

Identifikasi Kriteria Pemeliharaan Alutsista Berkelanjutan di PT XYZ: Kajian Literatur sebagai Tahap Awal Pengembangan Model AHP-TOPSIS

Firdah Dipi Juni Kurniawati*, G. Royke Deksin, I.B. Putra Jandhana

Program Studi Industri Pertahanan, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor

*Koresponden email: firdah.kurniawati@tp.idu.ac.id

Diterima: 18 Juli 2025

Disetujui: 25 Juli 2025

Abstract

Maintenance of the main weapon system (alutsista) at PT XYZ is an important aspect in maintaining the combat readiness and effectiveness of the national air defence system. Along with the development of the green defence industry framework, the maintenance approach is now required to not only focus on technical and operational aspects, but also pay attention to energy efficiency, environmental impact reduction, and resource sustainability. This research aims to identify and formulate strategic criteria in the sustainability-based defence equipment maintenance system, as an initial stage in developing the AHP-TOPSIS model. The method used is a literature study of 17 previous studies as a basis for criteria identification, and is relevant to the scope of maintenance of warships, submarines, commercial shipping systems, and air defence weapon systems. The analysis showed that there were seven main consistent criteria, namely security level, operational readiness, cost, operational time, technology use, resource availability, and environmental impact. These criteria were grouped into social, economic, and environmental dimensions to form the initial structure of the AHP hierarchy. This research is conceptual and only reaches the stage of identifying criteria as a basis for developing the AHP-TOPSIS model in further studies. This research also provides the development of defence equipment maintenance strategies that support the implementation of the green defence industry in Indonesia.

Keywords: *main weapon system maintenance, green defense industry, ahp-topsis, sustainable strategy*

Abstrak

Pemeliharaan alat utama sistem senjata (alutsista) di PT XYZ merupakan aspek penting dalam menjaga kesiapan tempur dan efektivitas sistem pertahanan udara nasional. Seiring dengan berkembangnya kerangka berpikir *green defense industry*, pendekatan pemeliharaan kini dituntut untuk tidak hanya berfokus pada aspek teknis dan operasional, tetapi juga memperhatikan efisiensi energi, pengurangan dampak lingkungan, dan keberlanjutan sumber daya. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan merumuskan kriteria strategis dalam sistem pemeliharaan alutsista berbasis *sustainability*, sebagai tahap awal dalam pengembangan model AHP-TOPSIS. Metode yang digunakan adalah studi literatur terhadap 17 penelitian terdahulu sebagai dasar untuk identifikasi kriteria, serta relevan dengan lingkup pemeliharaan kapal perang, kapal selam, sistem perkapalan niaga, dan sistem senjata pertahanan udara. Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat tujuh kriteria utama yang konsisten, yaitu tingkat keamanan, kesiapan operasional, biaya, waktu operasional, penggunaan teknologi, ketersediaan sumber daya, dan dampak lingkungan. Kriteria-kriteria tersebut dikelompokkan ke dalam dimensi sosial, ekonomi, dan lingkungan untuk membentuk struktur awal hierarki AHP. Penelitian ini bersifat konseptual dan hanya sampai pada tahap identifikasi kriteria sebagai dasar untuk pengembangan model AHP-TOPSIS pada studi lanjutan. Penelitian ini juga memberikan pengembangan strategi pemeliharaan alutsista yang mendukung implementasi *green defense industry* di Indonesia.

Kata Kunci: *pemeliharaan alutsista, green defense industry, ahp-topsis, strategi berkelanjutan*

1. Pendahuluan

Pemeliharaan alat utama sistem senjata (alutsista) merupakan salah satu aspek fundamental dalam menjaga kesiapan tempur dan keberlanjutan operasional satuan pertahanan, termasuk di lingkungan PT XYZ. Keberhasilan misi pertahanan udara tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknologi alutsista, tetapi juga oleh efektivitas sistem pemeliharaan yang mampu menjamin performa optimal secara berkelanjutan. Namun dalam praktiknya, kegiatan pemeliharaan alutsista kerap menghadapi berbagai

tantangan, seperti keterbatasan anggaran, keusangan teknologi, serta ketergantungan pada komponen impor [1].

Dalam lingkup global, telah berkembang pendekatan baru yang dikenal dengan istilah *green defense industry*, yaitu konsep pembangunan sistem pertahanan yang mengintegrasikan prinsip-prinsip keberlanjutan lingkungan, efisiensi sumber daya, dan teknologi ramah lingkungan tanpa mengurangi kapabilitas militer. Pendekatan ini lahir sebagai respons atas meningkatnya kesadaran terhadap dampak lingkungan dari aktivitas militer dan kebutuhan untuk menyesuaikan strategi pertahanan dengan agenda transisi energi global [16].

Studi-studi terbaru menunjukkan bahwa sektor pertahanan menyumbang emisi karbon yang signifikan secara global, dan jika tidak dikelola dengan strategi berkelanjutan, aktivitas militer dapat mempercepat degradasi lingkungan [18]. Oleh karena itu, pemeliharaan alutsista kini dituntut tidak hanya berorientasi pada keandalan teknis, tetapi juga pada bagaimana prosesnya mampu mengurangi jejak karbon, memanfaatkan energi alternatif, serta memperpanjang daur hidup alutsista melalui prinsip ekonomi sirkular seperti *repair, reuse, remanufacture* [16].

