



INTEGRASI AIR POWER DAN SEA POWER DALAM PERTAHANAN MARITIM INDONESIA: TRANSFORMASI RADAR TNI AU MENJADI ENABLER PENGENDALIAN LAUT

*Integrating Air Power and Sea Power in Indonesia's Maritime Defense: Transforming
Indonesian Air Force Radar into an Enabler of Sea Control*

Ronald Sitorus

Program Studi SPU, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Sentul, Indonesia

Email: ronaldsitorus84@gmail.com

Abstrak. Sebagai negara kepulauan yang ruang strategisnya didominasi laut, efektivitas pertahanan Indonesia tidak dapat dibangun melalui pemisahan konseptual antara kekuatan udara dan kekuatan laut. Artikel ini merevisi fokus integrasi radar TNI AU dengan menempatkannya dalam kerangka hubungan Air Power–Sea Power: bagaimana superioritas informasi udara, pengawasan berbasis radar, airborne intelligence, surveillance and reconnaissance (ISR), serta jejaring komando dan kendali dapat meningkatkan maritime domain awareness, perlindungan armada, sea denial, dan sea control. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif-analitis dengan studi dokumen, literatur internasional, dan reinterpretasi atas temuan awal mengenai blank spot, interoperabilitas radar sipil–militer, kompetensi operator, distribusi informasi real-time, dan keamanan siber. Kerangka analisis menggabungkan teori Air Power, Sea Power, network-centric warfare, multi-domain operations, dan sensor fusion. Hasil analisis menunjukkan bahwa kontribusi utama Air Power terhadap Sea Power bukan semata serangan udara terhadap sasaran maritim, melainkan perluasan horizon penginderaan, pemendekan kill chain, pembentukan recognized maritime picture, perlindungan kekuatan laut dari ancaman udara dan rudal, serta penyediaan targeting-quality data lintas matra. Kebaruan artikel terletak pada konsep Air-Enabled Sea Control (AESC), yaitu mekanisme di mana sensor dan C2 udara mengubah ruang laut dari wilayah yang hanya “dipatroli” menjadi battlespace yang dapat dipahami, diprioritaskan, dan direspons secara lintas domain. Bagi Indonesia, implikasinya adalah perlunya federasi sensor TNI AU–TNI AL–Bakamla–AirNav/sensor sipil, arsitektur data bersama, standar interoperabilitas, penguatan radar pesisir dan over-the-horizon, airborne early warning, UAV maritim, serta cyber-resilient command and control.

Kata kunci: Air Power; Sea Power; radar terintegrasi; maritime domain awareness; sea control; sensor fusion; pertahanan maritim; Indonesia.

Abstract. *As an archipelagic state whose strategic space is predominantly maritime, Indonesia cannot build effective defense through a conceptual separation of air and naval power. This article reframes Indonesian Air Force radar integration through the Air Power–Sea Power nexus, examining how air-derived information superiority, radar surveillance, airborne ISR, and networked command and control can strengthen maritime domain awareness, fleet protection, sea denial, and sea control. Using a qualitative descriptive-analytical design, the study combines document analysis, international literature, and a reinterpretation of the original findings concerning surveillance gaps, civil–military radar interoperability, operator competence, real-time information distribution, and cybersecurity. The analytical framework integrates Air Power, Sea Power, network-centric warfare, multi-domain operations, and sensor-fusion perspectives. The study argues that Air Power supports Sea Power not merely through maritime strike, but by extending the sensing horizon, compressing the kill chain, producing a recognized maritime picture, protecting naval forces from air and missile threats, and distributing targeting-quality data across services. Its principal theoretical contribution is the concept of Air-Enabled Sea Control (AESC): a mechanism through which airborne and ground-based air sensors and C2 transform the maritime domain from an area merely patrolled into a battlespace that can be understood, prioritized, and acted upon across domains. For Indonesia, this requires a federated sensor architecture linking the Air Force, Navy, maritime security agencies, and selected civilian surveillance systems, supported by interoperable data standards, coastal and over-the-horizon radar, airborne early warning, maritime UAVs, and cyber-resilient command and control.*

Keywords: Air Power; Sea Power; integrated radar; maritime domain awareness; sea control; sensor fusion; maritime defense; Indonesia.

1. Pendahuluan

Indonesia menghadapi paradoks strategis yang khas negara kepulauan. Di satu sisi, geografi menyediakan kedalaman, jalur manuver, dan posisi silang yang memberi keuntungan geopolitik. Di sisi lain, ribuan pulau, selat sempit, laut terbuka, kawasan perbatasan, dan jalur pelayaran internasional menciptakan ruang pengawasan yang sangat luas. Karena itu, pertahanan nasional tidak cukup dipahami sebagai agregasi kemampuan TNI Angkatan Darat, TNI Angkatan Laut, dan TNI Angkatan Udara yang bekerja paralel. Tantangan utamanya adalah bagaimana sensor, komando, platform, dan senjata lintas matra dapat menghasilkan efek operasional yang sama: kemampuan menemukan, memahami, memutuskan, dan bertindak lebih cepat daripada lawan.

Naskah awal penelitian ini menempatkan integrasi radar TNI AU sebagai kebutuhan untuk menutup blank spot, meningkatkan akurasi deteksi, mempercepat distribusi informasi, meningkatkan kompetensi operator, dan melindungi jaringan dari serangan siber. Fokus tersebut tetap relevan, terutama karena ancaman yang dibahas mencakup UAV, rudal jelajah, pesawat berteknologi stealth, serta pelanggaran ruang udara. Namun, untuk diarahkan ke Jurnal Strategi Pertahanan Laut, argumentasinya perlu diperluas: radar udara bukan hanya instrumen penjaga kedaulatan ruang udara, tetapi juga bagian dari ekosistem penguasaan ruang maritim. Naskah sumber sendiri telah menyebut kebutuhan integrasi radar primer, sekunder, militer, dan sipil serta distribusi data real-time ke unsur komando. Revisi ini mengembangkan temuan tersebut menjadi pertanyaan lintas-domain.

