 0.9673 |
| Copy Paste attack 1% | 99.24 | 42.8395 | 43.6669 | 0.9592 | 0.9604 |
| Copy Paste attack 4% | 97.00 | 40.1603 | 42.2923 | 0.9290 | 0.9321 |
| Copy Paste attack 25% | 81.32 | 34.1835 | 36.4262 | 0.7267 | 0.7333 |
| Remove attack 0.25% | 99.81 | 43.5988 | 43.9224 | 0.9480 | 0.9491 |
| Remove attack 1% | 99.23 | 42.4202 | 43.4715 | 0.9406 | 0.9447 |
| Remove attack 4% | 96.95 | 39.7273 | 41.7932 | 0.9109 | 0.9221 |
| Remove attack 25% | 80.86 | 34.1288 | 36.3486 | 0.7530 | 0.7775 |
| White noise attack 0.25% | 99.82 | 43.6642 | 43.9394 | 0.9478 | 0.9480 |
| White noise attack 1% | 99.24 | 42.6032 | 43.4570 | 0.9402 | 0.9410 |
| White noise attack 4% | 97.01 | 39.9002 | 42.1063 | 0.9106 | 0.9125 |
| White noise attack 25% | 81.23 | 33.6151 | 36.2178 | 0.7132 | 0.7171 |
| Add text attack | 99.15 | 42.5553 | 43.3256 | 0.9386 | 0.9392 |

Keterangan:

PSNR adalah nilai setelah diserang

PSNR* adalah nilai setelah dipulihkan

SSIM adalah nilai setelah diserang

SSIM* adalah nilai setelah dipulihkan

4.6 Pengujian Gambar Sinar-X Telapak Tangan 2

Pada gambar kelima, yakni sinar-X telapak tangan kedua, hasil pengujian menegaskan tren yang telah diamati sebelumnya. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7, serangan ringan tetap terdeteksi dengan akurasi tinggi (99.81% untuk 0.25% serangan *copy-paste*). Nilai PSNR meningkat dari 43.6786 ke 43.9581 dB dan SSIM menunjukkan stabilitas (0.9668 menjadi 0.9669), menandakan efektivitas pada area kecil.

Namun, pada serangan yang lebih masif (25%), performa kembali menurun. Tingkat deteksi turun ke 81.27%, PSNR naik dari 33.9318 ke 35.9620 dB, dan SSIM justru turun dari 0.8062 ke 0.7440. Serangan seperti *remove* dan *white noise* juga menunjukkan pola serupa, mempertegas keterbatasan sistem dalam menangani kerusakan besar.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tabel 7 Pengujian Gambar Sinar-X Telapak Tangan 2

| Jenis Serangan | Percentase Tingkat Deteksi | PSNR (dB) | PSNR* (dB) | SSIM (%) | SSIM* (%) |
|--------------------------|----------------------------|-----------|------------|----------|-----------|
| Copy Paste attack 0.25% | 99.81 | 43.6786 | 43.9581 | 0.9668 | 0.9669 |
| Copy Paste attack 1% | 99.26 | 42.6126 | 43.3628 | 0.9615 | 0.9617 |
| Copy Paste attack 4% | 96.98 | 39.8072 | 41.5401 | 0.9372 | 0.9348 |
| Copy Paste attack 25% | 81.27 | 33.9318 | 35.9620 | 0.8062 | 0.7440 |
| Remove attack 0.25% | 99.81 | 43.6873 | 43.9461 | 0.9662 | 0.9670 |
| Remove attack 1% | 99.24 | 42.6481 | 43.3465 | 0.9586 | 0.9608 |
| Remove attack 4% | 96.94 | 40.0751 | 41.5646 | 0.9286 | 0.9341 |
| Remove attack 25% | 80.88 | 33.6206 | 35.7460 | 0.7359 | 0.7564 |
| White noise attack 0.25% | 99.81 | 43.7067 | 43.9413 | 0.9662 | 0.9665 |
| White noise attack 1% | 99.26 | 42.6566 | 43.4365 | 0.9586 | 0.9595 |
| White noise attack 4% | 97.00 | 39.9191 | 41.8220 | 0.9288 | 0.9318 |
| White noise attack 25% | 81.27 | 33.6222 | 36.1222 | 0.7279 | 0.7327 |
| Add text attack | 99.14 | 42.6612 | 43.3118 | 0.9568 | 0.9574 |