Dengan adanya dorongan menuju transformasi hijau di berbagai sektor, termasuk pertahanan, maka integrasi prinsip *sustainability* dalam kegiatan pemeliharaan menjadi sangat penting. Penerapan metode analisis berbasis *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) seperti AHP dan TOPSIS dapat menjadi alat bantu dalam merumuskan strategi pemeliharaan yang memperhatikan berbagai dimensi, baik teknis, operasional, biaya, maupun lingkungan. Penelitian ini berupaya menjawab kebutuhan tersebut dengan merumuskan kriteria-kriteria strategis untuk sistem pemeliharaan alutsista PT XYZ berbasis *sustainability*, sebagai langkah awal menuju implementasi *green defense industry* di Indonesia.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Pemeliharaan Alutsista di Lingkungan PT XYZ

Pemeliharaan alutsista merupakan kegiatan krusial dalam menjamin kesiapan operasional sistem pertahanan. Di lingkungan PT XYZ, pemeliharaan tidak hanya menyangkut aspek teknis semata, tetapi juga keterkaitan dengan kesiapan tempur, ketersediaan logistik, dan efektivitas sumber daya manusia [1]. Menurut Nugraha (2022), keberadaan depo pemeliharaan memiliki peran vital dalam menjamin ketahanan sistem senjata PT XYZ, termasuk pada aspek ketersediaan dan keandalan sistem rudal, radar, dan sensor lainnya [1].

2.2 Pendekatan MCDA (AHP-TOPSIS) dalam Lingkup Militer

Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) merupakan pendekatan populer dalam pengambilan keputusan kompleks, terutama saat melibatkan banyak alternatif dan kriteria. Metode AHP (*Analytical Hierarchy Process*) digunakan untuk menghitung bobot kriteria berdasarkan perbandingan berpasangan, sementara TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) digunakan untuk menentukan alternatif terbaik berdasarkan kedekatannya terhadap solusi ideal [3][4][7].

Penerapan metode ini telah banyak digunakan dalam pengambilan keputusan strategis militer, seperti pemilihan strategi pemeliharaan kapal perang [3], kapal selam [7], dan sistem persenjataan [8]. Studi bibliometrik yang dilakukan oleh Costa et al. (2022) menunjukkan bahwa MCDA telah menjadi pendekatan dominan dalam mendukung keputusan teknis di sektor militer [6].

2.3 Konsep *Green Defense* dan Keberlanjutan dalam Sistem Pertahanan

Green defense merupakan konsep yang mengintegrasikan prinsip-prinsip keberlanjutan lingkungan ke dalam kegiatan militer. Pendekatan ini mencakup efisiensi energi, manajemen limbah berbahaya, penggunaan teknologi ramah lingkungan, serta pengurangan jejak ekologis dari operasi militer [16][17].

Laporan dari *Council of the European Union* (2024) menegaskan pentingnya transformasi sektor pertahanan agar sejalan dengan agenda perubahan iklim dan keberlanjutan global [16]. Dalam lingkup industri pertahanan Indonesia, adopsi prinsip *green defense* dapat diwujudkan melalui desain ulang sistem pemeliharaan, pemanfaatan energi terbarukan, dan pengembangan suku cadang yang ramah lingkungan [5].

2.4 Dimensi Keberlanjutan: *Triple Bottom Line* dalam Pemeliharaan Militer

Pendekatan *Triple Bottom Line* (TBL) membagi keberlanjutan menjadi tiga dimensi utama: ekonomi, lingkungan, dan sosial. TBL relevan digunakan dalam sistem pemeliharaan militer untuk mengevaluasi tidak hanya efektivitas biaya, tetapi juga dampaknya terhadap lingkungan dan personel [13][14][15].

Studi oleh Vanzetta et al. (2024) juga menyoroti bagaimana kerangka MCDA dapat disesuaikan dengan pendekatan TBL untuk mengevaluasi alternatif operasional secara lebih menyeluruh dalam lingkungan militer [19].

3. Metode Penelitian

3.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-kualitatif dengan metode studi literatur sebagai teknik utama dalam pengumpulan dan analisis data. Fokus utama penelitian adalah merumuskan kriteria-kriteria strategis yang digunakan dalam sistem pemeliharaan alutsista di PT XYZ berbasis prinsip keberlanjutan, yang akan menjadi dasar dalam pengembangan model AHP-TOPSIS pada tahap lanjutan. Sebanyak 17 literatur utama direview secara mendalam, terdiri dari jurnal ilmiah nasional dan internasional yang membahas strategi pemeliharaan alutsista, sistem kapal perang dan kapal selam, serta pendekatan berbasis *multi-criteria decision making* (MCDM) seperti AHP dan TOPSIS. Literatur-literatur ini dipilih karena relevan dan dijadikan sebagai dasar dalam identifikasi kriteria yang akan digunakan dalam penelitian selanjutnya, serta representatif dalam konteks keberlanjutan dan *green defense*.

Metode AHP digunakan untuk menentukan bobot prioritas dari masing-masing kriteria berdasarkan preferensi pakar, sedangkan TOPSIS digunakan untuk menilai alternatif strategi pemeliharaan. Pemilihan metode ini didasarkan pada kemampuannya dalam menangani keputusan multikriteria secara sistematis dan terstruktur, serta telah terbukti banyak digunakan dalam lingkup militer [19]. Setiap penelitian dianalisis untuk mengidentifikasi kriteria-kriteria yang digunakan dalam pemilihan strategi pemeliharaan. Kriteria yang muncul kemudian diklasifikasikan ke dalam tiga dimensi utama berdasarkan kerangka sustainability, yaitu dimensi sosial, ekonomi, dan lingkungan. Analisis dilakukan dengan pendekatan induktif, di mana temuan dari berbagai literatur disintesis untuk membentuk struktur hierarki awal AHP.

