

Penerapan Maritime 4.0 Melalui Sistem Pemantauan Ruang Mesin Berbasis *Long Range (LoRa)*: Tinjauan Pustaka

Ian Mochamad Sofian^{1*}, Yosi Apriani², Budi Purnomo³, Indah Purnaningratri⁴

^{1*,3,4} Program Studi Permesinan Kapal, Politeknik Pelayaran Banten, Indonesia

² Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Tangerang, Indonesia

*e-mail : ianms@poltekpel-banten.ac.id

ABSTRAK

Industri maritim sedang mengalami transformasi digital melalui konsep Maritime 4.0 yang menekankan integrasi Internet of Things (IoT), jaringan komunikasi cerdas, pemantauan real-time, dan pengambilan keputusan berbasis data. Salah satu teknologi yang semakin berkembang adalah Long Range (LoRa) karena konsumsi daya rendah, jangkauan komunikasi luas, dan kesesuaiannya untuk sistem sensor terdistribusi di lingkungan kapal. Namun, kajian mengenai pemanfaatan LoRa untuk pemantauan ruang mesin kapal dalam mendukung Maritime 4.0 masih terbatas. Penelitian ini bertujuan meninjau secara sistematis perkembangan, aplikasi, peluang, dan tantangan sistem pemantauan ruang mesin kapal berbasis LoRa pada kapal niaga. Penelitian menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) dengan mengikuti kerangka Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA). Artikel yang relevan diperoleh dari basis data akademik, kemudian diseleksi menggunakan kriteria inklusi dan eksklusi serta dianalisis melalui sintesis tematik. Hasil kajian menunjukkan bahwa sistem pemantauan berbasis LoRa telah berkembang dari media komunikasi nirkabel menjadi infrastruktur pendukung operasi ruang mesin yang cerdas. Teknologi ini berkontribusi terhadap pemantauan kondisi secara real-time serta pengembangan ekosistem Internet of Marine Things (IoMT). Selain itu, integrasi LoRa dengan kecerdasan buatan, digital twin, dan jaringan sensor hemat energi menjadi arah penelitian yang menjanjikan. Meskipun demikian, tantangan terkait interoperabilitas, keamanan siber, implementasi skala besar, dan validasi pada kondisi operasional nyata masih perlu diatasi. Tinjauan ini menegaskan bahwa sistem pemantauan ruang mesin berbasis LoRa merupakan teknologi penting dalam mendukung implementasi Maritime 4.0 serta berpotensi meningkatkan efisiensi, keandalan, keselamatan, dan keberlanjutan operasi kapal niaga.

Kata Kunci: Maritime 4.0, LoRa, IoT, Pemantau Ruang Mesin, Kapal

Enabling Maritime 4.0 through LoRa-Based Engine Room Monitoring Systems: A Literature Review

ABSTRACT

The maritime industry is undergoing a significant digital transformation through the Maritime 4.0 paradigm, which emphasizes the integration of the Internet of Things (IoT), intelligent communication networks, real-time monitoring, and data-driven decision-making. Among the enabling technologies, Long Range (LoRa) has attracted increasing attention due to its low power consumption, long communication range, and suitability for distributed sensor networks in shipboard environments. However, studies on LoRa-based engine room monitoring systems supporting Maritime 4.0 remain limited. This study systematically reviews the current state of knowledge on the development, applications, opportunities, and challenges of LoRa-based engine room monitoring systems for commercial vessels. A Systematic Literature Review (SLR) was conducted following the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) framework. Relevant publications were identified from major academic databases, screened using predefined inclusion and exclusion criteria, and analyzed through thematic synthesis. The findings indicate that LoRa-based monitoring systems have evolved from simple wireless communication solutions into key infrastructures for intelligent engine room operations. The literature highlights their contributions to real-time condition monitoring and the Internet of Marine Things (IoMT). Furthermore, integrating LoRa with artificial intelligence, digital twins, and energy-efficient sensor networks has emerged as a promising research direction. Nevertheless, challenges related to interoperability,

cybersecurity, large-scale deployment, and real-world validation remain unresolved. This review concludes that LoRa-based engine room monitoring systems constitute a critical enabling technology for Maritime 4.0, with significant potential to enhance the efficiency, reliability, safety, and sustainability of future commercial shipping operations..

Keywords: *Maritime 4.0, LoRa, IoT, Engine Room Monitoring, Ships*

PENDAHULUAN

Industri maritim sedang mengalami transformasi digital yang pesat seiring berkembangnya konsep Maritime 4.0, yaitu paradigma yang mengadaptasi prinsip Industry 4.0 ke dalam sektor maritim melalui integrasi sistem siber-fisik, *Internet of Things* (IoT), *Artificial Intelligence* (AI), *cloud computing*, *big data analytics*, dan otomatisasi cerdas. Transformasi ini bertujuan meningkatkan efisiensi operasional, keselamatan pelayaran, keandalan aset, keberlanjutan lingkungan, serta kualitas pengambilan keputusan di seluruh rantai nilai industri maritim. Mengingat lebih dari 80% perdagangan dunia masih bergantung pada transportasi laut, digitalisasi kapal menjadi salah satu prioritas strategis untuk meningkatkan produktivitas sekaligus menekan biaya operasional dan risiko kegagalan sistem. Oleh karena itu, pengembangan *intelligent monitoring systems* menjadi fondasi penting dalam mewujudkan kapal niaga yang lebih aman, efisien, dan otonom.

Di antara berbagai subsistem kapal, ruang mesin (*engine room*) merupakan salah satu area yang paling kritis karena menampung sistem propulsi, mesin bantu, pembangkit listrik, sistem bahan bakar, pompa, kompresor, dan berbagai peralatan penunjang keselamatan. Gangguan pada salah satu komponen tersebut dapat menyebabkan penurunan performa kapal, kerugian ekonomi, pencemaran lingkungan, bahkan membahayakan keselamatan awak kapal. Oleh karena itu, pemantauan kondisi mesin secara berkelanjutan menjadi komponen utama dalam strategi *condition-based maintenance* dan *predictive maintenance*. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa integrasi sensor cerdas dan sistem komputasi tertanam (*embedded systems*) mampu meningkatkan kemampuan diagnosis kerusakan mesin serta mendukung deteksi dini terhadap kondisi abnormal sebelum berkembang menjadi kegagalan yang lebih serius [1], [2].

Secara konvensional, sistem pemantauan ruang mesin masih didominasi oleh arsitektur berkabel (*wired monitoring systems*) yang terhubung ke pusat kendali kapal. Meskipun memiliki keandalan komunikasi yang tinggi, pendekatan ini memiliki sejumlah keterbatasan, antara lain biaya instalasi yang besar, kompleksitas penarikan kabel, kesulitan dalam proses pemeliharaan, serta rendahnya fleksibilitas ketika dilakukan penambahan sensor maupun proses *retrofitting* pada kapal yang telah beroperasi. Permasalahan tersebut semakin kompleks karena lingkungan ruang mesin memiliki karakteristik yang menantang, seperti struktur logam yang padat, interferensi elektromagnetik, tingkat getaran yang tinggi, kelembapan, dan temperatur ekstrem. Kondisi ini mendorong berkembangnya sistem pemantauan berbasis komunikasi nirkabel yang lebih fleksibel, mudah dikembangkan, dan ekonomis.

Perkembangan teknologi **Internet of Things (IoT)** telah mengubah paradigma pemantauan ruang mesin dari sistem akuisisi data yang bersifat lokal menjadi ekosistem digital yang saling terhubung. Evolusi ini ditandai oleh pergeseran dari arsitektur multiprosesor dan sensor terdistribusi menuju platform IoT yang mengintegrasikan sensor, *embedded systems*, komunikasi nirkabel, layanan *cloud computing*, dan analitik cerdas dalam satu sistem terpadu [3], [4]. Melalui arsitektur tersebut, berbagai parameter operasional, seperti suhu, tekanan, getaran, konsumsi bahan bakar, emisi gas buang, dan kondisi pelumasan dapat dipantau secara *real-time*. Selain meningkatkan visibilitas terhadap kondisi mesin, sistem IoT juga memungkinkan penerapan analitik berbasis data untuk mendukung optimasi operasi serta strategi *predictive maintenance*.

Keberhasilan implementasi sistem IoT sangat bergantung pada ketersediaan infrastruktur komunikasi yang andal. Seiring berkembangnya konsep Maritime 4.0, teknologi komunikasi tidak lagi berfungsi sebagai media pertukaran data semata, tetapi telah berkembang menjadi infrastruktur utama yang menghubungkan sensor, sistem kendali kapal, operator, dan pusat pengelolaan di darat [5], [6]. Namun demikian, teknologi komunikasi nirkabel konvensional, seperti Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, maupun jaringan seluler, masih menghadapi berbagai keterbatasan ketika diterapkan di lingkungan *engine room*. Hambatan propagasi sinyal akibat struktur logam, keterbatasan jangkauan komunikasi, konsumsi energi yang relatif

tinggi, serta ketergantungan terhadap infrastruktur jaringan menyebabkan teknologi tersebut kurang optimal untuk mendukung sistem pemantauan yang beroperasi secara kontinu.

Sebagai alternatif, teknologi *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), khususnya LoRa dan LoRaWAN, mulai mendapatkan perhatian luas karena menawarkan kombinasi jangkauan komunikasi yang panjang, konsumsi daya yang rendah, biaya implementasi yang relatif ekonomis, serta kemampuan mendukung jaringan sensor dalam jumlah besar. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa LPWAN memiliki potensi besar dalam mendukung pengembangan *Internet of Marine Things* (IoMT) melalui komunikasi antarsensor yang efisien dan hemat energi [7]. Potensi tersebut semakin diperkuat oleh perkembangan teknologi *energy harvesting* yang memungkinkan sensor memperoleh sumber daya secara mandiri dari getaran mesin sehingga mampu mendukung operasi jangka panjang dengan kebutuhan pemeliharaan yang minimal [8]. Selain itu, data yang dihasilkan oleh jaringan sensor berbasis LoRa dapat dimanfaatkan oleh algoritma *machine learning* dan *predictive analytics* untuk meningkatkan efisiensi konsumsi bahan bakar, mengoptimalkan performa mesin, serta mendukung pengambilan keputusan secara cerdas [9].

