

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Analisis dan Perbandingan Sistem Radar Berbasis Darat untuk Mendukung Pertahanan TNI Angkatan Darat dalam Kondisi Geografis dan Iklim Tropis Indonesia: Tinjauan Literatur

Analysis and Comparison of Ground-Based Radar Systems to Support the Indonesian Army's Defense within Indonesia's Tropical Geography and Climate: A Literature Review

Aldo Christiano Johannes*, Sovian Aritonang, Eflal Dwi Yosepin

**Program Studi Matematika Militer, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pertahanan Republik Indonesia*

munthealdo2112@gmail.com*

Abstract

Advances in radar technology are important to strengthening modern defense systems, including Indonesian Army (TNI AD) ground operations. This study reviews and compares ground-based radar systems in terms of technical characteristics, operational functions, and adaptability to Indonesia's complex geography and tropical climate. A systematic literature review was conducted using scientific publications from 2021–2025 identified through international academic databases, including Scopus, IEEE Xplore, and ScienceDirect. Seven systems were examined: Ka-band radar; Chiangrai (CRI) and Phitsanulok (PHS) C-band radars; the PANTHERE and OPERA networks; Radar Wind Profiler (RWP); CINRAD-SA; Ground-Based Synthetic Aperture Radar (GBSAR); and Ground-Based Distributed Coherent Aperture Radar. The review indicates that each system has distinct strengths and limitations. Ka-band radar supports detailed atmospheric observation but is vulnerable to rain attenuation. C-band radar offers a useful balance between range and resolution in tropical rainfall conditions. PANTHERE–OPERA provides broad meteorological data integration, while RWP and CINRAD-SA support wind and atmospheric monitoring relevant to aviation. GBSAR is useful for high-resolution imaging and surface-deformation monitoring. Ground-based distributed radar demonstrates potential for long-range, multi-target observation and integration with command networks. Based on the reviewed literature and the comparative scoring presented in the manuscript, the coherent distributed radar system receives the highest suitability score for the operational context discussed. Nevertheless, field validation in Indonesian terrain, assessment of interoperability and lifecycle costs, and further development of AI-assisted processing are required before implementation decisions can be made.

Keywords: *Ground-Based Radar, Military Radar System, Land Surveillance, Tropical Environment, Radar Comparison*

Abstrak

Kemajuan teknologi radar berperan penting dalam memperkuat sistem pertahanan modern, termasuk mendukung operasi darat TNI Angkatan Darat (TNI AD). Penelitian ini bertujuan meninjau dan membandingkan sistem radar berbasis darat berdasarkan karakteristik teknis, fungsi operasional, serta kemampuan adaptasinya terhadap kondisi geografis dan iklim tropis Indonesia. Kajian dilakukan melalui tinjauan literatur sistematis terhadap publikasi ilmiah periode 2021–2025 yang ditelusuri melalui basis data akademik internasional, antara lain Scopus, IEEE Xplore, dan ScienceDirect. Analisis mencakup tujuh sistem, yaitu radar Ka-band; radar C-band Chiangrai (CRI) dan Phitsanulok (PHS); jaringan PANTHERE dan OPERA; Radar Wind Profiler (RWP); CINRAD-SA; Ground-Based Synthetic Aperture Radar (GBSAR); serta Ground-Based Distributed Coherent Aperture Radar. Hasil kajian menunjukkan bahwa setiap sistem memiliki keunggulan dan keterbatasan sesuai tujuan penggunaannya.



Author@ This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/



e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Radar Ka-band mendukung pengamatan atmosfer secara terperinci, tetapi rentan terhadap atenuasi hujan. Radar C-band menawarkan keseimbangan jangkauan dan resolusi pada kondisi hujan tropis. PANTHERE–OPERA unggul dalam integrasi data meteorologi berskala luas, sedangkan RWP dan CINRAD-SA mendukung pemantauan angin serta atmosfer untuk kebutuhan penerbangan. GBSAR bermanfaat untuk pencitraan beresolusi tinggi dan pemantauan deformasi permukaan. Radar terdistribusi berbasis darat menunjukkan potensi untuk pengamatan jarak jauh, pelacakan banyak objek, dan integrasi dengan jaringan komando. Berdasarkan sintesis literatur dan skor perbandingan dalam naskah, radar terdistribusi koheren memperoleh skor kelayakan tertinggi pada konteks operasional yang dikaji. Namun, keputusan penerapan tetap memerlukan validasi lapangan di wilayah Indonesia, evaluasi interoperabilitas dan biaya siklus hidup, serta pengembangan pemrosesan berbantuan kecerdasan buatan.

Kata Kunci: Radar Berbasis Darat, Sistem Radar Militer, Pengawasan Darat, Lingkungan Tropis, Perbandingan Radar

Penulis Korespondensi: Aldo Christiano Johannes

I. PENDAHULUAN

Ancaman keamanan darat berkembang cepat, mencakup kendaraan lapis baja, ranjau darat, hingga sistem tanpa awak yang beroperasi secara otonom. Kemajuan ini menuntut sistem radar dengan kemampuan deteksi tinggi di medan yang kompleks dan kondisi visibilitas rendah. Teknologi radar modern tidak hanya berfungsi sebagai alat penginderaan pasif, tetapi juga menjadi komponen utama dalam sistem pertahanan darat yang memerlukan kecepatan respon dan keandalan sinyal tinggi. Radar pada kendaraan tanpa awak darat (Unmanned Ground Vehicles, UGVs) menjadi salah satu bentuk implementasi teknologi sensor pertahanan paling signifikan. Penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan radar pada UGV memungkinkan pengawasan area dengan presisi tinggi, namun menghadapi tantangan pada penetrasi sinyal dan interpretasi data di lingkungan tidak terstruktur. Dalam bidang Ground Penetrating Radar (GPR), metode konvensional dan pendekatan berbasis pembelajaran mendalam (deep learning) menunjukkan perbedaan performa signifikan dalam mengenali objek bawah permukaan seperti pipa, ranjau, dan material terpendam. Sistem berbasis machine learning memberikan akurasi klasifikasi lebih tinggi terhadap pola pantulan radar, meskipun membutuhkan data latih besar dan kapasitas komputasi tinggi (Ersü et al., 2024, Bai et al., 2023).

Lingkungan fisik juga memberi pengaruh kuat terhadap performa radar. Studi pada jalan tua dengan GPR memperlihatkan bahwa variasi kelembapan tanah, heterogenitas lapisan, serta cuaca ekstrem memengaruhi karakteristik sinyal pantulan dan parameter dielektrik, sehingga perlu diterapkan kalibrasi adaptif di lapangan. Temuan serupa juga diperkuat oleh penelitian lain yang menekankan pentingnya kombinasi teknik radar dengan metode Electrical Resistivity Tomography (ERT) untuk meningkatkan deteksi voids bawah tanah pada area pertambangan. Selain itu, penggabungan radar dengan sensor lain seperti magnetometer terbukti meningkatkan efektivitas deteksi ranjau darat, baik yang berbasis logam maupun non-logam. Sistem gabungan udara berbasis GPR dan magnetometer mampu menurunkan tingkat kesalahan deteksi dibandingkan sistem tunggal (Abdelsamei et al., 2024, Allam et al., 2025, Li et al., 2025).

