

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertahanan negara modern menghadapi tantangan kompleks akibat meningkatnya ancaman asimetris yang membutuhkan solusi pemantauan strategis berbasis teknologi penginderaan jauh seperti *Synthetic Aperture Radar* (SAR) (Chan, 2008). SAR digunakan karena kemampuannya menghasilkan citra resolusi tinggi dalam berbagai kondisi cuaca dan waktu, termasuk malam hari dan cuaca ekstrem. Sistem radar ini bekerja dengan memancarkan gelombang mikro dan menerima pantulan dari permukaan bumi untuk membentuk citra dua dimensi (Wen & Lu, 2012). Keunggulan SAR mencakup kemampuan mendeteksi aktivitas di wilayah luas termasuk perbatasan, zona konflik, dan area maritim yang menjadi jalur utama penyelundupan atau pergerakan kelompok bersenjata (Patel et al., 2010).

Ukuran *file* citra SAR sangat besar karena mengandung data kompleks hasil pengolahan sinyal radar berupa komponen *In-phase* (I) dan *Quadrature* (Q). Data ini biasanya disimpan dalam format .TIF UINT16 untuk mempertahankan akurasi pantulan sinyal radar (Ives et al., 1998). Volume besar data ini menyulitkan transmisi dalam sistem komunikasi militer yang memiliki *bandwidth* terbatas seperti UAV atau satelit taktis (El-Ashkar et al., 2021). Kondisi tersebut dapat memperlambat proses analisis dan pengambilan keputusan yang membutuhkan akses data cepat dan presisi tinggi.

Penggunaan metode kompresi menjadi solusi utama untuk mengurangi ukuran *file* SAR tanpa mengorbankan kualitas penting dari citra tersebut. Kompresi *near-lossless* secara khusus dikembangkan untuk mempertahankan informasi penting seperti *speckle* dan dinamika amplitudo-fase pada citra SAR. Teknik ini dinilai unggul karena dapat mengurangi ukuran citra secara signifikan sambil tetap menjaga akurasi

spasial dan tekstur penting yang dibutuhkan dalam deteksi perubahan medan dan identifikasi objek strategis (Cirillo et al., 2002).

Berbagai penelitian menyebutkan bahwa metode JPEG dan PNG tidak dapat menangani struktur data kompleks SAR secara efektif karena karakteristiknya tidak sesuai untuk citra radar berbasis gelombang koheren (Eichel & Ives, 1999). JPEG mengandalkan transformasi *Discrete Cosine Transform* (DCT) yang dirancang untuk citra visual dan mengabaikan informasi fase yang krusial dalam SAR. Oleh sebab itu, pendekatan berbasis *wavelet* seperti *Integer Wavelet Transform* (IWT) semakin banyak digunakan karena mampu membagi citra SAR ke dalam subband frekuensi yang bisa dikompresi secara selektif.

Kompresi juga memanfaatkan *Delta Encoding* yang menghitung perbedaan antar piksel untuk menurunkan entropi lokal sebelum diterapkan algoritma akhir seperti *Zstandard* (Zstd) (Stefko et al., 2022). Zstd digunakan karena memberikan kecepatan dekompresi tinggi tanpa kehilangan integritas data kritis, yang penting untuk sistem pemrosesan *real-time* di medan operasi militer (Patel et al., 2010). Sistem SAR modern seperti yang digunakan dalam wahana COSMO-SkyMed menggabungkan algoritma *wavelet* dan strategi *Region of Interest* (ROI) untuk memprioritaskan area penting secara spasial.

Setiap upaya kompresi ini dirancang tidak hanya untuk menghemat ruang penyimpanan, melainkan juga untuk menjaga kualitas citra yang krusial dalam proses analitik militer, seperti pelacakan target dan pengintaian medan tempur (Bielecka et al., 2014). Efisiensi kompresi secara langsung berdampak pada kemampuan sistem militer dalam merespons cepat terhadap perubahan situasi di lapangan. Integrasi strategi kompresi dalam sistem SAR bukan sekadar solusi teknis, melainkan telah menjadi fondasi penting bagi keunggulan strategis dalam bidang pertahanan dan keamanan nasional.