Pertanyaan utama artikel adalah: bagaimana Air Power bekerja sebagai enabling power bagi Sea Power dalam konteks pertahanan kepulauan Indonesia? Pertanyaan turunannya meliputi: (1) mekanisme apa yang menghubungkan radar dan ISR udara dengan maritime domain awareness (MDA); (2) bagaimana data udara dapat memperluas sea control dan sea denial; (3) apa hambatan institusional dan teknologi dalam integrasi sensor TNI AU–TNI AL; dan (4) arsitektur kemampuan apa yang paling relevan bagi Indonesia.

Secara konseptual, Sea Power tidak identik dengan jumlah kapal perang. Ia mencakup kemampuan menggunakan laut bagi kepentingan sendiri sekaligus membatasi penggunaan laut oleh lawan. Dalam lingkungan modern, kemampuan itu bergantung pada informasi. Kapal yang memiliki rudal jarak jauh tetapi tidak memperoleh data sasaran yang akurat tetap memiliki daya tempur yang terbatas. Sebaliknya, sensor udara dan ruang angkasa dapat memperluas horizon penginderaan armada, membangun track di luar horizon radar kapal, dan memberikan peringatan dini terhadap pesawat, rudal, UAV, atau kapal permukaan. Di sinilah Air Power menjadi pengganda Sea Power.

Literatur teknologi maritim mutakhir memperkuat argumen tersebut. Sensor tunggal memiliki keterbatasan inheren. Radar dapat dipengaruhi clutter dan kondisi lingkungan; AIS hanya menggambarkan target kooperatif dan dapat dimatikan atau dimanipulasi; kamera dibatasi cuaca dan jarak. Karena itu, penelitian terbaru bergerak menuju multi-sensor fusion yang menggabungkan radar, AIS, elektro-optik, SAR satelit, dan UAV. Wu et al. (2022), misalnya, menunjukkan peningkatan konsistensi dan akurasi persepsi kapal melalui penggabungan radar, AIS, dan kamera. Qu et al. (2023) menunjukkan bahwa fusi AIS dan visual memperkuat pengawasan lalu lintas maritim. Perkembangan 2024–2026 bahkan menempatkan AI sebagai lapisan analitik untuk ship detection, anomaly detection, trajectory prediction, dan dark-vessel identification.

Dalam konteks pertahanan, persoalannya lebih kompleks daripada keselamatan pelayaran. Data harus memiliki latensi rendah, integritas tinggi, provenance yang dapat diverifikasi, dan kualitas yang memadai untuk mendukung keputusan operasional. Cooperative Engagement Capability (CEC) Angkatan Laut Amerika Serikat memperlihatkan logika penting: sensor yang tersebar secara geografis dapat dipadukan menjadi satu gambaran udara terpadu dan mendukung integrated fire control. Prinsipnya bukan meniru sistem asing, melainkan memahami bahwa nilai sensor terletak pada kemampuan jaringan untuk mengubah deteksi menjadi shared track dan kemudian menjadi keputusan.

Artikel ini menawarkan konsep Air-Enabled Sea Control (AESC). AESC didefinisikan sebagai kondisi ketika kemampuan penginderaan, ISR, komando-kendali, dan respons dari domain udara secara sistematis memperluas kemampuan kekuatan laut untuk memperoleh maritime situational awareness, mempertahankan kebebasan manuver, menolak akses lawan, dan mengendalikan ruang laut tertentu. Konsep ini menggeser diskusi dari “radar TNI AU untuk pertahanan udara” menjadi “jejaring sensor udara sebagai bagian dari sistem tempur maritim nasional.” Pergeseran tersebut merupakan kontribusi teoretis sekaligus kebijakan artikel ini.

2. Tinjauan Pustaka dan Kerangka Teoretis

Kajian Air Power klasik menekankan keunggulan karakteristik udara: kecepatan, jangkauan, fleksibilitas, perspektif ketinggian, dan kemampuan mengonsentrasikan efek secara cepat. Dalam perkembangan kontemporer, nilai Air Power semakin terletak pada fungsi sensing, networking, dan decision advantage. Pesawat tempur generasi baru, airborne early warning and control (AEW&C), UAV, radar darat, electronic intelligence, dan satelit tidak hanya berfungsi sebagai platform terpisah, tetapi sebagai node dalam jaringan informasi. Dengan demikian, Air Power modern memiliki fungsi ofensif, defensif, dan informasional.

Sea Power, sebaliknya, berkaitan dengan penggunaan laut sebagai ruang komunikasi, perdagangan, proyeksi kekuatan, dan pertahanan. Konsep sea control bersifat relatif terhadap waktu, tempat, dan tujuan; suatu negara tidak harus menguasai seluruh laut, tetapi harus mampu menciptakan tingkat kebebasan bertindak yang memadai pada area dan periode yang diperlukan. Sea denial berorientasi pada pencegahan lawan menggunakan ruang laut. Dalam lingkungan rudal jarak jauh, kapal selam, drone, dan sensor persisten, sea control semakin bergantung pada kemampuan lintas-domain.