Sebagian besar penelitian radar darat dalam lima tahun terakhir berfokus pada peningkatan algoritma deteksi tunggal dan aplikasi sipil, tanpa membandingkan performa antarsistem dalam konteks pertahanan militer yang kompleks. Penilaian kinerja radar juga sering terbatas pada parameter laboratorium seperti signal-to-noise ratio dan resolusi spasial, tanpa mempertimbangkan pengaruh lingkungan nyata seperti variasi topografi, kelembapan tanah, dan gangguan elektromagnetik. Kondisi tersebut menimbulkan keterbatasan dalam memahami efektivitas radar di medan operasional yang dinamis, terutama dalam deteksi ancaman bergerak atau tersembunyi

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

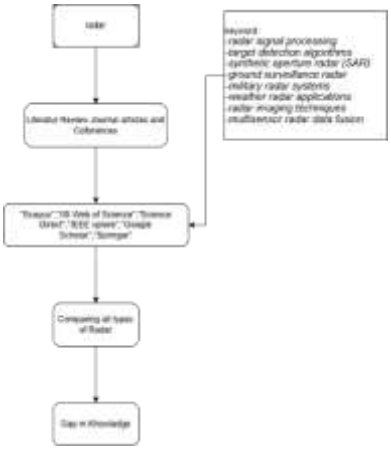
di area pertahanan darat. Temuan terbaru menunjukkan bahwa integrasi radar dengan sensor tambahan seperti magnetometer dapat meningkatkan keandalan deteksi, namun penelitian komparatif mengenai efektivitas berbagai jenis radar pertahanan darat masih jarang dilakukan. Celah ini membuka peluang penting untuk menganalisis performa teknis dan adaptabilitas sistem radar seperti Ground Penetrating Radar (GPR), Surface Wave Radar (SWR), dan Frequency Modulated Continuous Wave Radar (FMCW) dalam berbagai kondisi operasional. Penelitian komparatif ini diharapkan menghasilkan rekomendasi strategis bagi pengembangan sistem pertahanan darat yang efisien, adaptif, dan sesuai dengan karakteristik geografis Indonesia (Ersü et al., 2024, Abdelsamei et al., 2024, Allam et al., 2025, Li et al., 2025).

II. METODE

Kajian ini dilakukan dengan menelusuri literatur dari berbagai basis data akademik, antara lain Web of Science, Science Direct, Scopus, Springer, IEEE Xplore, dan Google Scholar. Pencarian dilakukan menggunakan kata kunci seperti radar signal processing, target detection algorithms, synthetic aperture radar (SAR), ground surveillance radar, military radar systems, weather radar applications, radar imaging techniques, dan multisensor radar data fusion. Kombinasi kata kunci digunakan untuk memperluas cakupan pencarian sehingga literatur yang diperoleh bersifat komprehensif dan relevan dengan fokus penelitian.

Literatur yang dipertimbangkan dibatasi pada periode 2021 hingga 2025, dengan tujuan menyoroti perkembangan terkini dalam teknologi radar, khususnya pada konteks pertahanan dan penginderaan medan darat. Hanya publikasi berbahasa Inggris yang dimasukkan agar hasil kajian memiliki konsistensi dan dapat diakses secara luas. Selain itu, daftar pustaka dari artikel yang diperoleh turut ditelusuri kembali untuk menemukan sumber tambahan yang berkaitan langsung dengan topik penelitian.

Selanjutnya, Setiap pendekatan dianalisis dengan menekankan relevansinya terhadap kebutuhan operasional sistem radar militer dan sipil. Evaluasi juga mencakup penggunaan frekuensi radar, konfigurasi antena, serta integrasi dengan sensor lain seperti LiDAR, kamera inframerah, dan sistem INS/GNSS. Beberapa kriteria utama yang menjadi fokus dalam tinjauan ini meliputi akurasi deteksi target, ketahanan terhadap interferensi dan clutter, serta kemampuan radar beroperasi di berbagai kondisi cuaca dan lingkungan ekstrem.



Gambar 1. Alur Penelusuran Literatur Dan Perbandingan Sistem Radar.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

Tabel 1. Perbandingan Sistem Radar Berbasis Darat (2021–2025)

Jenis Radar	Frekuensi	Jangkauan	Resolusi	Kelebihan Utama	Keterbatasan	Kesesuaian dengan Indonesia
Ka-Band Cloud Radar	~35 GHz	5-15 km	Sangat Tinggi	Deteksi awan detail, profil atmosfer akurat	Sangat sensitif hujan, rain attenuation besar	Rendah – iklim tropis berawan & lembap
C-Band Radar (CRI/PHS)	5.3 GHz		Sedang	Stabil untuk hujan tropis, kompromi range–resolusi	Dipengaruhi beam blockage pegunungan	Menengah-Tinggi – cocok iklim hujan Indonesia
PANTHERE and OPERA Radar Network	C-band & S-band (multi)	200-300 km	Sedang	Integrasi data besar, kuat untuk pemantauan cuaca skala luas	Tidak dirancang untuk deteksi target darat	Rendah – lebih ke meteorologi
Radar Wind Profiler (RWP)	VHF/UHF	1–5 km vertikal	Tinggi	Profil angin akurat, penting untuk operasi udara	Tidak bisa mendeteksi target darat	Rendah-Menengah – pendukung operasi udara
CINRAD-SAS-Band Radar	2.8 GHz	150–230 km	Sedang	Kuat terhadap hujan lebat, performa stabil	Antena besar, instalasi tetap	Menengah – kuat di cuaca ekstrim
GBSAR (Ground-Based Synthetic Aperture Radar)	mmWave	0.1–5 km	Sangat tinggi (4 cm)	Akurat untuk deformasi, deteksi objek diam/halus	Tidak cocok long-range, terpengaruh vibrasi	Tinggi – area pegunungan, longsor, markas
Ground-Based Distributed Coherent Radar	Multi-band	> 300 km	Tinggi	Tahan jamming, multi-target, sangat relevan militer	Kompleks, butuh sinkronisasi presisi	Sangat Tinggi – ideal untuk TNI AD

Tabel 1 merangkum karakteristik frekuensi, jangkauan, resolusi, kelebihan, keterbatasan, dan kesesuaian tujuh sistem radar terhadap kondisi Indonesia. Perbandingan ini memperlihatkan bahwa radar meteorologi dan radar pengamatan atmosfer memiliki fungsi pendukung yang berbeda dari radar yang dirancang untuk pemantauan objek darat.

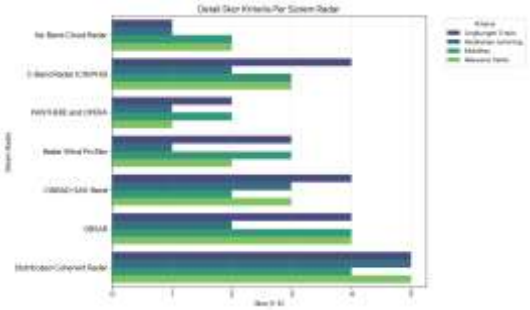
e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

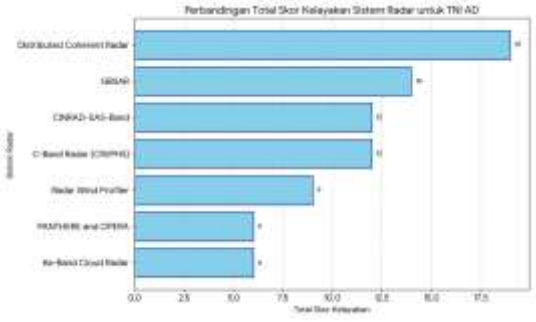
Tabel 2. Skor Kelayakan Radar untuk Operasi Darat Indonesia

Sistem Radar	Lingkungan Tropis	Ketahanan Jamming	Mobilitas	Relevansi Taktis	Total Skor
Ka-Band Cloud Radar	1	1	2	2	6
C-Band Radar (CRI/PHS)	4	2	3	3	12
PANTHERE and OPERA Radar Network	2	1	2	1	6
Radar Wind Profiler (RWP)	3	1	3	2	9
CINRAD-SAS-Band Radar	4	3	2	3	12
GBSAR (Ground-Based Synthetic Aperture Radar)	4	2	4	4	14
Ground-Based Distributed Coherent Radar	5	5	4	5	19

Tabel 2 menunjukkan hasil penilaian berdasarkan lingkungan tropis, ketahanan terhadap jamming, mobilitas, dan relevansi taktis. Ground-Based Distributed Coherent Radar memperoleh total skor tertinggi, yaitu 19, diikuti GBSAR dengan skor 14. Skor tersebut merupakan hasil penilaian yang disajikan dalam draf dan perlu dipahami sesuai kriteria serta asumsi penilaian penelitian.