Keterangan:

PSNR adalah nilai setelah diserang

PSNR* adalah nilai setelah dipulihkan

SSIM adalah nilai setelah diserang

SSIM* adalah nilai setelah dipulihkan

4.7 Analisis Keseluruhan Tabel

Berdasarkan lima tabel pengujian, dapat disimpulkan bahwa metode *digital watermarking* yang dikembangkan berhasil menunjukkan performa deteksi dan pemulihan yang unggul untuk kerusakan berskala kecil hingga sedang. Nilai PSNR dan SSIM yang tinggi setelah pemulihan memperkuat efektivitas metode dalam mempertahankan kualitas visual dan mendeteksi manipulasi.

Namun, terdapat keterbatasan signifikan pada saat menghadapi serangan dengan cakupan area luas (25%). Penurunan nilai SSIM pasca-pemulihan, meskipun PSNR meningkat, menunjukkan bahwa struktur visual tidak sepenuhnya pulih. Hal ini menunjukkan bahwa proses pemulihan bersifat parsial dan perlu ditingkatkan untuk mencakup deteksi dan rekonstruksi yang lebih akurat.

Secara umum, metode ini cocok untuk diterapkan pada sistem yang memerlukan validasi keaslian data dengan toleransi kerusakan yang rendah, seperti sistem penyimpanan citra medis. Ke depannya, pendekatan ini dapat diperluas untuk pengolahan gambar berskala besar dan integrasi dengan algoritma deteksi lanjutan guna meningkatkan presisi pemulihan.

4.8 Hasil proses pemulihan

Dari semua pengujian pada sub-bab sebelumnya meskipun proses pemulihan dapat dilakukan masih banyak kekurangan dalam hasilnya. Proses pemulihan masih meninggalkan artefak dari serangan sebelumnya. Proses pemulihan bekerja dengan mengecek bagian gambar yang terdeteksi berubah. Pada saat mendeteksi bagian gambar yang berubah, bagian yang terdeteksi masih seperti *noise*, padahal seharusnya bagian merupakan putih sempurna. Cara kerja pemulihan gambar diawali dengan mencari bagian gambar yang rusak terlebih dahulu. Jika bagian tersebut tidak terdeteksi rusak maka gambar tidak dipulihkan. Mengembangkan metode untuk mendeteksi gambar yang rusak secara tidak langsung akan meningkatkan kualitas dari pemulihan gambar. Visualisasi hasil pemulihan dapat dilihat pada Gambar 9.



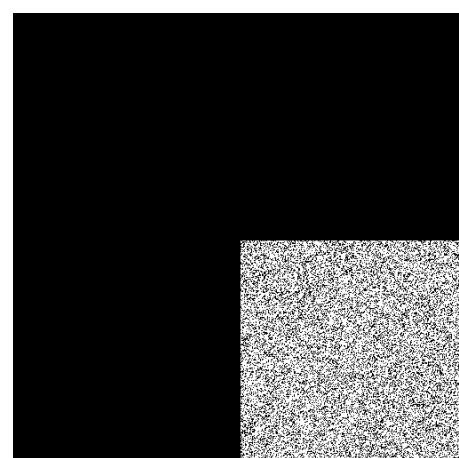
Gambar asli



Gambar setelah dilakukan serangan



Gambar setelah dilakukan pemulihan



Area yang terdeteksi terkena serangan

Gambar 9 Ilustrasi pemulihan gambar

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar IPB University.