Teknologi kompresi *Synthetic Aperture Radar* (SAR) tidak hanya menjadi alat bantu efisiensi teknis, tetapi telah berkembang menjadi

instrumen strategis dalam memperkuat sistem pertahanan modern (Patel et al., 2010). Tantangan utama yang dihadapi oleh sistem SAR saat ini adalah keterbatasan *bandwidth* transmisi, kapasitas penyimpanan di wahana platform seperti satelit atau pesawat tanpa awak, serta kebutuhan akan waktu tanggap yang cepat dalam analisis data medan operasi (Madabushi et al., 2024). Solusi terhadap tantangan ini tidak bisa bergantung pada teknologi pemrosesan konvensional, melainkan membutuhkan pendekatan kompresi cerdas dan fleksibel yang dirancang khusus untuk karakteristik kompleks SAR.

Implementasi kompresi SAR dalam konteks militer telah banyak dibuktikan dalam berbagai sistem operasional. Salah satu contoh aplikatif adalah sistem satelit militer Italia COSMO-SkyMed, yang menggabungkan algoritma *wavelet* dan skema prioritas spasial dalam pengiriman data *real-time* ke markas komando pusat. Dalam sistem ini, area yang dianggap sebagai *Region of Interest* (ROI) seperti konsentrasi kendaraan musuh atau pusat komunikasi diprioritaskan dalam kompresi dengan menjaga resolusi penuh, sedangkan area latar belakang dikompresi lebih agresif tanpa mempengaruhi kemampuan interpretasi (Zhang et al., 2007). Pendekatan ini tidak hanya hemat *bandwidth*, tetapi juga mempercepat proses pengambilan keputusan berdasarkan informasi spasial yang relevan.

Komponen UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) atau drone militer turut menjadi platform yang sangat bergantung pada teknologi kompresi SAR. Kapasitas penyimpanan dan tenaga pemrosesan pada UAV sangat terbatas, sehingga diperlukan kompresi yang mampu bekerja secara efisien langsung dari platform udara. Algoritma kompresi berbasis jaringan saraf telah diadopsi dalam UAV untuk menyaring dan mentransmisikan data citra secara cepat ke pusat kendali darat dengan beban komunikasi yang minimal. Kompresi berbasis *neural network* juga memungkinkan sistem UAV melakukan klasifikasi awal terhadap citra dan hanya mengirimkan segmen citra yang mengandung anomali atau objek strategis.

Penggunaan kompresi dalam pengawasan perbatasan juga menjadi salah satu contoh nyata efisiensi strategis dari pendekatan ini. Area perbatasan yang luas memerlukan pemantauan terus-menerus, dan SAR menjadi alat utama untuk melakukan deteksi dini terhadap infiltrasi atau aktivitas ilegal lintas batas (El-Ashkar et al., 2021). Data yang dikumpulkan dari UAV atau satelit kemudian dikompresi secara *near-lossless* untuk menghindari keterlambatan transmisi sambil mempertahankan detail objek seperti kendaraan ringan atau individu yang melintasi area terlarang (Wen & Lu, 2012).

Konteks lain yang menunjukkan pentingnya kompresi adalah dalam operasi tempur aktif. Di wilayah konflik bersenjata, satelit dan UAV dilengkapi SAR digunakan untuk mendeteksi perubahan posisi pasukan musuh, pergerakan kendaraan lapis baja, dan aktivitas logistik strategis lainnya. Proses pengambilan dan pengiriman data tidak dapat dibebani oleh file berukuran besar yang lambat ditransmisikan, mengingat tingkat sensitivitas waktu yang tinggi dari data tersebut. Kompresi memungkinkan data SAR untuk segera dikirimkan dan digunakan dalam sistem keputusan berbasis AI atau analisis cepat oleh personel intelijen.