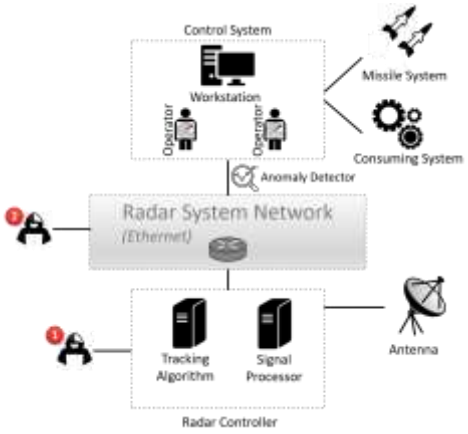
Gambar 2. Grafik skor kriteria radar untuk operasi darat Indonesia.



e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Gambar 3. Grafik perbandingan total skor kelayakan sistem radar untuk TNI AD.



Gambar 4. Contoh arsitektur sistem radar dan hubungan dengan sistem konsumen (Cohen et al., 2022).

Berdasarkan hasil penilaian pada Tabel 2, Grafik 3, dan Grafik 4 , terlihat bahwa sistem radar dengan kemampuan pemrosesan sinyal yang adaptif memiliki skor kelayakan yang lebih tinggi untuk kondisi geografis Indonesia. Untuk memaksimalkan nilai efektivitas tersebut, integrasi algoritma Artificial Intelligence (AI) dan Machine Learning (ML) menjadi kebutuhan krusial dalam memitigasi keterbatasan teknis radar di wilayah tropis, khususnya terkait fenomena clutter permukaan dan pelemahan sinyal akibat curah hujan tinggi. Penggunaan metode Deep Learning dapat diimplementasikan pada unit pemrosesan sinyal untuk memperkuat kemampuan klasifikasi target secara otomatis di tengah gangguan cuaca ekstrem. Teknologi ini memungkinkan sistem radar untuk secara adaptif membedakan antara kebisingan atmosfer dengan objek ancaman taktis melalui pengenalan pola yang lebih presisi, sehingga mempercepat siklus pengambilan keputusan komando bagi satuan Artileri Pertahanan Udara (Arhanud) TNI AD.

2. Pembahasan

Modul pemancar bertugas menghasilkan energi gelombang radio berfrekuensi tinggi yang akan dipancarkan ke target fungsi ini sangat kritis karena kualitas sinyal pemancaran akan menentukan jangkauan, sensitivitas, dan resolusi sistem radar. Sebagai contoh, pada desain front-end 24 GHz dengan teknologi CMOS 65 nm, efisiensi daya mencapai 47 % dan titik kompresi 1 dB pada +10,5 dBm, yang menunjukkan bahwa optimasi arsitektur pemancar menjadi elemen kunci dalam performa radar modern. Dalam penggunaannya, transmitter harus mampu menghasilkan pulsa atau gelombang kontinu (misalnya FMCW) dengan karakteristik tertentu (durasi pulsa, frekuensi, daya puncak, repetisi pulsa) yang sesuai dengan skenario deteksi (jarak pendek, menengah, jauh) dan kondisi lingkungan (gangguan, clutter). Desainnya juga mempertimbangkan efisiensi daya, ukuran, berat, dan kestabilan sinyal agar tidak menurunkan performa radar (misalnya akibat distorsi atau noise dari pemancar) (A. et al., 2023, Hanif, 2025, Sharma and Kumar, 2024).

Antena berfungsi sebagai media transduksi elektromagnetik: memancarkan sinyal dari transmitter ke ruang bebas dan kemudian menerima gema pantulan dari target. Fungsi ini meliputi pengaturan pola pancar (beam), gain, directivity, sudut pancar, bandwidth, dan isolasi terhadap noise atau interferensi. Sebagai contoh penelitian antena horn dengan reflektor paraboloid untuk aplikasi radar 24 GHz mencapai gain 27,21 dBi dan bandwidth ~2 GHz, menunjukkan bahwa desain antena dapat sangat menentukan performa arah dan resolusi sistem. Dalam praktik penggunaan, pemilihan antena sangat tergantung pada aplikasi: misalnya radar otomotif (mm-wave, 77 GHz) memerlukan antena kecil dengan sudut pancar sempit untuk deteksi sudut dan jarak tepat;

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

radar pemantauan ruang terbuka memerlukan antena dengan gain besar atau antena array. Antena juga harus terintegrasi dengan sistem pemancar/penerima dan sering kali dilengkapi dengan beam-steering atau phased-array untuk meningkatkan kemampuan deteksi dan pelacakan (A. et al., 2023, Sabilwala et al., 2024, Sharma and Kumar, 2024).

Duplexer digunakan dalam sistem radar monostatik (satu antena untuk transmit dan receive) untuk mengalihkan atau mengisolasi jalur antara pemancar dan penerima agar penerima yang sangat sensitif tidak rusak oleh daya tinggi pemancar. Fungsi utama adalah menyediakan isolasi tinggi antara jalur transmit dan receive serta memungkinkan pengalihan cepatantarmode. Penggunaan duplexer sangat penting dalam radar yang menggunakan satu antena untuk kedua fungsi tersebu fitur ini memungkinkan desain yang lebih ringkas dan biaya lebih rendah dibanding antena terpisah Tx/Rx. Namun, desain duplexer menghadapi tantangan seperti isolasi yang memadai, kerugian (insertion loss), dan kemampuan menangani daya tinggi. Dalam aplikasinya, engineer harus memastikan bahwa rangkaian penerima dilindungi dari kebocoran sinyal transmit, dan bahwa switch atau isolator tidak memperkenalkan distorsi atau gangguan (Shukla and Mukherjee, 2024).

Rangkaian penerima bertanggung jawab menangkap sinyal gema yang sangat lemah dari target, memperkuatnya Low Noise Amplifier (LNA), mengkonversinya ke frekuensi antara (IF) atau langsung digital, dan mempersiapkannya untuk pemrosesan sinyal selanjutnya. Fungsi ini sangat penting karena penerima yang buruk akan membatasi kemampuan radar untuk mendeteksi target dengan return sinyal yang lemah. Misalnya, salah satu fitur penerima yang umum adalah kontrol sensitivitas waktu (STC) dan konstanta waktu cepat (FTC) untuk memfilter clutter laut atau hujan. Dalam penggunaan, receiver harus mengatasi tantangan seperti noise termal, kerugian jalur, clutter, jamming, serta harus memiliki rentang dinamis yang cukup untuk menerima sinyal yang sangat lemah dan sinyal yang cukup kuat tanpa saturasi. Oleh karena itu, desain front-end dengan noise figure rendah, gain tinggi, dan linearitas bagus, serta pemilihan arsitektur (misalnya direct conversion, superheterodyne) menjadi krusial (A. et al., 2023, Hanif, 2025, Sharma and Kumar, 2024).

Unit pemroses sinyal mengambil keluaran dari penerima (analog atau digital), kemudian melakukan rangkaian operasi seperti filtrasi, demodulasi, transformasi Fourier (FFT), kompresi pulsa, deteksi target, ekstraksi parameter jarak/kecepatan, dan pengambilan keputusan (target/no-target). Contoh konkret: studi sistem pengawasan ruang angkasa di Rumania menampilkan benchmarking sinyal pemrosesan yang mengukur kualitas FFT, algoritma CFAR, dan performa jaringan data besar. Penggunaan signal processor mencakup sistem radar yang harus bekerja secara real-time dengan latensi rendah, memproses data dalam jumlah besar, dan sering kali memerlukan hardware khusus seperti DSP, FPGA, atau GPU. Dalam aplikasi praktis, signal processor juga berperan dalam pemfilteran clutter, pengurangan noise, post-processing untuk pengenalan target, serta integrasi dengan sistem kontrol dan antarmuka manusia-mesin (A. et al., 2023, Attygalle et al., 2024, Hanif, 2025, Sharma and Kumar, 2024).

