



UNIVERSITAS PERTAHANAN RI

**Kompresi *Near Lossless Citra Synthetic Aperture Radar* dengan
Integer Wavelet Transform, Delta Encoding dan *Zstandard***

RIVILYO MANGOLAT RIZKY SITANGGANG 320210302021

**Skripsi yang Ditulis untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan dalam
Mendapatkan Gelar Sarjana**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM MILITER
PROGRAM STUDI MATEMATIKA
BOGOR 2025**

LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI

Nama : Rivilyo Mangolat Rizky Sitanggang
NIM : 320210302021
Program Studi : Matematika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
Judul Skripsi : Kompresi *Near Lossless* Citra *Synthetic Aperture Radar* dengan *Integer Wavelet Transform*, *Delta Encoding* dan *Zstandard*

Dosen Pembimbing I



Dr. Bambang Suharjo, M.Si.

Kolonel Laut (KH)

NIP. 10830/P

Tanggal: 07 Agustus 2025

Dosen Pembimbing II



Bambang Setiadi, S.T., M.Eng., Ph.D.

Penata Tk. I III/d

NIP. 198611052022021000

Tanggal: 07 Agustus 2025

Mengetahui,

Kepala

Program Studi Matematika



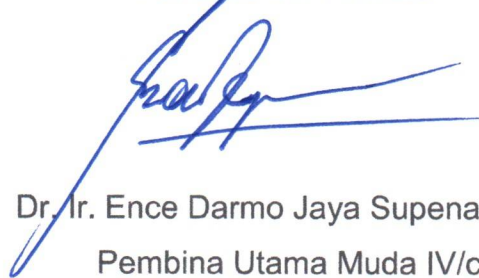
Djoko Heksa Purnomo, S.Si., M.Si.

Kolonel Laut (KH) NRP. 14628/P

Tanggal: 07 Agustus 2025

Dekan

Fakultas MIPA Militer



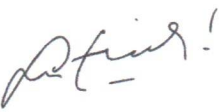
Dr. Ir. Ence Darmo Jaya Supena, M.Si

Pembina Utama Muda IV/c

Tanggal:

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

Nama : Rivilyo Mangolat Rizky Sitanggang
 NIM : 320210302021
 Program Studi : Matematika
 Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
 Judul Skripsi : Kompresi *Near Lossless* Citra *Synthetic Aperture Radar* dengan *Integer Wavelet Transform*, *Delta Encoding* dan *Zstandard*

No.	Nama	Tanda Tangan	Tanggal
1.	Dosen Pembimbing I: Dr. Bambang Suharjo, M.Si. Kolonel Laut (KH) NRP. 10830/P		7 / 8 25
2.	Dosen Pembimbing II: Bambang Setiadi, S.T., M.Eng. Ph.D. Penata Tk. I III/d NIP. 197506302005021001		7 / 8 25
3.	Dosen Penguji I: Dr. Ro'fah Nur Rachmawati, S.Si., M.Si. Penda Tk. I III/b NIP. 198612152022032002		7 / 8 25
4.	Dosen Penguji II: Muhamad Syazali, M.Si. Penda Tk. I III/b NIP. 198611212022031001		7 / 8 25

PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya atau sebagian karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan jenjang apapun di suatu Perguruan Tinggi; dan sepanjang sepengetahuan saya juga tidak terpadat istilah, frasa, kalimat, paragraf, subbab, atau bab dari karya yang pernah ditulis atau diterbitkan; kecuali yang secara tertulis diajukan dalam naskah ini dan disebutkan dalam Daftar Referensi.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa terdapat plagiat dalam skripsi ini, saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan/undang-undang yang berlaku.

Bogor, 11 April 2025



Rivilyo Mangolat Rizky Sitanggang

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Pertahanan Republik Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Rivilyo Mangolat Rizky Sitanggang
NIM : 320210302021
Program Studi : Sarjana Matematika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Pertahanan Republik Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Kompresi *Near Lossless* Citra *Synthetic Aperture Radar* dengan *Integer Wavelet Transform*, *Delta Encoding* dan *Zstandard*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pertahanan Republik Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bogor
Pada Tanggal : 07 Agustus 2025
Yang menyatakan



