



## Rancang Bangun Aplikasi *Integrated Cavalry Monitoring and Maintenance System (ICMMS)* Berbasis *Life Cycle Cost* pada Kendaraan Tempur Non-Aviation

Teddy Hendra\*

PT Pindad, Indonesia

\*Email: [teddy.hendra@pindad.com](mailto:teddy.hendra@pindad.com)

Alamat: Jl. Gatot Subroto, No 517. Bandung, Indonesia, 40285

\*Penulis korespondensi

**Abstract.** *The maintenance of non-aviation defense equipment (main weapon system) is a critical aspect in maintaining operational readiness. However, the Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO) system in Indonesia still faces limitations due to manual reporting, inefficiency in spare parts management, and the lack of integration of the Life Cycle Cost (LCC) approach. This study aims to design and develop the Integrated Cavalry Monitoring and Maintenance System (ICMMS) based on a web application that integrates sensors, real-time data analytics, and LCC calculation. The prototyping method was used, involving design, development, integration, and testing phases on the Maung Tactical Vehicle and Anoa Armoured Personnel Carrier at PT Pindad. The results of the prototype implementation showed a significant increase in maintenance efficiency: damage reporting time decreased from  $\pm 3$  hours to  $\pm 1$  minute, critical component identification became 95% faster, and maintenance scheduling shifted from reactive to predictive. Additionally, the integration of the LCC algorithm allows for more accurate maintenance cost estimation, supporting technical and strategic decision-making. This study demonstrates that ICMMS based on LCC can be an innovative digital solution to enhance MRO effectiveness and operational readiness of non-aviation defense vehicles in Indonesia. It is expected that this system will improve the resilience and cost-effectiveness of managing Indonesia's military vehicle fleet.*

**Keywords:** *Defense Equipment; Integrated Cavalry Monitoring and Maintenance System (ICMMS); Life Cycle Cost (LCC); Predictive Maintenance; Real-Time Data.*

**Abstrak.** Pemeliharaan alutsista (alat utama sistem senjata) non-aviation merupakan aspek krusial dalam menjaga kesiapan operasional. Namun, sistem Maintenance, Repair, dan Overhaul (MRO) di Indonesia masih menghadapi keterbatasan akibat pelaporan manual, inefisiensi manajemen suku cadang, serta absennya integrasi pendekatan Life Cycle Cost (LCC). Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun Integrated Cavalry Monitoring and Maintenance System (ICMMS) berbasis aplikasi web yang mengintegrasikan sensor, analitik data real-time, dan perhitungan LCC. Metode prototyping digunakan melalui tahapan desain, pengembangan, integrasi, serta pengujian pada kendaraan tempur Maung Tactical Vehicle dan Anoa Armoured Personnel Carrier di PT Pindad. Hasil implementasi prototipe menunjukkan peningkatan signifikan pada efisiensi pemeliharaan, dengan waktu pelaporan kerusakan yang berkurang dari  $\pm 3$  jam menjadi  $\pm 1$  menit, identifikasi komponen kritis yang lebih cepat hingga 95%, serta penjadwalan pemeliharaan yang berubah dari reaktif menjadi prediktif. Selain itu, integrasi algoritma LCC memungkinkan estimasi biaya pemeliharaan yang lebih akurat, sehingga mendukung pengambilan keputusan teknis dan strategis dalam pengelolaan alutsista. Studi ini membuktikan bahwa ICMMS berbasis LCC dapat menjadi solusi digital inovatif dalam meningkatkan efektivitas MRO serta kesiapan operasional kendaraan tempur non-aviation di Indonesia. Dengan sistem ini, diharapkan dapat meningkatkan ketahanan dan efektivitas biaya dalam pengelolaan armada kendaraan tempur Indonesia.

**Kata kunci:** *Data Real-Time; Integrated Cavalry Monitoring and Maintenance System (ICMMS); Life Cycle Cost (LCC); Pemeliharaan Prediktif; Peralatan Pertahanan.*

### 1. LATAR BELAKANG

Aktifitas pemeliharaan (*maintenance*), perbaikan (*repair*), dan *overhaul* (MRO) merupakan faktor penting dalam menjaga kesiapan operasional khususnya di industri militer. PT Pindad memainkan peran strategis dalam upaya menjaga kedaulatan NKRI dengan

menyediakan berbagai produk alutsista, mulai dari kendaraan tempur, senjata, hingga amunisi untuk. Untuk mendukung keberlanjutan produk tersebut, PT Pindad memiliki Divisi MRO yang bertugas memberikan layanan purna jual dan pemeliharaan kepada pelanggan, khususnya bagi produk-produk militer dan pertahanan yang digunakan oleh TNI maupun instansi terkait lainnya.