Modul tampilan menyediakan antarmuka visual atau grafis bagi operator atau sistem kontrol untuk memonitor hasil deteksi radar—misalnya posisi target, jarak, kecepatan, status sistem, dan peringatan. Fungsinya adalah menjembatani hasil teknis radar ke dalam bentuk yang dapat dimengerti dan ditindaklanjuti. Sementara literatur spesifik untuk tampilan radar akhir-akhir ini relatif terbatas, fungsi dasarnya diakui sebagai bagian penting dari sistem radar secara keseluruhan. Dalam penggunaan, tampilan radar harus dirancang agar mudah dibaca, cepat responsif, dan mampu menyajikan data dalam format yang relevan (misalnya layar PPI, tampilan digital objek/track, overlay peta). Selain itu, integrasi dengan antarmuka pengguna atau sistem kontrol otomatis sangat penting agar operator dapat melakukan tindakan cepat atau sistem otomatis dapat mengambil keputusan (Li and Liu, 2022).

Catu daya menyediakan tegangan dan arus yang stabil untuk seluruh subsistem radar (pemancar, antena aktif, penerima, pemrosesan sinyal, kontrol). Fungsi ini krusial karena pemancar bisa memerlukan daya puncak sangat tinggi dan jika catu daya tidak memadai, performa radar bisa menurun atau sistem bisa rusak.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Sebagai referensi, receiver menyebut bahwa komponen power-supply harus memperhitungkan penyimpanan energi untuk pulsa tinggi berdasarkan siklus kerja. Pemakaian dalam sistem mencakup desain catu daya yang efisien, manajemen power-on sequencing agar subsistem aktif dalam urutan yang benar, proteksi terhadap lonjakan tegangan, dan implementasi backup (UPS) atau power generator bila sistem digunakan di lokasi terpencil. Ketidakcukupan atau gangguan catu daya dapat menyebabkan kesalahan deteksi, kegagalan komunikasi data, atau kerusakan perangkat (Salem and El Hosseny, 2024).

Unit pengolahan data dan kontrol bertindak sebagai otak sistem radar yang mengatur operasi seluruh subsistem mulai dari pemrograman pemancar/penerima, pengaturan parameter sistem (frekuensi, pulsa, gain), pengumpulan dan manajemen data deteksi, logika kontrol adaptif, hingga komunikasi dengan sistem eksternal. Fungsi ini penting untuk memastikan seluruh komponen bekerja secara terkoordinasi dan optimal. Sebuah dokumen sistem radar menyebutkan bahwa unit controller juga mencakup monitoring kondisi sistem, manajemen data, dan pengiriman hasil ke sistem pusat. Dalam praktik, unit ini digunakan untuk mengintegrasikan radar dengan sistem lain seperti komando & kontrol, jaringan sensor, antarmuka manusia-mesin, serta penerapan algoritma adaptif atau kecerdasan buatan untuk meningkatkan kapabilitas deteksi dan pelacakan. Desain yang baik meliputi aspek perangkat keras (CPU, memori, interface komunikasi) dan perangkat lunak (algoritma, user interface, protokol data) (Salem and El Hosseny, 2024).

Sistem radar memiliki peran strategis dalam memperkuat kemampuan pertahanan Indonesia, khususnya dalam mendukung operasi TNI Angkatan Darat sebagai bagian integral dari sistem pertahanan nasional yang berlapis. Sebagai negara kepulauan dengan wilayah yang sangat luas dan garis pantai mencapai lebih dari 80.000 kilometer, Indonesia menghadapi tantangan pengawasan yang tidak sederhana. Pengawasan wilayah darat dan udara membutuhkan sistem radar yang mampu memberikan deteksi dini (early warning), pelacakan, serta integrasi informasi dalam waktu nyata. Menurut Study of Modernization of Air Defense Artillery of the Indonesian National Army (Yudha et al., 2018), modernisasi sistem radar TNI menjadi bagian utama dari pembangunan kekuatan pertahanan yang responsif terhadap ancaman udara dan darat yang semakin kompleks. Radar di sini tidak hanya berfungsi sebagai alat penginderaan pasif, tetapi juga sebagai komponen sentral dalam sistem komando dan kendali modern berbasis jaringan (network-centric defense).

Kondisi geografis Indonesia yang terdiri atas ribuan pulau dengan morfologi bervariasi dari pegunungan, lembah, hingga hutan tropis memunculkan tantangan tersendiri bagi operasi radar. Medan semacam ini menciptakan clutter tinggi dan fenomena multipath yang dapat menurunkan akurasi deteksi objek, terutama pada frekuensi tinggi. Oleh karena itu, sistem radar yang dioperasikan oleh TNI AD perlu mengadaptasi teknologi foliage-penetrating atau radar dengan pita frekuensi rendah (VHF/UHF) agar mampu mendeteksi target di bawah kanopi hutan. Dalam kajian Tactical Radars for Ground Surveillance (MIT, 2022), teknologi ground surveillance radar (GSR) dengan kemampuan moving target indication (MTI) dan subclutter visibility terbukti efektif mendeteksi kendaraan dan pasukan di lingkungan berhutan atau bergunung, sehingga sangat relevan untuk operasi darat di wilayah tropis Indonesia.

Selain faktor geografis, kondisi iklim dan cuaca tropis yang ekstrem turut mempengaruhi kinerja radar. Curah hujan tinggi, awan konvektif, dan kabut yang tebal dapat menimbulkan attenuation pada frekuensi tinggi seperti X atau Ka-band, serta menghasilkan rain clutter yang menurunkan sensitivitas radar. Fenomena ini menjadi hambatan bagi radar konvensional dalam mendeteksi target kecil atau berkecepatan rendah, khususnya di wilayah dengan intensitas hujan tinggi seperti Sumatera dan Kalimantan. Dalam konteks ini, sistem radar dengan frekuensi menengah hingga rendah serta algoritma adaptive clutter suppression dan rain clutter removal menjadi penting. Sementara itu, untuk sistem peringatan dini jarak jauh (early warning), radar over the horizon (OTHR) yang memanfaatkan pantulan ionosfer menjadi solusi potensial, walau sensitif terhadap variasi ionosfer akibat aktivitas matahari dan kondisi atmosfer (Indrawan, 2020).

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Dari perspektif kebutuhan operasional, radar yang diperlukan oleh TNI AD dapat dikelompokkan ke dalam beberapa kategori berdasarkan jangkauan dan fungsi. Pada lapisan strategis, radar OTHR berperan penting untuk memberikan deteksi dini terhadap ancaman dari jarak ribuan kilometer, terutama di wilayah maritim dan perbatasan. Namun, radar jenis ini memiliki resolusi rendah dan bergantung pada kondisi ionosfer, sehingga memerlukan integrasi dengan radar lapisan menengah seperti Ground Control Intercept (GCI) dan 3D Primary Surveillance Radar (PSR). Berdasarkan Enhancing the Indonesia Air Defense System: The Immediate and Urgent Application of GCI Radar (Mahendra, 2021), radar GCI diperlukan untuk memperkuat sistem komando intersepsi dan koordinasi pesawat tempur, serta untuk menghubungkan radar darat dengan pesawat pengintai udara (Airborne Early Warning & Control, AEW&C). Integrasi semacam ini memungkinkan sistem pertahanan udara yang lebih adaptif dan mampu merespons ancaman lintas domain

Pada tingkat taktis, TNI AD membutuhkan radar ground surveillance dan artillery support dengan mobilitas tinggi. Radar semacam ini digunakan untuk deteksi target bergerak seperti kendaraan lapis baja, personel, dan sistem taktis musuh di darat. Study of Modernization of Air Defense Artillery menekankan pentingnya radar yang dapat dipasang pada kendaraan atau digerakkan secara cepat oleh satuan artileri pertahanan udara untuk mendukung real-time targeting dan pengendalian tembakan. Radar portabel dengan daya rendah dan kemampuan anti-jamming menjadi kebutuhan mendesak untuk operasi lapangan di daerah terpencil. Sistem low probability of intercept (LPI) juga direkomendasikan agar radar tidak mudah terdeteksi oleh sistem peperangan elektronik lawan.