3.2 Penyusunan Struktur Hierarki AHP

Setelah mengkaji 17 penelitian terdahulu yang relevan, peneliti mengidentifikasi tujuh kriteria utama yang dinilai paling berpengaruh terhadap strategi pemeliharaan alutsista di PT XYZ. Kriteria-kriteria tersebut kemudian diklasifikasikan ke dalam tiga dimensi keberlanjutan, yaitu sosial, ekonomi, dan lingkungan, sesuai dengan pendekatan *triple bottom line*. Pendekatan TBL telah berkembang menjadi kerangka praktis dalam pengambilan keputusan strategis di berbagai sektor, termasuk sektor pertahanan yang semakin menekankan pentingnya efisiensi ekonomi, tanggung jawab sosial, dan pengurangan dampak lingkungan [13] [14]. Dalam lingkup ini, pemeliharaan alutsista tidak hanya dipandang dari sisi kesiapan operasional dan efisiensi biaya, tetapi juga dari perspektif keberlanjutan jangka panjang sejalan dengan semangat *green defense industry* [15].

Penyusunan struktur hierarki AHP dilakukan sebagai kerangka awal untuk mendukung pengembangan model AHP-TOPSIS pada studi lanjutan. Struktur ini terdiri dari tiga level: tujuan utama pada level 1, tujuh kriteria pada level 2, dan alternatif strategi pada level 3. Namun, pada tahap ini, alternatif strategi belum dirumuskan, karena fokus penelitian masih pada tahap identifikasi dan klasifikasi kriteria

Struktur hierarki ini diharapkan menjadi dasar konseptual bagi proses penilaian multikriteria dalam konteks keberlanjutan pemeliharaan alutsista. Gambar berikut menunjukkan struktur hierarki AHP yang disusun dalam penelitian ini.



Gambar 1. Struktur Hierarki AHP untuk Pemeliharaan Alutsista Berkelanjutan di PT XYZ

Sumber: Tim Penulis, 2025

Penjelasan Hierarki:

- Level 1 (Tujuan) → Menentukan strategi pemeliharaan alutsista PT XYZ berbasis keberlanjutan.
- Level 2 (Kriteria) → Tingkat Keamanan (K1), Kesiapan Operasional (K2), Biaya (K3), Waktu Operasional (K4), Penggunaan Teknologi (K5), Ketersediaan Sumber Daya (K6), Dampak Lingkungan (K7).
- Level 3 (Alternatif Strategi) → Belum dirumuskan pada tahap ini dan akan dikembangkan pada penelitian lanjutan.

Pada tahap ini, penelitian belum merumuskan alternatif strategi dalam struktur hierarki karena fokus masih berada pada identifikasi dan klasifikasi kriteria berdasarkan literatur. Alternatif strategi akan dirumuskan secara kontekstual pada penelitian lanjutan setelah tahap validasi kriteria.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Identifikasi Kriteria Pemilihan Strategi Pemeliharaan Alutsista

Sejumlah studi terdahulu telah menggunakan pendekatan MCDA untuk mendukung proses pengambilan keputusan strategis di sektor militer, termasuk dalam pemilihan sistem pemeliharaan dan sarana operasional [19]. Berdasarkan dari kajian literatur terhadap 17 penelitian terdahulu, diperoleh tujuh kriteria utama yang berhubungan dalam lingkup strategi pemeliharaan alutsista. Kriteria-kriteria ini muncul secara berulang dalam studi mengenai pemeliharaan kapal perang, kapal selam, sistem kapal niaga, dan sistem senjata pertahanan udara. Adapun hasil penggabungan kriteria tersebut dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Kriteria Pemilihan Strategi Pemeliharaan Alutsista Berbasis *Sustainability*

No	Kriteria	Penjelasan	Dimensi Sustainability	Sumber Referensi
1	Tingkat Keamanan	Tingkat keamanan berkaitan dengan perlindungan personel dan sistem dari kecelakaan, ledakan, atau kerusakan selama operasional dan pemeliharaan.	Sosial	[1], [3], [7], [12]
2	Kesiapan Operasional	Kemampuan alutsista untuk tersedia dan siap pakai saat dibutuhkan, termasuk keandalan sistem dan waktu respons terhadap tugas.	Sosial	[1], [3], [7], [9], [12]
3	Biaya	Total pengeluaran yang dibutuhkan untuk seluruh siklus pemeliharaan, termasuk penghematan biaya dan efisiensi sumber daya.	Ekonomi	[2], [3], [5], [6], [7], [10], [12]
4	Waktu Operasional	Lama waktu alutsista dapat beroperasi tanpa gangguan dan waktu siklus perawatan; semakin pendek waktu pemeliharaan, semakin tinggi nilai efektivitas.	Ekonomi	[3], [4], [5], [6], [8], [9], [12]
5	Penggunaan Teknologi	Tingkat integrasi teknologi terkini dalam proses perawatan, termasuk pemantauan berbasis sensor, digitalisasi, dan otomasi sistem perawatan.	Ekonomi	[2], [4], [5], [6], [10], [13], [15]
6	Ketersediaan Sumber Daya	Akses terhadap personel, suku cadang, peralatan, dan infrastruktur pendukung; faktor kunci dalam keberlangsungan operasi dan perawatan alutsista.	Ekonomi	[1], [4], [5], [7], [11], [14]
7	Dampak Lingkungan	Penilaian terhadap efek aktivitas pemeliharaan terhadap lingkungan seperti limbah berbahaya, emisi karbon, dan penggunaan energi; relevan dalam <i>green defense</i> .	Lingkungan	[13], [14], [15], [16], [17]

Sumber: Tim Penulis (2025) berdasarkan dari [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17].