Efisiensi kompresi juga memainkan peran dalam sistem komunikasi tempur mobile seperti pusat kendali bergerak atau kendaraan pengendali lapangan. Sistem tersebut seringkali menggunakan saluran komunikasi yang terbatas kapasitasnya, dan tanpa teknologi kompresi SAR, mereka tidak dapat menerima citra pengawasan dalam waktu yang cukup cepat untuk merespons ancaman taktis. Penggunaan algoritma seperti IWT dan Zstd di kendaraan militer telah menunjukkan peningkatan efektivitas dalam mempercepat transfer data tanpa degradasi kualitas yang berarti (Stefko et al., 2022).

Kompresi SAR juga berkontribusi terhadap efisiensi energi dan pengurangan beban sistem elektronik, terutama pada platform berbasis baterai seperti *drone* kecil dan nanosatellit (Choi et al., 2021). Beban pemrosesan dan pengiriman data yang lebih ringan berarti sistem dapat

beroperasi lebih lama dan mengirimkan lebih banyak citra per misi, memperluas cakupan pengawasan dengan biaya lebih rendah. Selain itu, kemampuan sistem SAR untuk menyimpan lebih banyak data secara lokal melalui kompresi juga meningkatkan kapasitas perekaman selama misi panjang, seperti patroli laut atau pengawasan perbatasan pegunungan (Rane et al., 2011).

Integrasi kompresi dalam sistem SAR masa kini semakin diarahkan pada pendekatan adaptif, di mana sistem secara otomatis memilih skema kompresi berdasarkan jenis misi, volume data, dan tingkat kritikalitas objek yang terdeteksi (Ji et al., 2017). Pendekatan ini sangat sesuai untuk sistem multi-platform, seperti operasi gabungan antara satelit, UAV, dan sistem radar darat. Dengan demikian, semua komponen jaringan pertahanan dapat saling terhubung dan berbagi data dalam format kompresi yang optimal, menjaga kualitas sekaligus efisiensi sistem secara keseluruhan.

Setiap kemajuan dalam metode kompresi citra SAR membawa dampak langsung terhadap peningkatan kecepatan, akurasi, dan fleksibilitas dalam sistem pertahanan nasional (Orzada et al., 2021). Kompresi bukan lagi sekadar isu teknis yang terkait dengan penyimpanan data, tetapi telah menjadi elemen strategis yang menentukan kecepatan dan keberhasilan misi. Dalam era peperangan modern yang ditandai oleh dominasi teknologi dan pengambilan keputusan berbasis data, efisiensi transmisi dan interpretasi citra radar dapat menjadi pembeda antara keberhasilan dan kegagalan operasi di medan nyata (Pieterse et al., 2019).

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi kompresi citra *Synthetic Aperture Radar* (SAR) dengan pendekatan yang beragam, mulai dari penolakan frekuensi rendah berbasis peta kualitas (Deng & Huang, 2024), transformasi geometri multi-skala (Bouchemha et al., 2015), hingga teknik compressed sensing untuk data mentah SAR (Mulgrew et al., 2007; Zhu et al., 2015). Zhang et al. (2012) di sisi lain mengusulkan representasi tepi terstruktur pohon untuk mengoptimalkan efisiensi penyimpanan, dan beberapa studi lokal seperti Pangesti et al. (2020) serta Linna (2015)

membahas perbandingan antara metode lossy dan lossless secara umum dalam domain citra digital. Namun, seluruh pendekatan tersebut memiliki keterbatasan spesifik: sebagian besar menggunakan representasi floating-point yang tidak kompatibel dengan sistem komputasi berbasis integer, tidak mempertahankan struktur bilangan bulat secara penuh, serta jarang mengkaji performa kompresi pada citra SAR polarimetri 16-bit (.TIF UINT16) seperti *Sentinel-1A* yang umum digunakan dalam sistem militer dan pengawasan (Pilikos, 2024).