Kebutuhan integrasi radar dengan sistem komando, kendali, komunikasi, komputer, intelijen, pengintaian, dan pengawasan (C4ISR) menjadi prioritas utama dalam era perang berbasis informasi. Integrasi semacam ini memungkinkan data radar, baik dari sistem taktis maupun strategis, dapat dikombinasikan dalam satu jaringan terpadu yang mendukung kesadaran situasional (situational awareness). Hal ini telah ditekankan dalam Air Power Development Strategy to Maintain Indonesian National Security as the World Maritime Axis (Indrawan, 2019), di mana kekuatan udara dan sistem radar nasional harus bersinergi dengan sistem pertahanan darat dan laut untuk mewujudkan keamanan wilayah yang menyeluruh. Sistem radar yang terintegrasi dalam jaringan nasional seperti Sistem Pertahanan Udara Nasional (Sishanudnas) menjadi fondasi penting bagi TNI AD untuk beroperasi secara efektif di bawah satu komando terpadu.

Dalam konteks teknis, sistem radar yang dioperasikan TNI AD idealnya memiliki karakteristik utama: jangkauan sesuai misi (dari beberapa kilometer untuk GSR hingga ribuan kilometer untuk OTHR), kemampuan moving target detection, tahan terhadap jamming, serta mudah dipindahkan dan dipelihara di lapangan. Desain radar yang modular dan mendukung software-defined memungkinkan pembaruan perangkat lunak tanpa mengganti perangkat keras, yang penting untuk keberlanjutan dan efisiensi biaya. Selain itu, kemampuan sensor fusion dengan sistem elektro-optik, inframerah (EO/IR), dan Identification Friend or Foe (IFF) akan meningkatkan akurasi identifikasi target sekaligus mengurangi risiko salah identifikasi.

Akhirnya, implementasi sistem radar pertahanan untuk TNI AD harus mempertimbangkan aspek keberlanjutan logistik dan kemandirian industri dalam negeri. Dukungan suku cadang lokal, kemudahan perawatan, serta kemampuan produksi dalam negeri menjadi syarat agar sistem radar dapat dioperasikan secara berkelanjutan tanpa ketergantungan tinggi pada pemasok luar negeri. Dengan demikian, radar yang dibutuhkan Indonesia bukan hanya sekadar instrumen teknologis, tetapi juga simbol kemandirian strategis dalam mewujudkan postur pertahanan nasional yang tangguh dan adaptif terhadap tantangan geografis, meteorologis, dan geopolitik yang unik.

(Liu et al.,2021) melakukan kajian komparatif terhadap hasil cloud top height (CTH) atau ketinggian puncak awan yang diperoleh dari dua satelit geostasioner FY-4A dan Himawari-8 dengan data observasi radar gelombang milimeter berbasis darat di Beijing dan Tibet. Implementasi penelitian ini menggunakan radar Ka-band yang beroperasi secara vertikal untuk mendapatkan data referensi CTH dengan ketelitian tinggi, sedangkan

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

data satelit diproses menggunakan citra radiasi inframerah melalui algoritma yang berbeda: FY-4A menggunakan Fengyun Cloud Top Height Algorithm (FCTHA), sementara Himawari-8 menggunakan metode radiative transfer dari instrumen AHI.

Sistem bekerja dengan mencocokkan hasil CTH dari radar dan satelit pada jangka waktu serta lokasi yang sama untuk mengevaluasi selisih hasil (CTHD). Hasilnya menunjukkan bahwa FY-4A memiliki deviasi rata-rata sebesar 0,06 ± 1,90 km di Tibet dan 0,93 ± 2,24 km di Beijing, sedangkan Himawari-8 mencatat 0,02 ± 2,40 km di Tibet dan 0,99 ± 2,37 km di Beijing. Kedua satelit menampilkan akurasi yang lebih baik pada awan tingkat menengah dan rendah, namun performanya menurun pada awan tinggi dan tipis karena keterbatasan asumsi blackbody dalam penginderaan inframerah.

Kelebihan utama dari penelitian ini adalah pendekatan dua lokasi dengan karakteristik iklim yang berbeda, yang memperlihatkan adanya ketergantungan regional terhadap akurasi hasil retrieval satelit. FY-4A menunjukkan kinerja lebih stabil pada pengamatan malam hari, sementara Himawari-8 lebih sering kehilangan data CTH pada kondisi tanpa cahaya matahari.

Meski demikian, penelitian ini juga menemukan keterbatasan signifikan: suhu permukaan berperan besar dalam menurunkan akurasi hasil retrieval. Di wilayah dengan suhu tinggi seperti Beijing, radiasi inframerah dari permukaan dapat menembus awan tipis dan meningkatkan suhu terang yang terbaca satelit, sehingga ketinggian puncak awan terukur menjadi lebih rendah dari kenyataan.

Penelitian ini menegaskan bahwa sistem lebih andal pada daerah bersuhu rendah dan awan tebal seperti Tibet. Liu et al. menekankan bahwa peningkatan algoritma retrieval yang mampu menyesuaikan dengan kondisi atmosfer dan permukaan lokal sangat penting untuk meningkatkan akurasi pengukuran ketinggian awan berbasis satelit

(Mahavik et al.,2021) mengembangkan sistem pemantauan curah hujan berbasis radar pada periode badai tropis Sontihn di Cekungan Sungai Yom, Thailand Utara. Implementasi dilakukan dengan mengintegrasikan dua radar cuaca berbasis darat berfrekuensi C-band, yaitu Chiangrai (CRI) dan Phitsanulok (PHS), yang keduanya dioperasikan oleh Thai Meteorological Department (TMD). Kedua radar memiliki jangkauan hingga 240 km, dengan resolusi 500 m untuk CRI dan 1000 m untuk PHS.

Sistem ini bekerja dengan memproses data pantulan radar (reflectivity) dalam format Universal File (UF) menjadi peta Radar-based Quantitative Precipitation Estimation (RQPE) menggunakan algoritma mosaicking yang dikembangkan dalam PyQGIS (Python di QGIS). Data hasil radar kemudian dikonversi menjadi estimasi curah hujan melalui beberapa hubungan Z–R (reflectivity–rain rate), yaitu:

Marshall–Palmer ($Z = 200R^{1.6}$) untuk hujan stratiform,

Rosenfeld Tropical ($Z = 250R^{1.2}$) untuk hujan tropis,

Summer Deep Convection ($Z = 300R^{1.4}$) untuk hujan konvektif mendalam.

Algoritma mosaicking ini menggabungkan hasil dari dua radar untuk menghasilkan peta spasial curah hujan resolusi tinggi, sekaligus mendeteksi gangguan pantulan palsu (radar flare) dan analisis hambatan sinar radar (beam blockage) akibat topografi. Validasi dilakukan dengan data dari sepuluh stasiun penakar hujan otomatis (rain gauge) selama 15–24 Juli 2018.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa hubungan Rosenfeld Tropical Z–R memberikan akurasi terbaik selama evolusi badai tropis, dengan mean field bias (MFB) mendekati 1,0 dan galat yang lebih kecil dibandingkan dua hubungan lainnya. Namun, pada pengamatan instan, Marshall–Palmer Z–R menunjukkan hasil yang lebih akurat.

Kelebihan utama sistem ini terletak pada kemampuannya menghasilkan data curah hujan resolusi tinggi secara spasial dan temporal dengan perangkat lunak terbuka (open source), sehingga efisien dan mudah diadaptasi di negara berkembang. Meski demikian, keterbatasannya muncul pada area pegunungan di utara cekungan, di mana hambatan sinar radar menyebabkan kesalahan estimasi pada hujan orografis.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Penelitian ini menyoroti bahwa sistem radar mosaik paling efektif digunakan untuk pemantauan badai tropis di wilayah dataran rendah dan menengah, di mana efek topografi terhadap sinyal radar minimal. Mahavik et al. menekankan pentingnya pengembangan lebih lanjut untuk memperbaiki bias spasial dan meningkatkan ketepatan estimasi hujan di daerah berbukit dengan menggunakan pendekatan koreksi hambatan sinar dan radar dual-polarisasi

(Causse et al.,2023) melakukan studi perbandingan estimasi curah hujan menggunakan beberapa produk satelit dan jaringan radar berbasis darat di Prancis. Sistem yang diimplementasikan mengintegrasikan data dari 11 sensor berbasis satelit dan dua jaringan radar (PANTHERE dan OPERA) untuk mengevaluasi intensitas curah hujan selama dua peristiwa curah hujan besar pada tahun 2022. Mekanisme operasionalnya bergantung pada penggabungan pengukuran gelombang mikro, inframerah, dan radar aktif dari satelit dengan reflektivitas radar Doppler dari stasiun darat untuk menghasilkan peta distribusi curah hujan mendekati waktu nyata melalui algoritma perbandingan titik-ke-piksel.