Berdasarkan dari hasil analisis literatur pada **Tabel 1** diatas menunjukkan bahwa terdapat 7 kriteria strategis pemeliharaan alutsista berbasis *sustainability* yaitu Tingkat Keamanan (K1), Kesiapan Operasional (K2), Biaya (K3), Waktu Operasional (K4), Penggunaan Teknologi (K5), Ketersediaan Sumber Daya (K6), dan Dampak Lingkungan (K7). Hal ini menunjukkan kriteria “Biaya” dan “Waktu Operasional” merupakan yang paling sering digunakan dan menjadi prioritas utama dalam penelitian-

penelitian terdahulu. Hal ini ditunjukkan dari banyaknya kemunculan kriteria tersebut pada sumber penelitian terdahulu, kriteria “Biaya” muncul dalam tujuh referensi ([2], [3], [5], [6], [7], [10], [12]), dan kriteria “Waktu Operasional” muncul dalam tujuh referensi juga ([3], [4], [5], [6], [8], [9], [12]).

Tingginya tingkat kegunaan dua kriteria ini menunjukkan bahwa dalam lingkup operasional militer, efisiensi pemeliharaan dari sisi ekonomi dan waktu sangat menentukan tingkat kesiapan dan efektivitas alutsista. Biaya yang dikeluarkan selama siklus hidup perawatan harus tetap terkendali agar tidak membebani anggaran pertahanan secara keseluruhan. Di sisi lain, waktu operasional yang optimal memastikan ketersediaan alutsista secara berkelanjutan dalam mendukung kesiapan tempur.

Sementara itu, kriteria seperti “Penggunaan Teknologi” dan “Ketersediaan Sumber Daya” juga mendapatkan perhatian cukup tinggi karena berkaitan langsung dengan efektivitas implementasi strategi pemeliharaan di lapangan, terlebih pada era digitalisasi dan otomasi. Namun, dimensi lingkungan seperti kriteria “Dampak Lingkungan” relatif lebih sedikit menjadi perhatian, meskipun memiliki urgensi yang semakin meningkat dalam kerangka *green defense industry* ([13], [14], [15], [16], [17]).

Situasi ini menunjukkan bahwa meskipun aspek ekonomi dan teknis masih menjadi pertimbangan dominan, ada kebutuhan mendesak untuk mulai mengintegrasikan dimensi lingkungan secara lebih serius ke dalam pengambilan keputusan strategi pemeliharaan. Pendekatan *triple bottom line* (TBL) dalam *sustainability* yang mencakup aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan perlu dijadikan acuan dalam perumusan kebijakan pertahanan modern agar pemeliharaan alutsista tidak hanya tangguh dan efisien, tetapi juga bertanggung jawab terhadap lingkungan.

Dengan demikian, hasil identifikasi ini dijadikan untuk pengembangan kerangka kerja pemilihan strategi pemeliharaan berbasis AHP-TOPSIS pada tahap penelitian selanjutnya, di mana bobot kriteria dan alternatif strategi dapat dianalisis secara kuantitatif dan holistik.

4.2 Integrasi Konsep *Green Defense Industry*

Konsep *Green Defense Industry* merupakan pendekatan strategis yang menggabungkan kebutuhan pertahanan militer dengan prinsip-prinsip keberlanjutan, seperti efisiensi energi, pengurangan limbah, dan penggunaan teknologi ramah lingkungan. Dalam lingkup pemeliharaan alutsista di lingkungan PT XYZ, integrasi konsep ini memiliki makna penting karena berkaitan langsung dengan bagaimana kegiatan pemeliharaan dapat dilakukan secara berkelanjutan, efisien, dan tetap menjaga kesiapan tempur.

Green defense menekankan pentingnya mengurangi jejak karbon dan limbah berbahaya melalui inovasi proses dan teknologi perawatan seperti penggunaan sensor untuk deteksi dini kerusakan, pemanfaatan sistem digitalisasi logistik pemeliharaan, serta optimalisasi rantai pasok berbasis daur ulang. Dalam studi oleh Reis et al. [16], upaya penerapan ekonomi sirkular dalam sistem militer di Eropa ditunjukkan mampu memperpanjang umur sistem pertahanan sekaligus mengurangi beban lingkungan secara signifikan. Oleh karena itu, strategi pemeliharaan alutsista PT XYZ yang mendukung *green defense* harus mempertimbangkan faktor-faktor lingkungan sejajar dengan aspek teknis dan ekonomi.

Kriteria seperti dampak lingkungan, biaya, penggunaan teknologi, dan ketersediaan sumber daya menjadi pilar utama dalam integrasi ini. Strategi pemeliharaan yang tidak memperhitungkan keberlanjutan dapat berisiko tidak hanya secara teknis-operasional, tetapi juga dari sisi kebijakan lingkungan dan legitimasi sosial dalam lingkup pertahanan modern [13][14][15]. Dengan kata lain, *green maintenance* bukan lagi sekadar pilihan, melainkan keharusan untuk menjamin ketahanan alutsista secara berkelanjutan.

Terdapat beberapa elemen penting yang memperkuat urgensi implementasi pendekatan berkelanjutan ini.

