

ATRISI MILITER DALAM PERENCANAAN OPERASI MILITER ANALISIS KOMPREHENSIF MODEL MATEMATIKA UNTUK ATRISI PERSONEL DAN LOGISTIK

Andri Gandhy¹, Suroso², Ronny³, Samsul Bahri⁴, Muchammad⁵,
Kurniawan⁶, Supriyanto Kemal⁷, Kusuma Safarie⁸

¹Sekolah Tinggi Ilmu Ekonomi Harapan Bangsa; ^{2,3,4,5}Binus University;
^{6,7,8}National Air And Space Power Of Indonesia
^{1,2,3}ronny.bahri@binus.ac.id; ^{4,5}Muchammadfurqon10@gmail.com;
^{6,7,8}ikeo.santai@gmail.com;

Abstrak — Penelitian ini bertujuan untuk menyajikan analisis komprehensif tentang model matematika atrisi militer dengan fokus pada atrisi personel dan logistik dalam konteks perencanaan operasi militer modern. Penelitian ini mengintegrasikan model teori klasik seperti persamaan Lanchester dengan sistem kontemporer seperti CALAPER (*Campaign Level Ammunition and Petroleum Expenditure Rates*) untuk memberikan kerangka analitis yang holistik. Metodologi penelitian meliputi analisis literatur ekstensif, pengembangan model matematika terintegrasi, dan implementasi skenario operasional realistis untuk validasi model. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi model atrisi personel dan logistik memberikan prediksi yang lebih akurat terhadap efektivitas operasional dibandingkan pendekatan parsial. Model yang dikembangkan mampu memprediksi tingkat atrisi dengan akurasi tinggi dan memberikan wawasan strategis untuk optimasi alokasi sumber daya. Implikasi praktis dari penelitian ini mencakup peningkatan akurasi perencanaan operasi, optimasi alokasi sumber daya, dan pengurangan risiko operasional melalui prediksi atrisi yang lebih baik.

Kata kunci: Atrisi militer, perencanaan operasi, model Lanchester, atrisi personel, atrisi logistik, CALAPER.

Abstrak — This study aims to present a comprehensive analysis of mathematical models of military attrition, focusing on personnel and logistics attrition in the context of modern military operations planning. This study integrates classical theoretical models such as the Lanchester equation with contemporary systems such as CALAPER (*Campaign Level Ammunition and Petroleum Expenditure Rates*) to provide a holistic analytical framework. The research methodology includes extensive literature analysis, development of an integrated mathematical model, and implementation of realistic operational scenarios for model validation. The results show that the integration of personnel and logistics attrition models provides more accurate predictions of operational effectiveness than partial approaches. The developed model is capable of predicting attrition rates with high accuracy and provides strategic insights for optimizing resource allocation. Practical implications of this study include improving the accuracy of operations planning, optimizing resource allocation, and reducing operational risk through better attrition prediction.

Keywords: Military attrition, operations planning, Lanchester model, personnel attrition, logistics attrition, CALAPER.

1. PENDAHULUAN

Perencanaan operasi militer modern menghadapi kompleksitas yang semakin meningkat dalam era konflik kontemporer. Salah satu aspek paling kritis dalam perencanaan tersebut adalah pemahaman dan prediksi atrisi militer, yang mencakup pengurangan kemampuan tempur melalui kehilangan personel, konsumsi logistik, dan degradasi peralatan. Atrisi militer bukan hanya fenomena yang terjadi selama pelaksanaan operasi, tetapi juga faktor determinan yang harus diperhitungkan secara akurat dalam fase perencanaan untuk memastikan keberhasilan misi dan keberlanjutan operasional. Konsep atrisi militer telah berkembang secara signifikan sejak diperkenalkan oleh Frederick William Lanchester pada tahun 1916 melalui persamaan diferensial yang menggambarkan dinamika pertempuran. Namun, kompleksitas operasi militer modern memerlukan pendekatan yang lebih komprehensif yang tidak hanya memperhatikan atrisi personel, tetapi juga mengintegrasikan aspek logistik, teknologi, dan faktor operasional lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan kerangka analitis yang holistik untuk memahami dan memprediksi atrisi militer dalam konteks perencanaan operasi militer kontemporer. Pentingnya penelitian ini terletak pada kebutuhan mendesak untuk meningkatkan akurasi perencanaan operasi militer di era modern. Operasi militer kontemporer dicirikan oleh kompleksitas yang tinggi, ketergantungan pada teknologi canggih, dan kebutuhan akan presisi dalam alokasi sumber daya. Kesalahan dalam prediksi atrisi dapat mengakibatkan kegagalan misi, kerugian personel yang tidak perlu, dan pemborosan sumber daya yang signifikan. Penelitian ini mengadopsi pendekatan interdisipliner yang menggabungkan teori matematika, analisis operasional, dan studi kasus historis untuk mengembangkan model atrisi yang komprehensif. Fokus utama penelitian adalah pada dua aspek kritis atrisi militer: atrisi personel dan atrisi

logistik. Atrisi personel mencakup kehilangan sumber daya manusia melalui berbagai mekanisme seperti korban tempur, penyakit, dan faktor psikologis. Atrisi logistik meliputi konsumsi amunisi, bahan bakar, dan degradasi peralatan yang mempengaruhi kemampuan operasional unit militer. Model ini tidak hanya memberikan estimasi kuantitatif tentang tingkat atrisi yang diharapkan, tetapi juga menyediakan kerangka analitis untuk optimasi alokasi sumber daya dan mitigasi risiko operasional. Selain itu, penelitian ini juga menyajikan implementasi praktis model melalui skenario operasional yang realistis, memberikan validasi empiris terhadap keakuratan dan kegunaan model yang dikembangkan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Tinjauan literatur. Perkembangan Historis Teori Atrisi Militer. Konsep atrisi militer memiliki akar historis yang panjang, namun formalisasi matematisnya baru dimulai pada awal abad ke-20. Frederick William Lanchester, seorang insinyur dan matematikawan Inggris, memperkenalkan pendekatan kuantitatif pertama untuk menganalisis dinamika pertempuran melalui sistem persamaan diferensial yang kemudian dikenal sebagai persamaan Lanchester. Kontribusi Lanchester sangat revolusioner karena memberikan dasar matematis untuk memahami bagaimana kekuatan militer berinteraksi dan mengalami atrisi dalam konteks pertempuran. Persamaan Lanchester dikembangkan dalam dua varian utama: *Square Law* dan *Linear Law*. *Square Law*, yang juga dikenal sebagai "*modern combat*" model, mengasumsikan bahwa setiap kombatan dapat menargetkan dan menyerang lawan secara efektif, menghasilkan tingkat atrisi yang proporsional dengan ukuran kekuatan lawan. *Linear Law*, atau "*ancient combat*" model, berlaku untuk situasi di mana pertempuran terjadi dalam formasi terbatas, seperti pertempuran tradisional dengan senjata tajam. Kedua model ini memberikan wawasan fundamental

tentang prinsip konsentrasi kekuatan, yang menjadi salah satu prinsip taktis paling penting dalam doktrin militer modern. Perkembangan selanjutnya dalam teori atrisi militer didorong oleh kebutuhan untuk memahami kompleksitas peperangan modern. Trevor Dupuy, seorang sejarawan militer dan analis, memberikan kontribusi signifikan melalui definisi komprehensif tentang atrisi militer. Menurut Dupuy, atrisi adalah "pengurangan jumlah personel, senjata, dan peralatan dalam unit militer, organisasi, atau kekuatan" yang lebih spesifik didefinisikan sebagai "perbedaan antara kerugian dan kembali bertugas". Definisi ini penting karena mengakui bahwa atrisi bukan hanya tentang kehilangan absolut, tetapi juga tentang kemampuan untuk memulihkan dan mempertahankan kekuatan operasional. Penelitian kontemporer telah memperluas pemahaman tentang atrisi militer dengan mengintegrasikan aspek-aspek yang sebelumnya diabaikan. Kress (2020) dalam studinya tentang model Lanchester untuk peperangan tidak teratur menunjukkan bahwa model klasik perlu diadaptasi untuk mengakomodasi karakteristik unik konflik modern, termasuk asimetri informasi, peran sipil, dan dinamika multilateral. Penelitian ini menunjukkan bahwa atrisi dalam konflik modern tidak hanya dipengaruhi oleh faktor kinetik, tetapi juga oleh faktor informasi, psikologis, dan sosial-politik.