Meskipun penelitian mengenai IoT maritim, jaringan sensor nirkabel, LPWAN, analitik prediktif, dan sistem pemantauan mesin berkembang sangat pesat selama satu dekade terakhir, kajian yang ada masih bersifat terfragmentasi. Sebagian besar penelitian berfokus pada aspek tertentu, seperti teknologi komunikasi, platform IoT, diagnosis kerusakan, pemantauan lingkungan, atau algoritma kecerdasan buatan secara terpisah. Akibatnya, belum tersedia sintesis yang mengintegrasikan perkembangan teknologi LoRa dengan arsitektur sistem pemantauan ruang mesin dalam kerangka **Maritime 4.0**. Selain itu, sebagian besar artikel tinjauan membahas teknologi komunikasi maritim secara umum tanpa memberikan perhatian khusus terhadap karakteristik *engine room* yang memiliki kebutuhan operasional dan tantangan lingkungan yang berbeda dibandingkan aplikasi maritim lainnya.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat sedikitnya empat kesenjangan penelitian yang masih perlu dijawab. Pertama, belum terdapat *Systematic Literature Review* (SLR) yang secara khusus membahas sistem pemantauan ruang mesin berbasis LoRa pada kapal niaga. Kedua, hubungan antara teknologi komunikasi LPWAN, infrastruktur sensor IoT, strategi *condition-based maintenance*, dan *predictive maintenance* masih dibahas secara terpisah. Ketiga, belum tersedia kerangka konseptual yang menjelaskan posisi LoRa sebagai teknologi pendukung implementasi **Maritime 4.0**. Keempat, arah pengembangan teknologi menuju integrasi dengan *Artificial Intelligence* (AI), *Digital Twin*, dan *Internet of Marine Things* (IoMT) masih belum dipetakan secara komprehensif.

Oleh karena itu, penelitian ini melakukan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk menganalisis perkembangan sistem pemantauan ruang mesin berbasis LoRa pada kapal niaga dalam perspektif Maritime 4.0. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya berfokus pada teknologi atau aplikasi tertentu, studi ini menyintesis bukti ilmiah dari berbagai disiplin ilmu untuk membangun pemahaman yang lebih komprehensif mengenai evolusi teknologi, arsitektur komunikasi, mekanisme penginderaan, tantangan implementasi, dan arah penelitian masa depan. Kontribusi utama penelitian ini tidak terletak pada pengembangan teknologi LoRa baru, melainkan pada penyusunan kerangka konseptual integratif yang menghubungkan komunikasi LPWAN, infrastruktur IoT, sistem pemantauan ruang mesin, *predictive maintenance*, dan tujuan strategis Maritime 4.0. Selain itu, penelitian ini menyusun taksonomi tematik, mengidentifikasi tantangan implementasi, serta mengusulkan *research roadmap* yang dapat menjadi acuan bagi pengembangan sistem pemantauan ruang mesin yang lebih skalabel, hemat energi, interoperabel, dan cerdas pada kapal niaga generasi berikutnya.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Tinjauan Literatur Sistematis (SLR) untuk menyelidiki secara komprehensif pengembangan, implementasi, tantangan, dan prospek masa depan sistem pemantauan ruang mesin berbasis LoRa sebagai teknologi pendukung untuk Maritime 4.0. Metodologi tinjauan ini dirancang sesuai dengan pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020) untuk memastikan transparansi, reproduktifitas, ketelitian metodologis, dan meminimalkan bias seleksi selama proses tinjauan [10]. Selain itu, prosedur pencarian literatur mengikuti rekomendasi PRISMA, yang memberikan panduan terperinci untuk melaporkan pencarian basis data dan strategi pencarian dalam tinjauan sistematis [11]. Penerapan kerangka kerja yang diakui secara internasional ini



dimaksudkan untuk meningkatkan kredibilitas dan keandalan temuan tinjauan serta memfasilitasi replikasi studi di masa mendatang.

Proses tinjauan ini dimulai dengan merumuskan pertanyaan penelitian yang bertujuan untuk mengeksplorasi kondisi terkini pengetahuan mengenai sistem pemantauan berbasis LoRa di lingkungan maritim. Secara khusus, penelitian ini berupaya mengidentifikasi tren penelitian yang ada, menelaah implementasi teknologi LoRa dan LoRaWAN dalam aplikasi pemantauan di atas kapal, menganalisis kontribusi infrastruktur komunikasi berbasis LoRa terhadap Maritime 4.0, mengevaluasi tantangan teknis yang terkait dengan penerapan di lingkungan ruang mesin, serta mengidentifikasi peluang penelitian di masa depan untuk sistem pemantauan cerdas pada kapal niaga. Pertanyaan-pertanyaan penelitian ini dikembangkan berdasarkan pengamatan bahwa meskipun teknologi IoT maritim telah mendapat perhatian yang semakin besar dalam beberapa tahun terakhir, studi yang secara khusus membahas sistem pemantauan ruang mesin yang didukung LoRa masih tersebar di berbagai disiplin ilmu, termasuk teknik kelautan, komunikasi nirkabel, IoT industri, dan pemeliharaan prediktif.

Penelusuran literatur secara komprehensif dilakukan dengan menggunakan beberapa basis data ilmiah utama, termasuk Scopus, Web of Science Core Collection, IEEE Xplore, ScienceDirect, dan SpringerLink. Basis data tersebut dipilih karena mengindeks publikasi berkualitas tinggi yang telah melalui proses peninjauan sejawat di bidang teknik, teknologi maritim, komunikasi nirkabel, dan sistem informasi. Proses pencarian dilakukan antara Januari dan Maret 2026 dan mencakup publikasi yang diterbitkan dari Januari 2010 hingga Maret 2026. Tahun awal dipilih karena bertepatan dengan munculnya konsep pemantauan maritim berbasis IoT dan pengembangan awal teknologi LPWAN yang kemudian berkembang menjadi implementasi LoRa dan LoRaWAN yang praktis.

Strategi pencarian dikembangkan secara bertahap melalui pencarian awal dan penyempurnaan kata kunci untuk memaksimalkan perolehan studi yang relevan sekaligus meminimalkan hasil yang tidak relevan. Pencarian dilakukan pada kolom judul, abstrak, dan kata kunci di setiap basis data dengan menggunakan kombinasi operator Boolean, simbol pemotongan, dan pencarian frasa. String pencarian utama menggabungkan kata kunci yang terkait dengan teknologi LoRa, pemantauan ruang mesin, lingkungan maritim, dan konsep Maritime 4.0. Ekspresi pencarian akhir mencakup istilah seperti “LoRa,” “LoRaWAN,” “Low-Power Wide-Area Network,” “LPWAN,” “pemantauan ruang mesin,” “pemantauan mesin kapal,” “pemantauan kondisi mesin,” “pemeliharaan prediktif,” “pengiriman cerdas,” “Maritime 4.0,” “Internet of Marine Things,” “kapal,” “kapal laut,” dan “IoT maritim.” Strategi pencarian terus disempurnakan hingga tercapai keseimbangan antara sensitivitas dan spesifisitas, memastikan cakupan yang komprehensif terhadap literatur yang relevan sekaligus menghindari penemuan berlebihan atas studi yang tidak terkait.

Setelah pencarian literatur, semua catatan yang diperoleh diekspor ke dalam basis data manajemen referensi. Catatan duplikat yang berasal dari berbagai basis data diidentifikasi secara otomatis dan kemudian diverifikasi melalui pemeriksaan manual sebelum dihapus. Catatan yang tersisa menjalani proses penyaringan bertahap. Pada tahap awal, judul dan abstrak ditinjau untuk menilai relevansinya dengan tujuan penelitian. Publikasi yang jelas-jelas tidak membahas aplikasi maritim, sistem komunikasi berbasis LoRa, pemantauan ruang mesin, atau teknologi pemantauan terkait, disingkirkan pada tahap ini. Selanjutnya, versi teks lengkap dari artikel yang berpotensi relevan diperoleh dan dinilai berdasarkan kriteria kelayakan yang telah ditentukan sebelumnya.

Kriteria inklusi ditetapkan sebelum proses tinjauan untuk memastikan konsistensi dan objektivitas dalam pemilihan studi. Studi yang memenuhi syarat harus berupa artikel jurnal yang telah ditinjau oleh rekan sejawat, prosiding konferensi, atau makalah tinjauan yang diterbitkan dalam bahasa Inggris antara tahun 2005 dan 2024. Selain itu, studi tersebut harus meneliti setidaknya salah satu dari topik berikut: teknologi komunikasi LoRa atau LoRaWAN, aplikasi LPWAN, sistem IoT maritim, jaringan sensor nirkabel di lingkungan laut, pemantauan ruang mesin, pemantauan kondisi mesin, pemeliharaan prediktif, pengiriman cerdas, atau teknologi Maritime 4.0. Studi dikecualikan jika tidak ditinjau oleh rekan sejawat, berfokus secara eksklusif pada aplikasi darat tanpa relevansi maritim, kurang memiliki detail metodologis yang memadai, atau tidak dapat diakses dalam format teks lengkap. Editorial, ulasan buku, disertasi, paten, dan publikasi duplikat juga dikecualikan dari tinjauan ini.

Untuk memastikan keandalan landasan bukti, dilakukan prosedur penilaian kualitas terhadap semua studi yang memenuhi kriteria inklusi. Kerangka kerja evaluasi kualitas tersebut diadaptasi dari praktik

tinjauan sistematis yang telah mapan dalam penelitian teknik dan sistem informasi. Setiap studi dinilai berdasarkan beberapa kriteria, termasuk kejelasan tujuan penelitian, kecukupan deskripsi metodologi, relevansi dengan pemantauan maritim berbasis LoRa, validitas prosedur pengumpulan data, kelengkapan evaluasi teknis, penerapan pada operasi kapal niaga, dan kontribusi terhadap pengembangan Maritime 4.0. Setiap kriteria diberi skor berkisar antara nol hingga dua, di mana nol menunjukkan bahwa kriteria tersebut tidak dipenuhi, satu menunjukkan pemenuhan sebagian, dan dua menunjukkan pemenuhan penuh. Studi yang memperoleh skor kualitas keseluruhan rendah dikecualikan dari sintesis akhir untuk memastikan bahwa temuan tinjauan ini berasal dari bukti yang andal dan metodologis yang kuat.

Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan protokol pengambilan data yang terstandarisasi untuk memastikan konsistensi di seluruh studi yang dipilih. Untuk setiap publikasi, informasi dicatat secara sistematis mengenai penulis, tahun terbit, negara asal, sumber publikasi, tujuan penelitian, desain studi, teknologi komunikasi yang digunakan, bidang aplikasi maritim, parameter pemantauan, jenis sensor, arsitektur jaringan, indikator kinerja, temuan utama, keterbatasan, dan rekomendasi penelitian lanjutan. Informasi tambahan terkait kinerja komunikasi LoRa, jangkauan transmisi, konsumsi daya, skalabilitas jaringan, kendala lingkungan, dan interoperabilitas dengan infrastruktur IoT maritim juga dikumpulkan jika tersedia. Data yang diekstraksi kemudian disusun ke dalam basis data terstruktur untuk memudahkan perbandingan dan analisis tematik di seluruh studi.