1. Studi Kasus: Pemusnahan Amunisi di Garut

Kejadian meledaknya gudang amunisi Kodam III/Siliwangi di Garut pada Maret 2024 menyoroti kelemahan sistemik dalam manajemen pemeliharaan dan pemusnahan logistik militer yang belum sepenuhnya mengadopsi prinsip keberlanjutan dan pengelolaan risiko lingkungan. Ledakan yang menimbulkan kepanikan warga dan kerugian lingkungan tersebut menunjukkan bahwa prosedur pemusnahan amunisi using masih belum didukung oleh sistem *risk management* berbasis *green logistics*.

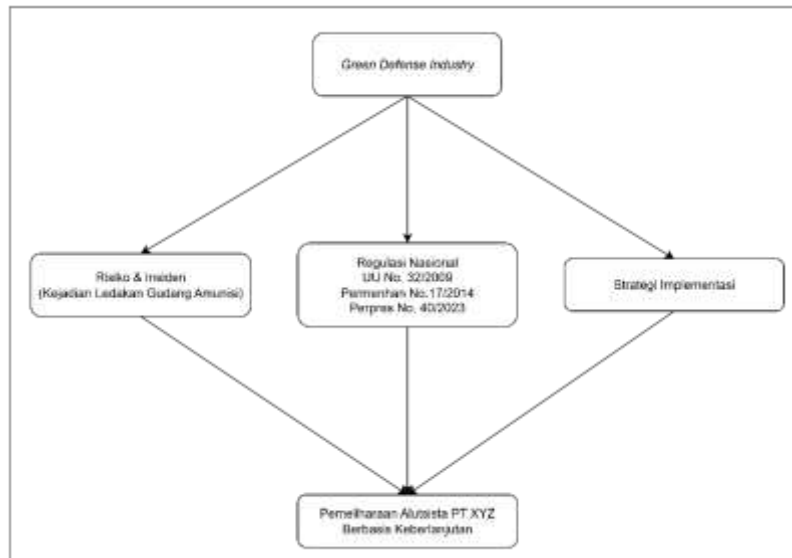
Menurut Vanzetta et al. [19], pengambilan keputusan operasional dalam militer harus mempertimbangkan faktor risiko multidimensional, termasuk dampak lingkungan dan sosial. Dengan pendekatan

2. Integrasi dengan Regulasi Nasional

Penerapan prinsip *green defense* dalam sistem pemeliharaan alutsista PT XYZ sejalan dengan berbagai regulasi nasional, seperti:

- a. Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup yang mewajibkan setiap kegiatan strategis termasuk sektor pertahanan untuk melakukan Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL). Dalam lingkup pertahanan, kegiatan seperti pemeliharaan senjata, pembangunan fasilitas militer, dan pembuangan amunisi memiliki potensi dampak lingkungan signifikan sehingga wajib menyusun dokumen AMDAL [20][21]. Implementasi ini sejalan dengan pendekatan *green defense*, sebagaimana disarankan oleh *Art: Greening the Armies* dan praktik NATO tentang *environmental management* [17][18].
 - b. Peraturan Menteri Pertahanan Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2014 tentang Pedoman Umum Pemeliharaan Alat Peralatan Pertahanan dan Keamanan yang meskipun belum secara eksplisit mengatur soal keberlanjutan, Permenhan ini menyediakan ruang terbuka untuk integrasi prinsip keberlanjutan dalam proses pemeliharaan. Beberapa penelitian menekankan pentingnya mengadaptasi standar teknis pemeliharaan agar selaras dengan prinsip berkelanjutan, seperti efisiensi energi dan minimisasi limbah berbahaya [2][7].
 - c. Perpres No. 40 Tahun 2023 tentang Percepatan Transisi Peraturan ini menegaskan perlunya seluruh lembaga negara, termasuk militer untuk mendukung transisi ke energi rendah karbon. Ini dapat diimplementasikan dalam kegiatan pemeliharaan alutsista melalui:
 - Penggunaan teknologi pemantauan konsumsi energi;
 - Pengurangan bahan bakar fosil dalam sistem uji coba dan transportasi internal;
 - Pelaporan emisi berkala pada unit logistik dan gudang amunisi.Penelitian oleh Narkhede et al. (2024) menunjukkan bahwa tekanan global terhadap *triple bottom line* mendorong transformasi operasional pada sektor industri dan pertahanan secara bersamaan [14] [15].
Implementasi kebijakan ini dalam kegiatan pemeliharaan alutsista dapat diperkuat melalui perumusan SOP teknis yang mencakup audit energi, pelaporan emisi, dan pengelolaan limbah logistik secara sistematis.
3. Strategi Implementasi *Green Defense Maintenance*
- Beberapa strategi implementasi dapat diterapkan untuk mengarah pada sistem pemeliharaan militer yang berkelanjutan, sebagaimana didukung oleh literatur penelitian terdahulu [14]-[17]:
- Desain ulang proses pemeliharaan agar lebih hemat energi dan minim limbah, termasuk pemanfaatan *predictive maintenance* berbasis sensor dan data analitik.
 - Penggantian material berbahaya dengan alternatif ramah lingkungan dalam proses perawatan dan pembersihan komponen alutsista.
 - Digitalisasi sistem pemeliharaan menggunakan teknologi *IoT* dan *CMMS (Computerized Maintenance Management Systems)* yang mampu memantau penggunaan energi dan jejak karbon (*carbon footprint*) dari kegiatan operasional.
 - Pelatihan personel teknis mengenai prinsip dasar *green maintenance* dan penyusunan indikator kinerja berbasis dimensi keberlanjutan (*triple bottom line*).
- Upaya-upaya tersebut selaras dengan tren internasional dalam pengembangan industri pertahanan hijau (*green defense industry*) seperti yang dilakukan di Uni Eropa [16] dan NATO [17], di mana peningkatan kesiapan tempur tidak boleh lagi mengabaikan keberlanjutan lingkungan.