2.2. Model Atrisi Personel dalam Literatur. Atrisi personel merupakan aspek paling kritis dalam operasi militer karena berkaitan langsung dengan sumber daya manusia yang tidak dapat dengan mudah digantikan dalam jangka pendek. Studi *Personnel Attrition Rates (PAR)* yang dilakukan oleh *US Army Concepts Analysis Agency* memberikan kontribusi empiris yang signifikan dalam memahami pola atrisi personel dalam operasi tempur darat historis. Studi ini menganalisis data dari berbagai konflik untuk mengidentifikasi hubungan empiris antara ukuran kekuatan, durasi pertempuran, dan tingkat korban.

Penelitian PAR mengkategorikan atrisi personel menjadi tiga jenis utama: *Killed in Action (KIA)*, *Wounded in Action (WIA)*, dan *Captured or Missing in Action (CMIA)*. Kategorisasi ini penting karena setiap jenis atrisi memiliki implikasi operasional yang berbeda. Studi empiris menunjukkan bahwa tingkat atrisi personel sangat bervariasi tergantung pada faktor-faktor seperti intensitas pertempuran, jenis operasi, terrain, dan kualitas pelatihan. (Helmbold, 1995) dalam analisisnya terhadap operasi tempur darat historis menemukan bahwa terdapat korelasi yang kuat antara rasio kekuatan, durasi operasi, dan tingkat korban. Temuan ini memberikan dasar empiris untuk pengembangan model prediktif yang dapat digunakan dalam perencanaan operasi. Penelitian modern telah mengintegrasikan pendekatan probabilistik dan simulasi Monte Carlo untuk meningkatkan akurasi prediksi atrisi personel. Pendekatan ini mengakui bahwa atrisi personel memiliki komponen stokastik (pendekatan matematis) yang signifikan dan tidak dapat diprediksi dengan menggunakan model deterministik. Penggunaan distribusi probabilitas seperti Poisson untuk korban harian dan binomial untuk tingkat survival memberikan kerangka yang lebih realistis untuk pemodelan atrisi personel.

2.3. Sistem Calaper dan Atrisi Logistik. Sistem Calaper (*Campaign Level Ammunition and Petroleum Expenditure Rates*) yang dikembangkan oleh *US Army Concepts Analysis Agency* merupakan terobosan penting dalam quantifikasi atrisi logistik. Sistem ini menyediakan metodologi sistematis untuk mengestimasi konsumsi amunisi, bahan bakar, dan kerugian peralatan dalam operasi tingkat gabungan. Calaper terdiri dari tiga komponen utama: *Munitions Consumption (MCON)*, *Equipment Loss Consolidator (ELCON)*, dan *Fuel Consumption (FCON)*. MCON menghitung konsumsi amunisi berdasarkan jenis senjata, intensitas pertempuran, dan karakteristik target. Elcon memproyeksikan kerugian peralatan berdasarkan tingkat kerusakan historis dan

kondisi operasional. FCON mengestimasi kebutuhan bahan bakar berdasarkan jenis kendaraan, jarak operasi, dan tempo operasional. Keunggulan sistem Calaper terletak pada pendekatannya yang komprehensif dan berbasis data empiris. Sistem ini mengintegrasikan berbagai faktor yang mempengaruhi konsumsi logistik, termasuk intensitas operasi, jenis terrain, kondisi cuaca, dan karakteristik musuh. Selain itu, Calaper juga mempertimbangkan faktor-faktor operasional seperti tingkat pemeliharaan, efisiensi logistik, dan ketersediaan suku cadang. Penelitian terbaru telah memperluas konsep atrisi logistik untuk mencakup aspek-aspek modern seperti *cyber warfare*, *electronic warfare*, dan operasi informasi. Konsumsi sumber daya untuk sistem C4ISR (*Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance*) menjadi semakin signifikan dalam operasi modern.

2.4. Atrisi Logistik Udara. Konsumsi bahan bakar merupakan faktor dominan dalam perhitungan logistik udara, dengan pesawat tempur modern mengonsumsi ribuan liter bahan bakar per jam terbang. Konsumsi ini dapat meningkat secara signifikan dalam kondisi operasional yang menuntut, seperti terbang pada ketinggian rendah, melakukan manuver evasif, atau menggunakan afterburner. Selain bahan bakar, konsumsi amunisi dalam operasi udara juga memiliki karakteristik yang berbeda. Tidak seperti operasi darat di mana konsumsi amunisi dapat berlangsung secara kontinyu selama pertempuran, operasi udara umumnya melibatkan pelepasan amunisi dalam periode waktu yang relatif singkat selama engagement. Namun, jenis amunisi yang digunakan, seperti rudal udara-ke-udara atau rudal udara-ke-darat, memiliki biaya dan kompleksitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan amunisi konvensional. Faktor logistik lain yang kritis dalam operasi udara adalah ketersediaan suku cadang dan dukungan maintenance. Platform udara modern memerlukan maintenance yang

intensif dan reguler untuk mempertahankan tingkat keandalan yang tinggi. Rasio maintenance-to-flight hours untuk pesawat tempur modern dapat mencapai 20-40 jam maintenance untuk setiap jam terbang, tergantung pada jenis platform dan kondisi operasional.

2.5. Atrisi Personel dalam Operasi Udara. Atrisi personel dalam operasi udara memiliki karakteristik yang unik karena rasio personel-to-platform yang rendah dibandingkan dengan operasi darat. Setiap kehilangan pesawat umumnya berarti kehilangan satu atau dua personel (pilot dan/atau weapon systems officer), namun dampak operasional dari kehilangan ini dapat sangat signifikan karena tingkat pelatihan dan pengalaman yang diperlukan untuk menggantikan personel tersebut. Pelatihan pilot pesawat tempur modern memerlukan waktu bertahun-tahun dan biaya yang sangat tinggi. Kehilangan pilot berpengalaman tidak hanya berarti kehilangan personel, tetapi juga kehilangan institutional knowledge dan tactical expertise yang sulit digantikan dalam jangka pendek. Oleh karena itu, perhitungan atrisi personel dalam operasi udara harus mempertimbangkan tidak hanya jumlah kehilangan, tetapi juga dampak jangka panjang terhadap kemampuan operasional. Selain personel aircrew, operasi udara juga bergantung pada personel pendukung darat yang jumlahnya jauh lebih besar. Rasio personel pendukung terhadap aircrew dalam operasi udara modern dapat mencapai 20:1 atau lebih tinggi. Personel pendukung ini termasuk teknisi maintenance, personel logistik, intelligence analysts, dan berbagai spesialis lainnya yang diperlukan untuk mendukung operasi udara yang kompleks.