Mengingat keragaman metodologi penelitian, bidang penerapan, dan hasil yang dilaporkan yang teridentifikasi dalam literatur yang dipilih, meta-analisis kuantitatif dianggap tidak sesuai. Sebagai gantinya, pendekatan sintesis tematik kualitatif diterapkan. Studi-studi yang dipilih dianalisis dan dikategorikan berdasarkan bidang tematik utama, termasuk sistem komunikasi maritim, arsitektur LPWAN dan LoRa, aplikasi Internet of Marine Things, teknologi pemantauan ruang mesin, sistem pemantauan kondisi mesin, pendekatan pemeliharaan prediktif, jaringan sensor hemat energi, dan kerangka kerja implementasi Maritime 4.0. Analisis tematik memungkinkan identifikasi tren teknologi yang berulang, tantangan implementasi, karakteristik kinerja, dan arah penelitian yang sedang berkembang. Selain itu, hubungan antara teknologi komunikasi, infrastruktur sensor, sistem pemantauan cerdas, dan tujuan Maritime 4.0 dievaluasi untuk mengembangkan pemahaman komprehensif mengenai kondisi terkini bidang ini.

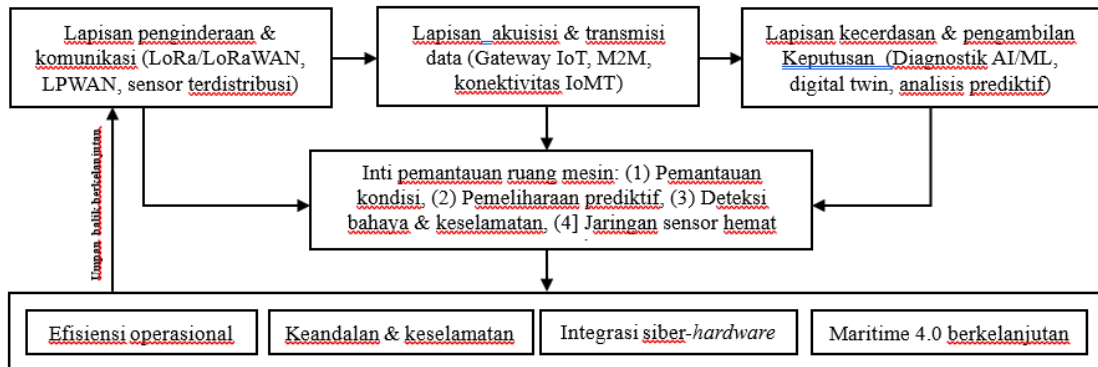
Akhirnya, temuan-temuan yang telah disintesis diintegrasikan ke dalam kerangka konseptual yang menggambarkan bagaimana infrastruktur komunikasi berbasis LoRa mendukung pengembangan sistem pemantauan ruang mesin cerdas dalam ekosistem Maritime 4.0. Kerangka kerja ini menyoroti interaksi antara teknologi sensor nirkabel, sistem akuisisi data, strategi pemeliharaan prediktif, alat pendukung pengambilan keputusan operasional, dan inisiatif transformasi maritim digital. Berdasarkan sintesis ini, sebuah peta jalan penelitian masa depan diusulkan untuk mengidentifikasi prioritas teknologi dan peluang penelitian guna pengembangan arsitektur pemantauan yang skalabel, hemat energi, interoperabel, dan cerdas yang mampu mendukung kapal niaga generasi berikutnya. Melalui pendekatan sistematis dan berbasis bukti ini, tinjauan ini memberikan pemahaman komprehensif mengenai peran teknologi LoRa dalam memajukan Maritime 4.0 dan memfasilitasi transformasi digital operasi ruang mesin.

Untuk memperkuat kedalaman analitis tinjauan ini, sintesis tematik kualitatif yang dijelaskan di atas dilengkapi dengan dua prosedur tambahan. Pertama, dilakukan comparative analysis antar-studi dengan membandingkan setiap publikasi terpilih berdasarkan teknologi komunikasi yang digunakan, domain aplikasi maritim, metode penelitian, serta temuan utama, sehingga persamaan, perbedaan, dan kesenjangan antar-studi dapat diidentifikasi secara eksplisit dan bukan hanya dipaparkan secara naratif (disajikan pada Tabel 3). Kedua, hasil sintesis tematik dipetakan ke dalam sebuah kerangka konseptual yang menghubungkan lapisan penginderaan dan komunikasi, lapisan akuisisi dan transmisi data, serta lapisan kecerdasan dan pengambilan keputusan, dengan capaian strategis Maritime 4.0 sebagai muaranya. Kerangka ini selanjutnya digunakan sebagai lensa analitis dalam bagian hasil dan pembahasan untuk menafsirkan posisi relatif setiap studi yang ditinjau, serta untuk menyusun taksonomi tematik dan peta jalan penelitian masa depan yang disajikan secara visual.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum menguraikan temuan tematik secara rinci, sintesis lintas-tema dari tinjauan ini dirangkum terlebih dahulu ke dalam sebuah kerangka konseptual, sebagaimana disajikan pada Gambar 1. Kerangka

ini menegaskan bahwa kontribusi sistem pemantauan ruang mesin berbasis LoRa terhadap Maritime 4.0 tidak berdiri sendiri pada tingkat teknologi komunikasi, melainkan terbentuk melalui interaksi tiga lapisan fungsional, yaitu lapisan penginderaan dan komunikasi, lapisan akuisisi dan transmisi data, serta lapisan kecerdasan dan pengambilan keputusan, yang secara kolektif bermuara pada inti pemantauan ruang mesin dan pada akhirnya menghasilkan empat capaian strategis Maritime 4.0: efisiensi operasional, keandalan dan keselamatan, integrasi siber-fisik, serta keberlanjutan. Kerangka inilah yang digunakan secara konsisten sebagai lensa analitis dalam pembahasan Tema 1 hingga Tema 2.



Gambar 1. Kerangka Konseptual Sistem Pemantauan Ruang Mesin Berbasis LoRa untuk Maritime 4.0

Perkembangan Teknologi Komunikasi Maritim Menuju Maritime 4.0

Perkembangan teknologi komunikasi maritim telah menjadi salah satu pendorong utama terwujudnya Maritime 4.0, yang memfasilitasi transisi dari operasi kapal konvensional menuju ekosistem maritim yang cerdas, saling terhubung, dan didorong oleh data. Secara historis, sistem komunikasi di atas kapal dirancang terutama untuk mendukung navigasi, sinyal darurat, dan koordinasi operasional melalui komunikasi radio, sistem satelit, dan jaringan kabel di atas kapal. Namun, meningkatnya kompleksitas operasi pelayaran modern, ditambah dengan meningkatnya tuntutan akan efisiensi operasional, pemeliharaan prediktif, manajemen keselamatan, dan kepatuhan lingkungan, telah mempercepat kebutuhan akan infrastruktur komunikasi yang lebih canggih yang mampu mendukung pertukaran data secara real-time antara aset di atas kapal, awak kapal, operator di darat, dan sistem pendukung keputusan otonom.

Munculnya teknologi Industri 4.0 telah secara mendasar mengubah kebutuhan komunikasi di sektor maritim. Berbeda dengan sistem komunikasi maritim tradisional yang terutama berfokus pada transmisi suara dan data navigasi, Maritim 4.0 menuntut konektivitas berkelanjutan di antara sensor, aktuator, sistem pemantauan, perangkat tepi, platform awan, dan aplikasi kecerdasan buatan. Akibatnya, jaringan komunikasi maritim telah berevolusi dari sistem yang terisolasi dan berfokus pada fungsi tertentu menjadi infrastruktur siber-fisik terintegrasi yang mampu mendukung komunikasi mesin-ke-mesin (M2M) skala besar, aplikasi Internet of Things (IoT), dan manajemen kapal cerdas [5].

Beberapa penelitian telah menunjukkan transisi teknologi ini. Perkembangan awal berfokus pada integrasi teknologi IoT ke dalam operasi ruang mesin guna memungkinkan pemantauan terdesentralisasi dan pemantauan cerdas. Pada penelitian [3] mengusulkan arsitektur IoT ruang mesin cerdas berbasis sistem multiprosesor, yang merupakan salah satu upaya paling awal untuk mendigitalisasi pengelolaan informasi ruang mesin. Meskipun teknologi komunikasi pada saat itu masih relatif terbatas, penelitian tersebut telah meletakkan landasan konseptual bagi perkembangan ruang mesin cerdas selanjutnya.

Seiring dengan kemajuan digitalisasi maritim, para peneliti semakin gencar mengeksplorasi teknologi jaringan jarak jauh yang mampu menghubungkan sistem di atas kapal dengan platform pemantauan eksternal. Pada penelitian [6] menekankan peran teknologi jaringan jarak jauh dalam memfasilitasi komunikasi di dalam ruang mesin kapal serta antara kapal dan sistem manajemen berbasis darat. Temuan

mereka menunjukkan bahwa jaringan komunikasi kini menjadi komponen integral dalam manajemen operasional kapal, bukan sekadar infrastruktur pendukung.

Meningkatnya adopsi teknologi IoT semakin memperluas kemampuan komunikasi maritim. Pada penelitian [4], mengembangkan sistem pemantauan lingkungan laut berbasis NB-IoT yang mampu mengumpulkan dan mengirimkan data lingkungan secara real time. Studi ini menyoroti semakin pentingnya teknologi komunikasi berdaya rendah dalam aplikasi pemantauan maritim dan menunjukkan kelayakan integrasi jaringan komunikasi nirkabel ke dalam lingkungan operasional maritim.

Baru-baru ini, penelitian telah bergeser ke arah teknologi Jaringan Area Luas Berdaya Rendah (LPWAN), khususnya LoRa dan LoRaWAN, karena potensinya dalam mengatasi tantangan komunikasi yang terkait dengan lingkungan maritim. Pada penelitian [7] meneliti penerapan jaringan sensor dan aktuator LPWAN di atas kapal dan menyimpulkan bahwa teknologi LPWAN memberikan solusi yang menjanjikan untuk mengimplementasikan arsitektur Internet of Marine Things (IoMT). Temuan mereka menunjukkan bahwa sistem komunikasi LPWAN dapat mendukung penerapan sensor yang luas sambil mempertahankan konsumsi energi yang rendah, sehingga sangat cocok untuk aplikasi pemantauan di atas kapal.

Meningkatnya pentingnya strategis teknologi komunikasi maritim juga tercermin dalam analisis bibliometrik terbaru. Pada penelitian [5], melaporkan pertumbuhan substansial dalam penelitian komunikasi maritim selama dekade terakhir, terutama di bidang yang berkaitan dengan IoT, kapal otonom, pengiriman digital, dan infrastruktur maritim cerdas. Tren ini menunjukkan bahwa teknologi komunikasi tidak lagi dianggap sebagai komponen teknis yang terpisah, tetapi telah menjadi pendorong penting bagi transformasi maritim digital.