Pada **Gambar 2** di bawah merupakan integrasi *Green Defense Industry* dalam Pemeliharaan Alutsista. Diagram ini menjelaskan bagaimana tiga elemen penting, risiko & insiden, regulasi nasional, dan strategi implementasi menjadi pendorong utama transformasi menuju pemeliharaan alutsista yang berkelanjutan. Semua faktor ini mengarah pada terciptanya praktik pemeliharaan di PT yang lebih aman, efisien, dan ramah lingkungan.



Gambar 2. Diagram Integrasi *Green Defense Industry* dalam Pemeliharaan Alutsista
Sumber: Tim Penulis, 2025

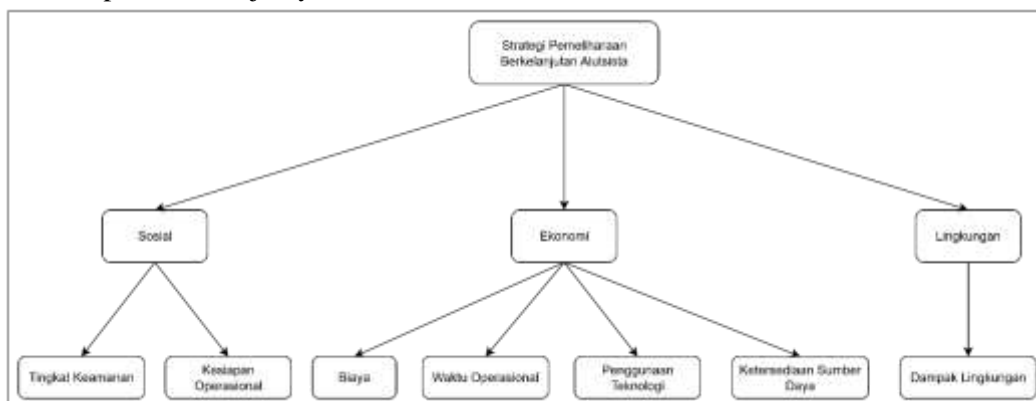
4.3 Pembentukan Struktur Hierarki AHP

Dalam penelitian ini, pembentukan struktur hierarki AHP dilakukan sebagai langkah awal untuk mengidentifikasi prioritas kriteria dalam strategi pemeliharaan alutsista yang berkelanjutan. Pendekatan AHP (*Analytic Hierarchy Process*) dipilih karena mampu menangani masalah pengambilan keputusan multikriteria yang kompleks, termasuk dalam lingkup pertahanan yang melibatkan banyak faktor teknis dan strategis.

Struktur hierarki disusun dalam tiga level. Level 1 adalah tujuan utama, yaitu *“Pemilihan Strategi Pemeliharaan Alutsista Berbasis Sustainability di PT XYZ”*. Level 2 mencakup tiga dimensi keberlanjutan (*sustainability*) berdasarkan pendekatan *Triple Bottom Line*, yaitu dimensi Sosial, Ekonomi, dan Lingkungan. Ketiga dimensi ini merepresentasikan tujuan pembangunan berkelanjutan yang kini mulai diarusutamakan ke dalam sektor pertahanan, sebagaimana ditegaskan *Council of the European Union* [19]. Selanjutnya, Level 3 berisi tujuh kriteria utama hasil penggabungan dari literatur terdahulu, yaitu:

- a. Tingkat Keamanan
- b. Kesiapan Operasional
- c. Biaya
- d. Waktu Operasional
- e. Penggunaan Teknologi
- f. Ketersediaan Sumber Daya
- g. Dampak Lingkungan

Setiap kriteria ini dipetakan ke dalam dimensi yang relevan: misalnya, Dampak Lingkungan secara langsung masuk ke dimensi lingkungan, sedangkan Biaya dan Waktu Operasional lebih erat kaitannya dengan dimensi ekonomi. Pemisahan ini dilakukan untuk mendukung analisis yang lebih sistematis dan terarah pada tahap AHP selanjutnya.



Gambar 3. Diagram Struktur Hierarki AHP Pemeliharaan Alutsista Berbasis *Sustainability*
Sumber: Tim Penulis, 2025

Berdasarkan pada **Gambar 3** diatas merupakan diagram struktur hierarki AHP untuk menentukan strategi pemeliharaan berkelanjutan alutsista di PT XYZ dengan mempertimbangkan prinsip-prinsip dari *green defense industry*.

1. Level 1 (Tujuan)

Di puncak hierarki terdapat tujuan utama, yaitu “Menentukan Strategi Pemeliharaan Berkelanjutan Alutsista PT XYZ”. Ini adalah hasil akhir yang ingin dicapai, yakni strategi tidak hanya efektif secara operasional, tetapi juga efisien secara ekonomi dan bertanggung jawab terhadap lingkungan.

2. Level 2 (Dimensi Keberlanjutan)

Tujuan tersebut didukung oleh tiga dimensi utama keberlanjutan yang bersumber dari konsep *Triple Bottom Line*, yaitu [13][14][15]:

- a. Sosial, terkait dengan dampak terhadap personel dan organisasi.
- b. Ekonomi, terkait dengan efisiensi biaya, efektivitas pemeliharaan, dan optimalisasi sumber daya.
- c. Lingkungan, terkait dengan pengaruh terhadap kondisi ekologis dan pengurangan dampak lingkungan negatif.