Divisi MRO bertugas memastikan seluruh produk Pindad, termasuk produk militer dapat beroperasi optimal melalui serangkaian perawatan, perbaikan, serta penyediaan suku cadang. Namun dalam praktiknya, aktivitas MRO untuk kendaraan tempur *non-aviation* seperti *Maung Tactical Vehicle* dan *Anoa Armoured Personnel Carrier* masih bergantung pada pelaporan manual dan dokumentasi yang belum terintegrasi. Kondisi ini menimbulkan keterlambatan dalam identifikasi kerusakan, inefisiensi dalam manajemen suku cadang, serta kesulitan dalam memantau kinerja pemeliharaan jangka panjang. Sistem pemeliharaan di sektor pertahanan *non-aviation* di Indonesia masih menghadapi dua kekurangan utama. Pertama, belum adanya sistem monitoring terintegrasi yang dapat memberikan informasi secara *real-time* untuk mendukung pengambilan keputusan operasional. Kedua, belum diterapkannya pendekatan *Life Cycle Cost (LCC)* secara menyeluruh, padahal LCC terbukti efektif di sektor penerbangan dalam mengendalikan biaya keberlanjutan (*sustainment cost*) dan memastikan efisiensi penggunaan sumber daya.

Tidak adanya sistem monitoring terintegrasi yang dilengkapi dengan kerangka pengambilan keputusan berbasis LCC menyebabkan alokasi sumber daya menjadi kurang optimal dan mengganggu operasional. Hal ini mendorong inovasi berupa platform digital yang mampu mengintegrasikan pemantauan kondisi kendaraan disertai analisis siklus biaya, sehingga mendukung perencanaan pemeliharaan yang lebih efisien dan tepat sasaran. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun *Integrated Cavalry Monitoring and Maintenance System (ICMMS)* berbasis aplikasi web (*web-based application*) dengan integrasi LCC yang mampu mempercepat proses pelaporan dan pemantauan kondisi kendaraan melalui identifikasi unjuk kerja komponen serta mendukung pengelolaan biaya melalui analisis faktor biaya utama sehingga pada akhirnya meningkatkan kesiapan operasional kendaraan tempur *non-aviation* di Indonesia. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi baik secara praktis bagi PT Pindad dan TNI dalam meningkatkan efektivitas MRO, maupun secara akademis dalam memperkaya literatur mengenai penerapan LCC pada sistem pertahanan *non-aviation*.

## 2. KAJIAN TEORITIS

### Maintenance Repair Overhaul

*Maintenance, Repair, and Overhaul* (MRO) merupakan serangkaian aktivitas yang bertujuan memastikan ketersediaan dan keandalan suatu sistem melalui pemeliharaan, perbaikan, dan peremajaan. Menurut Cavalieri et al. (2008), fungsi utama MRO ialah menjaga keberlangsungan operasional peralatan industri, sementara Blanchard dan Fabrycky (2011) menekankan bahwa lebih dari 60% biaya siklus hidup suatu sistem pertahanan dialokasikan untuk operasi dan pemeliharaan. Marquez (2020) juga menambahkan bahwa manajemen MRO yang efektif dapat mengurangi *downtime* sekaligus meningkatkan umur pakai aset. Di beberapa penelitian terbaru dikatakan bahwa biaya *sustainment* mencapai 70% dari total *Life Cycle Cost* pada sistem militer (Sandborn, 2020; Bokrantz et al., 2020; Liu et al., 2021).

Beberapa penelitian di Indonesia seperti studi oleh Wicaksono (2020) dan Hidayat & Nurcahyo (2021) menunjukkan bahwa tantangan utama MRO di industri pertahanan adalah keterlambatan laporan serta keterbatasan manajemen suku cadang. Hal ini menegaskan pentingnya inovasi digital untuk mendukung Divisi MRO PT Pindad dalam menjaga kesiapan alutsista.