Gap penelitian ini adalah belum ada penelitian yang mengintegrasikan *Integer Wavelet Transform* (IWT), *Delta Encoding*, dan strategi estimasi berbasis regresi linier dalam satu pipeline kompresi citra SAR yang sepenuhnya berjalan di domain bilangan bulat. Dalam penelitian ini, inovasi utama terletak pada penggantian penyimpanan eksplisit subband HH dengan pendekatan regresi lokal, yang memprediksi nilai-nilai HH berdasarkan informasi dari subband HL, LH, serta selisih absolut keduanya. Dengan hanya menyimpan parameter regresi untuk tiap blok, metode ini mampu secara signifikan mengurangi ukuran data tanpa menurunkan kualitas hasil rekonstruksi. Kombinasi IWT–Delta–Regresi–Zstd tidak hanya efisien secara statistik dan visual, tetapi juga sangat sesuai untuk implementasi pada perangkat komputasi terbatas seperti UAV, edge device, dan sistem militer real-time. Oleh karena itu, pendekatan ini mengisi celah penting dalam pengembangan metode kompresi *near-lossless* yang akurat, efisien, dan praktis untuk pengolahan citra SAR resolusi tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, adapun rumusan masalah atau pertanyaan penelitian dari penelitian ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

- a. Bagaimana pengaruh kombinasi *Integer Wavelet Transform* (IWT) dan *Delta Encoding* terhadap struktur data citra SAR dalam hal distribusi entropi dan keterpusatan informasi spasial?

- b. Sejauh mana metode estimasi subband HH menggunakan regresi linier dapat menggantikan penyimpanan langsung tanpa menurunkan kualitas hasil rekonstruksi citra SAR?
- c. Bagaimana kinerja metode kompresi IWT–Delta–Regresi–Zstd dibandingkan dengan metode kompresi konvensional (seperti Zstd murni dan ZIP) dalam hal rasio kompresi, waktu pemrosesan, serta metrik kualitas citra seperti MSE dan PSNR?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun berdasarkan rumusan masalah yang telah dibuat, tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk :

- a. Membangun pipeline preprocessing citra SAR menggunakan Integer Wavelet Transform (IWT) dan tahapan encoding berbasis estimasi prediktif untuk menyusun ulang informasi spasial ke dalam representasi frekuensi yang lebih efisien dan mudah dikompresi..
- b. Mengkaji perubahan nilai-nilai numerik pada citra setelah diterapkan IWT dan tahapan encoding, meliputi histogram intensitas, entropi orde-nol, dan spektrum singular (SVD) sebagai indikator potensi efisiensi kompresi..
- c. Mengevaluasi pengaruh tahapan preprocessing terhadap hasil akhir kompresi menggunakan algoritma Zstandard (Zstd), berdasarkan metrik ukuran file, rasio kompresi, kecepatan proses, serta kualitas rekonstruksi menggunakan MSE dan PSNR.

1.4 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan manfaat teoritis dan praktis sebagai berikut:

- a. Manfaat Teoritis

1. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu kompresi citra dengan mengintegrasikan pendekatan transformasi integer, *Delta Encoding*, dan regresi linier dalam domain pengolahan citra radar.
 2. Menunjukkan bahwa subband frekuensi tinggi (HH) dalam transformasi wavelet dapat diestimasi secara matematis menggunakan regresi tanpa menyimpan data eksplisit, sehingga membuka ruang baru dalam penelitian kompresi citra adaptif.
 3. Menyediakan dasar teoritis yang kuat mengenai hubungan antara entropi, struktur SVD, dan efisiensi kompresi dalam citra SAR 16-bit (UINT16), yang selama ini jarang dieksplorasi secara mendalam.
- b. Manfaat praktis
1. Menawarkan metode kompresi citra SAR yang efisien, ringan, dan cocok untuk sistem dengan keterbatasan sumber daya seperti UAV, edge device, dan sistem pemantauan militer.
 2. Menghasilkan alternatif kompresi *near-lossless* yang kompatibel dengan data SAR berformat UINT16 dan tetap mempertahankan kualitas informasi penting seperti speckle dan tekstur lokal.
 3. Dapat digunakan sebagai acuan atau dasar pengembangan sistem kompresi terintegrasi pada aplikasi pemantauan lingkungan, mitigasi bencana, hingga sistem pengawasan maritim dan pertahanan nasional.