2.6. Integrasi Model Atrisi dalam Perencanaan Operasi. Integrasi model atrisi dalam perencanaan operasi militer merupakan tantangan yang kompleks karena melibatkan multiple stakeholders, berbagai tingkat perencanaan, dan ketidakpastian yang inheren dalam operasi militer. Literatur menunjukkan bahwa pendekatan

terbaik adalah menggunakan model atrisi sebagai alat bantu pengam bilan keputusan yang terintegrasi dengan sistem perencanaan operasi yang lebih luas. Pada tingkat strategis, model atrisi digunakan untuk mengevaluasi kelayakan operasi jangka panjang dan menentukan alokasi sumber daya makro. Pada tingkat operasional, model ini membantu dalam pengembangan konsep operasi dan penentuan fase-fase operasi. Pada tingkat taktis, model atrisi digunakan untuk optimasi penggunaan kekuatan dalam pertempuran langsung. Penelitian menunjukkan bahwa efektivitas model atrisi sangat bergantung pada kualitas data input, validasi model, dan kemampuan untuk mengadaptasi model terhadap kondisi operasional yang berubah. Validasi model melalui wawancara, simulasi, dan analisis *post-operation* menjadi kritis untuk memastikan akurasi dan relevansi model.

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

3.1. Pendekatan Penelitian. Penelitian ini mengadopsi pendekatan metode campuran (*mixed-methods*) yang menggabungkan analisis teoritis, pemodelan matematika, dan validasi empiris melalui simulasi skenario. Pendekatan ini dipilih untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan tidak hanya secara teori, tetapi juga praktis dan dapat diaplikasikan dalam konteks operasional nyata:

- Fase pertama, penelitian melibatkan analisis literatur komprehensif untuk mengidentifikasi state-of-the-art dalam teori atrisi militer dan mengidentifikasi gap dalam pengetahuan yang ada. Analisis literatur mencakup *review* terhadap publikasi akademik, laporan teknis militer, dan studi kasus historis dari berbagai konflik.
- Fase kedua, fokus pada pengembangan kerangka teori yang mengintegrasikan berbagai aspek atrisi militer. Kerangka ini dikembangkan melalui sintesis konsep-konsep yang ada dan pengembangan konsep-konsep baru yang diperlukan untuk mengatasi

kompleksitas operasi militer modern.

- Fase ketiga, melibatkan formulasi matematika dari kerangka teori menjadi model yang dapat diimplementasikan secara komputasional. Formulasi ini menggunakan kombinasi persamaan diferensial, model probabilistik, dan algoritma optimasi.
- Fase keempat, adalah implementasi model dalam bentuk *software* dan validasi melalui simulasi skenario operasional yang realistis. Validasi dilakukan dengan membandingkan output model dengan data historis dan penilaian ahli (*expert judgment*) operasional.

3.2. Pengembangan Model Matematika.

Pengembangan model matematika dalam penelitian ini mengikuti pendekatan modular yang memungkinkan integrasi berbagai komponen atrisi secara fleksibel. Setiap komponen atrisi dimodelkan sebagai modul terpisah yang dapat dikombinasikan untuk membentuk model yang lebih kompleks. Model dasar menggunakan *framework* persamaan diferensial yang diperluas dari model Lanchester klasik. *Framework* ini dipilih karena kemampuannya untuk menangkap dinamika temporal atrisi dan interaksi antara berbagai faktor yang mempengaruhi tingkat atrisi. Komponen stokastik diintegrasikan melalui penggunaan proses stokastik dan simulasi Monte Carlo. Pendekatan ini memungkinkan model untuk menangkap ketidakpastian yang inheren dalam operasi militer dan memberikan estimasi probabilistik terhadap *outcome* operasional. Validasi model dilakukan melalui beberapa pendekatan, termasuk *sensitivity analysis*, *crossvalidation* dengan data historis, dan *expert review*. *Sensitivity analysis* digunakan untuk mengidentifikasi parameter yang paling berpengaruh terhadap *output model*. *Crossvalidation* dengan data historis memberikan validasi empiris terhadap akurasi model. *Expert review* memastikan bahwa model sesuai dengan realitas operasional.

3.3. Model Lanchester yang Diperluas.

Model dasar atrisi personel dalam penelitian

ini didasarkan pada perluasan model Lanchester yang mengakomodasi kompleksitas operasi modern. Model klasik Lanchester *Square Law* dinyatakan dalam sistem persamaan diferensial:

$$dB/dt = -aR \times R(t); dR/dt = -aB \times B(t)$$

Dimana $B(t)$ dan $R(t)$ masing-masing merepresentasikan ukuran pasukan Biru dan Merah pada waktu t , sedangkan aR dan aB adalah koefisien atrisi yang disebabkan oleh masing-masing pihak. Model yang diperluas dalam penelitian ini mengintegrasikan faktor-faktor tambahan yang mempengaruhi tingkat atrisi:

$$dB/dt = -aR(t) \times R(t) \times fR(t) - \lambda B(t) \times B(t)$$

$$dR/dt = -aB(t) \times B(t) \times fB(t) - \lambda R(t) \times R(t)$$

Dimana:

- $aR(t)$ dan $aB(t)$ adalah koefisien atrisi yang dapat berubah seiring waktu

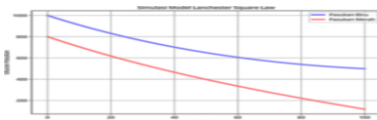
- $fR(t)$ dan $fB(t)$ adalah faktor efektivitas yang mempertimbangkan kondisi operasional

$\lambda B(t)$ dan $\lambda R(t)$ adalah tingkat atrisi non-combat (penyakit, kecelakaan, desersi).

Faktor efektivitas $f(t)$ dimodelkan sebagai fungsi dari multiple variabel:

$$f(t) = g(M(t), L(t), E(t), T(t))$$

Dimana $M(t)$ adalah moral unit, $L(t)$ adalah tingkat logistik, $E(t)$ adalah kondisi peralatan, dan $T(t)$ adalah faktor terrain dan cuaca.



3.4. Model Atrisi Personel Probabilistik.

Untuk menangkap ketidakpastian dalam atrisi personel, model deterministik diperluas dengan komponen probabilistik. Tingkat atrisi harian dimodelkan menggunakan distribusi Poisson:

$$P(X = k) = (\lambda^k \times e^{(-\lambda)}) / k!$$

Dimana λ adalah expected daily casualties yang dihitung berdasarkan:

$$\lambda = \text{Force Size} \times \text{Base Rate} \times \text{Intensity Factor} \times \text{Environmental Factor}$$

Base Rate dikalibrasi berdasarkan data historis untuk berbagai jenis operasi:

- KIA base rate = 0.02 (2% per hari untuk operasi intensitas tinggi)
- WIA base rate = 0.08 (8% per hari untuk operasi intensitas tinggi)

- CMIA base rate = 0.01 (1% per hari untuk operasi intensitas tinggi)
- Intensity_Factor memodifikasi base rate berdasarkan intensitas operasi:
 - Low intensity: 0.3
 - Medium intensity: 0.7
 - High intensity: 1.0
 - Very high intensity: 1.5

Environmental Factor mempertimbangkan kondisi operasional seperti terrain, cuaca, dan dukungan medis.

3.5. Model Atrisi Logistik CALAPER.

Model atrisi logistik didasarkan pada sistem CALAPER yang diperluas untuk mencakup berbagai jenis sumber daya. Konsumsi amunisi dimodelkan sebagai:

$$\text{Ammunition Consumption} = \sum (\text{Weapon} \times \text{Base Rate}_i \times \text{Intensity Multiplier} \times \text{Duration})$$

Dimana:

- Weapon adalah jumlah sistem senjata jenis i
- Base Rate adalah tingkat konsumsi dasar untuk senjata jenis i
- Intensity Multiplier adalah faktor yang bergantung pada intensitas operasi

Konsumsi bahan bakar dimodelkan sebagai: Fuel Consumption = $\sum (\text{Vehicle} \times \text{Base Rate} \times \text{Operational Tempo} \times \text{Duration})$

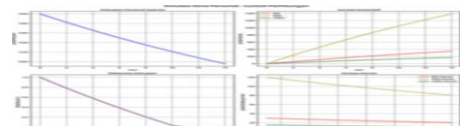
Dimana Operational Tempo adalah faktor yang menggambarkan intensitas penggunaan kendaraan bermotor, pesawat dan lainnya.