### Sistem Monitoring Terintegrasi

Perkembangan teknologi digital seperti *Internet of Things* (IoT), *big data*, dan *cloud computing* memungkinkan pengembangan sistem monitoring terintegrasi pada sektor industri maupun pertahanan. Lee et al. (2014) memperkenalkan arsitektur *cyber-physical systems* untuk mendukung Industry 4.0, sedangkan Zhang et al. (2019) dan Mourtzis et al. (2020) menekankan bahwa integrasi data real-time dapat meningkatkan efisiensi operasional. Konsep *Condition-Based Maintenance* (CBM) dan *Predictive Maintenance* (PdM) terbukti efektif menurunkan *downtime* serta meningkatkan keandalan sistem (Jardine et al., 2006; Carvalho et al., 2019; Hu et al., 2021). Studi lain membuktikan bahwa CBM dan PdM dapat meningkatkan keandalan serta menurunkan biaya pemeliharaan (Jardine et al., 2006; Hu et al., 2021; Gopalakrishnan & Skoogh, 2022). Studi terkini menunjukkan digitalisasi pemeliharaan dapat mengurangi biaya hingga 20–30% (Mobley, 2002; Tao et al., 2018; Gopalakrishnan & Skoogh, 2022).

Di Indonesia, implementasi sistem monitoring digital juga mulai dikembangkan, misalnya pada kendaraan dinas dan mesin produksi (Ramadhan et al., 2021; Putra & Yulianti, 2022). Namun, penelitian untuk sektor kendaraan militer masih terbatas, sehingga peluang penerapan ICMMS menjadi signifikan.

### Life Cycle Cost

*Life Cycle Cost* (LCC) adalah metode untuk menghitung total biaya dari tahap akuisisi, operasi, pemeliharaan, hingga disposal suatu sistem (Asiedu & Gu, 1998; Dhillon, 2010; Korpi

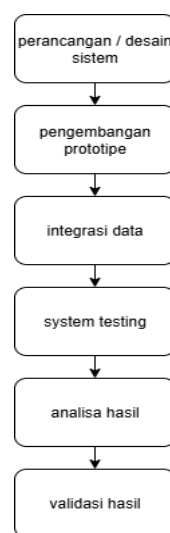
& Ala-Risku, 2008). Konsep ini relevan diterapkan di sektor pertahanan karena biaya *sustainment* sering kali melebihi biaya akuisisi awal (Sandborn, 2013; Komonen et al., 2020). Penelitian terkini menunjukkan bahwa LCC membantu organisasi mengidentifikasi *cost drivers* yang dominan, mengurangi ketidakpastian biaya, serta mendukung perencanaan pemeliharaan yang lebih akurat (Zhang et al., 2019; Bukhsh et al., 2022).

Di Indonesia, Pratama & Suryadi (2022) mengembangkan model perhitungan LCC pada Alutsista TNI, sementara Puslitbang Strahanhan (2021) melakukan kajian awal LCC untuk kendaraan tempur *non-aviation*. Sejauh ini penerapan LCC di dunia industri militer masih sangat terbatas dan ditegaskan bahwa masih terdapat kesenjangan dalam penerapan LCC pada produk industri militer *non-aviation*. Penelitian oleh Pratama & Suryadi di tahun 2022 serta Wicaksono di tahun 2020 menunjukkan bahwa pentingnya kebutuhan akan sistem monitoring yang lebih efisien di sektor industri militer. Sayangnya, integrasi langsung antara LCC dengan sistem monitoring digital belum pernah diimplementasi, sehingga penelitian ini memberikan perbaruan di level nasional.

### 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem dengan metode *prototyping* yang banyak digunakan dalam pengembangan aplikasi berbasis monitoring dan manajemen pemeliharaan (Pressman & Maxim, 2014; Sommerville, 2016). Metode ini dipilih karena memungkinkan iterasi berulang antara pengguna dan pengembang sehingga sistem dapat disesuaikan dengan kebutuhan Divisi MRO PT Pindad dan calon pengguna.