Hubungan Air Power dan Sea Power dapat dijelaskan melalui lima mekanisme. Pertama, extension of sensing horizon. Kelengkungan bumi membatasi radar permukaan kapal, sementara sensor udara pada ketinggian dapat memperluas line of sight. AEW&C, pesawat patroli maritim, UAV, dan sensor udara lainnya karena itu meningkatkan waktu peringatan dan kedalaman pengawasan. Kedua, information fusion. Track udara, permukaan, dan elektronik dapat dikorelasikan dengan AIS, data satelit, dan radar pesisir untuk membentuk common operational picture. Ketiga, fleet air defense. Pesawat tempur dan sensor udara memperluas lapisan pertahanan armada dari ancaman udara dan rudal. Keempat, maritime strike dan targeting support. Air Power dapat menyerang sasaran laut, tetapi yang lebih mendasar adalah menyediakan data sasaran bagi shooter lain. Kelima, command-and-control

resilience. Node udara dapat menjadi relay komunikasi dan menjaga konektivitas ketika jaringan permukaan terganggu.

Network-centric warfare menjelaskan mengapa jaringan dapat meningkatkan combat power. Efeknya muncul ketika sensor, decision-maker, dan shooter tidak harus berada pada platform yang sama. Prinsip sensor-to-shooter memungkinkan sensor terbaik mendukung senjata terbaik selama standar data, identifikasi, otorisasi, dan latency memenuhi kebutuhan. CEC merupakan ilustrasi institusional dari logika ini: data radar dan IFF dari berbagai unit dijangkau sehingga unit yang tidak melihat target secara organik tetap memperoleh composite track berkualitas tinggi.

Multi-domain operations memperluas logika tersebut. Domain udara, laut, darat, ruang angkasa, siber, dan elektromagnetik bukan arena terpisah. Keunggulan di satu domain dapat menciptakan peluang di domain lain. Bagi negara kepulauan, integrasi udara-laut sangat penting karena ruang udara di atas choke points, ALKI, ZEE, dan perairan perbatasan merupakan lapisan vertikal dari battlespace maritim yang sama.

Maritime Domain Awareness memberi jembatan antara teori dan sistem. MDA bukan sekadar melihat posisi kapal, melainkan memahami aktivitas, identitas, pola, anomali, dan potensi ancaman yang dapat memengaruhi keamanan, keselamatan, ekonomi, dan pertahanan. Literatur mutakhir menunjukkan pergeseran dari surveillance berbasis sensor tunggal menuju multimodal fusion. SAR dapat mendeteksi kapal dalam gelap dan awan; AIS memberi identitas dan perilaku kooperatif; sensor elektro-optik memberi klasifikasi visual; radar pesisir menyediakan persistence; UAV memberikan fleksibilitas dan revisit rate; AI membantu asosiasi track dan deteksi anomali.

Dari sintesis tersebut, artikel ini membangun model AESC dengan empat lapisan: sensing, fusion, decision, dan effect. Lapisan sensing menghimpun radar TNI AU, radar kapal TNI AL, radar pesisir, AEW&C, UAV, AIS, sensor sipil, satelit SAR/optik, dan electronic support measures. Lapisan fusion mengorelasikan data

menjadi track bersama dan mengurangi duplikasi atau false track. Lapisan decision menghubungkan recognized air picture dan recognized maritime picture ke pusat komando. Lapisan effect menghubungkan informasi dengan patroli, intersepsi, fighter, kapal perang, rudal pertahanan udara, atau respons penegakan hukum. Keunggulan sistem ditentukan bukan hanya oleh kualitas sensor, tetapi oleh latency, interoperability, cybersecurity, dan rules of engagement.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif-analitis dengan desain conceptual synthesis dan document-based analysis. Basis pertama adalah naskah penelitian awal mengenai strategi penguatan integrasi radar TNI AU. Temuan inti naskah tersebut—blank spot, kebutuhan integrasi radar primer-sekunder-militer sipil, kompetensi personel, distribusi informasi real-time, serta keamanan siber—dipertahankan sebagai empirical problematique. Basis kedua adalah literatur internasional bereputasi mengenai maritime surveillance, sensor fusion, radar/SAR, AIS, UAV, trajectory prediction, networked command and control, dan hubungan operasi udara–laut.

Strategi pencarian literatur diarahkan pada publikasi peer-reviewed terutama periode 2020–2026, dengan beberapa karya lebih lama dipertahankan ketika memiliki fungsi konseptual atau metodologis. Kata kunci mencakup air power, sea power, sea control, maritime domain awareness, radar integration, sensor fusion, AIS-SAR fusion, maritime surveillance, UAV maritime surveillance, network-centric warfare, integrated air and missile defense, cooperative engagement, dan multi-domain operations. Sumber diprioritaskan dari jurnal internasional terindeks dan penerbit akademik mapan seperti Elsevier, IEEE, Taylor & Francis, Oxford University Press, MDPI, dan jurnal strategis bereputasi.

Analisis dilakukan dalam tiga tahap. Pertama, coding terhadap masalah naskah awal: coverage, interoperability, human competence, information latency,

cybersecurity, dan policy integration. Kedua, coding literatur eksternal berdasarkan fungsi Air Power terhadap Sea Power: detection, identification, tracking, targeting, protection, command-and-control, and battle damage/behavior assessment. Ketiga, pattern matching untuk menguji apakah masalah integrasi radar udara dapat direkonstruksi menjadi masalah joint maritime battlespace awareness.

Unit analisis artikel bukan platform atau satuan tertentu, melainkan hubungan fungsional antara sensor udara dan outcome pertahanan maritim. Dengan demikian, artikel tidak menilai kesiapan tempur aktual satuan tertentu dan tidak menggunakan data klasifikasi. Klaim operasional dibatasi pada level konsep, arsitektur, dan kebijakan yang dapat didukung oleh sumber terbuka. Pendekatan ini penting agar rekomendasi tetap relevan secara akademis tanpa mengungkap parameter teknis sensitif.