Kerugian peralatan dimodelkan menggunakan tingkat atrisi komposit:

$$\text{Equipment Loss Rate} = \text{Combat Loss Rate} + \text{Maintenance Loss Rate} + \text{Accident Loss Rate}$$

Dimana:

- Combat Loss Rate = $0.02 \times \text{Intensity Multiplier}$
- Maintenance Loss_Rate = 0.005
- (konstan) Accident Loss Rate = 0.001.



3.6. Model Atrisi Terintegrasi.

Model atrisi terintegrasi menggabungkan semua komponen atrisi dalam framework yang koheren. Efektivitas operasional keseluruhan dihitung sebagai:

Overall Effectiveness = $\alpha \times$ Personnel Effectiveness + $\beta \times$ Equipment Effectiveness + $\gamma \times$ Logistics_Sustainability

Dimana $\alpha + \beta + \gamma = 1$, dan bobot-bobot ini dapat disesuaikan berdasarkan jenis operasi.

Personnel Effectiveness dihitung sebagai:

Personnel Effectiveness = $(\text{Remaining Personnel} - \text{Degraded Personnel}) / \text{Initial Personnel}$

Equipment Effectiveness dihitung sebagai nilai rata-rata dari efektivitas berbagai jenis peralatan:

Equipment Effectiveness = $\sum (w_i \times \text{Remaining Equipment} / \text{Initial Equipment})$

Logistics_Sustainability dihitung berdasarkan rasio sumber daya yang tersedia terhadap kebutuhan operasional:

Logistics Sustainability = $\min (\text{Ammunition_Ratio}, \text{Fuel_Ratio}, \text{Supply_Ratio})$

3.7. Model Optimasi Alokasi Sumber Daya.

Untuk mendukung perencanaan operasi, model atrisi diintegrasikan dengan model optimasi untuk alokasi sumber daya. Fungsi objektif adalah memaksimalkan efektivitas operasional sambil meminimalkan atrisi:

Maximize: $f(x) = \sum w_i \times \text{Effectiveness}(x) - \sum c_j \times \text{Attrition}(x_j)$

Subject to:

$\sum x_i \leq \text{Total Resources}$ $x_i \geq 0$ for all i

Dimana x_i adalah alokasi sumber daya untuk aktivitas i , w_i adalah bobot kepentingan aktivitas i , dan c_j adalah cost dari atrisi jenis j .

3.8. Model Validasi dan Kalibrasi.

Validasi model dilakukan menggunakan multiple metrics:

Mean Absolute Error (MAE):

$\text{MAE} = (1/n) \times \sum |\text{Predicted} - \text{Actual}|$

Root Mean Square Error (RMSE):

$\text{RMSE} = \sqrt{(1/n) \times \sum (\text{Predicted} - \text{Actual})^2}$

Coefficient of Determination (R^2):

$R^2 = 1 - (\text{SS}_{\text{res}} / \text{SS}_{\text{tot}})$

Kalibrasi parameter dilakukan menggunakan metode Maximum Likelihood Estimation: $\theta^* = \arg\max \sum \log P(y_i | x_i, \theta)$

Dimana θ adalah vektor parameter yang akan dikalibrasi, dan $P(y_i | x_i, \theta)$ adalah likelihood dari observasi y_i given input x_i dan parameter θ .

3.9. Implementasi Model Dan Skenario Operasional

3.9.1 Implementasi model atrisi untuk operasi udara.

Adaptasi Model Lanchester untuk Operasi Udara. Model Lanchester klasik yang dikembangkan untuk operasi darat memerlukan adaptasi signifikan untuk dapat diterapkan pada operasi udara. Karakteristik fundamental operasi udara, seperti engagement yang terjadi dalam periode waktu yang singkat, mobilitas yang tinggi, dan ketergantungan pada teknologi sensor, memerlukan modifikasi terhadap asumsi dasar model Lanchester. Dalam konteks operasi udara, konsep "kekuatan" tidak hanya diukur dari jumlah platform, tetapi juga dari kemampuan sensor, persenjataan, dan sistem elektronik yang dimiliki. Sebuah pesawat tempur modern dengan sistem radar dan persenjataan yang canggih dapat memiliki efektivitas yang setara dengan beberapa platform yang lebih tua. Oleh karena itu, model yang diadaptasi menggunakan konsep "effective combat power" yang mempertimbangkan kualitas platform selain kuantitas. Koefisien atrisi dalam model yang diadaptasi tidak hanya bergantung pada jumlah platform musuh, tetapi juga pada faktor-faktor seperti efektivitas sistem pertahanan udara, kondisi cuaca, waktu operasi (siang/malam), dan tingkat electronic warfare. Setiap faktor ini memiliki pengaruh yang dapat dikuantifikasi terhadap tingkat kehilangan yang diharapkan. Tidak seperti operasi darat di mana atrisi terjadi secara kontinyu selama periode yang panjang, operasi udara melibatkan episode engagement yang diskrit dengan periode non-engagement di antaranya.

3.9.2. Model Atrisi Platform Udara.

Model atrisi platform udara yang dikembangkan menggunakan pendekatan probabilistik yang mempertimbangkan berbagai sumber kehilangan. Setiap jenis platform memiliki profil risiko yang berbeda berdasarkan peran operasional, karakteristik teknis, dan pola penggunaan dalam operasi. Untuk pesawat tempur yang berperan sebagai air superiority fighters, tingkat atrisi combat ditetapkan pada 0.8% per sortie dalam lingkungan pertempuran (contested).

Tingkat ini didasarkan pada asumsi bahwa platform ini akan menghadapi ancaman dari pesawat tempur musuh dan sistem pertahanan udara, namun memiliki kemampuan defensif yang baik dan beroperasi dengan dukungan peperangan elektronika (pernika) yang memadai. Pesawat serang multi-role memiliki tingkat atrisi yang lebih tinggi, yaitu 1.2% per sortie, karena sifat misi yang mengharuskan penetrasi ke dalam wilayah yang dipertahankan musuh. Platform ini lebih rentan terhadap sistem pertahanan udara ground-based dan memiliki exposure yang lebih tinggi selama fase attack. Model Konsumsi Logistik Udara Model konsumsi logistik untuk operasi udara dikembangkan berdasarkan karakteristik operasional masing-masing jenis platform. Pesawat tempur multi-role diasumsikan mengkonsumsi 2.500 liter bahan bakar per jam terbang dalam kondisi operasional normal. Konsumsi ini dapat meningkat hingga 50% dalam kondisi combat yang intensif, terutama ketika menggunakan afterburner atau melakukan manuver evasif yang agresif. Untuk misi dengan durasi rata-rata 3 jam, konsumsi total per sortie mencapai sekitar 7.500 liter. Pesawat serang multi-role memiliki konsumsi yang sedikit lebih tinggi, yaitu 3.000 liter per jam terbang, karena payload yang lebih berat dan profil misi yang lebih menuntut. Platform pembom strategis memiliki konsumsi yang jauh lebih tinggi, yaitu 8.000 liter per jam terbang, karena ukuran dan berat yang besar. Platform pendukung juga memiliki konsumsi yang signifikan. Tanker udara mengkonsumsi 6.000 liter per jam terbang, namun harus juga memperhitungkan bahan bakar yang ditransfer ke platform lain. AWACS mengkonsumsi 4.000 liter per jam terbang dengan durasi misi yang umumnya lebih panjang karena peran command and control yang kontinyu. Konsumsi amunisi dihitung berdasarkan loadout standar untuk setiap jenis platform dan misi. Pesawat tempur membawa rata-rata 2 rudal udara-ke-udara per sortie, sementara pesawat serang membawa 4 rudal udara-ke-darat atau 2 bom presisi. Platform pembom dapat membawa hingga 12 bom presisi atau 8

rudal udara-ke-darat per sortie.