#### Tahapan Penelitian

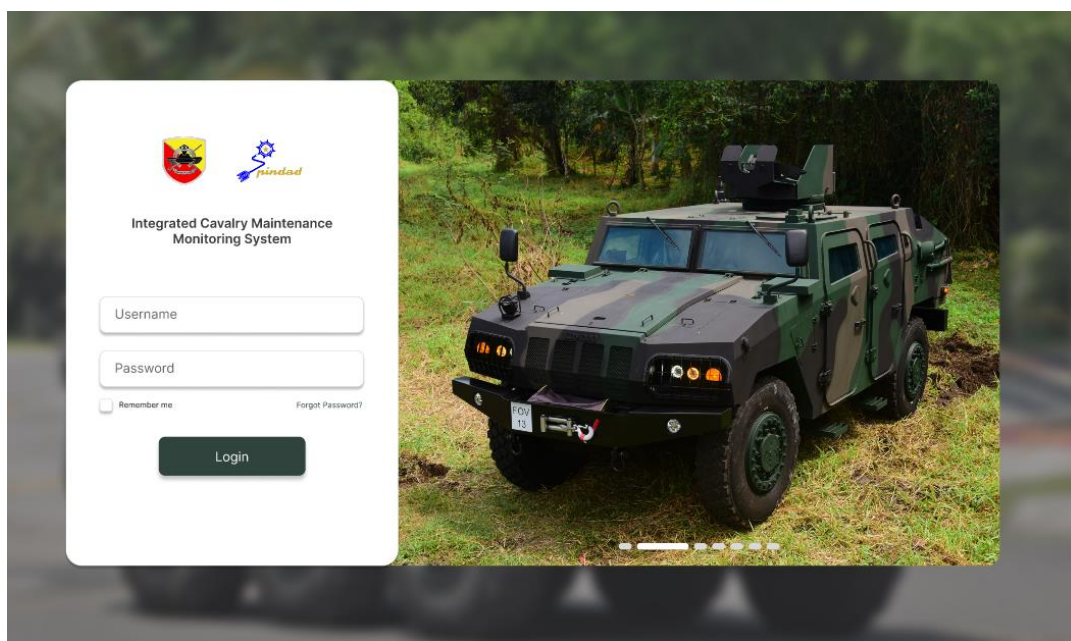


Gambar 1. Metode Penelitian.

**Perancangan / Desain Sistem**, Desain penelitian berupa rancang bangun aplikasi ICMMS yang diintegrasikan dengan pendekatan *Life Cycle Cost (LCC)* untuk mendukung

kegiatan pemeliharaan kendaraan tempur *non-aviation* di PT Pindad. Studi kasus difokuskan pada Maung *Tactical Vehicle* dan Anoa *Armoured Personnel Carrier (APC)* yang saat ini menjadi fokus pemeliharaan. Menentukan ruang lingkup batasan bersama pengguna berdasarkan wawancara dengan teknisi *maintenance* Divisi MRO, serta calon pengguna yakni kesatuan Kavaleri.

**Pengembangan Prototipe,** Pada tahap ini dibuatlah aplikasi berbasis web dengan *database* terpusat yang dilengkapi dengan modul input data kendaraan dan historis pemeliharaan disertai dengan integrasi ke sensor pada kendaraan untuk mendapatkan data real time yang kemudian dianalisa dengan algoritma tertentu untuk kemudian ditampilkan pada dashboard monitoring.



**Gambar 2.** Prototype tampilan depan interface ICMMS.

**Integrasi Data,** Setelah pembuatan *prototype* ICMMS selesai, tahap selanjutnya ialah pengintegrasian data. Data yang dikumpulkan meliputi 2 jenis, yakni : (1)Data primer: wawancara dengan staf Divisi MRO PT Pindad, observasi kegiatan pemeliharaan, serta hasil uji coba prototipe (data melalui sensor, data input teknisi, serta data biaya pemeliharaan untuk mendukung perhitungan LCC). (2)Data sekunder: laporan pemeliharaan kendaraan tempur, manual teknis, serta evidence laporan kerusakan terkait.

**Pengujian Sistem,** Tahap selanjutnya ialah pengujian sistem atau tahap preimplementasi, tahap ini melibatkan pemasangan sensor pada unit kendaraan yang akan dijadikan sasaran penelitian pembuatan ICMMS. Tahap pengujian ini untuk melihat unjuk kerja sensor dan algoritma yang sudah didesain sebelumnya.