Rivilyo Mangolat Rizky Sitanggang
NIM. 320210302021

KATA PENGANTAR

Puji syukur peneliti panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulisan skripsi dengan judul “Kompresi *Near Lossless* Citra *Synthetic Aperture Radar* dengan *Integer Wavelet Transform*, *Delta Encoding* dan *Zstandard*” dapat diselesaikan. Penyusunan skripsi ini ditujukan sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer Universitas Pertahanan RI. Penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu, pada kesempatan ini Kadet Mahasiswa mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Ence Darmo Jaya Supena, M.Si, selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer.
2. Bapak Djoko Heksa Purnomo, S.Si., M.Si. selaku Kaprodi Matematika.
3. Bapak Dr. Bambang Suharjo, M.Si. dan Bapak Bambang Setiadi, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing dalam penelitian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan staff Prodi Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam selaku pendidik, pembimbing, dan fasilitator sehingga penulis mendapatkan ilmu pengetahuan yang bermanfaat.
5. Seluruh dosen penguji penelitian tugas akhir ini sejak seminar proposal hingga sidang skripsi.
6. Kedua Orang tua yang memberikan dukungan moral dan material dalam membantu penulisan skripsi ini
7. Seluruh jajaran Kelompok Komando Batalyon Remaja 2023/2024
8. Segenap keluarga Peleton 2 Kompi B Batalyon Remaja
9. Segenap keluarga asuh Apeiros dan Jayadrata
10. Semua pihak yang telah banyak membantu dalam penyusunan skripsi ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Saya menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu dengan kerendahan hati mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif demi kesempurnaan skripsi ini. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat terhadap pengembangan ilmu pertahanan dan dapat memberikan pengembangan pada bidang kompresi citra SAR, khususnya dari misi *Sentinel-1A*, yang sangat besar dan digunakan dalam pemantauan lingkungan, mitigasi bencana, serta surveilans maritim.

Bogor, 11 April 2025



Rivilyo Mangolat Rizky Sitanggang

ABSTRAK

Kompresi *Near Lossless* Citra *Synthetic Aperture Radar* dengan *Integer Wavelet Transform*, *Delta Encoding* dan *Zstandard*

Penelitian ini mengembangkan metode kompresi *near-lossless* untuk citra *Synthetic Aperture Radar* (SAR) *Sentinel-1A* dengan menggabungkan *Integer Wavelet Transform* (IWT), *Delta Encoding*, dan algoritma *Zstandard* (Zstd). Data yang digunakan berupa citra Level-1 GRD polarimetri VV dan VH dari tiga lokasi berbeda. Proses diawali dengan transformasi wavelet *integer* untuk membagi citra ke dalam subband frekuensi, kemudian dilanjutkan dengan *Delta Encoding* untuk mereduksi entropi lokal secara efisien. Kompresi akhir dilakukan menggunakan Zstd pada level 10 dan 22. Hasil menunjukkan bahwa pendekatan IWT–Delta–Zstd mampu mengurangi ukuran file secara signifikan, dengan rasio kompresi mencapai 12–26% tergantung lokasi dan kanal, serta waktu kompresi antara 90 hingga 500 detik. Evaluasi kualitas rekonstruksi menggunakan MSE dan PSNR menunjukkan distorsi yang sangat rendah, dengan PSNR konsisten di atas 78 dB, bahkan mencapai lebih dari 90 dB pada area laut. Selain itu, metode ini mempertahankan struktur informasi penting dalam citra SAR, seperti *speckle* dan tekstur lokal. Efektivitas pendekatan regresi dalam memprediksi subband HH juga menambah efisiensi penyimpanan tanpa menurunkan kualitas rekonstruksi. Oleh karena itu, metode ini terbukti efisien secara matematis, ringan secara komputasi, dan layak diimplementasikan pada sistem penyimpanan dan transmisi data SAR berbasis perangkat terbatas dalam konteks pengawasan dan pertahanan.

Kata Kunci: *Synthetic Aperture Radar*, *Integer Wavelet Transform*, *Delta Encoding*, *Zstandard*, Kompresi *Near-lossless*, Entropi, MSE, PSNR

ABSTRACT

Near Lossless Compression of Synthetic Aperture Radar Images with Integer Wavelet Transform, Delta Encoding and Zstandard

This study develops a near-lossless compression method for Sentinel-1A Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery by combining Integer Wavelet Transform (IWT), Delta Encoding, and the Zstandard (Zstd) compression algorithm. The dataset comprises Level-1 GRD images with VV and VH polarizations from three distinct locations. The compression pipeline begins with IWT to decompose the image into frequency subbands, followed by Delta Encoding to reduce local entropy. Final compression is performed using Zstd at levels 10 and 22. Results indicate that the IWT–Delta–Zstd approach significantly reduces file size, achieving compression ratios between 12% and 26%, depending on location and polarization channel, with processing times ranging from 90 to 500 seconds. Reconstruction quality evaluation using MSE and PSNR shows very low distortion, with PSNR values consistently above 78 dB, and exceeding 90 dB in oceanic regions. Additionally, the method preserves critical SAR features such as speckle and local texture. The use of regression to estimate the HH subband further enhances storage efficiency without degrading image quality. Thus, this method is mathematically efficient, computationally lightweight, and suitable for implementation in storage and transmission systems using resource-constrained platforms for defense and surveillance applications.