Tabel 1. Perkembangan Teknologi Komunikasi Maritim Menuju Maritime 4.0

Penulis	Judul dan Tahun	Negara	Tujuan	Metode	Temua Utama	Journal/Source
[3]	Sistem Ruang Mesin Cerdas Berbasis Multi-Prosesor (2023)	China	Untuk mengembangkan arsitektur IoT ruang mesin yang cerdas	Perancangan dan implementasi sistem	Mengusulkan salah satu arsitektur pemantauan ruang mesin berbasis IoT paling awal yang mengintegrasikan sistem sensor terdistribusi dan sistem komunikasi onboard	Microelectronics & Computers
[4]	Perancangan dan Penerapan Sistem Akuisisi Parameter Lingkungan Internet of Things (IoT) Kelautan Berbasis Teknologi NB-IoT (2021)	China	Untuk mengembangkan sistem pemantauan lingkungan IoT maritim	Pengembangan prototipe dan pengujian eksperimen	Membuktikan kelayakan komunikasi NB-IoT untuk aplikasi pemantauan maritim	ICCBN Proc.



[6]	Aplikasi teknologi jaringan jarak jauh dalam Ruang Mesin kapal (2021)	China	Menginvestigasi teknologi jaringan kerja jauh di dalam kamar mesin kapal	Analisis system dan desain arsitektur jaringan	Mengidentifikasi jaringan jarak jauh sebagai factor penentu yang sangat penting dalam pengelolaan kapal cerdas	Springer Proc.
[7]	Studi Kelayakan untuk Penerapan Jaringan Sensor dan Aktuator LPWAN di Lingkungan Kapal dalam Rangka IoMT (2023)	Greece	Untuk mengevaluasi penerapan LPWAN di atas kapal	Studi kelayakan dan penilaian eksperimental	Menunjukkan kelayakan penerapan teknologi LPWAN di lingkungan kapal dan pengembangan IoMT	AIP Con.Proc
[5]	Analisis Tren Penelitian dalam Komunikasi Maritim (2024)	India	Untuk menganalisis tren penelitian di bidang komunikasi maritim	Analisis Bibliometrik	Terungkapnya pertumbuhan pesat dalam teknologi komunikasi digital yang mendukung Maritime 4.0	IJACSA

Temuan yang dirangkum dalam Tabel 1 menunjukkan lintasan teknologi yang jelas dalam evolusi sistem komunikasi maritim. Evolusi ini dapat diklasifikasikan ke dalam empat fase yang berbeda: sistem komunikasi konvensional, integrasi IoT maritim, pemantauan maritim berbasis LPWAN, dan ekosistem komunikasi Maritim 4.0.

Fase pertama ditandai dengan digitalisasi fungsi komunikasi dan pemantauan di atas kapal. Pada penelitian [3] memperkenalkan salah satu konsep paling awal tentang ruang mesin cerdas yang didukung oleh sensor terdistribusi dan arsitektur komunikasi multiprosesor. Meskipun kematangan teknologi IoT masih terbatas pada saat itu, penelitian tersebut merupakan tonggak penting secara konseptual dengan mengakui kebutuhan akan sistem ruang mesin yang saling terhubung.

Fase kedua mencakup integrasi teknologi IoT ke dalam operasi maritim. Studi seperti yang dilakukan oleh [4] menunjukkan bahwa teknologi komunikasi nirkabel dapat secara efektif mendukung pemantauan lingkungan secara real-time dalam konteks maritim. Periode ini menandai peralihan dari perangkat pemantauan yang terpisah-pisah menuju infrastruktur sensor yang saling terhubung dan mampu menghasilkan aliran data operasional secara berkelanjutan.

Fase ketiga muncul dengan diperkenalkannya teknologi LPWAN ke dalam lingkungan maritim. Dibandingkan dengan teknologi nirkabel konvensional seperti Wi-Fi, Bluetooth, dan ZigBee, solusi LPWAN menawarkan jangkauan komunikasi yang lebih baik, konsumsi energi yang lebih rendah, dan skalabilitas yang lebih besar. Studi kelayakan yang dilakukan oleh [7] memberikan bukti empiris yang mendukung kesesuaian teknologi LPWAN untuk lingkungan kapal dan menyoroti peran potensialnya dalam pengembangan Internet of Marine Things. Temuan ini sangat penting karena lingkungan maritim menghadirkan tantangan komunikasi yang unik, termasuk struktur logam, interferensi elektromagnetik, dan kompartemen yang terisolasi secara fisik.

Fase keempat dan yang terbaru sejalan dengan munculnya ekosistem komunikasi Maritime 4.0. Pada fase ini, teknologi komunikasi tidak lagi dipandang sekadar sebagai mekanisme transmisi data, melainkan sebagai infrastruktur dasar yang mendukung pengambilan keputusan cerdas, pemeliharaan prediktif, operasi otonom, dan teknologi digital twin. Temuan bibliometrik yang dilaporkan oleh [5] menunjukkan

bahwa penelitian komunikasi maritim semakin berfokus pada inisiatif transformasi digital, pelayaran cerdas, integrasi kecerdasan buatan, dan teknologi kapal otonom.

Sebuah pengamatan kritis yang muncul dari literatur yang ditinjau adalah bahwa sebagian besar studi yang ada berfokus pada teknologi komunikasi dalam aplikasi maritim umum, termasuk pemantauan lingkungan, pelacakan kapal, dan komunikasi jarak jauh. Relatif sedikit studi yang secara khusus membahas arsitektur komunikasi di lingkungan ruang mesin, meskipun ruang mesin merupakan salah satu area kapal niaga yang paling padat sensor dan sangat penting secara operasional. Selain itu, meskipun teknologi LPWAN telah menunjukkan karakteristik kinerja yang menjanjikan, analisis sistematis yang meneliti kontribusi spesifiknya terhadap sistem pemantauan ruang mesin masih langka.

Temuan penting lainnya adalah keterbatasan integrasi antara penelitian teknologi komunikasi dan kerangka kerja implementasi Maritime 4.0. Studi-studi yang ada cenderung mengevaluasi metrik kinerja komunikasi seperti jangkauan, tingkat pengiriman paket, latensi, dan konsumsi energi secara terpisah, tanpa secara eksplisit mengkaji bagaimana teknologi-teknologi tersebut mendukung tujuan Maritime 4.0 yang lebih luas, termasuk pemeliharaan prediktif, manajemen aset cerdas, dan operasi kapal otonom. Fragmentasi ini membatasi kemampuan para peneliti dan praktisi untuk memahami peran strategis infrastruktur komunikasi dalam transformasi digital maritim.

Oleh karena itu, literatur menunjukkan adanya kesenjangan pengetahuan yang signifikan terkait perpaduan antara sistem komunikasi berbasis LoRa, aplikasi pemantauan ruang mesin, dan implementasi Maritime 4.0. Meskipun berbagai studi telah meneliti secara terpisah teknologi komunikasi maritim, arsitektur IoT, dan penerapan LPWAN, belum ada sintesis komprehensif yang secara sistematis mengkaji bagaimana sistem pemantauan berbasis LoRa dapat mendukung operasi ruang mesin yang cerdas dalam kerangka kerja Maritime 4.0.

Analisis Tema 1 menyoroti keunikan utama dari tinjauan literatur sistematis ini. Berbeda dengan studi sebelumnya yang meneliti teknologi komunikasi maritim, aplikasi IoT, atau sistem LPWAN secara terpisah, tinjauan ini mengintegrasikan aliran penelitian yang terfragmentasi tersebut ke dalam perspektif Maritime 4.0 yang terpadu. Secara khusus, studi ini memberikan kontribusi dengan : (1) Menyajikan sintesis komprehensif pertama yang berfokus pada evolusi teknologi komunikasi menuju sistem pemantauan ruang mesin berbasis LoRa pada kapal niaga; (2) Membangun hubungan konseptual antara evolusi komunikasi maritim, arsitektur Internet of Marine Things, dan strategi implementasi Maritime 4.0; (3) Mengidentifikasi transisi teknologi dari sistem komunikasi kapal konvensional ke infrastruktur pemantauan cerdas berbasis LPWAN; (4) Mengungkap kesenjangan penelitian kritis terkait arsitektur komunikasi untuk lingkungan ruang mesin, yang masih kurang dieksplorasi meskipun penting bagi keselamatan kapal, pemeliharaan, dan efisiensi operasional. (5) Menyediakan landasan untuk pengembangan peta jalan penelitian masa depan yang mengintegrasikan teknologi komunikasi LoRa, sistem pemeliharaan prediktif, digital twins, dan operasi maritim otonom. Kontribusi ini memperluas pemahaman saat ini tentang bagaimana teknologi komunikasi telah berevolusi dari alat operasional terpisah menjadi pendorong strategis Maritime 4.0 dan menetapkan dasar teoretis untuk tema-tema selanjutnya yang membahas arsitektur LoRa, sistem pemantauan ruang mesin, dan operasi maritim cerdas.

Pengembangan Sistem Pemantauan Ruang Mesin Berbasis Internet of Things (IoT)

Pengembangan sistem pemantauan ruang mesin berbasis Internet of Things (IoT) merupakan salah satu kemajuan teknologi paling transformatif yang mendukung terwujudnya Maritime 4.0. Secara tradisional, pemantauan ruang mesin bergantung pada inspeksi manual, jadwal pemeliharaan berkala, dan sistem pengawasan terpusat yang terhubung melalui infrastruktur kabel yang luas. Meskipun pendekatan ini memberikan pengawasan operasional dasar, namun sering kali mengalami kendala berupa skalabilitas yang terbatas, keterlambatan deteksi kesalahan, biaya pemasangan yang tinggi, dan visibilitas kondisi mesin yang tidak memadai secara real-time. Meningkatnya permintaan akan efisiensi operasional, pemeliharaan prediktif, optimalisasi energi, dan manajemen keselamatan telah mempercepat transisi menuju sistem pemantauan cerdas yang mampu secara terus-menerus mengumpulkan, mentransmisikan, memproses, dan menganalisis data operasional dari mesin kapal.

Munculnya teknologi IoT telah mengubah secara mendasar arsitektur sistem pemantauan ruang mesin. Alih-alih bergantung pada instrumen terpisah dan panel kontrol lokal, kerangka kerja pemantauan ruang mesin modern memanfaatkan jaringan yang saling terhubung antara sensor, perangkat komunikasi,

prosesor tertanam, platform cloud, dan alat analitik untuk menciptakan ekosistem pemantauan terintegrasi. Sistem semacam ini memungkinkan pengumpulan data secara berkelanjutan terhadap parameter-parameter kritis, termasuk suhu, tekanan, getaran, konsumsi bahan bakar, kondisi pelumasan, emisi gas buang, beban listrik, dan status operasional peralatan. Akibatnya, operator kapal dapat memperoleh kesadaran situasional secara real-time mengenai kinerja mesin dan menerapkan strategi pemeliharaan berbasis data yang meningkatkan keandalan serta mengurangi risiko operasional.