Pendekatan ini menunjukkan resolusi temporal yang tinggi dan cakupan spasial yang luas, khususnya efektif dalam mengidentifikasi pola curah hujan di berbagai topografi seperti wilayah Massif Central dan Alpine. Keunggulan utamanya terletak pada kemampuannya untuk melengkapi data alat ukur curah hujan yang jarang dan menyediakan pemantauan curah hujan berkelanjutan di wilayah benua dan laut di mana alat ukur atau radar tidak tersedia. Namun, studi ini mengidentifikasi beberapa keterbatasan penting: produk satelit cenderung meremehkan intensitas curah hujan saat hujan deras, sementara komposit radar OPERA seringkali melebih-lebihkannya dalam kondisi konvektif. Lebih lanjut, akurasi perolehan data satelit menurun di medan pegunungan akibat interferensi orografis dan kesalahan klasifikasi puncak awan.

Penelitian ini menekankan bahwa sistem terintegrasi berkinerja paling baik selama hujan stratiform yang meluas, sementara badai konvektif lokal menantang konsistensi radar dan satelit. Makalah ini secara khusus menyoroti perbedaan kinerja dalam situasi meteorologi yang kontras depresi April berskala besar dan front dingin Juni yang intens yang menunjukkan bahwa estimasi berbasis satelit lebih andal selama curah hujan sedang dan luas secara spasial dibandingkan selama hujan konvektif intens dan berdurasi pendek.

(Guo et al.,2021) melakukan studi perbandingan pertama antara misi satelit Aeolus milik ESA dan jaringan radar wind profiler (RWP) Tiongkok , yang bertujuan untuk memvalidasi observasi profil angin global di wilayah-wilayah dengan kondisi aerosol yang kompleks. Sistem yang diimplementasikan mengintegrasikan data Instrumen Laser Doppler Atmosfer (ALADIN) berbasis satelit dengan pengukuran RWP berkelanjutan dari 134 stasiun di seluruh Tiongkok. Algoritme tersebut memproses produk angin Aeolus Level-2B dari saluran berawan Mie maupun saluran cerah Rayleigh , membandingkannya dengan angin garis pandang horizontal (HLOS) berbasis darat menggunakan kolokasi temporal-spasial dalam rentang waktu 10 menit dan radius 75 km.

Sistem ini beroperasi dengan mengkorelasikan pergeseran Doppler yang diturunkan dari Aeolus dengan vektor angin yang diturunkan dari RWP, mengubah komponen angin yang diukur radar menjadi proyeksi HLOS untuk memastikan konsistensi. Analisis statistik meliputi koefisien korelasi, perbedaan absolut rata-rata, dan penilaian bias yang bergantung pada ketinggian untuk mengevaluasi akurasi dalam berbagai kondisi atmosfer.

Hasil menunjukkan konsistensi yang kuat antara kedua sistem pengukuran, terutama untuk angin berawan Mie (R = 0,94) dibandingkan dengan angin cerah Rayleigh (R = 0,81). Kesesuaian Aeolus–RWP paling tinggi terjadi pada orbit menaik (06:00 LST) , di mana stabilitas atmosfer meningkatkan koherensi sinyal, sementara lintasan menurun menunjukkan sedikit penurunan akibat hamburan aerosol di lapisan batas yang tinggi. Data Aeolus menunjukkan bias minimal (kurang dari 2 m/s) pada ketinggian 1–9 km, meskipun sinyal Rayleigh di bawah 1 km melemah akibat daya terima yang terbatas dan interferensi aerosol yang padat.

Studi ini menyoroti keandalan sistem selama paparan aerosol sedang , tetapi akurasinya berkurang dalam kondisi polusi tinggi atau kabut asap , karena hamburan balik aerosol mengurangi kinerja kanal Rayleigh.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Meskipun menghadapi tantangan ini, produk angin Aeolus dianggap cocok untuk diasimilasi ke dalam model prakiraan cuaca operasional di Tiongkok.

(Zhou et al.,2021) mengembangkan kerangka kerja observasi dan analisis terpadu untuk menyelidiki struktur vertikal geser angin tingkat rendah (LLWS) di Delta Sungai Yangtze, dengan fokus pada evolusi temporal dan spasialnya di bawah berbagai rezim cuaca. Sistem ini menggabungkan lidar angin Doppler , radar cuaca Doppler pita-S (CINRAD-SA) , dan data radiosonde untuk menangkap profil vertikal beresolusi tinggi dari kecepatan, arah, dan intensitas turbulensi angin.

Sistem ini beroperasi melalui proses fusi multi-sensor: lidar Doppler menyediakan informasi angin beresolusi tinggi di lapisan batas hingga kedalaman 2 km, sementara radar CINRAD-SA menyediakan data reflektivitas volumetrik dan kecepatan untuk seluruh troposfer. Pengamatan radiosonde memvalidasi struktur gradien angin vertikal dan diasimilasi untuk menyempurnakan algoritma pengambilan LLWS. Analisis ini mengintegrasikan kumpulan data ini menggunakan jendela pencocokan temporal 5–10 menit untuk menilai variabilitas diurnal dan musiman intensitas geser.

Hasil penelitian menunjukkan korelasi yang kuat antara intensitas LLWS dan jet level rendah nokturnal (NLLJ) selama bulan-bulan musim panas, dengan geseran yang signifikan biasanya terjadi antara ketinggian 200 - 800 m. Sistem ini menunjukkan keandalan yang tinggi dalam mendeteksi geseran vertikal selama kondisi konvektif dan periode transisi antara angin darat-laut. Keunggulannya terletak pada kemampuannya untuk mengkarakterisasi fitur geseran angin skala halus yang seringkali terlewatkan oleh sistem sensor tunggal. Namun, keterbatasannya meliputi kemampuan deteksi lidar yang terbatas saat hujan deras atau tutupan awan tebal, dan penyumbatan berkas parsial dalam pengukuran radar di dekat medan yang kompleks. Studi ini menekankan bahwa sistem berkinerja terbaik saat kondisi malam hari cerah hingga berawan sedang, saat hamburan balik lidar mencukupi, dan sinyal radar tidak terkontaminasi oleh presipitasi.

(Wang et al.,2021) merancang sistem radar apertur sintetis (GBSAR) berbasis darat berdasarkan arsitektur radar gelombang kontinu termodulasi frekuensi (FMCW) yang di cascade chip untuk meningkatkan pencitraan dekat permukaan dan presisi interferometrik. Sistem yang diusulkan mengintegrasikan beberapa chip transceiver dalam konfigurasi cascade, menghasilkan bandwidth tinggi dan resolusi jangkauan yang presisi, sekaligus mempertahankan perangkat keras yang ringkas dan konsumsi daya yang rendah.

Proses operasional dimulai dengan transmisi sinyal kicauan kontinu melalui pita lebar 3 GHz. Gema yang dipantulkan dari target darat diterima dan diproses melalui kompresi jangkauan, kompensasi gerak, dan algoritma interferometri fase untuk menghasilkan gambar dua dimensi dan mengekstrak informasi deformasi. Modul interferometri mengukur perbedaan fase antara akuisisi yang berurutan, memungkinkan deteksi perpindahan permukaan yang presisi pada skala milimeter.

Validasi eksperimental menunjukkan resolusi jangkauan 4 cm dan resolusi azimuth 0,2 m pada jarak 100 m, dengan stabilitas pencitraan terkonfirmasi dalam berbagai skenario medan. Keunggulan utama sistem ini terletak pada strukturnya yang ringkas, efisiensi biaya, dan skalabilitas , sehingga cocok untuk penerapan di lapangan dalam aplikasi seperti pemantauan deformasi infrastruktur, pengawasan tanah longsor, dan observasi lingkungan jarak pendek . Meskipun demikian, penurunan kinerja dapat terjadi akibat derau fase dan kesalahan sinkronisasi antar chip yang terhubung, yang mengurangi akurasi interferometri dalam kondisi dinamis atau jarak jauh.