3.9.3. Model Maintenance dan Availability.

Tingkat maintenance yang intensif yang diperlukan untuk memper tahankan tingkat keandalan platform. Model yang dikembangkan mempertimbangkan dampak maintenance terhadap availability platform untuk operasi. Setiap sortie mengakibatkan sejumlah platform masuk ke dalam *main tenance cycle*. Untuk pesawat tempur, diasumsikan 15% dari platform yang melakukan sortie akan memerlukan maintenance yang membuatnya tidak tersedia untuk sortie berikutnya. Untuk pesawat serang, angka ini meningkat menjadi 18% karena stress operasional yang lebih tinggi. Platform pembom memiliki tingkat *main tenance requirement* yang tertinggi, yaitu 20% persortie, karena kompleksitas sistem dan stress operasional yang signifikan. Platform pendukung memiliki tingkat yang lebih rendah, dengan tanker udara pada 12% dan AWACS pada 10%. Model juga mempertimbangkan *recovery rate dari main tenance*, di mana sejumlah platform keluar dari maintenance cycle setiap hari. *Recovery rate* diasumsikan 30% per hari, yang berarti platform yang masuk *main tenance* memiliki probabilitas 30% untuk kembali tersedia pada hari berikutnya.

3.9.4. Arsitektur Software. Arsitektur software terdiri dari lima komponen utama: *Data Management Layer*, *Model Engine*, *Simulation Frame work*, *Optimization Module*, dan *Visuali zation Interface*. *Data Management Layer* bertanggung jawab untuk mengelola input data, termasuk parameter operasional, data historis, dan konfigurasi skenario. Layer ini menggunakan struktur data yang efisien untuk mendukung akses cepat dan manipulasi data yang kompleks. *Model Engine* merupakan inti dari sistem yang mengimplementasikan semua formulasi matematika yang telah dikembangkan. *Engine* ini dirancang untuk mendukung eksekusi paralel dan dapat menangani skenario dengan kompleksitas tinggi. *Simulation Framework* menyediakan infra struktur untuk menjalankan simulasi

Monte Carlo dan analisis sensitivitas. *Framework* ini mendukung berbagai distribusi probabilitas dan metode sampling yang canggih. *Optimization Module* mengimplementasikan algoritma optimasi untuk alokasi sumber daya dan perencanaan operasi. Module ini menggunakan kombinasi metode deterministik dan heuristik untuk menangani masalah optimasi yang kompleks. *Visualization Interface* menyediakan tools untuk visualisasi hasil simulasi dan analisis. Interface ini mendukung berbagai jenis grafik dan dashboard interaktif untuk membantu interpretasi hasil.

3.9.5. Skenario 1: Operasi Serangan Urban "Thunder Strike" Skenario pertama yang dianalisis adalah operasi serangan urban untuk merebut kota strategis yang dipertahankan musuh. Operasi ini dinamakan "Thunder Strike" dan dirancang untuk mendemonstrasikan aplikasi model atrisi dalam konteks *urban warfare* yang kompleks. Parameter operasional untuk skenario ini meliputi kekuatan awal 2.500 personel yang terdiri dari unit infanteri, armor, dan dukungan. Komposisi kekuatan mencakup 2.200 senjata ringan, 30 sistem artileri, 45 tank utama, dan 15 sistem rudal. Dukungan kendaraan terdiri dari 80 kendaraan infanteri, 45 tank tempur utama, 20 pesawat dukungan udara, dan 60 kendaraan logistik. Intensitas operasi diklasifikasikan sebagai "*very high*" dengan tempo operasional 1.8, mencerminkan karakteristik *urban warfare* yang sangat intensif. Durasi operasi direncanakan selama 21 hari dengan asumsi bahwa kota dapat direbut dalam periode tersebut. Hasil simulasi menunjukkan tingkat atrisi yang sangat tinggi, dengan efektivitas personel menurun menjadi 0% pada akhir operasi. Total korban mencapai 5.681 personel (227.24% dari kekuatan awal), dengan 951 personel tersisa yang masih dapat beroperasi. Tingkat korban yang melebihi 100% dari kekuatan awal menunjukkan bahwa model memperhitungkan personel pengganti dan rotasi selama operasi. Konsumsi logistik dalam operasi ini sangat signifikan, dengan konsumsi amunisi

mencapai 6.93 juta peluru senjata ringan, 18.900 peluru artileri, 14.175 peluru tank, dan 472 rudal. Total konsumsi bahan bakar mencapai 1.75 juta liter, dengan kontribusi terbesar dari dukungan udara (756.000 liter) dan operasi tank (510.300 liter). Kerugian peralatan mencapai tingkat yang kritis dengan 96.6% dari semua kategori peralatan mengalami kerusakan atau kehilangan (*total loss*). Tingkat kerugian yang sangat tinggi ini mencerminkan intensitas *urban warfare* dan paparan yang tinggi terhadap ancaman musuh. Analisis khusus untuk *urban warfare* menunjukkan bahwa tingkat korban berada dalam kategori "sangat tinggi" dan memerlukan pertimbangan taktik alternatif atau dukungan tambahan.

3.9.6. Skenario 2: Operasi Pertahanan "Steel Wall". Skenario kedua adalah operasi pertahanan posisi strategis yang dinamakan "Steel Wall". Skenario ini dirancang untuk mendemonstrasikan perbedaan karakteristik atrisi antara operasi ofensif dan defensif. Parameter operasional untuk skenario defensif meliputi kekuatan awal 1.800 personel dengan komposisi yang lebih menekankan pada sistem pertahanan. Konfigurasi senjata mencakup 1.600 senjata ringan, 40 sistem artileri (lebih banyak dari skenario ofensif), 25 tank (lebih sedikit karena posisi defensif), dan 20 sistem rudal anti-tank dan anti-udara. Intensitas operasi diklasifikasikan sebagai "*high*" dengan tempo operasional 1.2, yang lebih rendah dibandingkan operasi ofensif karena karakteristik defensif. Durasi operasi diperpanjang menjadi 30 hari untuk mencerminkan sifat operasi pertahanan yang umumnya lebih panjang. Hasil simulasi menunjukkan bahwa meskipun intensitas lebih rendah, operasi pertahanan jangka panjang tetap menghasilkan tingkat atrisi yang signifikan. Efektivitas personel dan peralatan mencapai 0% pada akhir operasi, dengan total korban 3.953 personel (219.63% dari kekuatan awal) dan 722 personel tersisa. Konsumsi logistik dalam operasi defensif menunjukkan pola yang berbeda, dengan

konsumsi amunisi yang lebih rendah tetapi lebih konsisten sepanjang operasi. Total konsumsi mencakup 4.8 juta peluru senjata ringan, 24.000 peluru artileri, 7.500 peluru tank, dan 600 rudal. Konsumsi bahan bakar mencapai 1.12 juta liter, yang lebih rendah dari operasi ofensif karena mobilitas yang terbatas.