Salah satu upaya paling awal untuk mengintegrasikan konsep IoT ke dalam pengelolaan ruang mesin dilaporkan oleh [3], yang mengusulkan arsitektur ruang mesin cerdas berbasis sistem multiprosesor dan pertukaran informasi terdistribusi. Studi tersebut memperkenalkan konsep integrasi berbagai perangkat sensor melalui jaringan komunikasi yang saling terhubung, yang menjadi landasan bagi pengembangan ruang mesin cerdas di masa depan. Meskipun kemampuan komunikasi pada saat itu masih relatif terbatas, studi tersebut menyoroti pentingnya penginderaan terdistribusi dan berbagi informasi secara real-time dalam meningkatkan manajemen ruang mesin.

Evolusi teknologi IoT maritim kemudian memperluas kemampuan sistem pemantauan cerdas. Pada penelitian [4] menunjukkan kelayakan mengintegrasikan teknologi komunikasi berdaya rendah ke dalam lingkungan pemantauan maritim melalui pengembangan platform pemantauan lingkungan berbasis NB-IoT. Meskipun penelitian ini terutama berfokus pada parameter lingkungan, arsitekturnya memberikan wawasan berharga tentang bagaimana jaringan IoT nirkabel dapat diterapkan dalam lingkungan maritim untuk mendukung akuisisi data berkelanjutan dan aplikasi pemantauan jarak jauh.

Kemajuan lebih lanjut dalam infrastruktur komunikasi maritim telah memungkinkan terwujudnya arsitektur pemantauan yang lebih canggih. Pada penelitian [6] menekankan pentingnya teknologi jaringan jarak jauh bagi komunikasi di ruang mesin, dengan menunjukkan bagaimana sistem pemantauan di atas kapal dapat bertukar informasi dengan pusat manajemen jarak jauh. Kemampuan ini sangat penting dalam ekosistem Maritime 4.0, di mana pengambilan keputusan operasional semakin bergantung pada konektivitas yang lancar antara sistem di atas kapal dan platform digital berbasis darat.

Perkembangan terkini juga berfokus pada pemantauan mesin cerdas dan diagnosis kerusakan. Pada penelitian [1] mengembangkan sistem deteksi kerusakan mesin diesel laut tertanam berdasarkan platform Xilinx ZYNQ System-on-Chip. Studi mereka menunjukkan bahwa teknologi penginderaan dan komputasi tertanam yang canggih dapat secara signifikan meningkatkan pemantauan kondisi mesin dengan memungkinkan identifikasi kerusakan yang cepat dan evaluasi kinerja secara real-time. Temuan tersebut menunjukkan bahwa sistem pemantauan cerdas berkembang melampaui platform akuisisi data sederhana menuju sistem pendukung keputusan terintegrasi yang mampu mendukung strategi pemeliharaan prediktif.

Semakin pentingnya pemantauan keselamatan di ruang mesin telah semakin mempercepat penerapan teknologi IoT. Pada penelitian [2] mengusulkan kerangka kerja pemantauan untuk mendeteksi kebocoran amonia bertekanan tinggi di ruang mesin kapal, yang menyoroti peran krusial teknologi sensor real-time dalam mencegah insiden berbahaya. Studi tersebut menunjukkan bagaimana sistem sensor terdistribusi dapat meningkatkan manajemen keselamatan dengan memberikan peringatan dini dan memungkinkan intervensi cepat sebelum insiden berkembang menjadi risiko operasional yang serius.

Penerapan sistem pemantauan IoT yang semakin meluas juga telah menghasilkan volume besar data operasional yang dapat dimanfaatkan untuk analisis canggih. Pada penelitian [9] mendemonstrasikan potensi teknik pembelajaran mesin dalam memprediksi konsumsi bahan bakar kapal di bawah kondisi operasional nyata. Meskipun studi mereka tidak secara langsung berfokus pada arsitektur pemantauan ruang mesin, studi tersebut menggambarkan bagaimana data yang dihasilkan dari sistem pemantauan berbasis IoT dapat mendukung pengambilan keputusan cerdas, optimasi operasional, dan pemeliharaan prediktif dalam lingkungan Maritime 4.0.

Selain itu, keberlanjutan sistem pemantauan IoT di masa depan semakin didukung oleh kemajuan dalam teknologi sensor yang hemat energi. Pada penelitian [8] mengembangkan sistem pemanenan energi getaran triboelektrik yang mampu menyalakan node sensor nirkabel sambil mentransmisikan data pemantauan sejauh lebih dari 1000 meter. Teknologi semacam itu memiliki implikasi signifikan bagi aplikasi pemantauan ruang mesin karena dapat mengurangi kebutuhan pemeliharaan yang terkait dengan penggantian baterai dan memfasilitasi penyebaran jangka panjang jaringan sensor otonom di ruang mesin yang sulit dijangkau.

Tabel 2. Pengembangan Sistem Pemantauan Ruang Mesin Berbasis IoT

Penulis	Judul	Negara	Tujuan	Metode	Temuan Utama	Jurnal/ Sumber
[3]	Sistem IoT Ruang Mesin Cerdas Berbasis Multi-Prosesor (2023)	China	Untuk mengembangkan arsitektur pemantauan ruang mesin yang cerdas	Desain arsitektur sistem	Mengusulkan kerangka kerja ruang mesin berbasis IoT yang terintegrasi, yang menggabungkan sistem sensor terdistribusi dan pertukaran informasi	Microelectronics & Computer
[4]	Design and Realization of Marine Internet of Things Environmental Parameter Acquisition System Based on NB-IoT Technology (2021)	China	To develop a maritime IoT monitoring platform	Prototype development and testing	Demonstrated the feasibility of low-power IoT communication in maritime environments	ICCBN Proc.
[6]	Penerapan Teknologi Jaringan Jarak Jauh dalam Komunikasi Ruang Mesin Kapal (2021)	China	Untuk meneliti teknologi komunikasi jarak jauh untuk ruang mesin	Analisis arsitektur komunikasi	Menyoroti peran jaringan jarak jauh dalam pengelolaan kapal cerdas	Springer Proc.
[7]	Studi Kelayakan untuk Penerapan Jaringan Sensor dan Aktuator LPWAN di Lingkungan Kapal dalam Rangka IoMT (2023)	Greece	Untuk mengevaluasi penerapan LPWAN di atas kapal	Studi kelayakan dan penilaian eksperimental	Menunjukkan kelayakan penerapan teknologi LPWAN di lingkungan kapal dan pengembangan IoMT	AIP Con.Proc
[1]	Deteksi Kerusakan Mesin Diesel Kapal Berbasis SoC Xilinx ZYNQ (2024)	China	Untuk meningkatkan diagnosis kerusakan mesin kapal	Pengembangan dan pengujian sistem tertanam	Telah membuktikan kemampuan deteksi kesalahan secara cerdas dan real-time	Applied Sciences

[9]	Metode Pembelajaran Mendalam untuk Memprediksi Konsumsi Bahan Bakar Kapal dalam Kondisi Operasional Nyata (2024)	Finland /UK	Untuk mengembangkan model prediksi berbasis kecerdasan buatan (AI) untuk operasi kapal	Deep learning and analisis data operasional	Menunjukkan manfaat data pemantauan operasional bagi analisis prediktif	Engineering App. of AI
[8]	Pengumpul Energi Getaran Triboelektrik Berperforma Tinggi dan Dapat Ditumpuk yang Mirip Trampolin untuk Menyediakan Daya Secara Langsung pada Node Sensor dengan Data yang Dikirimkan Secara Nirkabel hingga Jarak Lebih dari 1000 m (2024)	China	Untuk mengembangkan sistem sensor nirkabel yang bertenaga mandiri	Pengembangan eksperimen dan evaluasi kinerja	Telah terbukti memiliki kemampuan penginderaan otonom jangka panjang untuk sistem pemantauan nirkabel	Advanced Energy Materials
[2]	Pendekatan Berbasis Skor untuk Pemantauan Kebocoran Amonia Bertekanan Tinggi di Ruang Mesin Kapal (2022)	China	Untuk meningkatkan pemantauan keselamatan di ruang mesin	Pengembangan kerangka kerja penilaian risiko dan pemantauan	Menunjukkan keefektifan pemantauan secara real-time untuk deteksi bahaya	Ocean Engineering

Temuan yang disajikan dalam Tabel 2 menunjukkan evolusi teknologi yang jelas, mulai dari perangkat pemantauan terpisah menuju ekosistem pemantauan ruang mesin berbasis IoT yang sepenuhnya terintegrasi. Literatur menunjukkan bahwa pengembangan sistem pemantauan ruang mesin cerdas dapat diklasifikasikan ke dalam empat tahap teknologi: arsitektur sensor terdistribusi, integrasi IoT maritim, pemantauan kondisi cerdas, dan manajemen prediktif berbasis data.

Tahap paling awal berfokus terutama pada pembangunan infrastruktur pemantauan yang saling terhubung dan mampu mengumpulkan informasi dari berbagai sistem mesin. Pada penelitian [3], memperkenalkan salah satu arsitektur ruang mesin cerdas pertama yang menekankan pada sensor terdistribusi dan berbagi informasi. Studi ini mewakili pergeseran konseptual yang signifikan karena

mengakui bahwa pemantauan ruang mesin tidak boleh terbatas pada instrumen individu, melainkan harus melibatkan sistem informasi terintegrasi yang mampu mendukung pengambilan keputusan operasional.

Tahap kedua melibatkan integrasi teknologi IoT maritim. Studi oleh [4] dan [7], menunjukkan bahwa teknologi komunikasi nirkabel dapat secara efektif mendukung penginderaan terdistribusi di lingkungan maritim. Studi-studi ini menunjukkan bahwa arsitektur IoT dapat secara signifikan meningkatkan fleksibilitas pemantauan dengan mengurangi ketergantungan pada infrastruktur kabel sekaligus memungkinkan penyebaran sensor skala besar. Munculnya teknologi LPWAN semakin meningkatkan kemampuan ini dengan menyediakan komunikasi jarak jauh dan konsumsi daya yang lebih rendah, yang keduanya sangat penting untuk aplikasi pemantauan di atas kapal.

Tahap ketiga berkaitan dengan penerapan fungsi pemantauan kondisi cerdas. Alih-alih sekadar mentransmisikan data sensor, sistem pemantauan modern semakin banyak mengintegrasikan kemampuan komputasi tertanam yang mampu memproses informasi secara lokal dan mengidentifikasi kondisi operasi yang tidak normal. Karya [1] menggambarkan transisi ini dengan menunjukkan bagaimana algoritma deteksi kesalahan tertanam dapat mendukung diagnostik mesin secara real-time. Evolusi ini sejalan dengan tujuan Maritime 4.0, yang menekankan pemantauan otonom, pemeliharaan cerdas, dan ketahanan operasional yang ditingkatkan.