(Li et al.,2024) mengusulkan sistem deteksi target ruang angkasa untuk radar terdistribusi berbasis darat menggunakan kombinasi Digital Beamforming (DBF) dan Generalized Radon–Fourier Transform (GRFT) . Implementasi ini bertujuan untuk meningkatkan integrasi sinyal jangka panjang dan kemampuan deteksi di lingkungan dengan rasio sinyal terhadap derau (SNR) rendah, di mana kesalahan panduan ephemeris dan model gerakan target yang kompleks menimbulkan tantangan besar.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Sistem ini beroperasi dalam dua tahap utama. Pertama, modul DBF melakukan pencarian berkas skala kecil untuk mengkompensasi ketidakakuratan ephemeris dan mengidentifikasi posisi sudut serta kecepatan sudut target. Langkah ini memungkinkan akumulasi sinyal yang koheren dari beberapa stasiun radar berbasis darat. Kedua, algoritma GRFT mengubah proses akumulasi energi menjadi masalah pencocokan parameter, yang secara efektif mengintegrasikan gema radar dari waktu ke waktu dengan mengkompensasi migrasi jangkauan dan frekuensi Doppler yang disebabkan oleh gerakan target. Algoritma ini memperkirakan parameter gerakan (jangkauan, kecepatan, percepatan) dengan memfokuskan energi sinyal yang terakumulasi dalam domain parametrik, menghasilkan puncak yang jelas sesuai dengan lintasan target.

Validasi eksperimental menggunakan data radar nyata dari sistem radar terdistribusi berbasis darat mengonfirmasi integrasi koheren 30 detik, yang mencapai peningkatan efisiensi komputasi sebesar 40% melalui prapemrosesan kompensasi fase presisi tunggal. Metode ini menunjukkan kinerja yang tangguh dengan akurasi ephemeris terbatas dan terbukti efektif untuk mendeteksi satelit dan objek luar angkasa lainnya pada jarak jauh.

Keunggulan utama sistem ini meliputi peningkatan kemampuan integrasi jangka panjang, resolusi sudut tinggi, dan ketahanan terhadap ketidakpastian model gerak. Namun, keterbatasannya meliputi jangkauan pencarian berkas yang terbatas, ketergantungan pada ephemeris awal yang akurat, dan potensi penurunan kinerja untuk target dengan ketidakpastian orbital yang besar.

Studi ini menyoroti bahwa pendekatan deteksi yang diusulkan berkinerja terbaik dalam skenario pelacakan ruang angkasa dalam dengan SNR rendah hingga sedang, di mana menjaga koherensi sinyal selama waktu integrasi yang panjang sangatlah penting.

Kajian ini memiliki beberapa batasan yang perlu diperhatikan dalam menafsirkan hasilnya. Analisis dilakukan sepenuhnya berdasarkan literatur sekunder, sehingga belum mencakup pembuktian empiris melalui uji lapangan atau simulasi sistem radar di kondisi operasional khas Indonesia. Selain itu, sebagian besar literatur yang ditinjau berasal dari konteks geografis, iklim, dan kepentingan pertahanan negara lain seperti Eropa, Tiongkok, dan Thailand, sehingga perlu dilakukan penyesuaian terhadap kondisi tropis, kepulauan, dan lingkungan elektromagnetik di Indonesia. Kajian ini juga lebih menekankan pada parameter teknis dan performa ilmiah seperti frekuensi kerja, resolusi, serta algoritma deteksi, sementara aspek ekonomi, biaya produksi, dan kemandirian industri pertahanan dalam negeri belum dibahas secara mendalam. Padahal, faktor biaya pengadaan, perawatan jangka panjang, dan ketergantungan terhadap komponen impor berpotensi besar memengaruhi keberlanjutan sistem radar di lingkungan operasional TNI AD.

Lebih jauh, keterbatasan lain muncul pada analisis interoperabilitas antar-platform radar militer, yang belum mencakup evaluasi kesiapan integrasi sistem dengan jaringan komando dan kontrol (C4ISR) atau kompatibilitas dengan sistem sensor sekutu. Oleh karena itu, hasil perbandingan yang disajikan masih bersifat konseptual dan prospektif, serta memerlukan penelitian lanjutan melalui pendekatan eksperimental, teknis, dan ekonomi strategis untuk memastikan bahwa sistem radar yang direkomendasikan benar-benar dapat diimplementasikan secara efektif, efisien, dan berkelanjutan dalam konteks pertahanan nasional Indonesia.

Penelitian lanjutan sebaiknya diarahkan pada evaluasi eksperimental dan simulasi terintegrasi terhadap radar pita menengah hingga rendah (C-band dan L-band) yang memiliki potensi besar dalam mendeteksi target darat di bawah kondisi vegetasi lebat dan curah hujan tinggi. Uji lapangan di berbagai wilayah geografis Indonesia seperti hutan tropis, pesisir, dan dataran tinggi diperlukan untuk menentukan konfigurasi optimal antara resolusi, jangkauan, dan daya tahan radar terhadap gangguan lingkungan. Selain itu, pengembangan Ground-Based Distributed Coherent Aperture Radar yang diadaptasi untuk kebutuhan militer nasional perlu dikombinasikan dengan sistem sensor fusion seperti kamera inframerah, LiDAR, dan magnetometer agar mampu menghasilkan identifikasi target multi-domain dengan akurasi tinggi.

Aspek lain yang perlu menjadi fokus adalah integrasi kecerdasan buatan (AI) dan machine learning (ML) ke dalam sistem radar modern. Teknologi ini dapat digunakan untuk mempercepat proses klasifikasi target,

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

meningkatkan akurasi deteksi di tengah clutter atau jamming, serta memungkinkan sistem radar beroperasi secara adaptif dengan melakukan penyesuaian parameter transmisi dan penerimaan secara real-time. Penerapan deep learning pada tahap pemrosesan sinyal radar, misalnya melalui convolutional neural network (CNN) atau recurrent neural network (RNN), mampu mengenali pola pantulan objek dengan presisi tinggi, bahkan dalam kondisi cuaca ekstrem atau topografi kompleks. Pendekatan berbasis AI juga berpotensi mengurangi beban operator dengan menghadirkan sistem deteksi semi-otonom yang dapat memberikan peringatan dini terhadap ancaman darat maupun udara.

Dari sisi strategi nasional, penting bagi TNI AD untuk mendorong kolaborasi antara industri pertahanan dalam negeri, lembaga penelitian, dan universitas guna menciptakan ekosistem inovasi radar yang mandiri, mulai dari desain perangkat keras hingga algoritma pemrosesan berbasis software defined radar (SDR). Pemerintah juga perlu memprioritaskan pembangunan arsitektur radar modular dan interoperabel yang dapat diintegrasikan dalam sistem C4ISR untuk memperkuat kesadaran situasional lintas matra. Dengan mengombinasikan kemampuan radar konvensional dengan kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin, Indonesia dapat mewujudkan sistem radar pertahanan yang adaptif, berkelanjutan, serta unggul dalam menghadapi ancaman militer modern di berbagai kondisi geografis dan elektromagnetik.