Area yang seharusnya terdeteksi terserang

Gambar 9 Ilustrasi pemulihan gambar (*lanjutan*)

4.9 Pengembangan selanjutnya

Ada beberapa hal yang dapat dikembangkan lagi setelah penelitian ini. Yang pertama yaitu mengembangkan lagi teknik pemulihan gambar sehingga hasil pemulihan bisa lebih baik. Pengembangan ini bisa dilakukan dengan mencari teknik yang lebih baik dalam menentukan bagian yang terkena serangan. Pengembangan ini akan berpengaruh langsung pada peningkatan nilai PSNR dan SSIM yang lebih signifikan. Pengembangan lainnya bisa berupa pengembangan menjadi bentuk aplikasi sederhana, seperti membuat website sehingga memudahkan penggunaannya

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilang mengumumkan dan memperbarui sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

V SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan teknik *digital watermarking* yang dilengkapi dengan fitur pemulihan, serta mengevaluasi performanya dalam mendeteksi dan memulihkan kerusakan pada citra medis. Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian, dapat disimpulkan bahwa metode yang dikembangkan berhasil menyisipkan watermark secara tersembunyi menggunakan algoritma Least Significant Bit (LSB) dan Arnold's Map, serta mampu memuat informasi autentikasi dan pemulihan di dalam setiap sub-blok gambar. Sistem ini menunjukkan performa yang sangat baik, dengan nilai PSNR rata-rata di atas 44 dB dan SSIM di atas 0.92, menandakan bahwa kualitas visual gambar tetap terjaga setelah penyisipan *watermark*. Pengujian pada lima jenis gambar sinar-X membuktikan bahwa tingkat deteksi watermark mencapai 100% dalam kondisi tanpa serangan. Untuk serangan berskala kecil tingkat deteksi menurun yang menunjukkan teknik ini dapat mendeteksi perubahan yang sedikit. Sistem juga mampu meningkatkan kualitas visual gambar yang telah dimanipulasi, dengan kenaikan nilai PSNR dan SSIM setelah proses pemulihan. Namun, efektivitas pemulihan menurun pada serangan berskala besar (25% area gambar), yang ditunjukkan oleh keterbatasan pemulihan struktur gambar. Dengan demikian, tujuan penelitian telah tercapai: metode ini terbukti efektif dalam menyisipkan, mendeteksi, dan memulihkan watermark pada citra medis, serta memberikan kontribusi terhadap keamanan dan integritas data visual.

5.2 Saran

Untuk meningkatkan efektivitas metode yang dikembangkan, beberapa hal perlu diperhatikan dalam penelitian selanjutnya. Pertama, mekanisme deteksi area kerusakan dapat ditingkatkan dengan pendekatan yang lebih adaptif, seperti pemanfaatan pola lokal atau metode berbasis *machine learning*. Kedua, kualitas hasil pemulihan dapat ditingkatkan melalui teknik restorasi lanjutan seperti *inpainting* atau model prediktif. Ketiga, sistem ini sebaiknya dikembangkan menjadi perangkat lunak dengan antarmuka pengguna yang intuitif, agar dapat digunakan langsung dalam praktik medis. Keempat, pengujian perlu diperluas pada jenis citra dan format *file* medis lain, termasuk DICOM, CT-scan, dan MRI, untuk memastikan kompatibilitas yang lebih luas. Terakhir, aspek keamanan watermark perlu diperkuat melalui penggunaan kunci enkripsi atau teknik kriptografi tambahan guna mencegah upaya perusakan atau pemalsuan informasi yang disisipkan.