Validitas konseptual diperkuat melalui triangulasi antarkategori sumber: penelitian radar dan remote sensing, studi maritime surveillance, literatur strategi, serta dokumen kebijakan terbuka. Keterbatasan penelitian terletak pada tidak tersedianya data latency aktual, coverage radar rinci, network topology, dan rules of engagement. Oleh sebab itu, model AESC harus dipahami sebagai kerangka analitis dan arah desain, bukan sebagai audit teknis sistem pertahanan yang sedang beroperasi.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Dari Pertahanan Udara Menuju Battlespace Maritim Terintegrasi

Temuan awal menunjukkan bahwa radar yang berdiri sendiri menghadapi keterbatasan jangkauan, akurasi, dan kecepatan distribusi informasi. Dalam perspektif pertahanan laut, keterbatasan tersebut memiliki konsekuensi langsung. Kapal perang secara fisik dibatasi radar horizon, sedangkan ancaman anti-ship cruise missile, pesawat, UAV, dan platform permukaan dapat muncul dari luar cakupan

sensor organik kapal. Karena itu, radar TNI AU dan sensor airborne seharusnya dipahami sebagai bagian dari outer sensing layer pertahanan maritim.

Integrasi tidak berarti seluruh sensor harus berada dalam satu organisasi. Yang diperlukan adalah federasi sensor dengan governance yang jelas: siapa pemilik data, siapa yang boleh mengakses, bagaimana track diklasifikasikan, bagaimana identitas dikonfirmasi, dan pada tingkat kualitas apa data dapat digunakan untuk keputusan. Model federatif lebih realistis bagi Indonesia karena sensor berada pada TNI AU, TNI AL, instansi maritim, penerbangan sipil, dan sumber komersial/satelit.

4.2 Air Power sebagai Perluasan Horizon Sea Power

Kontribusi pertama Air Power adalah geometri. Sensor yang ditempatkan lebih tinggi memiliki line-of-sight lebih luas daripada radar permukaan. Ini menjelaskan nilai AEW&C dan UAV berdaya tahan panjang bagi operasi laut. Dalam situasi di mana kapal harus menjaga emisi elektronik atau beroperasi tersebar, node udara dapat menyediakan picture yang lebih luas tanpa setiap kapal harus mengaktifkan seluruh sensornya secara terus-menerus.

Kontribusi kedua adalah persistence yang bersifat komplementer. Radar darat memberikan pengawasan kontinu pada sektor tertentu; pesawat patroli dan UAV memberikan fleksibilitas; satelit SAR memberikan wide-area search; AIS memberi data identitas target kooperatif. Tidak satu pun sempurna. Literatur fusi sensor menunjukkan bahwa kombinasi beberapa sumber menghasilkan situational awareness yang lebih robust dibanding penggunaan sensor tunggal (Wu et al., 2022; Qu et al., 2023; Fan et al., 2025).

Kontribusi ketiga adalah classification and intent inference. Dalam lingkungan maritim padat, tantangan bukan hanya mendeteksi kontak, tetapi membedakan kapal niaga, kapal ikan, kapal negara, kapal perang, dan target yang memanipulasi identitas. Studi trajectory prediction dan anomaly detection berbasis AIS menunjukkan bahwa pola historis, konteks rute, kecepatan, dan perilaku dapat membantu mengidentifikasi penyimpangan (Mehri et al., 2023; Zhang et al., 2023).

Untuk kepentingan pertahanan, analitik semacam ini harus dipadukan dengan sensor non-kooperatif karena AIS dapat dimatikan atau dipalsukan.

4.3 Radar TNI AU dan Recognized Maritime Picture

Naskah awal menekankan integrasi radar primer, sekunder, militer, dan sipil. Dalam revisi ini, output integrasi tersebut tidak berhenti pada recognized air picture. Track udara harus dapat dikorelasikan dengan recognized maritime picture. Sebagai contoh konseptual, pola penerbangan rendah di sekitar gugus kapal, UAV yang tidak teridentifikasi, atau perubahan aktivitas udara di sekitar choke point dapat menjadi indikator maritim. Sebaliknya, pergerakan kapal tertentu dapat menjadi cue bagi sensor udara untuk melakukan pemeriksaan lebih lanjut.

Hubungan dua arah ini mengubah radar dari alat deteksi menjadi node intelligence. Sensor tidak lagi hanya menjawab “ada objek di koordinat tertentu”, tetapi berkontribusi pada pertanyaan operasional: objek apa, bergerak ke mana, berinteraksi dengan siapa, apakah perilakunya normal, dan respons apa yang proporsional. Inilah inti fusion: mengubah data menjadi track, track menjadi situational understanding, dan understanding menjadi decision advantage.

4.4 Air Power, Fleet Protection, dan Sea Control

Sea control mensyaratkan kebebasan bertindak kekuatan sendiri. Dalam lingkungan ancaman udara dan rudal, kebebasan tersebut tidak mungkin dipertahankan tanpa pertahanan udara berlapis. Air Power mendukung Sea Power melalui combat air patrol, early warning, air interception, electronic warfare, dan surveillance. Radar TNI AU yang terintegrasi dapat memberi warning lebih awal kepada unsur laut, sementara unsur laut dapat menyumbang data radar kapal ke picture bersama.

Konsep CEC menunjukkan prinsip penting bahwa sensor dan shooter dapat dipisahkan secara geografis. Dalam konteks Indonesia, pelajarannya bukan adopsi teknis langsung, melainkan kebutuhan akan data standards, time synchronization, track quality management, dan secure tactical data links. Jika satu radar mendeteksi

target tetapi informasi terlambat atau tidak kompatibel dengan sistem pengguna, keunggulan sensor hilang. Dengan kata lain, combat power berada pada jaringan, bukan hanya platform.