Keywords: Synthetic Aperture Radar, Integer Wavelet Transform, Delta Encoding, Zstandard, Near-lossless Compression, Entropy, MSE, PSNR

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI	ii
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	v
KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK.....	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR SINGKATAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Manfaat Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Landasan Teori	9
2.1.1 Citra Synthetic Aperture Radar	9
2.1.2 Transformasi Preprocessing	15
2.1.3 Regresi Linier	21
2.1.4 Kompresi Berbasis Entropi Algoritma <i>Zstandard</i> (Zstd) ...	22
2.1.5 Evaluasi Efisiensi Kompresi.....	30
2.2 Hasil Penelitian Terdahulu	36
2.3 Kerangka Pemikiran.....	38
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	41
3.1 Metode dan Desain Penelitian	41
3.1.1 <i>Define</i> (Pendefinisian)	42
3.1.2 <i>Design</i> (Perancangan).....	43
3.1.3 <i>Develop</i> (Pengembangan).....	45
3.1.4 <i>Disseminate</i> (Penyebaran)	46

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	48
3.3 Data dan Teknik Pengolahan	49
3.4 Metode Analisis	51
3.4.1 Analisis Kualitas Rekonstruksi	52
3.4.2 Analisis Efisiensi Kompresi	52
3.4.3 Komparasi Hasil Antar Metode	53
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	54
4.1 <i>Define</i> (Pendefinisian)	54
4.2 <i>Design</i> (Perancangan)	56
4.2.1 Mekanisme <i>Preprocessing</i>	56
4.2.2 Mekanisme Kompresi	59
4.2.3 Mekanisme Dekompresi	61
4.2.4 Mekanisme Rekonstruksi	63
4.3 <i>Develop</i> (Pengembangan)	70
4.3.1 Mekanisme Modifikasi Kompresi	71
4.3.2 Mekanisme Dekompresi	82
4.4 <i>Disseminate</i> (Penyebaran)	97
4.4.1 Komparasi Hasil	97
4.4.2 Penerimaan Masukan dan Feedback (Umpan Balik)	104
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	105
5.1 Kesimpulan	105
5.2 Saran	106
DAFTAR PUSTAKA	108
LAMPIRAN	119

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Umum Citra SAR Berdasarkan Lingkungan	15
Tabel 2.2 Hasil Penelitian Terdahulu.....	36
Tabel 3.1 Jadwal Penelitian	48
Tabel 3.2 Data Penelitian	50
Tabel 4.1 Ukuran File Asli dan Hasil Kompresi Langsung dengan Zstd (dalam MB)	55
Tabel 4.2 Ukuran File Asli vs. Hasil Kompresi Zstd per Subband dan Lokasi	65
Tabel 4.3 Waktu Proses Kompresi dan Dekompresi (ms) per Lokasi dan Kanal	66
Tabel 4.4 Probabilitas ΔLL	78
Tabel 4.5 Probabilitas HL	78
Tabel 4.6 Probabilitas LH	79
Tabel 4.7 Performa Metode Kompresi IWT-Delta-Regresi-Zstd (Level- 10)	79
Tabel 4.8 Performa Metode Kompresi IWT-Delta-Regresi-Zstd (Level- 22)	80
Tabel 4.9 Performa Metode Dekompresi IWT-Delta-Regresi-Zstd (Level-10)	89
Tabel 4.10 Performa Metode Dekompresi IWT-Delta-Regresi-Zstd (Level-22).....	90
Tabel 4.11 Tabel Perbandingan Ukuran Kompresi.....	99
Tabel 4.12 Tabel Perbandingan Rasio Kompresi	100
Tabel 4.13 Tabel Perbandingan Waktu Kompresi	101
Tabel 4.14 Tabel Perbandingan Waktu Dekompresi	102