DAFTAR PUSTAKA

- Assini I, Badri A, Safi K, Sahel A, Abdennaceur Baghdad. 2018. A Robust Hybrid Watermarking Technique for Securing Medical Image. *Int. J. Intell. Eng. Syst.* 11(3):169–176.doi:10.22266/ijies2018.0630.18.
- Atta-ur-Rahman, Sultan K, Aldhafferi N, Alqahtani A, Mahmud M. 2018. Reversible and Fragile Watermarking for Medical Images. *Comput. Math. Methods Med.* 2018:1–7.doi:10.1155/2018/3461382.
- Budiman G, Safitri I, Siregar RD. 2019. Image Hiding on Audio Subband Based On Centroid in Frequency Domain. *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.* 7(1):29.doi:10.26760/elkomika.v7i1.29.
- Cheddad A, Condell J, Curran K, Mc Kevitt P. 2010. Digital image steganography: Survey and analysis of current methods. *Signal Process.* 90(3):727–752.doi:10.1016/j.sigpro.2009.08.010.
- Chen Y-L, Cheng C-M. 2014. Combining a chaos system with an Arnold cat map for a secure authentication scheme in wireless communication networks. Hsieh W-H, editor.[editorial]. *Eng. Comput.* 31(2):317–330.doi:10.1108/EC-01-2013-0021.
- Chroni M, Fylakis A, Nikolopoulos SD. 2014. Watermarking Digital Images in the Frequency Domain: Performance and Attack Issues. Di dalam: Krempels K-H, Stocker A, editor. *Web Information Systems and Technologies*. [internet] Vol. 189. Berlin, Heidelberg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. (Lecture Notes in Business Information Processing). hlm. 68–84. [diunduh 2025 Mar 18]. Tersedia pada: https://link.springer.com/10.1007/978-3-662-44300-2_5
- Dhar PK, Khan MI, Kim J-M. 2010. A New Audio Watermarking System using Discrete Fourier Transform for Copyright Protection. *Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur.* 10(6):35–40.
- Gonzalez RC, Woods RE. 2017. *Digital Image Processing*. Fourth edition, global edition. New York: Pearson.
- Harahap H, Budiman G, Novamizanti L. 2018. Implementasi Teknik Watermarking menggunakan FFT dan Spread Spectrum Watermark pada Data Audio Digital. *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.* 4(1):98.doi:10.26760/elkomika.v4i1.98.
- Khamliche YI, Machkour M, Afdel K, Moudden A. 2006. Multiple Watermark for Tamper Detection in Mammography Image. *WSEAS Trans. Comput.* 2.
- Mehto A, Mehra N. 2016. Adaptive Lossless Medical Image Watermarking Algorithm Based on DCT & DWT. *Procedia Comput. Sci.* 78:88–94.doi:10.1016/j.procs.2016.02.015.
- Moonlight LS, Sugiarto S, Irfansyah A, Widyarini R. 2021. Digital Image Watermarking Pada Citra Medis Menggunakan Discrete Cosine Transform (DCT), Dan Metode Spread Spectrum. *SCAN - J. Teknol. Inf. Dan Komun.* 16(1):27–33.doi:10.33005/scan.v16i1.2548.
- Munir R. Sekilas Image Watermarking untuk Memroteksi Citra Digital dan Aplikasinya pada Citra Medis.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

- Poljicak A. 2011. Discrete Fourier transform–based watermarking method with an optimal implementation radius. *J. Electron. Imaging.* 20(3):033008.doi:10.1117/1.3609010.
- Rahman MdM. 2013. A DWT, DCT and SVD Based Watermarking Technique to Protect the Image Piracy. *Int. J. Manag. Public Sect. Inf. Commun. Technol.* 4(2):21–32.doi:10.5121/ijmpict.2013.4203.
- Sharma P. 2013. Digital Image Watermarking Using 3 level Discrete Wavelet Transform. *Conference on Advances in Communication and Control Systems 2013*; Atlantis Press. hlm. 129–133.
- Shehab A, Elhoseny M, Muhammad K, Sangaiah AK, Yang P, Huang H, Hou G. 2018. Secure and Robust Fragile Watermarking Scheme for Medical Images. *IEEE Access*. 6:10269–10278.doi:10.1109/ACCESS.2018.2799240.
- Surekha B, Swamy DG. 2011. A Spatial Domain Public Image Watermarking. *Int. J. Secur. Its Appl.* 5(1).
- Tsui TK, Zhang X-P, Androultsos D. 2008. Color Image Watermarking Using Multidimensional Fourier Transforms. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.* 3(1):16–28.doi:10.1109/TIFS.2007.916275.