4.5 Air Power untuk Sea Denial dan Maritime Strike

Air Power juga mendukung sea denial melalui kemampuan mendeteksi, mengidentifikasi, membayangi, dan bila diperlukan menyerang target permukaan. Namun, efektivitas maritime strike modern bergantung pada kill chain: find, fix, track, target, engage, assess. Titik paling rapuh sering bukan pada senjata, melainkan pada kemampuan mempertahankan track yang valid terhadap target bergerak.

Karena itu, investasi radar harus dihubungkan dengan kill-chain architecture. Radar darat dapat memberikan cue awal; UAV atau pesawat patroli memperbarui track; satelit menyediakan pencarian area; platform lain melakukan identification; pusat komando melakukan fusi dan otorisasi. Model ini mengurangi ketergantungan pada satu sensor dan meningkatkan resilience ketika terjadi jamming, deception, atau kerusakan jaringan.

4.6 AI, Sensor Fusion, dan Maritime Domain Awareness

Literatur 2023–2026 menunjukkan percepatan penggunaan AI untuk ship detection. Ma et al. (2024), Liu et al. (2024), Jia et al. (2024), dan Yue et al. (2024) mengembangkan pendekatan deep learning untuk deteksi kapal pada citra SAR, termasuk kapal kecil dan orientasi kompleks. Liu et al. (2024) dan Gao et al. (2023) menekankan peningkatan feature representation dan explainability. Zhao et al. (2025) memperlihatkan penggunaan multi-sensor fusion berbasis UAV untuk identifikasi dan tracking kapal permukaan.

Bagi pertahanan Indonesia, AI sebaiknya tidak diposisikan sebagai pengganti operator, tetapi sebagai decision-support layer. Fungsi prioritas adalah mengurangi beban kognitif: deduplication track, anomaly flagging, probabilistic classification, correlation AIS–radar–SAR, dan rekomendasi prioritas sensor. Human-on-the-loop

tetap penting karena data pertahanan mengandung ambiguity, deception, dan konsekuensi keputusan yang tinggi.

4.7 Kompetensi Personel sebagai Joint Cognitive Capability

Naskah awal menempatkan kompetensi operator radar sebagai faktor kunci. Revisi ini memperluasnya menjadi joint cognitive capability. Operator radar udara harus memahami implikasi maritim dari track yang diamati; personel laut perlu memahami kualitas dan keterbatasan sensor udara. Pelatihan tidak cukup berfokus pada pengoperasian perangkat, tetapi harus mencakup cross-domain track interpretation, data-link procedures, cyber hygiene, dan joint decision exercises.

Kebutuhan ini konsisten dengan perubahan karakter perang yang semakin data-intensive. Ketika volume sensor meningkat, masalah bergeser dari kekurangan data menjadi overload. Personel harus mampu membedakan data relevan, menilai confidence level, dan memahami kapan automation dapat dipercaya. Dengan demikian, integrasi teknologi tanpa integrasi doktrin dan pendidikan hanya menghasilkan connected systems, bukan integrated force.

4.8 Latency sebagai Variabel Strategis

Kecepatan distribusi informasi yang ditekankan naskah awal perlu diperlakukan sebagai variabel strategis. Dalam operasi maritim, nilai informasi menurun seiring waktu karena target bergerak. Data posisi yang akurat tetapi terlambat dapat menghasilkan keputusan yang salah. Oleh karena itu, performa jaringan harus diukur bukan hanya bandwidth, tetapi end-to-end decision latency: waktu dari deteksi, korelasi, validasi, distribusi, keputusan, hingga action.

AESC mengasumsikan bahwa Air Power memperpendek siklus tersebut. Radar udara yang mendeteksi ancaman harus mampu menyebarkan track kepada pusat komando dan unsur laut yang relevan tanpa bottleneck organisasi. Ini memerlukan mission data standards, edge processing, prioritas jaringan, dan prosedur yang menghindari approval chain yang tidak perlu untuk data situasional non-sensitif.

4.9 Cybersecurity dan Electromagnetic Resilience

Semakin terintegrasi sistem, semakin besar attack surface. Jaringan radar, tactical data link, cloud/edge computing, AIS, GNSS, dan sistem satelit dapat menjadi sasaran cyberattack, jamming, spoofing, atau data poisoning. Karena itu, integrasi harus berjalan bersama zero-trust principles, encryption, authentication, redundancy, anomaly detection, dan kemampuan degraded-mode operations.

Literatur dark-vessel detection menunjukkan pentingnya sensor non-kooperatif ketika AIS tidak tersedia. Prinsip yang sama berlaku dalam konflik: sistem harus diasumsikan akan mengalami degradation. Arsitektur yang baik bukan arsitektur yang selalu terkoneksi sempurna, melainkan yang tetap menghasilkan minimum viable operational picture ketika sebagian node gagal.

4.10 Relevansi Geostrategis bagi Indonesia

Indonesia memiliki beberapa ruang prioritas: Selat Malaka, Selat Sunda, Selat Lombok, Selat Makassar, Laut Natuna Utara, Laut Sulawesi, Laut Arafura, dan jalur ALKI. Karakter ancaman dan kepadatan lalu lintas berbeda sehingga arsitektur sensor tidak boleh seragam. Choke point memerlukan high-resolution persistent surveillance; laut terbuka memerlukan wide-area search; kawasan perbatasan memerlukan kemampuan cueing dan rapid response.

Dalam konteks Laut Natuna Utara, integrasi Air Power–Sea Power penting karena jarak, luas area, kepadatan aktivitas sipil, dan kebutuhan presence. Radar darat dan sensor udara dapat memperluas picture bagi kapal patroli, sementara kapal memberi local confirmation. Dengan pola ini, sea presence tidak harus berarti setiap area dijaga terus-menerus oleh kapal perang; persistent awareness dapat dibangun melalui kombinasi sensor dan respons yang dapat digerakkan.