3.9.7. Skenario 3: Kampanye Berkepanjangan "Enduring Freedom". Skenario ketiga adalah kampanye multi-fase berkepanjangan yang dinamakan "Enduring Freedom". Skenario ini dirancang untuk mendemonstrasikan aplikasi model atrisi dalam konteks operasi yang kompleks dengan intensitas yang berubah-ubah. Kampanye ini dibagi menjadi tiga fase dengan karakteristik yang berbeda: Fase Serangan Awal (30 hari, intensitas tinggi), Fase Konsolidasi (30 hari, intensitas sedang), dan Fase Operasi Lanjutan (30 hari, intensitas tinggi). Setiap fase memiliki tujuan operasional yang berbeda dan memerlukan pendekatan atrisi yang spesifik. Kekuatan awal untuk kampanye ini adalah 5.000 personel dengan komposisi yang lebih besar dan beragam. Konfigurasi mencakup 4.500 senjata ringan, 60 sistem artileri, 80 tank utama, dan 35 sistem rudal. Dukungan kendaraan terdiri dari 150 kendaraan infanteri, 80 tank, 40 pesawat, dan 120 kendaraan logistik. Hasil simulasi menunjukkan degradasi kemampuan yang progresif sepanjang kampanye. Fase Serangan Awal menghasilkan penurunan personel menjadi 2.005 dengan efektivitas keseluruhan 0%. Fase Konsolidasi lebih lanjut mengurangi personel menjadi 1.060. Fase Operasi Lanjutan menghasilkan personel tersisa 425 pada akhir kampanye. Pola atrisi dalam kampanye berkepanjangan menunjukkan efek kumulatif yang signifikan. Meskipun Fase Konsolidasi memiliki intensitas yang lebih rendah, tingkat atrisi tetap tinggi karena efek kelelahan dan degradasi peralatan dari fase sebelumnya.

3.9.8. Validasi Model melalui Contoh Perhitungan. Untuk memvalidasi akurasi

model, menggunakan model Lanchester klasik dan membandingkan dengan hasil simulasi. Contoh perhitungan menggunakan parameter: Pasukan Biru awal 1.000, Pasukan Merah awal 800, koefisien atrisi Biru 0.01, dan koefisien atrisi Merah 0.012. Kondisi paritas dihitung sebagai: $Parity = aB \times B_0^2 - aR \times R_0^2 = 0.01 \times 1000^2 - 0.012 \times 800^2 = 10.000 - 7.680 = 2.320$. Nilai paritas positif menunjukkan bahwa Pasukan Biru diprediksi akan memenangkan pertempuran, yang dikonfirmasi oleh simulasi numerik. Contoh perhitungan atrisi personel menggunakan kekuatan awal 1.500 personel dengan intensitas tinggi selama 14 hari menunjukkan hasil yang konsisten dengan model probabilitas. Tingkat atrisi harian untuk KIA (2%), WIA (8%), dan CMIA (1%) menghasilkan total atrisi 11% per hari. Hasil akhir setelah 14 hari menunjukkan 979 personel tersisa, dengan total 347 KIA, 1.389 WIA, dan 174 CMIA. Efektivitas kekuatan mencapai 0% karena tingginya tingkat WIA yang mempengaruhi kemampuan operasional unit.

3.10. Diskusi dan Implikasi Teoritis. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teori atrisi militer dengan mengintegrasikan berbagai aspek yang sebelumnya dipelajari secara terpisah. Model atrisi terintegrasi yang dikembangkan menunjukkan bahwa interaksi antara atrisi personel dan logistik menghasilkan efek sinergis yang tidak dapat diprediksi dengan akurat menggunakan model parsial. Temuan penting dari penelitian ini adalah bahwa atrisi militer memiliki karakteristik non-linear yang kuat, di mana degradasi kemampuan operasional dapat terjadi secara tiba-tiba ketika mencapai batas (*threshold*) tertentu. Fenomena ini konsisten dengan teori sistem kompleks dan menunjukkan pentingnya mempertimbangkan efek kumulatif dalam perencanaan operasi. Penelitian ini juga mengkonfirmasi relevansi prinsip-prinsip Lanchester dalam konteks operasi modern, meskipun memerlukan modifikasi untuk mengakomodasi kompleksitas tambahan. Prinsip konsentrasi kekuatan

tetap valid, tetapi harus diinterpretasikan dalam konteks yang lebih luas yang mencakup faktor logistik, informasi, dan psikologis. Integrasi komponen probabilitas dalam model menunjukkan pentingnya mengakui ketidakpastian dalam perencanaan operasi militer.

3.11. Implikasi Praktis. Dari perspektif praktis, model yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat diimplementasikan dalam sistem perencanaan operasi militer untuk meningkatkan akurasi prediksi dan optimasi alokasi sumber daya. Model ini memberikan capability untuk melakukan analisis "what-if" yang komprehensif dan mengidentifikasi faktor-faktor kritis yang mempengaruhi keberhasilan operasi. Hasil skenario operasional menunjukkan bahwa tingkat attrisi dalam operasi modern dapat sangat tinggi, terutama dalam konteks *urban warfare* dan operasi intensitas tinggi. Temuan ini memiliki implikasi penting untuk perencanaan kekuatan dan alokasi sumber daya. Perencana operasi perlu mempertimbangkan tingkat attrisi yang realistis dan menyediakan cadangan yang memadai untuk mempertahankan efektivitas operasional. Model ini juga memberikan pemahaman mendalam tentang pemilihan (*trade-off*) antara intensitas operasi dan keberlanjutan. Operasi dengan intensitas sangat tinggi dapat mencapai tujuan dengan cepat tetapi dengan biaya yang sangat tinggi dalam hal attrisi. Sebaliknya, operasi dengan intensitas yang lebih rendah mungkin lebih *sustainable* tetapi memerlukan waktu yang lebih lama dan dapat memberikan kesempatan kepada musuh untuk beradaptasi.

3.12. Keterbatasan Penelitian.

Meskipun memberikan kontribusi yang signifikan, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui antara lain:

- Pertama, model yang dikembangkan didasarkan pada data historis dan asumsi teoritis yang mungkin tidak sepenuhnya aplikatif terhadap konflik masa depan. Evolusi teknologi militer,

perubahan dalam *nature of warfare*, dan munculnya domain baru seperti *cyber* dan *space warfare* dapat memerlukan modifikasi model.

- Kedua, validasi model dalam penelitian ini terbatas pada simulasi dan analisis teoritis. Validasi empiris yang komprehensif memerlukan data operasional yang seringkali *classified* atau tidak tersedia untuk penelitian akademik. Keterbatasan ini dapat mempengaruhi akurasi model dalam aplikasi praktis.
- Ketiga, model ini belum sepenuhnya mengintegrasikan faktor-faktor psikologis dan sosial yang dapat memiliki dampak signifikan terhadap attrisi militer. Faktor seperti moral, *leadership*, dan kohesi unit sulit dikuantifikasi tetapi dapat mempengaruhi efektivitas operasional secara substansial.
- Keempat, kompleksitas komputasional model dapat menjadi limitasi dalam aplikasi waktu nyata (*real-time*). Skenario operasional yang sangat kompleks memerlukan sumber komputasi (*computational resources*) yang signifikan dan mungkin tidak *feasible* untuk implementasi dalam sistem perencanaan operasi yang memerlukan *response time* yang cepat.

3.13. Rekomendasi untuk Implementasi.

Berdasarkan hasil penelitian, beberapa rekomendasi dapat diberikan untuk implementasi model attrisi dalam perencanaan operasi militer antara lain:

- Pertama, implementasi harus dilakukan secara bertahap/gradual dengan memulai dari aplikasi dalam *wargaming* dan simulasi sebelum diintegrasikan dalam sistem perencanaan operasional.
- Kedua, perlu dilakukan kalibrasi model yang kontinyu berdasarkan data operasional yang tersedia. Kalibrasi ini harus melibatkan *subject matter experts* (SME) dan menggunakan data dari operasi terbaru untuk memastikan relevansi model.
- Ketiga, latar belakang wawasan, pengetahuan dan pengalaman operasi untuk pengguna model sangat penting, untuk

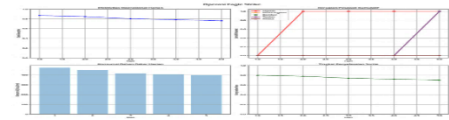
memastikan interpretasi yang benar terhadap hasil model. Pengguna harus memahami asumsi dan keterbatasan model untuk menghindari misinterpretasi yang dapat mengakibatkan keputusan yang kurang tepat.

