

Evaluasi Efektivitas Teknologi Internet of Things untuk Deteksi Dini Risiko Kebakaran dan Paparan Gas Berbahaya di Kamar Mesin Kapal

Muhammad Saleh

Permesinan Kapal, Politeknik Pelayaran Barombong, Indonesia

Email: muhsalehxxv@gmail.com

Abstrak: Kamar mesin kapal merupakan lingkungan kerja berisiko tinggi akibat keberadaan bahan bakar, minyak pelumas, permukaan panas, instalasi listrik, serta potensi paparan gas berbahaya. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT) dalam mendukung deteksi dini risiko kebakaran dan paparan gas berbahaya berdasarkan pengalaman awak, serta mengidentifikasi faktor teknis, manusia, lingkungan, dan organisasi yang memengaruhi penerapannya. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain studi kasus evaluatif. Data diperoleh dari 85 informan yang dipilih secara purposif melalui wawancara mendalam, observasi terhadap 85 unit pengamatan. Data dianalisis secara tematik, sedangkan keabsahannya diperkuat melalui triangulasi sumber dan teknik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa IoT cukup efektif dalam mendukung pemantauan berkelanjutan, mempercepat penyampaian peringatan, membantu mengenali jenis dan lokasi bahaya, serta mendukung tindakan awal awak. Hasil observasi menunjukkan 91,8% unit memiliki sensor kebakaran dan/atau gas berbahaya, 90,6% perangkat dalam kondisi baik dan berfungsi, 85,9% sistem menampilkan lokasi dan jenis bahaya secara jelas, 88,2% memiliki bukti pemeliharaan atau kalibrasi, dan 94,1% menunjukkan kesiapan awak merespons alarm. Namun, efektivitas belum optimal karena masih ditemukan alarm palsu, gangguan konektivitas, keterlambatan transmisi, ketidakjelasan informasi, pengaruh kondisi kamar mesin, serta perbedaan kompetensi awak. Disimpulkan bahwa IoT merupakan sistem pendukung deteksi dan pengambilan keputusan yang efektif, tetapi tidak menggantikan pemeriksaan langsung dan pertimbangan profesional. Peningkatan efektivitas memerlukan perangkat berstandar maritim, penempatan sensor berbasis risiko, pemeliharaan terjadwal, komunikasi cadangan, pelatihan berkala, SOP yang jelas, dan integrasi dengan Safety Management System kapal. Penerapan terpadu seluruh unsur tersebut diharapkan meningkatkan keandalan peringatan dini dan mencegah kondisi berbahaya berkembang menjadi kecelakaan kapal.

Kata Kunci: deteksi dini; gas berbahaya; Internet of Things; kamar mesin; kebakaran;

Abstract: Ship engine rooms are high-risk working environments due to the presence of fuel, lubricating oil, hot surfaces, electrical installations, and potential exposure to hazardous gases. This study aimed to evaluate the

effectiveness of Internet of Things (IoT) technology in supporting the early detection of fire risks and hazardous gas exposure based on crew experience, and to identify the technical, human, environmental, and organizational factors affecting its implementation. This study employed a qualitative approach with an evaluative case study design. Data were collected from 85 purposively selected informants through in-depth interviews, observations of 85 units. The data were analyzed thematically, while their validity was strengthened through source and technique triangulation. The findings indicate that IoT is sufficiently effective in supporting continuous monitoring, accelerating warning delivery, identifying hazard types and locations, and facilitating the crew's initial response. Observations showed that 91.8% of units had fire and/or hazardous gas sensors, 90.6% of devices were functional and in good condition, 85.9% of systems clearly displayed hazard types and locations, 88.2% had maintenance or calibration records, and 94.1% demonstrated crew readiness to respond to alarms. However, effectiveness remained suboptimal because of false alarms, connectivity disruptions, transmission delays, unclear information, engine-room environmental conditions, and varying crew competencies. It is concluded that IoT is an effective detection and decision-support system but cannot replace direct inspection and professional judgment. Improved effectiveness requires marine-grade devices, risk-based sensor placement, scheduled maintenance, backup communication, regular training, clear procedures, and integration with the ship's Safety Management System to enhance early-warning reliability and prevent hazardous conditions from developing into shipboard accidents.