3. Level 3 (Kriteria Strategis)

Setiap dimensi terdiri dari beberapa kriteria yang relevan, diperoleh dari proses penggabungan dari literatur penelitian terdahulu. Kriteria tersebut meliputi:

- a. Sosial
 - Tingkat Keamanan: menjaga keselamatan personel dan fasilitas dari risiko teknis dan insiden.
 - Kesiapan Operasional: kemampuan alutsista untuk selalu siap digunakan saat dibutuhkan.
- b. Ekonomi
 - Biaya: efisiensi pembiayaan dalam seluruh siklus pemeliharaan.
 - Waktu Operasional: durasi efektif dalam menjalankan tugas tanpa adanya gangguan.
 - Penggunaan Teknologi: pemanfaatan teknologi modern dalam menunjang efisiensi perawatan.
 - Ketersediaan Sumber Daya: mencakup personel, peralatan, dan logistik pendukung.
- c. Lingkungan
 - Dampak Lingkungan: meliputi emisi, limbah, dan penggunaan energi dalam proses pemeliharaan.

Pentingnya pembentukan struktur hierarki ini juga diperkuat oleh temuan Vanzetta et al. (2024), yang dalam studi bibliometriknya menekankan bahwa penggunaan metode MCDA (termasuk AHP) dalam lingkungan militer paling efektif jika diawali dengan identifikasi struktur hierarki yang kuat dan sesuai konteks strategis masing-masing organisasi .

Dengan menyusun struktur hierarki hingga level kriteria, penelitian ini menyediakan landasan yang kuat bagi proses selanjutnya yaitu pembobotan antar kriteria dan analisis prioritas strategi menggunakan metode AHP dan TOPSIS. Langkah ini juga mendukung pengambilan keputusan berbasis data dan sistematis yang selaras dengan praktik manajemen pertahanan modern dan prinsip *green defense*.

5. Kesimpulan

Penelitian ini dilakukan untuk merumuskan kriteria-kriteria penting dalam sistem pemeliharaan alutsista yang berorientasi pada keberlanjutan di PT XYZ. Langkah ini bertujuan sebagai dasar awal dalam pengembangan model pengambilan keputusan multikriteria berbasis AHP-TOPSIS. Melalui kajian terhadap 17 literatur ilmiah yang relevan, diperoleh tujuh kriteria utama yang dianggap paling berpengaruh, yaitu: tingkat keamanan, kesiapan operasional, biaya, waktu operasional, penggunaan teknologi, ketersediaan sumber daya, dan dampak lingkungan. Kriteria-kriteria ini kemudian dikelompokkan ke dalam tiga dimensi utama keberlanjutan, yaitu sosial, ekonomi, dan lingkungan, yang mencerminkan prinsip *triple bottom line* dalam pengelolaan sistem pertahanan modern.

Struktur hierarki AHP yang disusun pada studi ini belum memuat alternatif strategi, karena fokus penelitian masih terbatas pada proses identifikasi dan klasifikasi kriteria. Meski demikian, struktur ini telah membentuk kerangka konseptual yang kokoh untuk mendukung tahap-tahap selanjutnya dalam pengembangan sistem pengambilan keputusan yang lebih komprehensif. Dengan mempertimbangkan arah pengembangan industri pertahanan yang semakin berorientasi pada efisiensi dan keberlanjutan, temuan ini menjadi relevan dalam mendukung prinsip *green defense industry* di Indonesia.

Karena penelitian ini masih bersifat konseptual dan belum melibatkan pakar secara langsung, maka diperlukan validasi lebih lanjut terhadap kriteria yang telah diidentifikasi. Validasi ini penting untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan kelak benar-benar mencerminkan kebutuhan, konteks operasional, dan prioritas strategis yang dihadapi oleh organisasi seperti PT XYZ.

6. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan identifikasi kriteria yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diajukan adalah:

1. Melakukan validasi kriteria yang telah diidentifikasi melalui wawancara dengan pakar atau penyebaran kuesioner berbobot. Langkah ini diperlukan untuk memperoleh nilai perbandingan berpasangan antar kriteria yang akan digunakan dalam proses pembobotan AHP.
2. Mengembangkan model AHP-TOPSIS secara penuh, dengan melibatkan alternatif strategi pemeliharaan yang kontekstual dan relevan dengan karakteristik aset pertahanan di PT XYZ. Hal ini memungkinkan proses pengambilan keputusan yang lebih sistematis dan berbasis data.
3. Mendorong pembentukan tim evaluasi keberlanjutan internal di PT XYZ, yang dapat menjadikan struktur kriteria dari penelitian ini sebagai dasar dalam menyusun kebijakan pemeliharaan jangka panjang yang berorientasi masa depan.
4. Mengintegrasikan perspektif *green defence industry* secara eksplisit dalam seluruh tahapan pengambilan keputusan strategis di bidang pemeliharaan. Upaya ini penting agar aspek lingkungan tidak hanya menjadi pelengkap, tetapi menjadi bagian integral dari kebijakan pertahanan berkelanjutan.

Dengan menerapkan langkah-langkah tersebut, hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya menjadi kontribusi konseptual, tetapi juga dapat diimplementasikan secara praktis untuk memperkuat sistem pemeliharaan alutsista nasional yang lebih adaptif, efisien, dan ramah lingkungan.