4.11 Konsep Air-Enabled Sea Control (AESC)

Berdasarkan sintesis temuan, AESC memiliki empat proposisi. Pertama, sea control modern adalah information-dependent control. Kapal dan senjata memperoleh nilai maksimal ketika didukung picture lintas-domain. Kedua, Air

Power memberi vertical advantage yang memperluas horizon penginderaan dan waktu keputusan Sea Power. Ketiga, integrasi sensor menghasilkan nilai hanya jika interoperability, latency, dan trust terpenuhi. Keempat, ketahanan jaringan sama pentingnya dengan jangkauan sensor karena lawan akan berusaha menyerang information architecture.

AESC dapat dirumuskan secara konseptual sebagai hubungan: kualitas sea control meningkat ketika sensing coverage, track quality, interoperability, decision speed, dan network resilience meningkat secara bersama. Hubungan tersebut tidak linear; bottleneck pada satu komponen dapat membatasi keseluruhan sistem. Radar terbaik tidak memberi efek jika data tidak dapat dibagikan, dan jaringan tercepat tidak membantu bila identifikasi target buruk.

4.12 Roadmap Implementasi bagi Pertahanan Maritim Indonesia

Tahap pertama adalah federasi data. TNI perlu menetapkan common track data model dan protokol pertukaran data antara sensor udara dan laut. Prioritasnya bukan menyatukan semua sistem secara fisik, tetapi memastikan interoperability dan shared situational awareness.

Tahap kedua adalah penguatan sensing layer. Radar pertahanan udara perlu dioptimalkan sebagai bagian dari joint surveillance; radar pesisir dan radar kapal diintegrasikan; kemampuan over-the-horizon radar dikaji untuk wide-area cueing; UAV maritim dan AEW&C ditempatkan sebagai node penginderaan bergerak; akses data SAR/optik satelit diperkuat.

Tahap ketiga adalah fusion dan AI. Dibutuhkan fusion center yang mampu menggabungkan radar, AIS, satellite imagery, electro-optical, dan intelligence feeds. AI digunakan untuk membantu correlation, anomaly detection, dan prioritization, dengan auditability dan human oversight.

Tahap keempat adalah joint command and control. Recognized air picture dan recognized maritime picture perlu diperlakukan sebagai dua view dari common

battlespace. Latihan gabungan harus menguji sensor-to-decision dan sensor-to-shooter secara realistis, termasuk kondisi jamming dan network degradation.

Tahap kelima adalah resilience dan sovereignty. Sistem harus memiliki cyber defense, redundant communications, sovereign data governance, serta kemampuan tetap beroperasi ketika konektivitas eksternal atau satelit komersial terganggu. Kemandirian bukan berarti seluruh komponen harus diproduksi domestik, tetapi negara harus menguasai arsitektur, data, integration layer, dan mission-critical software.

Dengan roadmap ini, penguatan radar TNI AU memperoleh relevansi langsung bagi strategi pertahanan laut. Radar tidak lagi diposisikan sebagai proyek sektoral matra, melainkan sebagai salah satu fondasi national maritime combat cloud yang menghubungkan sensing, decision, dan effect secara lintas-domain.

5. Implikasi Teoretis, Kebaruan, dan Implikasi Kebijakan

Secara teoretis, artikel ini menunjukkan bahwa dikotomi Air Power versus Sea Power semakin tidak memadai untuk menjelaskan operasi pertahanan negara kepulauan. Air Power tidak hanya “membantu” armada dalam arti tambahan daya tembak, tetapi mengubah kondisi epistemik operasi laut: apa yang dapat diketahui, seberapa cepat diketahui, seberapa yakin identifikasi dilakukan, dan seberapa cepat keputusan dapat disebarkan. Karena itu, hubungan keduanya bersifat constitutive, bukan sekadar supportive.

Kebaruan pertama adalah konsep Air-Enabled Sea Control. Konsep ini memusatkan perhatian pada mekanisme penginderaan dan jaringan sebagai prasyarat sea control. Kebaruan kedua adalah reinterpretasi integrasi radar TNI AU sebagai joint maritime surveillance architecture. Kebaruan ketiga adalah penempatan latency dan cyber-resilience sebagai variabel strategis, bukan hanya isu teknis. Kebaruan keempat adalah model federasi sensor yang lebih sesuai bagi tata kelola Indonesia daripada pendekatan satu sistem monolitik.

Implikasi kebijakannya adalah perlunya pergeseran dari platform-centric procurement menuju architecture-centric capability development. Pengadaan radar, UAV, kapal, pesawat, dan satelit harus diuji dengan pertanyaan interoperabilitas: data apa yang dihasilkan, siapa yang dapat menerimanya, berapa latensinya, bagaimana kualitas track dinilai, dan bagaimana sistem tetap bekerja saat degraded. Pendekatan ini mencegah modernisasi menghasilkan islands of excellence yang tidak terhubung.

Bagi TNI, joint doctrine perlu memberi ruang lebih besar pada integrated air-maritime surveillance dan cross-domain fires. Bagi Kementerian Pertahanan, prioritas investasi harus memasukkan data architecture dan sovereign integration layer sebagai bagian alutsista strategis. Bagi industri pertahanan, peluang utama berada pada middleware, tactical data links, sensor fusion, AI-assisted analytics, cyber defense, dan simulator latihan gabungan. Bagi lembaga sipil, mekanisme sharing perlu dirancang dengan pemisahan data berdasarkan klasifikasi dan tujuan agar kontribusi radar sipil dapat dimanfaatkan tanpa mengorbankan keselamatan dan keamanan data.