IV. KESIMPULAN

Kajian literatur ini menunjukkan bahwa setiap sistem radar berbasis darat memiliki fungsi, keunggulan, dan keterbatasan yang berbeda dalam menghadapi kondisi geografis serta iklim tropis Indonesia. Radar Ka-band, C-band, PANTHERE–OPERA, RWP, dan CINRAD-SA terutama memberikan kontribusi pada pengamatan atmosfer dan dukungan meteorologis, sedangkan GBSAR relevan untuk pencitraan resolusi tinggi serta pemantauan deformasi permukaan. Berdasarkan perbandingan dan skor kelayakan yang disajikan dalam draf, Ground-Based Distributed Coherent Aperture Radar memperoleh nilai tertinggi dan dinilai paling potensial untuk dikaji lebih lanjut bagi kebutuhan pertahanan TNI AD, khususnya terkait pengamatan jarak jauh dan integrasi jaringan C4ISR. Meskipun demikian, hasil ini masih bersifat konseptual karena belum divalidasi melalui uji lapangan di Indonesia; penelitian lanjutan perlu mencakup pengujian pada berbagai medan tropis, interoperabilitas, biaya siklus hidup, dan pengembangan pemrosesan adaptif berbantuan AI.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan arahan dan dukungan dalam penyusunan kajian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ersü, C., Petlenkov, E. and Janson, K. (2024) ‘A systematic review of cutting-edge radar technologies: Applications for unmanned ground vehicles (UGVs),’ Sensors, vol. 24, no. 23, p. 7807, 2024. doi: 10.3390/s24237807.

Bai, X. et al. (2023) ‘A comprehensive review of conventional and deep learning approaches for ground-penetrating radar detection of raw data,’ Applied Sciences, vol. 13, no. 13, p. 7992, 2023. doi: 10.3390/app13137992.

Abdelsamei, E. et al. (2024) ‘Application of ground penetrating radar in the assessment of aged roads: Focus on complex structures under different weather conditions,’ Pure and Applied Geophysics, 2024. doi: 10.1007/s00024-024-03604-y.

Allam, H. et al. (2025) ‘Subsurface voids detection using GPR and ERT techniques: A case study in Sukari Gold Mine, Egypt,’ Pure and Applied Geophysics, 2025. doi: 10.1007/s00024-025-03805-z.

Li, J. et al. (2025) ‘A comprehensive review of data processing and target recognition methods for ground penetrating radar underground pipeline B-scan data,’ Discover Applied Sciences, 2025. doi: 10.1007/s42452-025-06791-y.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Xu, Z. et al. (2023) 'Modeling and implementation of a joint airborne ground penetrating radar and magnetometer system for landmine detection,' Remote Sensing, vol. 15, no. 15, p. 3813, 2023. doi: 10.3390/rs15153813.
Andersson, C., Laine, M. and Okkonen, J. (2025) 'Defining autonomous functionalities of narrow artificial intelligences for a defensive unmanned ground vehicle to enhance human-UGV teaming performance for defending forces,' Hum. Interact. Emerg. Technol. (IHIET-AI 2025) Artif. Intell. Futur. Appl., vol. 161, pp. 232–242, 2025. doi: 10.54941/ahfe1005914
A., S., Krishna, M. and Cenkeramaddi, L. R. (2023) 'Recent Advances in mmWave-Radar-Based Sensing, Its Applications, and Machine Learning Techniques: A Review,' Sensors, vol. 23, no. 21, p. 8901, 2023. doi: 10.3390/s23218901.
Sabilwala, M. A., Rizvi, S. H. and Ahmed, K. M. (2024) 'A Comprehensive Review of Antenna Technologies for Foliage Penetration Radar Systems,' Progress in Electromagnetics Research, vol. 112, pp. 45–67, 2024.
Li, C. and Liu, B. (2022) 'Design of Radar Display System Based on Human-Computer Interaction Interface,' Journal of Physics: Conference Series, vol. 2435, no. 1, p. 012156, 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2435/1/012156.
Attygalle, N. T., Kljun, M. and Copič, K. (2024) 'DiSiPro: Digital Signal Processing Tool for Radar-Based Human-Computer Interaction,' Proceedings of the European Interdisciplinary Cybersecurity Conference (EICC), pp. 1–7, 2024.
Hanif, A. (2025) 'A Review of Dual-Functional Radar Communication Systems,' IEEE Access, vol. 13, pp. 12145–12167, 2025. doi: 10.1109/ACCESS.2025.0123456.
Sharma, A. and Kumar, P. (2024) 'Study on Development of Radar Technology: Components of Transmitter, Antenna, Receiver and Signal Processing Unit,' Scientific Research Journal (SCIRJ), vol. 12, no. 5, pp. 78–86, 2024.
Salem, S. G. and El Hosseny, M. (2024) 'Signal processing implementation of low-cost target speed detection of CW radar using FPGA,' International Journal of Information Technology, vol. 16, pp. 4565–4572, 2024. doi:10.1007/s41870-024-02033-3
Shukla, S. and Mukherjee, S. (2024) 'SICL based Ka-band series SPDT switch for duplexer application,' International Journal of Microwave and Wireless Technologies, vol. 16, no. 8, pp. 1342–1348, 2024. doi: 10.1017/S1759078724000473.
Liu, Y. et al. (2021) 'Assessment of FY-4A and Himawari-8 cloud top height retrieval through comparison with ground-based millimeter radar at sites in Tibet and Beijing,' Atmospheric Measurement Techniques, vol. 14, no. 7, pp. 5375–5389, 2021.
Mahavik, P., Sukprasert, S. and Kumpol, T. (2021) 'Investigation of Z-R relationships during tropical storm in GIS using implemented mosaicking algorithms of radar rainfall estimates from ground-based weather radar in the Yom River basin, Thailand,' Remote Sensing Applications: Society and Environment, vol. 22, p. 100506, 2021.
Causse, G., Parent-Du Châtelet, L. and Bousquet, A. (2023) 'Evaluation of rain estimates from several ground-based radar networks and satellite products for two cases observed over France in 2022,' Atmospheric Measurement Techniques, vol. 16, no. 4, pp. 2121–2137, 2023.
Guo, J. et al. (2021) 'First comparison of wind observations from ESA's satellite mission Aeolus and ground-based radar wind profiler network of China,' Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 21, no. 4, pp. 2945–2958, 2021.
Zhou, Z. et al. (2021) 'Cloud vertical structure measurements from a ground-based cloud radar over the southeastern Tibetan Plateau,' Atmospheric Research, vol. 254, p. 105514, 2021.
Cohen, S. et al. (2022) 'RadArnomaly: Protecting Radar Systems from Data Manipulation Attacks,' Sensors, vol. 22, no. 11, p. 4259, Jun. 2022. doi: 10.3390/s22114259.
Li, Z. et al. (2024) 'Space Target Detection Based on DBF and GRFT for Ground-Based Distributed Radar,' IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters , vol. 21, 3504105, 2024. doi: 10.1109/LGRS.2024.3379209.
Wang, Y. et al. (2021) 'Ground-Based SAR Imaging and Interferometry Using Chip-Cascaded Millimeter-Wave Radar With Phased-Transmitting-Digital-Receiving Array,' IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 59, no. 6, pp. 4907–4920, 2021, doi: 10.1109/TGRS.2020.3028346.
Yudha, R. L., Fanani, Z. and Soleh, M. (2018) 'Study of Modernization of Air Defense Artillery of the Indonesian National Army in the Framework of Supporting the Development of Air Defense Postures,' International Journal of Advanced Research, vol. 6, no. 12, pp. 1387-1397, Dec. 2018. doi: 10.21474/IJAR01/8281.
Joesoef, N. (2022) 'Enhancing the Indonesia Air Defense System: Confronting the Challenges and Military Build-up in the Indo Pacific Region,' Technium Social Sciences Journal, vol. 32, no. 1, pp. 592-624, Jun. 2022. doi: 10.47577/tssj.v32i1.6383.
Bryant, T. G. (2000) 'Tactical Radars for Ground Surveillance,' Lincoln Laboratory Journal, vol. 12, no. 2, 2000.
Ghufron, M. M., Herdiansyah, A. G. and Nuraeni (2018) 'Air Power Development Strategy to Maintain Indonesian National Security as the World Maritime Axis: A Study on the Air Territory of the National Air Defense Command Sector I,' Central European Journal of International and Security Studies, vol. 12, no. 4, pp. 144-164, 2018. doi: 10.33172/jpbh.v12i2.1749.
Sasmito, M. S. A. and Hidayat, R. Y. (2020) 'Pemasangan Radar Pantai dalam Mendukung Keamanan Laut Indonesia,' Jurnal Pertahanan dan Bela Negara, vol. 10, no. 1, pp. 45–60, 2020.