Tahap keempat melibatkan kemunculan sistem manajemen prediktif berbasis data. Studi oleh [9] menggambarkan bagaimana data operasional yang dihasilkan oleh sistem pemantauan dapat diubah menjadi pengetahuan yang dapat ditindaklanjuti melalui teknik kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin. Demikian pula, [2] menunjukkan bagaimana pemantauan berkelanjutan dapat mendukung manajemen keselamatan proaktif dengan memungkinkan deteksi dini kondisi berbahaya di ruang mesin. Perkembangan ini menunjukkan bahwa sistem pemantauan IoT berkembang dari alat pengamatan pasif menjadi platform dukungan keputusan aktif yang mampu mengoptimalkan operasi kapal.

Tren penting lainnya yang diidentifikasi dari literatur adalah penekanan yang semakin besar pada keberlanjutan energi. Sistem pemantauan nirkabel konvensional sering menghadapi batasan operasional akibat persyaratan pemeliharaan baterai. Studi oleh [8] mengatasi tantangan ini dengan menunjukkan kelayakan sistem sensor nirkabel bertenaga mandiri berbasis pemanenan energi getaran. Perkembangan ini sangat relevan untuk lingkungan ruang mesin di mana getaran mesin yang berkelanjutan menyediakan peluang melimpah untuk pemanenan energi. Kombinasi teknologi pengumpulan energi dengan sistem komunikasi berdaya rendah seperti LoRa berpotensi memfasilitasi infrastruktur pemantauan otonom jangka panjang dengan persyaratan pemeliharaan minimal.

Meskipun kemajuan ini, beberapa celah kritis tetap terlihat. Pertama, sebagian besar studi yang ada meneliti komponen individu dari sistem pemantauan ruang mesin, termasuk teknologi sensor, arsitektur komunikasi, algoritma deteksi kesalahan, atau analitik prediktif. Kerangka kerja komprehensif yang mengintegrasikan komponen-komponen ini ke dalam arsitektur Maritime 4.0 yang terpadu masih langka. Kedua, meskipun teknologi LPWAN telah menunjukkan potensi yang cukup besar untuk aplikasi maritim, studi empiris yang secara khusus mengevaluasi penerapan LoRa di lingkungan ruang mesin masih terbatas. Ketiga, interaksi antara infrastruktur komunikasi, jaringan sensor IoT, sistem kecerdasan buatan, dan platform kapal digital belum diteliti secara sistematis. Akibatnya, mekanisme di mana sistem pemantauan yang didukung LoRa berkontribusi terhadap tujuan Maritime 4.0 yang lebih luas masih belum dipahami secara memadai.

Literatur juga menunjukkan adanya ketimpangan yang signifikan antara penelitian mengenai teknologi pemantauan dan penelitian mengenai strategi implementasi. Banyak studi berfokus pada kelayakan teknis tanpa membahas tantangan penerapan praktis seperti interoperabilitas, keamanan siber, keandalan jaringan di lingkungan logam, skalabilitas lintas jenis kapal, dan integrasi dengan sistem manajemen kapal yang sudah ada. Keterbatasan ini menunjukkan perlunya pemahaman yang lebih holistik terhadap sistem pemantauan ruang mesin berbasis IoT yang melampaui komponen teknologi individual.

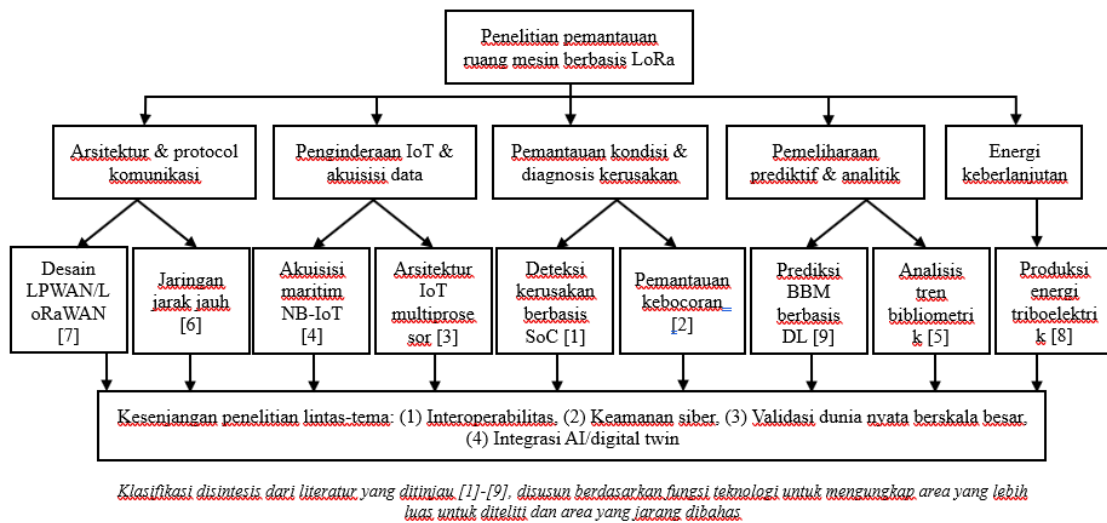
Temuan yang disintesis di bawah Tema 2 menyoroti kontribusi unik dari tinjauan literatur sistematis ini. Studi yang ada telah menyelidiki aspek-aspek individual dari pemantauan ruang mesin, termasuk komunikasi nirkabel, deteksi kesalahan, pemantauan keselamatan, pengumpulan energi, dan analitik prediktif. Namun, tidak ada tinjauan sebelumnya yang secara sistematis mengintegrasikan aliran penelitian ini dalam perspektif Maritime 4.0 yang terpadu.

Untuk memperkuat sintesis kritis di atas, Tabel 3 menyajikan comparative analysis yang membandingkan secara eksplisit studi-studi kunci yang ditinjau berdasarkan teknologi komunikasi, domain aplikasi, serta kontribusi dan keterbatasannya. Perbandingan langsung ini menunjukkan bahwa meskipun studi [3], [4], [6], dan [7] sama-sama berkontribusi pada evolusi konektivitas ruang mesin, keempatnya berbeda secara signifikan dalam tingkat kematangan teknologi dan orientasi aplikasinya: studi [3] bersifat konseptual-arsitektural, studi [4] dan [6] menekankan kelayakan komunikasi nirkabel pada level sistem, sedangkan studi [7] sudah secara spesifik menyasar LPWAN sebagai enabler IoMT. Sementara itu, studi [1], [2], [8], dan [9] memperluas cakupan ke arah diagnostik cerdas, keselamatan, keberlanjutan energi, dan analitik prediktif, namun tidak satu pun yang mengintegrasikan keempat dimensi tersebut ke dalam satu arsitektur pemantauan yang utuh. Kekosongan inilah yang secara eksplisit ditegaskan kembali sebagai kontribusi sintesis dari tinjauan ini.

Tabel 3. Comparative Analysis Studi Kunci Berdasarkan Teknologi Komunikasi, Domain Aplikasi, Kontribusi, dan Keterbatasan

Ref	Teknologi Komunikasi	Domain Aplikasi	Kontribusi Utama	Keterbatasan
[3]	Arsitektur multiprosesor (belum spesifik LPWAN)	Ruang mesin (konseptual)	Meletakkan dasar konsep ruang mesin cerdas berbasis sensor terdistribusi	Tidak menggunakan LPWAN/LoRa; validasi terbatas
[4]	NB-IoT	Lingkungan laut	Membuktikan kelayakan komunikasi berdaya rendah untuk akuisisi data maritim real-time	Fokus parameter lingkungan, bukan ruang mesin
[6]	Jaringan jarak jauh (umum)	Ruang mesin kapal	Menunjukkan jaringan jarak jauh sebagai faktor kunci manajemen kapal cerdas	Belum spesifik pada protokol LPWAN/LoRa
[7]	LPWAN	Sensor/aktuator kapal (IoMT)	Membuktikan kelayakan LPWAN sebagai enabler IoMT di lingkungan kapal	Skala uji terbatas; belum diuji pada ruang mesin operasional skala penuh
[1]	SoC tertanam (non-LPWAN)	Diagnosis mesin diesel	Menunjukkan deteksi kerusakan real-time berbasis komputasi tertanam	Tidak membahas lapisan komunikasi/transmisi data jarak jauh
[8]	Triboelektrik + transmisi nirkabel	Node sensor mandiri energi	Transmisi data hingga >1000 m tanpa baterai eksternal	Belum diuji spesifik pada lingkungan ruang mesin kapal
[9]	Tidak spesifik (data-driven)	Prediksi konsumsi BBM	Menunjukkan nilai analitik prediktif berbasis data pemantauan operasional	Tidak terhubung langsung dengan arsitektur sensor ruang mesin
[2]	Sensor pemantauan real-time	Keselamatan ruang mesin	Menunjukkan nilai deteksi dini bahaya kebocoran amonia	Belum terintegrasi dengan jaringan komunikasi berdaya rendah berskala luas

Untuk memvisualisasikan pengelompokan tematik secara lebih sistematis, Gambar 2 menyajikan taksonomi penelitian yang mengklasifikasikan seluruh literatur yang ditinjau ke dalam lima kategori fungsional, yaitu arsitektur dan protokol komunikasi, penginderaan IoT dan akuisisi data, pemantauan kondisi dan diagnosis kerusakan, pemeliharaan prediktif dan analitik, serta energi dan keberlanjutan. Taksonomi ini secara visual menegaskan pengamatan yang telah disampaikan pada Tema 1 dan Tema 2, yaitu bahwa setiap cabang taksonomi memiliki representasi studi yang relatif memadai secara individual, namun simpul-simpul tersebut belum pernah disatukan dalam satu arsitektur pemantauan yang koheren, sehingga kesenjangan lintas-tema pada interoperabilitas, keamanan siber, validasi dunia nyata berskala besar, dan integrasi AI/digital twin tetap terbuka sebagai prioritas penelitian mendatang.



Gambar 2. Taksonomi Penelitian Sistem Pemantauan Ruang Mesin Berbasis LoRa

Tinjauan ini memberikan kontribusi pada literatur dalam beberapa cara penting. Pertama, tinjauan ini menyediakan sintesis komprehensif pertama mengenai sistem pemantauan ruang mesin berbasis IoT dengan fokus khusus pada evolusinya menuju arsitektur Maritime 4.0 yang didukung LoRa. Kedua, tinjauan ini menetapkan kerangka konseptual yang menghubungkan teknologi sensor, infrastruktur komunikasi, diagnostik cerdas, pemeliharaan prediktif, dan transformasi maritim digital. Ketiga, tinjauan ini mengidentifikasi perkembangan teknologi dari sistem sensor terdistribusi menuju ekosistem pemantauan otonom cerdas yang mampu mendukung kapal pintar generasi berikutnya. Keempat, tinjauan ini mengungkap celah penelitian kritis terkait implementasi LoRa, interoperabilitas, keberlanjutan energi, dan integrasi dukungan keputusan cerdas di lingkungan ruang mesin. Terakhir, tinjauan ini mengusulkan peta jalan penelitian masa depan untuk pengembangan sistem pemantauan ruang mesin yang skalabel, efisien energi, interoperabel, dan cerdas, yang mampu mempercepat realisasi Maritime 4.0.

Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa sistem pemantauan berbasis LoRa tidak boleh dipandang sekadar sebagai teknologi komunikasi, melainkan sebagai infrastruktur dasar yang memungkinkan konvergensi IoT, kecerdasan buatan, pemeliharaan prediktif, dan ekosistem kapal digital dalam kapal niaga masa depan.

Temuan tinjauan ini menunjukkan bahwa pengembangan sistem pemantauan ruang mesin berbasis IoT merupakan komponen mendasar dari transformasi Maritime 4.0 yang lebih luas. Sejalan dengan prinsip-prinsip Industri 4.0, digitalisasi maritim semakin bergantung pada sistem siber-fisik yang saling terhubung, infrastruktur sensor cerdas, jaringan komunikasi nirkabel, serta kemampuan pengambilan keputusan berbasis data. Studi-studi yang ditinjau dalam Tema 2 secara kolektif menunjukkan bahwa teknologi pemantauan ruang mesin telah berevolusi dari sistem instrumentasi terisolasi menuju ekosistem digital terintegrasi yang mampu mendukung kesadaran operasional real-time, pemeliharaan prediktif, dan dukungan pengambilan keputusan otonom. Evolusi ini sejalan dengan analisis terbaru mengenai

transformasi digital maritim, yang mengidentifikasi infrastruktur IoT sebagai salah satu pilar teknologi utama yang memfasilitasi pengembangan Maritime 4.0 dan pelayaran cerdas [12].

Transisi dari sistem pemantauan konvensional menuju arsitektur yang didukung IoT didukung kuat oleh evolusi teknologi yang diidentifikasi dalam studi-studi yang ditinjau. Studi oleh [3] memperkenalkan salah satu konsep ruang mesin cerdas paling awal berdasarkan sensor terdistribusi dan prosesor yang saling terhubung, sementara studi-studi selanjutnya memperluas paradigma ini melalui jaringan nirkabel, pemantauan jarak jauh, dan diagnostik cerdas. Temuan ini sejalan dengan argumen bahwa sistem maritim modern semakin bergantung pada arsitektur sensor terdistribusi yang mampu mengumpulkan volume besar data operasional dari aset yang tersebar secara geografis [13]. Kerangka kerja Maritime 4.0 kontemporer menekankan bahwa kapal digital memerlukan aliran data yang berkelanjutan antara mesin di atas kapal, sistem komunikasi, dan platform pendukung keputusan untuk mencapai tingkat otomatisasi dan kecerdasan operasional yang lebih tinggi [12].

Temuan tersebut juga menunjukkan bahwa teknologi komunikasi merupakan lapisan pendukung yang sangat penting yang menghubungkan sensor ruang mesin dengan sistem analitik dan manajemen tingkat atas. Studi yang dilakukan oleh [4], [6]-[7], menunjukkan bahwa infrastruktur komunikasi nirkabel semakin menggantikan arsitektur kabel tradisional karena fleksibilitas, skalabilitas, dan kemudahan pemasangannya. Pengamatan ini didukung oleh tinjauan terbaru mengenai teknologi komunikasi maritim, yang menekankan bahwa operasi maritim di masa depan akan memerlukan kerangka kerja komunikasi yang mampu mendukung komunikasi mesin-ke-mesin skala besar, aplikasi Internet of Marine Things (IoMT), dan sistem pengambilan keputusan otonom [14]. Penelitian komunikasi maritim semakin mengakui bahwa teknologi komunikasi nirkabel tidak lagi sekadar saluran transmisi, melainkan infrastruktur strategis yang mendukung transformasi digital di seluruh operasi kapal.

Temuan yang sangat penting dari tinjauan ini adalah meningkatnya signifikansi teknologi LPWAN, terutama LoRa dan LoRaWAN, untuk aplikasi pemantauan di atas kapal. Studi komunikasi maritim yang ada menunjukkan bahwa teknologi nirkabel konvensional seperti Wi-Fi, Bluetooth, dan ZigBee sering menghadapi keterbatasan terkait jangkauan, konsumsi daya, dan keandalan sinyal di lingkungan maritim yang kompleks yang ditandai dengan struktur logam dan interferensi elektromagnetik [14]. Sebaliknya, teknologi LPWAN menawarkan jangkauan komunikasi yang lebih luas, kebutuhan daya yang lebih rendah, dan skalabilitas yang lebih baik, sehingga sangat cocok untuk aplikasi pemantauan ruang mesin yang tersebar. Temuan ini sejalan dengan tinjauan sistematis terbaru mengenai penerapan LoRaWAN maritim, yang menunjukkan bahwa sistem komunikasi berbasis LoRa memiliki potensi besar untuk mendukung infrastruktur IoT maritim yang hemat energi sambil mempertahankan keandalan komunikasi di bawah kondisi lingkungan yang menantang [14].

Pengamatan penting lainnya berkaitan dengan semakin eratnya konvergensi antara sistem pemantauan IoT dan aplikasi kecerdasan buatan. Studi yang dilakukan oleh [9] menggambarkan bagaimana data operasional yang dihasilkan oleh sistem pemantauan di atas kapal dapat diubah menjadi wawasan prediktif melalui algoritma pembelajaran mesin. Temuan ini mendukung perspektif teoretis yang lebih luas dari Maritime 4.0, yang mengkonseptualisasikan sistem IoT tidak hanya sebagai mekanisme pengumpulan data, tetapi juga sebagai infrastruktur dasar yang mendukung analitik cerdas dan pengambilan keputusan otonom. Tinjauan terbaru mengenai aplikasi IoT maritim juga menyimpulkan bahwa nilai terbesar dari sistem pemantauan digital muncul ketika teknologi sensor diintegrasikan dengan kecerdasan buatan, analitik prediktif, dan kerangka kerja pendukung pengambilan keputusan yang mampu mengubah data operasional mentah menjadi pengetahuan yang dapat ditindaklanjuti [12], [13].

Temuan tersebut lebih lanjut menunjukkan bahwa pemeliharaan prediktif muncul sebagai salah satu aplikasi paling strategis dari sistem pemantauan ruang mesin berbasis IoT. Kerangka kerja deteksi kegagalan yang diusulkan oleh [1] dan pendekatan pemodelan prediktif yang dikembangkan oleh [9] secara kolektif menunjukkan pergeseran yang semakin meningkat dari strategi pemeliharaan korektif dan preventif menuju paradigma pemeliharaan berbasis kondisi dan prediktif. Transisi ini sejalan dengan teori Industri 4.0 kontemporer, yang berargumen bahwa pemantauan kondisi berkelanjutan dan diagnostik prediktif dapat secara signifikan mengurangi kegagalan peralatan, biaya pemeliharaan, dan gangguan operasional. Dalam konteks maritim, pemeliharaan prediktif sangat berharga karena kegagalan mesin di laut sering kali mengakibatkan kerugian ekonomi yang signifikan, risiko keselamatan, dan konsekuensi

lingkungan. Oleh karena itu, sistem pemantauan yang didukung LoRa dapat berfungsi sebagai landasan teknologi kritis untuk menerapkan kerangka kerja pemeliharaan prediktif di seluruh armada kapal niaga.

Tinjauan ini juga menyoroti pentingnya aplikasi pemantauan yang berorientasi pada keselamatan. Studi oleh [2] menunjukkan nilai teknologi sensor real-time dalam mendeteksi kebocoran amonia berbahaya di ruang mesin kapal. Temuan ini memperkuat argumen bahwa sistem pemantauan berbasis IoT tidak hanya berkontribusi pada efisiensi operasional, tetapi juga pada keselamatan kerja dan manajemen risiko. Kerangka kerja Maritime 4.0 kontemporer semakin mengakui pemantauan keselamatan sebagai komponen strategis dari operasi kapal cerdas karena deteksi bahaya secara real-time memungkinkan waktu respons yang lebih cepat, meminimalkan risiko kecelakaan, dan meningkatkan perlindungan awak kapal. Akibatnya, arsitektur pemantauan yang didukung LoRa di masa depan harus dirancang tidak hanya untuk mendukung penilaian kinerja mesin tetapi juga untuk memfasilitasi sistem manajemen keselamatan terintegrasi.

Kontribusi tambahan dari tinjauan ini berkaitan dengan hubungan yang mulai muncul antara keberlanjutan energi dan sistem pemantauan cerdas. Perkembangan teknologi sensor bertenaga mandiri yang dilaporkan oleh [8] menunjukkan bahwa infrastruktur IoT maritim di masa depan mungkin akan menjadi semakin otonom melalui integrasi mekanisme pemanenan energi. Temuan ini sangat relevan karena penggantian baterai tetap menjadi salah satu tantangan pemeliharaan utama yang terkait dengan penerapan sensor nirkabel berskala besar. Kombinasi teknologi pemanenan energi dan protokol komunikasi berdaya rendah seperti LoRa dapat secara signifikan meningkatkan keberlanjutan jangka panjang sistem pemantauan ruang mesin sekaligus mengurangi persyaratan pemeliharaan operasional. Studi terbaru mengenai solusi IoT maritim berkelanjutan juga mengidentifikasi komunikasi hemat energi dan sensor otonom sebagai prioritas penelitian kritis untuk generasi berikutnya sistem Maritime 4.0 [12].

Meskipun terdapat kemajuan teknologi ini, temuan menunjukkan beberapa tantangan yang belum terselesaikan. Pertama, sebagian besar studi yang ada berfokus pada komponen teknologi terpisah daripada ekosistem pemantauan ruang mesin yang terintegrasi. Sistem komunikasi, jaringan sensor, algoritma kecerdasan buatan, platform pemeliharaan prediktif, dan kerangka kerja manajemen keselamatan sering kali diteliti secara terpisah. Akibatnya, pemahaman tentang bagaimana komponen-komponen ini berinteraksi dalam lingkungan operasional Maritime 4.0 masih terbatas. Kedua, studi empiris yang mengevaluasi penerapan LoRa secara khusus di lingkungan ruang mesin masih relatif langka meskipun minat terhadap teknologi LPWAN terus meningkat. Ketiga, masalah terkait interoperabilitas, keamanan siber, keandalan komunikasi, dan integrasi dengan platform kapal digital masih belum ditangani secara memadai. Pengamatan ini sejalan dengan tinjauan terbaru yang mengidentifikasi integrasi sistem, ketahanan, keamanan siber, dan interoperabilitas sebagai hambatan utama dalam transformasi digital maritim [14], [15].