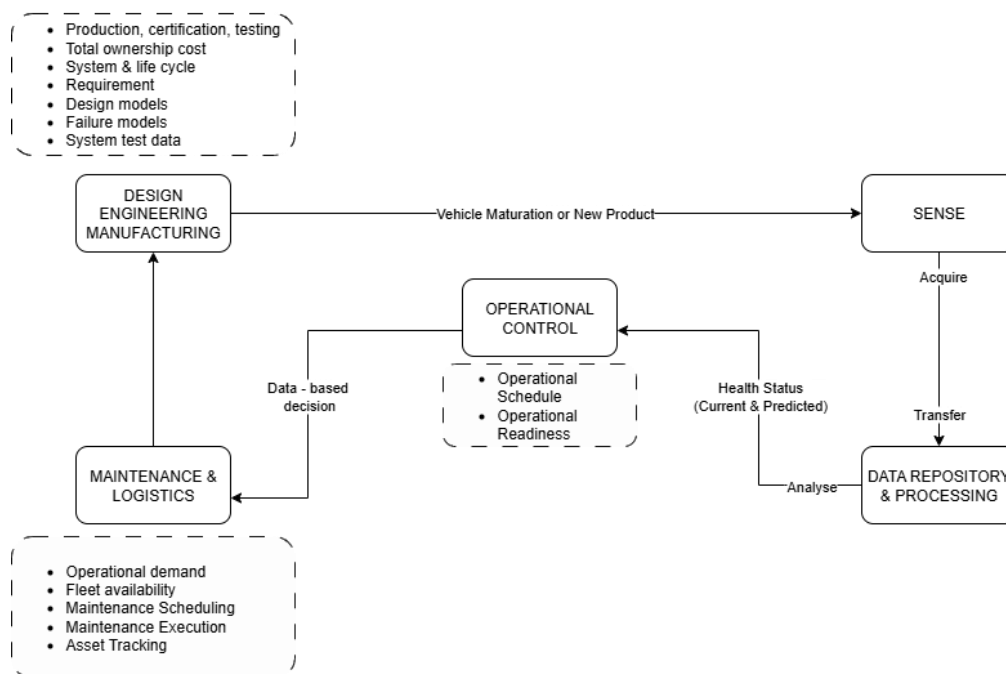
**Analisa Hasil,** Evaluasi hasil dari data yang sudah didapatkan dilakukan setelah tahap pre-implementation dengan analisa perbandingan hasil meliputi : (1)Perbandingan hasil teknis:

membandingkan waktu pelaporan manual dengan waktu pelaporan melalui ICMMS serta membandingkan variabel hasil pembacaan sensor dengan pelaporan manual sebelumnya. (2) Analisis biaya: menghitung LCC berdasarkan faktor dan variabel (kondisi suku cadang, frekuensi perbaikan, dan jam operasi).

**Validasi Hasil,** Setelah didapatkan hasil analisa pada tahap sebelumnya, selanjutnya dibutuhkan proses validasi data, tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem ICMMS berbasis LCC benar-benar mampu : (1) Sesuai dengan kebutuhan pengguna (Divisi MRO PT Pindad dan Kesatuan Kavaleri). (2) Memberikan output yang konsisten dengan data historis pemeliharaan untuk menghasilkan *health status* (baik, rusak ringan, rusak sedang, rusak berat)

### Sistem Arsitektur

Arsitektur ICMMS dirancang mengikuti prinsip sistem informasi yang terintegrasi untuk menghubungkan siklus peralatan tempur mulai dari tahap desain hingga operasi dan pemeliharaan. Sistem ini bertujuan untuk menyediakan informasi kesehatan kendaraan secara *real-time* dan prediktif, sehingga keputusan pemeliharaan dapat dilakukan lebih cepat, tepat, dan efisien.



**Gambar 3.** Arsitektur Rancang Bangun ICMMS.

**Sensor,** Sensor berfungsi sebagai pintu masuk data dari berbagai sumber, seperti sensor kondisi kendaraan, secara spesifik meliputi mesin, ban, kondisi interior ataupun eksterior. Data spesifik ini mencakup status kondisi komponen kritis dan performa terhadap umur pakai.