Keywords: early detection; engine room; fire; hazardous gases; Internet of Things

1. PENDAHULUAN

Kamar mesin merupakan pusat operasional kapal sekaligus salah satu lingkungan kerja dengan risiko keselamatan tertinggi. Di dalamnya, mesin induk, mesin bantu, boiler, purifier, pompa, instalasi listrik, dan jaringan perpipaan beroperasi secara bersamaan dalam ruang yang relatif terbatas. Kombinasi bahan bakar, minyak pelumas, permukaan bersuhu tinggi, tekanan kerja, getaran, dan keterbatasan ventilasi menciptakan kondisi yang rentan terhadap kebakaran serta paparan gas berbahaya. Apabila gejala awal tidak terdeteksi dengan cepat, gangguan teknis yang semula berskala kecil dapat berkembang menjadi keadaan darurat yang mengancam keselamatan awak, merusak permesinan, menghambat pelayaran, dan menimbulkan kerugian ekonomi maupun lingkungan [1], [2].

Risiko kebakaran di kamar mesin berkaitan dengan kompleksitas peralatan dan tingginya intensitas operasional. Kebocoran bahan bakar atau minyak pelumas yang mengenai permukaan panas, hubungan pendek instalasi listrik, kerusakan isolasi, kegagalan sistem pendingin, serta pembakaran tidak sempurna dapat menjadi sumber penyalaaan. Tata ruang yang padat dan keberadaan berbagai peralatan juga dapat menghambat pengamatan langsung serta memperlambat identifikasi lokasi kebakaran. Kondisi tersebut menjadi semakin kritis ketika kapal berada jauh dari bantuan eksternal sehingga tindakan awal awak sangat menentukan keberhasilan pengendalian keadaan darurat [3], [4].

Selain kebakaran, awak kamar mesin berpotensi terpapar karbon monoksida, hidrogen sulfida, metana, nitrogen dioksida, sulfur dioksida, uap bahan bakar, dan berbagai senyawa volatil. Gas tersebut dapat berasal dari pembakaran tidak sempurna, kebocoran perpipaan, proses perawatan, ruang tertutup, atau gangguan ventilasi. Sebagian gas berbahaya tidak berwarna dan sulit dikenali dengan indra manusia, tetapi paparannya dapat menyebabkan gangguan pernapasan, keracunan, kehilangan kesadaran, kebakaran,

bahkan ledakan. Oleh karena itu, keselamatan awak tidak dapat hanya bergantung pada pengamatan langsung dan pemeriksaan periodik, tetapi membutuhkan pemantauan konsentrasi gas secara kontinu [5], [6].

Sistem deteksi konvensional di kapal umumnya menggunakan detektor panas, asap, api, atau gas yang terhubung dengan alarm lokal maupun panel terpusat. Meskipun menjadi bagian penting dalam perlindungan kapal, kinerjanya dapat dipengaruhi oleh posisi pemasangan, jarak sensor dari sumber bahaya, tingkat sensitivitas, keterlambatan asap atau panas mencapai detektor, dan kemungkinan terjadinya alarm palsu. Lingkungan kamar mesin yang panas, lembap, bising, bergetar, dan mengandung kabut minyak juga dapat memengaruhi kestabilan pembacaan. Keterlambatan deteksi dapat mempersempit waktu yang tersedia bagi awak untuk mengisolasi sumber bahaya dan melaksanakan prosedur tanggap darurat [7], [8].

Perkembangan Internet of Things (IoT) menawarkan pendekatan pemantauan yang lebih terintegrasi melalui keterhubungan sensor, perangkat pengolah data, jaringan komunikasi, penyimpanan data, dashboard, dan sistem notifikasi. Teknologi tersebut memungkinkan parameter seperti suhu, asap, api, kelembapan, kualitas udara, dan konsentrasi gas dipantau secara kontinu serta dikirimkan kepada personel yang bertanggung jawab secara waktu nyata. IoT juga memungkinkan penyimpanan riwayat data, identifikasi perubahan kondisi lingkungan, pengenalan pola abnormal, dan penyampaian peringatan melalui beberapa media. Kemampuan tersebut berpotensi mengubah pemantauan keselamatan yang bersifat periodik dan reaktif menjadi lebih kontinu dan preventif [9].

Meskipun demikian, penggunaan IoT tidak secara otomatis menjamin peningkatan keselamatan. Data yang dikirimkan secara waktu nyata tidak akan memberikan manfaat optimal apabila pembacaan sensor tidak akurat, jaringan komunikasi tidak stabil, peringatan terlambat, atau notifikasi sulit dipahami. Efektivitas IoT di kapal juga dipengaruhi oleh interoperabilitas perangkat, keamanan data, pemeliharaan sensor, kompetensi digital awak, dan kemampuan pengguna menerjemahkan informasi menjadi tindakan keselamatan. Dengan demikian, evaluasi IoT tidak cukup hanya mengukur kemampuan teknologi mengumpulkan data, tetapi juga harus menilai ketepatan, kecepatan, keandalan, kemudahan penggunaan, dan manfaat informasi dalam pengambilan keputusan [10], [11].