- Keempat, pengembangan interface yang *user-friendly* dan *visualization tools* yang efektif dapat meningkatkan tingkat adaptasi dan *utility model* dalam praktik operasional. Interface harus dirancang untuk mendukung proses pengambilan keputusan (*decision-making process*) dan memberikan pemahaman yang mendalam untuk menghasilkan pemahaman aplikatif (*actionable insight*) yang dapat di eksekusi oleh satuan-satuan pelaksana.

3.14. Hasil Simulasi dan Analisis

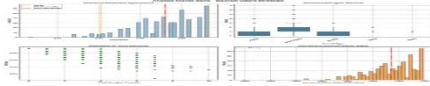
3.14.1. Hasil Simulasi Dasar. Simulasi dasar Operasi Eagle Strike dengan parameter yang telah ditetapkan menghasilkan tingkat efektivitas operasional rata-rata sebesar 81.30% selama periode operasi 5 hari. Tingkat efektivitas ini dihitung berdasarkan rasio sortie yang berhasil di selesaikan terhadap sortie yang direncanakan, dengan mempertimbangkan ketersediaan platform dan kondisi operasional. Total konsumsi bahan bakar selama operasi mencapai 2.148.000 liter, yang mencerminkan intensitas operasi dan jangkauan misi yang diperlukan. Distribusi konsumsi menunjukkan bahwa platform pembom strategis menyumbang proporsi terbesar konsumsi meskipun jumlahnya paling sedikit, karena konsumsi per jam yang tinggi dan durasi misi yang panjang. Kerugian platform selama operasi relatif rendah, dengan total 2 platform hilang (1 pesawat tempur dan 1 tanker udara) dari total 54 platform yang terlibat. Tingkat kehilangan ini konsisten dengan tingkat atrisi yang diproyeksikan dan menunjukkan bahwa operasi dapat di pertahankan tanpa degradasi kemampuan yang signifikan. Analisis kerusakan target menunjukkan hasil yang sangat positif, dengan semua target mencapai tingkat kerusakan yang melebihi threshold yang ditetapkan. Pangkalan Udara Alpha men

capai tingkat kerusakan 90.8% dengan dampak operasional 95%, sementara Pangkalan Udara Beta mencapai tingkat kerusakan yang sama dengan dampak operasional yang identik. Radar Site Charlie mencapai tingkat kerusakan 93.5% dengan dampak operasional 98%.



3.14.2. Analisis Monte Carlo dan Manajemen Risiko.

Simulasi Monte Carlo dengan 500 iterasi memberikan wawasan yang mendalam tentang variabilitas hasil operasi dan distribusi risiko. Analisis ini sangat penting untuk perencanaan operasi karena memberikan pemahaman tentang range outcome yang mungkin terjadi dan probabilitas pencapaian tujuan operasional. Efektivitas operasional menunjukkan distribusi yang relatif sempit dengan mean 79.20% dan standar deviasi 1.61%. Interval kepercayaan 90% berkisar antara 76.09% hingga 81.30%, yang menunjukkan bahwa operasi memiliki konsistensi yang tinggi dalam berbagai kondisi operasional. Distribusi yang sempit ini mengindikasikan bahwa perencanaan operasi cukup robust terhadap variasi dalam kondisi operasional. Probabilitas sukses misi, yang didefinisikan sebagai pencapaian efektivitas operasional di atas 70%, mencapai 100% dalam semua simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa dengan konfigurasi kekuatan dan perencanaan yang ada, operasi memiliki tingkat kepercayaan yang sangat tinggi untuk mencapai tujuan operasional minimum. Analisis distribusi kerugian platform menunjukkan variabilitas yang lebih tinggi, dengan beberapa simulasi mengalami kerugian yang lebih signifikan. Kerugian pesawat tempur berkisar antara 0-3 platform, dengan median 1 platform. Kerugian pesawat serang berkisar antara 0-2 platform, sementara kerugian pembom berkisar antara 0-1 platform. Variabilitas ini mencerminkan sifat probabilistik engagement udara dan pentingnya perencanaan kontinjensi.



3.14.3. Optimasi Alokasi Sortie. Analisis optimasi mengidentifikasi alokasi sortie yang dapat meningkatkan efektivitas operasional sambil meminimalkan risiko dan konsumsi sumber daya. Alokasi optimal yang diidentifikasi mengurangi jumlah sortie untuk beberapa jenis platform sambil memper tahankan atau meningkat kan efektivitas keseluruhan. Alokasi optimal merekomen dasikan pengu rangan sortie pesawat tempur dari 12 menjadi 8 per hari, dengan rasionalisasi bahwa tingkat escort yang lebih rendah masih memadai mengingat tingkat ancaman udara-ke-udara yang moderate. Sortie pesawat serang dikurangi dari 16 menjadi 10 per hari, dengan fokus pada target prioritas tinggi dan peningkatan efektivitas per sortie. Sortie pembom strategis dikurangi dari 8 menjadi 4 per hari, dengan konsentrasi pada target yang paling sesuai dengan kemam puan platform ini. Pengu rangan ini juga mengurangi kebutu han escort dan dukungan logistik yang intensif. Platform pendukung juga di sesuaikan, dengan tanker udara dikurangi menjadi 3 sortie per hari dan AWACS menjadi 1 sortie per hari. Alokasi optimal ini menghasilkan efektivitas operasional yang meningkat menjadi 100% sambil mengu rangi konsumsi sumber daya dan exposure terhadap risiko. Pengurangan jumlah sortie juga memberikan margin yang lebih besar untuk *maintenance* dan *recovery*, meningkatkan keberlangsungan operasi.

3.14.4. Analisis Sensitivitas. Analisis sensitivitas memberikan wawasan tentang faktor-faktor yang paling berpengaruh ter hadap *outcome* operasi dan membantu mengidentifikasi area yang memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan. Sensitivitas terhadap ukuran inventori menunjukkan hubungan yang relatif linear antara jumlah platform dan efektivitas operasional. Pengurangan inventori menjadi 80% dari baseline menghasilkan penurunan efektivitas menjadi 69.13%, sementara peningkatan menjadi 120% meningkatkan

efektivitas menjadi 84.78%. Elastisitas ini menunjukkan bahwa investasi dalam plat form tambahan memberikan penurunan atrisi, dan optimasi penggunaan platform yang ada mungkin lebih cost-effective. Sensitivitas terhadap kondisi cuaca menun jukkan dampak yang moderat namun signifikan. Kondisi cuaca buruk mengurangi efektivitas operasional menjadi 77.83%, sementara kondisi cuaca berawan mengu rangi menjadi 76.96%. Variasi ini menun jukkan pentingnya informasi perkem bangan cuaca dan kemampuan all-weather dalam operasi udara modern. Analisis sensitivitas juga mengidentifikasi bahwa tingkat perta hanan udara musuh meru pakan faktor yang sangat berpengaruh. Peningkatan dari moderat ke heavy air defense dapat mengu rangi efektivitas operasional hingga 15-20% dan mening katkan tingkat kehi langan platform secara signifikan.

4. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

4.1 Kesimpulan

- Penelitian ini berhasil mengembangkan model atrisi militer terintegrasi yang menggabungkan atrisi personel dan logistik dalam *framework* yang koheren dan dapat diimplementasikan secara praktis. Model yang dikembangkan menunjukkan bahwa pendekatan holistik terhadap atrisi militer memberi kan prediksi yang lebih akurat di bandingkan pendekatan parsial yang hanya mem pertimbangkan satu aspek atrisi.
- Hasil analisis skenario operasional menunjukkan bahwa tingkat atrisi dalam operasi militer modern dapat sangat tinggi, terutama dalam konteks *urban warfare* dan operasi intensitas tinggi. Temuan ini memiliki implikasi penting untuk perencanaan kekuatan, alokasi sumber daya, dan strategi operasional.
- Model matematika yang dikembangkan berhasil mengintegrasikan komponen deterministik dan probabilistik, memberi kan kemampuan untuk menangkap ketidakpastian yang interen dalam

operasi militer. Integrasi ini memungkinkan analisis risiko yang lebih komprehensif dan perencanaan kontinjensi yang lebih efektif.

- Validasi model melalui skenario operasional menunjukkan bahwa model dapat memberikan pemahaman mendalam yang bermanfaat untuk perencanaan operasi, termasuk identifikasi *bottle neck* logistik, prediksi kebutuhan dukungan medis, dan optimasi alokasi sumber daya.
- Kontribusi utama penelitian ini dapat dirangkum dalam empat aspek.
 - Pertama, pengembangan kerangka teori terintegrasi yang mengatasi fragmentasi dalam literatur atrisi militer dan memberikan pondasi yang solid untuk penelitian masa depan
 - Kedua, formulasi matematika yang komprehensif yang menggabungkan model klasik seperti Lanchester dengan sistem kontemporer seperti CALAPER, menghasilkan model yang secara teori dapat diper tanggung jawabkan dan dapat diaplikasikan secara praktis.
 - Ketiga, implementasi model dalam bentuk *software* yang dapat digunakan untuk analisis operasional dan perencanaan, memberikan *tool* yang praktis untuk para peneliti ilmu militer.
 - Keempat, validasi melalui skenario operasional yang realistis yang menunjukkan *utility* dan akurasi model dalam berbagai konteks operasional.

4.2 Rekomendasi

- Pertama, pengembangan model yang lebih komprehensif yang mengintegrasikan domain baru seperti *cyber warfare*, *space operations*, *network centric operation* (NCO), *information operations* dan *drone operations*.
- Kedua, penelitian tentang faktor-faktor psikologis dan sosial dalam atrisi militer, termasuk pengembangan metrik yang dapat dikuantifikasi untuk faktor-faktor

seperti moral, *leadership*, dan kohesi unit.

- Ketiga, validasi empiris yang lebih ekstensif menggunakan data operasional dari konflik terbaru, dengan mempertimbangkan evolusi dalam teknologi militer, *fog of war* dan *nature of warfare*.
- Keempat, pengembangan model yang dapat beradaptasi secara real-time berdasarkan kondisi operasional yang dinamis, menggunakan teknik *machine learning* dan *artificial intelligence* (AI).
- Kelima, penelitian tentang aplikasi model dalam konteks *multinational operations* dan *joint operations* yang melibatkan kekuatan militer berbagai negara dengan karakteristik atrisi yang berbeda.

5. REFERENCES

- [1] Anwar, S. (2014). Peran Diplomasi Pertahanan dalam Mengatasi Tantangan di Bidang Pertahanan. *Jurnal Pertahanan*, 4(2).
- [2] Ar-Rasyid, T. P., & Wismayana, W. M. (2023). Upaya Kerja Sama Pertahanan Indonesia Amerika Serikat dalam Men capai Target Minimum *Essential Force* Pertahanan Negara Tahun 2020-2021. *Jurnal Hubungan Luar Negeri*, 8(1), 140-158.
- [3] Amos Fox, The Mosul Study Group dan Pelajaran dari Pertempuran Mosul, *Land Warfare Paper* 130 (Arlington, VA: Asosiasi Angkatan Darat Amerika Serikat, Februari 2020), 4–5, <https://www.ausa.org/publications/mosul-study-group-and-lessons-battle-mosul>
- [4] Anthony King, Pemberontakan Perko taan di Abad ke-21: Militer yang Lebih Kecil dan Meningkatnya Konflik di Kota-Kota, *International Affairs* 98, no.2 (2022): 621–26, <https://doi.org/10.1093/ia/iac007>.

- [5] Chalisey, K. C. (2024). *Relevance of International Humanitarian Law in International Relations: National and International Context*. NCWA Annual Journal, 53.
- [6] Chauvel, R. (2019, Oktober 2). Australia-Indonesia Relations: Don't Mention Papua. Retrieved Agustus 18, 2024, from aspistrategist.org.au: <https://www.aspistrategist.org.au/australia-indonesia-relations-dont-mention-papua/>
- [7] Christopher Tuck, *Memahami Perang Darat* (London: Routledge, 2022), 99–100.
- [8] Dupuy, T.N. (1995). *Attrition: Forecasting Battle Casualties and Equipment Losses in Modern War*. Nova Publications.
- [9] David Glantz & Jonathan House *Ketika Titans Berbenturan: Bagaimana Tentara Merah Menghentikan Hitler* (Lawrence: University Press of Kansas, 2015), 179–95; Robert Citino, *Matinya Wehrmacht: Kampanye Jerman Tahun 1942* (Lawrence: University Press of Kansas, 2007), 96–97.
- [10] Effendi, T. D. (2017). *Memahami Politik Luar Negeri Indonesia Era Susilo Bambang Yudhoyono secara Komprehensif: Resensi Buku*. Indonesian Perspective, 2(1), 77-81.
- [11] Edward Luttwak, *Gaya Perang Amerika dan Keseimbangan Militer*, *Survival* 21, no. 2 (1979):57 <https://doi.org/10.1080/00396337908441800>.
- [12] Fox, A.C. (2024). *On Attrition: An Ontology for Warfare*. *Military Review*, September- October 2024.
- [13] <https://www.armyupress.army.mil/Journals/Military-Review/English-Edition-Archives/SO-24/SO-24-On-Attrition/>
- [14] Helmbold, R.L. (1995). *Personnel Attrition Rates in Historical Land Combat Operations: Some Empirical Relations Among Force Sizes, Battle Durations, Battle Dates, and Casualties*. *US Army Concepts Analysis Agency Research Paper CAA-RP-95-1*. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA298124.pdf>.
- [15] Hillway, T. (1956). *Introduction to Research*. Boston: Houghton Mifflin Company.
- [16] Kress, M. (2020). *Lanchester Models for Irregular Warfare*. *Mathematics*, 8(5), 737. <https://doi.org/10.3390/math8050737>
- [17] Leonie Chao-Fong, *Perang Rusia-Ukraina: Rusia dituduh menghancurkan teater mariupol untuk menyembunyikan kejahatan perang seperti yang terjadi*, *The Guardian* (situs web), 23 Desember 2022, <https://www.theguardian.com/world/live/2022/dec/23/russia-ukraine-war-live-north-korea-denies-supplying-russias-wagner-group-with-weapons-air-raid-sirens-sound-in-mykolaiv>
- [18] Mikael Weissmann, *Perang Kota: Tantangan Operasi Militer di Medan Perang Masa Depan*, dalam *Perang Darat Tingkat Lanjut: Taktik dan Operasi*, ed. Mikael Weissman dan Niklas Nilsson (Oxford: Oxford University Press, 2023), 148–51.
- [19] Williams, D.E. (1997). *Estimating Munition Consumption, Fuel Consumption, and Losses of Major End Items in a Theater-Level Campaign* (CALAPER). *US Army Concepts Analysis Agency Technical Paper CAA-TP-97-1*. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA323560.pdf>.
- [20] Wayne Hughes, *Dua Dampak Kekuatan Senjata: Pengurangan dan Penindasan*, *Penelitian Operasi Militer* 1, no. 3 (1995): 30, <https://core.ac.uk/reader/36730841>