**Data Repository & Processing,** Data yang terbaca oleh sensor akan ditransfer untuk diolah dan dianalisa melalui mekanisme penyimpanan terpusat (*data repository*). Pada tahap ini, ICMMS melakukan pemrosesan berbasis algoritma, termasuk analisis kemungkinan *failure*

(kegagalan) jangka panjang berdasarkan umur pakai *lifetime* (umur pakai), serta estimasi biaya penggantian *spare part* (suku cadang) dan biaya perbaikan.

**Operational Control**, Hasil pengolahan algoritma ditampilkan pada sebuah *dashboard* yang berfungsi sebagai pusat pengambilan keputusan. Modul ini mengintegrasikan jadwal operasional dengan efektivitas pemeliharaan, sehingga memungkinkan pengambil keputusan untuk menyesuaikan antara kesiapan operasional dan ketersediaan logistik (*critical spare part*).

**Maintenance & Logistics**, Hasil dari analisis algoritma yang sudah ditampilkan melalui *dashboard*, akan dimanfaatkan untuk menentukan keputusan berdasarkan data (*data-based decision*) sehingga keputusan yang diambil akan lebih akurat karena bersifat antisipatif dan bukan reaktif. Fungsi maintenance & logistics akan menyesuaikan permintaan operasional, menjadwalkan pemeliharaan serta menyiapkan ketersediaan suku cadang.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### Lokasi dan Periode Penelitian

Penelitian ini dilakukan di PT Pindad, Bandung, Indonesia, dengan fokus pada kendaraan taktis Maung dan Anoa APC sebagai objek uji coba implementasi *Integrated Cavalry Monitoring and Maintenance System* (ICMMS). Lama periode pembuatan rancang bangun sampai dengan pre-implementasi ialah sekitar 9 bulan (Nov 2024 –Juli 2025), mencakup kegiatan observasi lapangan, pengumpulan data pemeliharaan, serta pengujian prototipe sistem.

##### Hasil Analisis Data

Hasil implementasi *prototype* ICMMS menunjukkan bahwa penggunaannya meski belum dilakukan implementasi sepenuhnya, mampu meningkatkan efisiensi proses pemeliharaan dibandingkan sistem manual. Beberapa indikator utama yang diamati meliputi waktu pelaporan kerusakan dan kecepatan identifikasi komponen kritis.

**Tabel 1.** Perbandingan hasil sebelum dan setelah implementasi ICMMS prototype.

Indikator	Sebelum Implementasi ICMMS	Sesudah Implementasi ICMMS	Perbaikan
Waktu pelaporan	3 jam secara manual	1 menit (via sensor/log)	Di atas 95%
Identifikasi kondisi komponen	Dilakukan secara manual	Analisis data real-time secara otomatis	Lebih cepat 80%
Penjadwalan Pemeliharaan	Reaktif (setelah kerusakan terjadi)	Prediktif (berbasis kondisi secara otomatis)	Peningkatan efisiensi berdasarkan data faktual

Monitoring kondisi secara keseluruhan	Tidak dapat dilakukan	Dapat dilakukan melalui dashboard terintegrasi	Peningkatan efisiensi berdasarkan data faktual
---------------------------------------	-----------------------	--	--

Tabel 1 menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara sistem manual dan implementasi sistem ICMMS pada beberapa indikator kunci pemeliharaan kendaraan tempur.

**Waktu Pelaporan Kerusakan,** Pada sistem manual, waktu pelaporan rata-rata membutuhkan sekitar 3 jam. Hal ini disebabkan oleh proses berlapis yang melibatkan pencatatan manual, verifikasi, dan penyampaian laporan melalui rantai komando. Dengan ICMMS, waktu pelaporan berkurang drastis menjadi hanya  $\pm 1$  menit. Perubahan waktu pelaporan ini terjadi karena adanya sensor yang sensitif terhadap perubahan kondisi komponen serta algoritma analisis yang langsung memproses data dan mengirimkannya ke pusat kontrol. Percepatan waktu pelaporan dari 3 jam menjadi 1 menit bukan hanya disebabkan oleh otomatisasi digital, tetapi juga karena: (1)Sensitivitas sensor yang mampu mendeteksi perubahan kecil pada parameter kendaraan (misalnya temperatur mesin, tekanan oli, getaran komponen). (2)Kecepatan algoritma analitik, yang segera mengolah data sensor, mengidentifikasi anomali, dan mengirimkan laporan tanpa keterlambatan birokrasi.