Dari perspektif teoretis, tinjauan ini berkontribusi pada perkembangan pengetahuan tentang Maritime 4.0 dengan memperluas konseptualisasi digitalisasi maritim melampaui adopsi IoT secara umum. Temuan menunjukkan bahwa sistem pemantauan ruang mesin yang didukung LoRa harus dipahami sebagai infrastruktur siber-fisik yang menghubungkan teknologi sensor, jaringan komunikasi, analisis data, dan proses pengambilan keputusan cerdas dalam kerangka operasional terpadu. Perspektif ini memperkaya teori Maritime 4.0 saat ini dengan menyoroti peran sentral arsitektur pemantauan yang didukung komunikasi dalam memfasilitasi transisi menuju operasi kapal yang otonom, cerdas, dan berbasis data.

Dari perspektif praktis, tinjauan ini memberikan beberapa implikasi bagi operator kapal, pengembang teknologi maritim, badan klasifikasi, dan pembuat kebijakan. Operator kapal dapat memanfaatkan sistem pemantauan berbasis LoRa untuk meningkatkan keandalan mesin, mengurangi biaya pemeliharaan, dan meningkatkan keselamatan operasional. Pengembang teknologi dapat memanfaatkan kesenjangan penelitian yang teridentifikasi untuk merancang arsitektur pemantauan yang lebih tangguh dan interoperabel yang disesuaikan dengan lingkungan kapal. Lembaga klasifikasi dapat mempertimbangkan untuk memasukkan teknologi pemantauan nirkabel ke dalam standar dan pedoman kapal digital di masa depan. Sementara itu, pembuat kebijakan dapat mendukung inisiatif digitalisasi maritim dengan mendorong adopsi infrastruktur komunikasi yang memfasilitasi pemeliharaan prediktif, manajemen keselamatan, dan operasi kapal yang berkelanjutan.

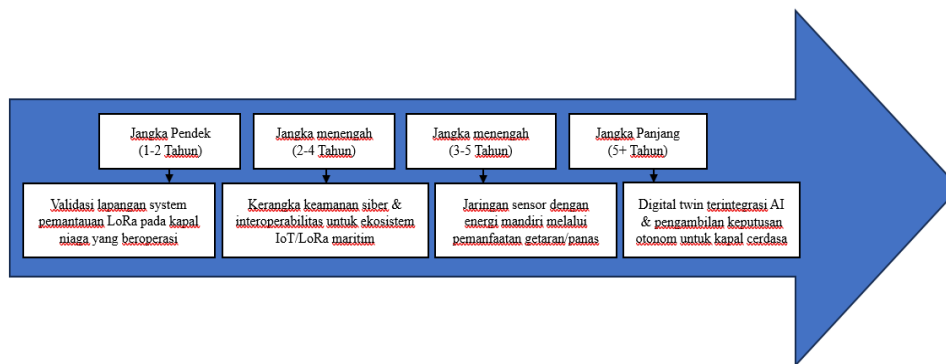
Kontribusi utama dari studi ini terletak pada integrasi komprehensif berbagai bidang penelitian yang terpisah-pisah ke dalam kerangka kerja Maritime 4.0 yang terpadu. Meskipun studi-studi sebelumnya telah



meneliti secara terpisah teknologi komunikasi maritim, aplikasi IoT, sistem pemantauan mesin, jaringan LPWAN, dan pendekatan pemeliharaan prediktif, tinjauan ini secara sistematis mensintesis bidang-bidang tersebut untuk menjelaskan bagaimana sistem pemantauan ruang mesin yang didukung LoRa dapat berfungsi sebagai pendorong utama transformasi digital maritim. Selain itu, studi ini mengidentifikasi kesenjangan teknologi yang kritis dan mengusulkan agenda penelitian yang menekankan arsitektur terintegrasi, diagnostik berbasis AI, infrastruktur sensor yang berkelanjutan, integrasi digital twin, dan operasi maritim otonom. Kontribusi ini memberikan landasan teoretis dan panduan praktis bagi upaya penelitian dan pengembangan di masa depan yang bertujuan mempercepat realisasi Maritime 4.0.

1. Peta Jalan Penelitian Masa Depan

Agar prioritas-prioritas tersebut dapat ditindaklanjuti secara terarah, Gambar 3 menyajikan peta jalan penelitian (research roadmap) yang menyusun rekomendasi di atas ke dalam empat horizon waktu. Dalam jangka pendek (1–2 tahun), prioritas utama adalah validasi lapangan pada kapal niaga yang beroperasi secara nyata. Dalam jangka menengah (2–5 tahun), perhatian diarahkan pada pengembangan kerangka keamanan siber dan interoperabilitas, serta pada jaringan sensor mandiri energi berbasis pemanenan getaran dan panas. Adapun dalam jangka panjang (5 tahun atau lebih), agenda penelitian diarahkan pada integrasi digital twin berbasis AI dan pengambilan keputusan otonom untuk mendukung kapal cerdas generasi berikutnya. Penahapan ini dimaksudkan untuk memberi arah yang lebih konkret bagi peneliti dan praktisi dibandingkan sekadar daftar rekomendasi yang bersifat datar.



Gambar 3. Peta Jalan Penelitian Masa Depan Sistem Pemantauan Ruang Mesin Berbasis LoRa

KESIMPULAN

Penelitian ini melakukan Systematic Literature Review (SLR) untuk menganalisis perkembangan sistem pemantauan ruang mesin berbasis LoRa dalam mendukung implementasi Maritime 4.0. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa teknologi LoRa memiliki potensi besar sebagai infrastruktur komunikasi untuk sistem pemantauan ruang mesin karena menawarkan konsumsi daya yang rendah, jangkauan komunikasi yang luas, serta kemampuan mendukung jaringan sensor yang terdistribusi. Selain itu, integrasi LoRa dengan Internet of Things (IoT), Internet of Marine Things (IoMT), Artificial Intelligence (AI), dan predictive maintenance dapat meningkatkan efisiensi operasional, keandalan mesin, serta keselamatan kapal. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa sintesis komprehensif mengenai perkembangan teknologi LoRa pada sistem pemantauan ruang mesin, penyusunan kerangka konseptual, identifikasi kesenjangan penelitian, serta penyajian arah pengembangan teknologi menuju implementasi Maritime 4.0. Hasil tinjauan juga menunjukkan bahwa penelitian mengenai penerapan LoRa secara khusus pada ruang mesin kapal masih terbatas dan sebagian besar masih berada pada tahap simulasi atau prototipe. Penelitian ini memiliki keterbatasan karena hanya menggunakan publikasi berbahasa Inggris yang terindeks pada basis data akademik utama, serta adanya variasi metode dan objek penelitian yang menyulitkan perbandingan secara langsung. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada validasi sistem pemantauan berbasis LoRa pada kapal niaga dalam kondisi operasional nyata, integrasi dengan teknologi Artificial Intelligence, Digital Twin, dan edge computing, serta pengembangan standar interoperabilitas dan keamanan siber untuk mendukung implementasi Maritime 4.0 secara lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Wu, R. Jiang, X. Wu, X. Chen, and T. Liu, "Marine Diesel Engine Fault Detection Based on Xilinx ZYNQ SoC," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 12, Jun. 2024, doi: 10.3390/app14125152.
- [2] W. Wu, B. Wei, G. Li, L. Chen, J. Wang, and J. Ma, "Study on ammonia gas high temperature corrosion coupled erosion wear characteristics of circulating fluidized bed boiler," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 132, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105896.
- [3] J. Zhang, J. Jiang, S. Zhang, P. Zhang, J. Dong, and Z. Sun, "A Review of Research on Intelligent Engine Room Systems," in *Advances in Transdisciplinary Engineering*, IOS Press BV, Oct. 2023, pp. 1003–1011. doi: 10.3233/ATDE230571.
- [4] L. Xie, C. Xing, Y. Wu, and D. Zhang, "Design and realization of marine internet of things environmental parameter acquisition system based on NB-IoT Technology," in *ACM International Conference Proceeding Series*, Association for Computing Machinery, Feb. 2021, pp. 257–260. doi: 10.1145/3456415.3456457.
- [5] G. P. Reddy, S. Sinha, and S.-H. Park, "Analysis of Research Trends in Maritime Communication," 2024. [Online]. Available: www.ijacsa.thesai.org
- [6] J. Kong, "Application and Research of Artificial Intelligence in Digital Library," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021, pp. 318–325. doi: 10.1007/978-981-33-4572-0_47.
- [7] J. Gu, M. Park, S. Lee, H. Kang, and B. Kim, "Evaluation of a Multi-Hop Wireless Internet-of-Things Network on Large Ships," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 12, Dec. 2023, doi: 10.3390/jmse11122243.
- [8] H. Yu *et al.*, "High Performance and Stackable Trampoline Like-Triboelectric Vibration Energy Harvester for In-Situ Powering Sensor Node with Data Wirelessly Transmitted Over 1000-m," *Adv. Energy Mater.*, vol. 14, no. 24, Jun. 2024, doi: 10.1002/aenm.202400585.
- [9] M. Zhang, N. Tsoulakos, P. Kujala, and S. Hirdaris, "A deep learning method for the prediction of ship fuel consumption in real operational conditions," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 130, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.engappai.2023.107425.
- [10] M. J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," Mar. 29, 2021, *Public Library of Science*. doi: 10.1371/JOURNAL.PMED.1003583.
- [11] M. L. Rethlefsen *et al.*, "PRISMA-S: an extension to the PRISMA Statement for Reporting Literature Searches in Systematic Reviews," *Syst. Rev.*, vol. 10, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s13643-020-01542-z.
- [12] L. Li, X. Ma, and J. Yang, "A bibliometric analysis on Internet of Things research for maritime industry 4.0," *Front. Mar. Sci.*, vol. 13, May 2026, doi: 10.3389/fmars.2026.1843040.
- [13] I. Durlík, T. Miller, D. Cembrowska-Lech, A. Krzemińska, E. Złoczowska, and A. Nowak, "Navigating the Sea of Data: A Comprehensive Review on Data Analysis in Maritime IoT Applications," Sep. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/app13179742.
- [14] I. Maglogiannis, S. Hadjiefthymiades, H. Marketing, E. S. Belgian Liaison Office, and B. Patrick Hartigan, "Biographical notes: Dr. Ilias Maglogiannis received a Diploma in Electrical &," 2005.
- [15] V. Bolbot, K. Kulkarni, P. Brunou, O. V. Banda, and M. Musharraf, "Developments and research directions in maritime cybersecurity: A systematic literature review and bibliometric analysis," Dec. 01, 2022, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.ijcip.2022.100571.