7. Referensi

- [1] E. Nugraha, "Peran Depo Pemeliharaan Dan Implikasinya Terhadap Ketahanan Alutsista Arhanud (Studi di Depo Pemeliharaan Sistem Senjata Arhanud Kota Batu Jawa Timur)," *Jurnal Ketahanan Nasional*, vol. 28, no. 2, pp. 161-184, 2022.
- [2] N. Hemmati, M. R. Galankashi, D. Imani and F. M. Rafiei, "An integrated fuzzy-AHP and TOPSIS approach for maintenance policy selection," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 37, no. 9/10, pp. 1275-1299, 2020.
- [3] I. W. Wicaksono, P. Syamrahmadi, A. Faisol and A. Susilo, "Determination of Depot Level Maintenance at Warship using Analytical Hierarchy Process (AHP) and TOPSIS Method," *Journal of Defense Resources Management*, vol. 12, no. 2 (23), pp. 61-82, 2021.
- [4] D. Panchal and D. Kumar, "Maintenance decision-making for power generating unit in thermal power plant using combined fuzzy AHP-TOPSIS approach," *Int. J. Operational Research*, vol. 29, no. 2, pp. 248-272, 2017.
- [5] T. Gedikli and B. C. Ervural, "Selection of Optimum Maintenance Strategy Using Multi-Criteria Decision Making Approaches," *Proc. Global Joint Conf. Ind. Eng. Appl. Areas*, pp. 156-170, 2020.
- [6] I. P. d. A. Costa, A. P. d. A. Costa, A. M. Sanseverino, C. F. S. Gomes and M. d. Santos, "Bibliometric Studies on Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Methods Applied in Military Problems," *Pesquisa Operacional*, vol. 42, pp. 1-26, 2022.
- [7] B. B. Septyanto, I. N. Putra and A. Sudiarso, "Analytical Hierarchy Process and TOPSIS Approach to Strategy Determination of Depo Level Maintenance for Submarine," *Journal of Defense Resources Management*, vol. 14, no. 1 (26), pp. 79-96, 2023.
- [8] I. Emovon, "Ship System Maintenance Strategy Selection based on DELPHI-AHP-TOPSIS Methodology," *World Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 252-260, 2016.
- [9] C. H. Liu and C.-W. R. Lin, "The Comparative of the AHP TOPSIS Analysis was Applied for the Commercialization Military Aircraft Logistic Maintenance Establishment," *International Business Management*, vol. 10, no. 4, pp. 6428-6432, 2016.
- [10] G. D. Bona, D. Falcone, A. Forcina, L. Silvestri, F. D. Carlo and M. M. Abaei, "A Hybrid Multi-Criteria Decision Decision Model (HMCDDM) based on AHP and TOPSIS analysis to evaluate Maintenance Strategy," *Proc. EMMS*, pp. 396-406, 2021.

- [11] D. D. A. Golec, Y. D. D. F. Gurbuz and Y. D. D. E. Senyigit, "Determination of Best Military Cargo Aircraft with Multi-Criteria Decision-Making Techniques," *MANAS Journal of Social Studies*, vol. 5, no. 5, pp. 87-101, 2016.
- [12] D. Dukic, I. Petrovic, D. Bozanic and B. Delibasic, "Selection of Unemployed Aircraft for Training of Small-Range Aircraft Defense System AHP-TOPSIS Optimization Methods," *Yugoslav Journal of Operations Research*, vol. 32, no. 3, pp. 389-406, 2022.
- [13] I. Nica, N. Chirita and I. Georgescu, "Triple Bottom Line in Sustainable Development; A Comprehensive Bibliometric Analysis," *Sustainability*, vol. 17, no. 5, pp. 1-31, 2025.
- [14] B. Tundys and T. Wisniewski, "Triple bottom line aspects and sustainable supply chain resilience; A structural equation modelling approach," *Frontiers in Environmental Science*, pp. 1-14, 9 May 2023.
- [15] G. Narkhede, V. Dohale and Y. Mahajan, "Darker side of industry 4.0 and its impact on triple-bottom-line sustainability," *Sustainable Development*, vol. 32, no. 6, pp. 5999-6016, 2024.
- [16] J. Reis, D. P. Rosado, Y. Cohen, C. Pousa and A. Cavalieri, "Green Defense Industries in the European Union; The Case of the Battle Dress Uniform for Circular Economy," *Sustainability*, vol. 14, no. 2, pp. 1-15, 2022.
- [17] O. Colak, S. E. G. Ozuyar and O. F. Bolukbasi, "Asymmetric Effects of the Defense Burden on Environmental Degradation; Evidence from NATO Countries," *Sustainability*, vol. 15, no. 1, pp. 1-17, 2022.
- [18] C. o. T. E. U. G. S. o. t. Council, "Greening the armies," *Luxembourg: Publications Office of the European Union*, 2024.
- [19] M. Vanzetta, C. F. S. Gomes, M. Santos, A. d. O. Alves, E. H. Kojima, M. P. R. Lima da Silva and T. Pires, "Bibliometric Study on Multicriteria Decision Analysis (MCDA) Applied to the Selection of Operational Means in a Military Environment," *Procedia Computer Science*, vol. 242, pp. 821-828, 2024.
- [20] G. Widjaja and A. , "Implementasi Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 Tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Terhadap Pelaku Pengelolaan Limbah B3 Yang Tidak Memiliki Izin: Studi Kasus Putusan Nomor 2132 K/Pid.Sus-LH/2016," *Jurnal Riset Ilmiah*, vol. 1, no. 4, pp. 243-251, 2024.
- [21] R. R. Aulia Nasution and I. Triadi, "Implementasi Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL) Dalam Mencegah Kerusakan Lingkungan Berdasarkan Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 Tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup," *Cendekia: Jurnal Hukum, Sosial dan Humaniora*, vol. 3, no. 2, pp. 1119-1126, 2025.