Kombinasi antara sensitivitas sensor dan kecepatan algoritma inilah yang membuat pelaporan kerusakan menjadi hampir mendekati *real time (near real-time)*, sehingga meningkatkan kesiapan operasional dan memperkecil risiko kerusakan yang tidak terdeteksi. Hal ini menunjukkan bahwa digitalisasi sistem memiliki dampak signifikan dalam mempercepat aliran informasi kritis.

**Identifikasi Kondisi Komponen,** Pada sistem manual, identifikasi bergantung pada inspeksi visual oleh teknisi, sehingga membutuhkan waktu lama dan rentan terhadap keterlambatan. ICMMS melakukan analisis berbasis data *real-time* yang mampu mendeteksi potensi kerusakan lebih awal, meningkatkan kecepatan identifikasi hingga 95% lebih cepat dibandingkan metode konvensional.

**Penjadwalan Pemeliharaan,** Sistem manual umumnya bersifat reaktif, yaitu pemeliharaan dilakukan setelah kerusakan terjadi. ICMMS memperkenalkan pendekatan prediktif, di mana algoritma memproyeksikan umur pakai komponen dan merekomendasikan jadwal perawatan sebelum kegagalan terjadi. Hal ini menghasilkan efisiensi pemeliharaan serta mengurangi *downtime*.

**Monitoring Kondisi Keseluruhan,** Pada sistem manual, monitoring kondisi kendaraan secara keseluruhan belum dapat dilakukan sedangkan dengan adanya dashboard terintegrasi pada ICMMS, data kondisi kendaraan (*health status*) dapat dipantau secara

langsung dan objektif sehingga memberikan gambaran yang lebih akurat bagi pengambil keputusan terkait pemeliharaan.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa prototipe Integrated Cavalry Monitoring and Maintenance System (ICMMS) mampu memberikan peningkatan signifikan pada efisiensi pemeliharaan kendaraan tempur. Implementasi sistem berbasis sensor dan algoritma analitik terbukti menurunkan waktu pelaporan kerusakan dari rata-rata 3 jam menjadi  $\pm 1$  menit, meningkatkan kecepatan identifikasi komponen kritis, serta mengoptimalkan penjadwalan pemeliharaan dari reaktif menjadi prediktif.

Selain itu, integrasi Life Cycle Cost (LCC) algorithm pada sistem memungkinkan penghitungan biaya pemeliharaan dilakukan secara lebih akurat dan transparan. Hal ini tidak hanya mendukung keputusan teknis di tingkat operasional, tetapi juga menjadi instrumen penting bagi perencanaan anggaran pertahanan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa ICMMS berpotensi menjadi pondasi sistem monitoring pemeliharaan modern untuk alutsista Indonesia, sejalan dengan tren global menuju digitalisasi dan prediksi berbasis data.

### Saran

**Pengembangan Menu Tambahan,** Prototipe ICMMS sebaiknya diperluas dengan menambahkan menu lain, seperti modul pelaporan *accident*, integrasi manajemen rantai pasok suku cadang, serta dashboard kesiapan operasional untuk level komando. Hal ini akan memperluas cakupan manfaat dan meningkatkan utilisasi sistem di berbagai lini operasi.

**Peningkatan Akurasi Algoritma LCC,** Walaupun hasil awal menunjukkan keandalan perhitungan biaya siklus, akurasi algoritma LCC perlu ditingkatkan melalui: (1) Integrasi dengan data historis pemeliharaan yang lebih komprehensif. (2) Penerapan *machine learning* untuk prediksi biaya jangka panjang. (3) Validasi model terhadap lebih banyak tipe kendaraan tempur.

**Implementasi Skala Luas,** Diperlukan uji coba skala besar di berbagai unit kendaraan tempur untuk menguji konsistensi hasil dan kesiapan integrasi dengan sistem logistik militer yang sudah ada.

**Keamanan Data dan Interoperabilitas,** Karena sistem akan digunakan dalam konteks pertahanan, perhatian khusus harus diberikan pada keamanan data dan interoperabilitas dengan sistem pertahanan lainnya, guna menjamin kelancaran operasional sekaligus menjaga kerahasiaan informasi strategis.