6. Kesimpulan

Revisi ini menggeser fokus penelitian dari integrasi radar TNI AU yang semata-mata berorientasi pada pertahanan udara menuju kerangka pertahanan maritim lintas-domain. Temuan utama adalah bahwa Air Power bekerja mendukung Sea Power melalui lima fungsi yang saling berkaitan: memperluas horizon penginderaan, membentuk shared situational awareness, memperkuat pertahanan udara armada, menyediakan targeting-quality information, dan menjaga konektivitas komando-kendali. Dalam konteks tersebut, radar TNI AU bukan hanya “mata pertahanan udara”, tetapi salah satu node strategis bagi maritime domain awareness dan sea control.

Konsep Air-Enabled Sea Control menjelaskan bahwa penguasaan laut modern bergantung pada kemampuan memperoleh dan mempertahankan information

advantage. Sea Power yang tidak didukung sensing dan C2 lintas-domain akan dibatasi horizon platformnya sendiri. Sebaliknya, Air Power yang terintegrasi dengan kekuatan laut dapat memperluas ruang deteksi, mempercepat keputusan, dan memungkinkan respons yang lebih presisi tanpa harus menambah kehadiran kapal secara proporsional.

Bagi Indonesia, prioritas strategis bukan sekadar menambah radar, melainkan membangun federasi sensor nasional yang menghubungkan TNI AU, TNI AL, radar pesisir, sensor sipil terpilih, UAV, AEW&C, AIS, dan satelit dalam common operational picture yang aman. Modernisasi harus diarahkan pada interoperabilitas, latency rendah, AI-assisted fusion, joint training, cyber resilience, dan sovereign data governance. Dengan orientasi tersebut, integrasi radar dapat menjadi fondasi transformasi pertahanan kepulauan Indonesia dari pengawasan sektoral menuju integrated air-maritime defense.

Tabel 1. Matriks Air Power sebagai Enabler Sea Power

Fungsi Air Power	Kontribusi terhadap Sea Power	Kapabilitas prioritas Indonesia
Wide-area sensing	Memperluas horizon deteksi dan early warning	Radar terintegrasi, AEW&C, UAV, OTHR, satelit SAR
Data fusion	Membentuk recognized maritime picture	Fusion center, common data model, AI-assisted correlation
Fleet protection	Peringatan ancaman udara/rudal dan cueing	Fighter, IAMD, tactical data link, EW
Targeting support	Mempertahankan track target bergerak	Multi-sensor tracking, ISR, secure low-latency links
C2 resilience	Menjaga keputusan lintas matra saat jaringan terganggu	Redundansi, edge processing, cyber defense, degraded-mode SOP

Sumber: sintesis penulis berdasarkan naskah awal dan literatur internasional tentang sensor fusion, maritime surveillance, networked C2, dan sea control.

Daftar Pustaka

- Fan, X., Gu, Y., Qin, Y., Shi, W., & Zhang, Y. (2025). Research on ship target tracking with multi-sensor data fusion. *Regional Studies in Marine Science*, 86, 104186. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104186>
- Gao, Y., Wu, C., & Ren, M. (2023). A novel anchor-free model with salient feature fusion mechanism for ship detection in SAR images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3319831>
- Guo, S., Zhang, H., & Guo, Y. (2023). Toward multimodal vessel trajectory prediction by modeling the distribution of modes. *Ocean Engineering*, 282, 115020. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115020>
- Jia, H., Pu, X., Liu, Q., Wang, H., & Xu, F. (2024). A fast progressive ship detection method for very large full-scene SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1–15. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3369637>
- King, A. (2024). Digital targeting: Artificial intelligence, data, and military intelligence. *Journal of Global Security Studies*, 9(2), ogae009. <https://doi.org/10.1093/jogss/ogae009>
- Liu, T., Ye, Y., Lei, Z., Huo, Y., Zhang, X., Wang, F., Sha, M., & Wu, H. (2024). A new efficient ship detection method based on remote sensing images by device–cloud collaboration. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1422. <https://doi.org/10.3390/jmse12081422>
- Liu, Y., Yan, G., Ma, F., Zhou, Y., & Zhang, F. (2024). SAR ship detection based on explainable evidence learning under intraclass imbalance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1–15. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3373668>
- Ma, Y., Guan, D., Deng, Y., Yuan, W., & Wei, M. (2024). 3SD-Net: SAR small ship detection neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3454308>

- Mehri, S., Alesheikh, A. A., & Basiri, A. (2023). A context-aware approach for vessels' trajectory prediction. *Ocean Engineering*, 282, 114916. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114916>
- Monzon Baeza, V., Parada, R., Concha Salor, L., & Monzo, C. (2025). AI integration in tactical communication systems and networks: A survey and future research directions. *Systems*, 13(9), 752. <https://doi.org/10.3390/systems13090752>
- Qu, J., Liu, R. W., Guo, Y., Lu, Y., Su, J., & Li, P. (2023). Improving maritime traffic surveillance in inland waterways using the robust fusion of AIS and visual data. *Ocean Engineering*, 275, 114198. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114198>
- Wu, Y., Chu, X., Deng, L., Lei, J., He, W., Królczyk, G., & Li, Z. (2022). A new multi-sensor fusion approach for integrated ship motion perception in inland waterways. *Measurement*, 200, 111630. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111630>
- Yue, T., Zhang, Y., Wang, J., Xu, Y., & Liu, P. (2024). A weak supervision learning paradigm for oriented ship detection in SAR image. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1–12. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3375069>
- Zhang, C., Liu, S., Guo, M., & Liu, Y. (2023). A novel ship trajectory clustering analysis and anomaly detection method based on AIS data. *Ocean Engineering*, 288, 116082. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116082>
- Zhang, Y., Han, Z., Zhou, X., Li, B., Zhang, L., Zhen, E., Wang, S., Zhao, Z., & Guo, Z. (2023). METO-S2S: A S2S based vessel trajectory prediction method with multiple-semantic encoder and type-oriented decoder. *Ocean Engineering*, 277, 114248. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114248>
- Zhao, C., Bao, M., Liang, J., Liang, M., Liu, R. W., & Pang, G. (2025). Multi-sensor fusion-driven surface vessel identification and tracking using unmanned aerial vehicles for maritime surveillance. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 71(2), 6280–6293. <https://doi.org/10.1109/TCE.2025.3527000>