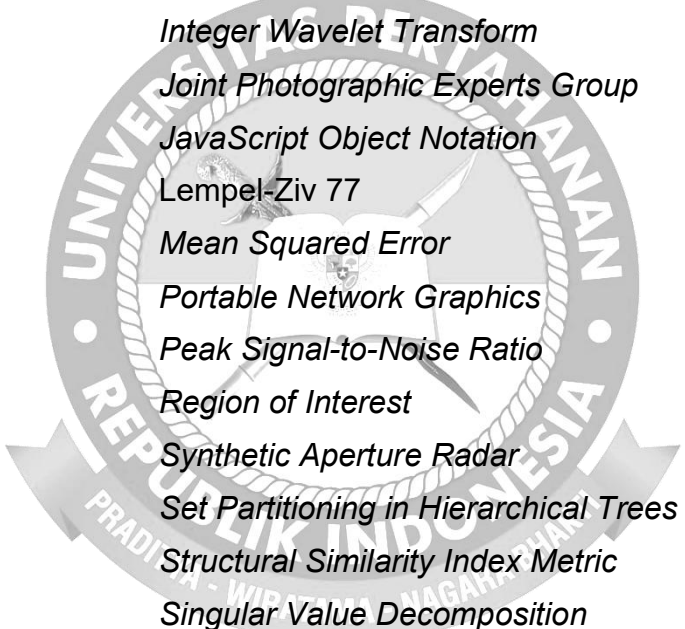
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram sistem <i>Sentinel-1A</i>	9
Gambar 2.2 Contoh hasil citra <i>Sentinel-1A</i>	10
Gambar 2.3 <i>Skema 2D Wavelet Transform: LL, LH, HL, HH</i>	17
Gambar 2.4 <i>Diagram Alir Proses Lifting: Split → Predict → Update</i>	18
Gambar 2.5 Diagram Tulang Ikan Kerangka Pemikiran	38
Gambar 3.1 Kerangka Kerja	42
Gambar 3.2 Citra Dataset Pengujian	51
Gambar 4.1 Algoritma Preprocessing	57
Gambar 4.2 Algoritma Kompresi Zstd	60
Gambar 4.3 Algoritma Dekompresi	62
Gambar 4.4 Algoritma Rekonstruksi Wavelet Dua Tingkat	64
Gambar 4.5 Histogram Subband [berturut-turut <i>LL, LH, HL</i> , dan <i>HH</i>] untuk Kanal VV Sebelum dan Sesudah <i>Delta Encoding</i>	68
Gambar 4.6 Visualisasi SVD Kanal VH (Atas) dan VV (Bawah)	70
Gambar 4.7 Algoritma Modifikasi Kompresi	72
Gambar 4.8 Diagram Alur Metode Kompresi	73
Gambar 4.9 Citra SAR Simulasi <i>I</i>	74
Gambar 4.10 Citra SAR Simulasi Terpadding <i>Ipad</i>	75
Gambar 4.11 Hasil Pemisahan subband citra SAR. Terbagi dari 4 subband berukuran 4×4 yaitu: LL (kiri-atas), HL (kanan- atas), LH (kiri-bawah), dan HH (kanan-bawah)	76
Gambar 4.12 Algoritma Modifikasi Kompresi	83
Gambar 4.13 Diagram Alur Metode Dekompresi	84
Gambar 4.14 Subband terekonstruksi <i>HH</i>	86
Gambar 4.15 Citra SAR terekonstruksi terpadding <i>Irecon – pad</i>	87
Gambar 4.16 Citra SAR terekonstruksi <i>Irecon</i>	87
Gambar 4.17 Heatmap Error Rekonstruksi – Jawa Barat VH (atas) & VV (bawah)	93

Gambar 4.18 Heatmap Error Rekonstruksi – Laut Cina Selatan VH (atas) & VV (bawah).....	94
Gambar 4.19 Heatmap Error Rekonstruksi – Pangkal Pinang Laut Cina Selatan VH (atas) & VV (bawah)	95



DAFTAR SINGKATAN



DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
FSE	<i>Finite State Entropy</i>
GRD	<i>Ground Range Detected</i>
IPYNB	<i>IPython Notebook file format</i>
IWT	<i>Integer Wavelet Transform</i>
JPEG	<i>Joint Photographic Experts Group</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
LZ77	<i>Lempel-Ziv 77</i>
MSE	<i>Mean Squared Error</i>
PNG	<i>Portable Network Graphics</i>
PSNR	<i>Peak Signal-to-Noise Ratio</i>
ROI	<i>Region of Interest</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SPIHT	<i>Set Partitioning in Hierarchical Trees</i>
SSIM	<i>Structural Similarity Index Metric</i>
SVD	<i>Singular Value Decomposition</i>
TIF / .TIF	<i>Tagged Image File Format</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UINT16	<i>Unsigned Integer 16-bit</i>
VH	<i>Vertical Transmit – Horizontal Receive</i>
VSCoDe	<i>Visual Studio Code</i>
VV	<i>Vertical Transmit – Vertical Receive</i>
ZSTD	<i>Zstandard (algoritma kompresi)</i>