## DAFTAR REFERENSI

- Asiedu, Y., & Gu, P. (1998). Product life cycle cost analysis: State of the art review. *International Journal of Production Research*, 36(4), 883–908. <https://doi.org/10.1080/002075498193444>
- Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2011). *Systems Engineering and Analysis* (5th ed.). Pearson.
- Bokrantz, J., Skoogh, A., Berlin, C., & Stahre, J. (2020). Maintenance in digitalised manufacturing: Delphi-based scenarios for 2030. *International Journal of Production Economics*, 229, 107702. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107702>
- Bukhsh, Z. A., Stipanovic, I., & Doree, A. G. (2022). A review of life cycle costing in infrastructure asset management. *Structure and Infrastructure Engineering*, 18(7), 869–889. <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1928393>
- Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>
- Cavalieri, S., Gaiardelli, P., & Ierace, S. (2008). Aligning strategic profiles with operational metrics in after-sales service. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 57(5), 436–455. <https://doi.org/10.1108/17410400810881824>
- Dhillon, B. S. (2010). *Life Cycle Costing for Engineers*. CRC Press.
- Fan, Y., Ding, S. X., & Li, Z. (2022). Data-driven fault diagnosis and health monitoring for complex industrial systems. *Annual Reviews in Control*, 54, 356–371. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2022.03.002>
- Gopalakrishnan, A., & Skoogh, A. (2022). Digitalization of maintenance for sustainable manufacturing: A systematic literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 738–752. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.12.010>
- Hidayat, A., & Nurcahyo, R. (2021). The implementation of maintenance management in Indonesian defense industry. *International Journal of Technology*, 12(4), 745–756. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i4.4777>

- Hu, Q., Zhang, Y., & Chen, M. (2021). Condition-based maintenance policies with big data analytics. *Reliability Engineering & System Safety*, 205, 107239. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107239>
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
- Komonen, K., Kortelainen, H., & Rääkkönen, M. (2020). Life cycle costing in investment decision-making and control: Review of literature. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 26(1), 103–128. <https://doi.org/10.1108/JQME-03-2019-0023>
- Korpi, E., & Ala-Risku, T. (2008). Life cycle costing: A review of published case studies. *Managerial Auditing Journal*, 23(3), 240–261. <https://doi.org/10.1108/02686900810857703>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2014). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Liu, Z., Chen, C., & Yang, C. (2021). A review of life cycle cost analysis of complex engineering systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110414. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110414>
- Marquez, A. C. (2020). *The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance*. Springer.
- Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Mourtzis, D., Vlachou, A., & Zogopoulos, V. (2020). Cloud-based adaptive process planning considering availability and maintenance. *CIRP Annals*, 69(1), 421–424. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.048>
- Pratama, A., & Suryadi, I. (2022). Developing a life cycle cost calculation model for Indonesian military assets. *Journal of Defense Management*, 13(2), 55–67.
- Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2014). *Software Engineering: A Practitioner's Approach* (8th ed.). McGraw-Hill.

- Putra, A., & Yulianti, E. (2022). Implementation of IoT-based monitoring systems in Indonesian manufacturing industry. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 54(1), 12–21. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.1.2>
- Ramadhan, M. A., Hidayat, R., & Sutopo, W. (2021). Development of fleet monitoring systems for logistics vehicles in Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1010(1), 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1010/1/012036>
- Sandborn, P. (2013). *Cost Analysis of Electronic Systems*. World Scientific.
- Sandborn, P. (2020). System life cycle cost analysis: Trends, gaps, and directions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67(2), 278–290. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2897800>
- Sommerville, I. (2016). *Software Engineering* (10th ed.). Pearson.
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *Engineering*, 4(3), 362–370. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.02.020>
- Wicaksono, F. (2020). Challenges of maintenance repair overhaul in Indonesian defense industry. *Journal of Defense Acquisition and Logistics*, 4(2), 77–88.
- Zhang, Y., Yang, L., & Jiang, Z. (2019). Real-time data-driven predictive maintenance in complex industrial systems. *Procedia CIRP*, 81, 1419–1424. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.162>