- Ten, K. H., Kang, H.-S., Siow, C.-L., Goh, P. S., Lee, K.-Q., Huspi, S. H., & Guedes Soares, C. (2023). Automatic identification system in accelerating decarbonization of maritime transportation: The state-of-the-art and opportunities. *Ocean Engineering*, 116232. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116232>
- Alessandrini, A., Mazzearella, F., & Vespe, M. (2019). Estimated time of arrival using historical vessel tracking data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20, 7–15. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2789279>
- Borkowski, P. (2017). The ship movement trajectory prediction algorithm using navigational data fusion. *Sensors*, 17(6), 1432. <https://doi.org/10.3390/s17061432>
- Xiao, F. (2019). Multi-sensor data fusion based on a generalised belief divergence measure. *Information Fusion*, 49, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.11.003>
- Greidanus, H., Alvarez, M., Santamaria, C., Thoorens, F.-X., Kourti, N., & Argentieri, P. (2017). The use of satellite AIS to improve the detection of ships in satellite SAR imagery. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 231(1), 148–159.
- Corbane, C., Marre, F., & Petit, M. (2010). Using SPOT-5 HRG data in panchromatic mode for operational detection of small ships in tropical area. *Sensors*, 10(8), 7287–7299. <https://doi.org/10.3390/s100807287>
- Vespe, M., Gibin, M., Alessandrini, A., Natale, F., Mazzearella, F., & Osio, G. C. (2016). Mapping EU fishing activities using ship tracking data. *Journal of Maps*, 12(sup1), 520–525. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1195299>
- Tu, E., Zhang, G., Rachmawati, L., Rajabally, E., & Huang, G.-B. (2018). Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation: A comprehensive survey from data to methodology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(5), 1559–1582. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2724551>

- Pallotta, G., Vespe, M., & Bryan, K. (2013). Vessel pattern knowledge discovery from AIS data: A framework for anomaly detection and route prediction. *Entropy*, 15(6), 2218–2245. <https://doi.org/10.3390/e15062218>
- Riveiro, M., Pallotta, G., & Vespe, M. (2018). Maritime anomaly detection: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 8(5), e1266. <https://doi.org/10.1002/widm.1266>
- Sidibé, A., & Shu, G. (2017). Study of automatic anomalous behaviour detection techniques for maritime vessels. *Journal of Navigation*, 70(4), 847–858.
- Lane, R. O., Nevell, D. A., Hayward, S. D., & Beaney, T. W. (2010). Maritime anomaly detection and threat assessment. *Information Fusion*, 11(4), 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2009.08.002>
- Felski, A., & Jaskólski, K. (2013). Information unfitness as a factor constraining automatic identification system (AIS) application to anti-collision manoeuvring. *Polish Maritime Research*, 20(3), 60–64.
- Balduzzi, M., Pasta, A., & Wilhoit, K. (2014). A security evaluation of AIS automated identification system. *Journal of Information Security and Applications*, 20, 1–12.
- Van Westrenen, F., & Ellerbroek, J. (2017). The effect of traffic complexity on the development of near misses on the North Sea. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(3), 432–440.
- Wen, D., Zhou, Y., Li, X., Shi, Y., Huang, K., & Letaief, K. B. (2025). A survey on integrated sensing, communication, and computation. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Preprint version: arXiv:2408.08074.
- Jung, S., Jeong, S., Kang, J., & Kang, J. (2023). Marine IoT systems with space-air-sea integrated networks: Hybrid LEO and UAV edge computing. *IEEE Internet of Things Journal* (preprint version arXiv:2301.03815).
- Putri, M. S. D., Gultom, R. A. G., & Wadjdi, A. F. (2022). Manfaat alutsista radar dalam mendukung sistem pertahanan udara berlapis TNI AU. *Kajian pertahanan Indonesia*.



- Martha, S., Prasetyani, I., Wadjdi, A. F., Prihanto, Y., Supriyadi, A. A., Lestari, A. A., Supriyatno, M., & Haryanto, A. (2023). Evaluasi pemanfaatan teknologi radar dalam rangka penguatan pertahanan dan kedaulatan wilayah udara Indonesia. *Journal on Education*, 5(3), 8324–8332. <https://doi.org/10.31004/JOE.V5I3.1620>
- Muna, R. A. A., Ras, A. R., Rudyanto, Widodo, P., Saragih, H. J. R., & Suwarno, P. (2023). Sea Power Indonesia related to geopolitics in the South China Sea and geoeconomics in the North Natuna Sea SLoC & SLoT. *Jurnal Kewarganegaraan*, 7(1). <https://doi.org/10.31316/jk.v7i1.4892>
- Wirasuta, D. S. (2015). South China Sea maritime security. *Jurnal Pertahanan*, 1(1).
- U.S. Navy. (2021). Cooperative Engagement Capability (CEC): Real-time sensor netting and integrated fire control. Official fact file.
- Naval Sea Systems Command. (2025). Cooperative Engagement Capability: Enhancing battlefield awareness. Official publication.
- Kementerian Pertahanan Republik Indonesia. (2015). Strategi Pertahanan Negara. Jakarta: Kemhan RI.
- TNI Angkatan Udara. (2025). Doktrin Swa Bhuwana Paksa dan konsep pertahanan udara terintegrasi. Jakarta: Mabesau.
- Protap Opshanud. (2023). Prosedur Tetap Operasi Pertahanan Udara, Kep Panglima Koopsudnas No. Kep/97/VII/2023.