Penelitian deteksi kebakaran kapal dalam beberapa tahun terakhir lebih banyak berfokus pada aspek teknis, seperti penggunaan computer vision, kamera inframerah, edge computing, sensor fusion, dan algoritma deep learning. Berbagai model tersebut dikembangkan untuk meningkatkan akurasi, mempercepat pemrosesan, serta mengurangi kesalahan dalam mendeteksi api dan asap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi digital mampu meningkatkan kemampuan deteksi kebakaran pada lingkungan kapal yang kompleks, tetapi pengujiannya masih dominan menggunakan dataset dan kondisi eksperimental [12], [13].

Orientasi teknis tersebut belum sepenuhnya menjelaskan bagaimana teknologi dimanfaatkan oleh awak dalam kegiatan operasional. Akurasi yang tinggi dalam pengujian belum tentu menghasilkan manfaat yang sama apabila perangkat digunakan dalam lingkungan kamar mesin yang panas, lembap, bergetar, dan memiliki konektivitas terbatas. Kajian terdahulu juga belum banyak mengungkap bagaimana awak menafsirkan notifikasi, mempercayai hasil pembacaan sensor, merespons alarm, serta mengintegrasikan informasi dari IoT dengan prosedur keselamatan dan sistem dinas jaga [2], [3].

Kesenjangan serupa ditemukan dalam penelitian pemantauan gas berbahaya. Sejumlah penelitian telah menunjukkan bahwa sensor gas, mikrokontroler, jaringan nirkabel, komputasi awan, dan aplikasi seluler dapat diintegrasikan untuk melakukan pengukuran serta menyampaikan peringatan secara waktu nyata. Akan tetapi, sebagian

besar penelitian dilakukan di laboratorium, lingkungan industri darat, fasilitas pengolahan limbah, atau ruang terbatas. Hasil penelitian tersebut belum sepenuhnya menggambarkan tantangan pemanfaatan teknologi pada kamar mesin kapal yang dipengaruhi oleh temperatur tinggi, kelembapan, getaran, kabut minyak, gerakan kapal, keterbatasan ruang, dan mekanisme kerja awak [14].

Efektivitas teknologi keselamatan pada akhirnya ditentukan oleh interaksi antara teknologi, manusia, organisasi, dan lingkungan kerja. Keberhasilan penerapan IoT tidak hanya bergantung pada kualitas sensor dan kecepatan transmisi, tetapi juga pada kompetensi pengguna, kejelasan tanggung jawab, pemeliharaan perangkat, respons terhadap alarm, integrasi dengan prosedur darurat, serta tingkat kepercayaan terhadap teknologi. Apabila aspek tersebut tidak diperhatikan, penerapan IoT berpotensi menimbulkan alarm fatigue, ketergantungan berlebihan, ketidakpercayaan pengguna, dan pengambilan keputusan yang tidak tepat [10], [11].

Berdasarkan penelitian terdahulu, masih terdapat kesenjangan antara keberhasilan teknis perangkat dan efektivitas pemanfaatannya dalam praktik keselamatan kamar mesin. Penelitian sebelumnya lebih banyak menilai performa sensor dan algoritma, sedangkan pengalaman pengguna, proses pemanfaatan informasi, dan pengaruh kondisi operasional kapal masih relatif terbatas. Pemantauan kebakaran dan gas berbahaya juga sering dikaji secara terpisah, padahal keduanya merupakan risiko yang saling berkaitan dan membutuhkan respons terpadu di kamar mesin. Kesenjangan tersebut menunjukkan perlunya penelitian yang mengevaluasi tidak hanya kemampuan IoT mendeteksi bahaya, tetapi juga kemampuannya mendukung respons nyata awak kapal [1], [9].

Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi pemanfaatan IoT secara kontekstual dan multidimensional untuk mendukung deteksi dini kebakaran dan paparan gas berbahaya di kamar mesin kapal. Penelitian tidak berfokus pada pengembangan perangkat maupun algoritma baru, tetapi mengevaluasi kesesuaian antara kemampuan teknologi dengan kebutuhan keselamatan operasional. Aspek yang dikaji mencakup ketepatan dan kecepatan informasi, keandalan sensor dan konektivitas, kemudahan penggunaan, kejelasan notifikasi, respons awak, integrasi dengan prosedur keselamatan, serta hambatan teknis dan organisasional.

Pendekatan kualitatif digunakan untuk memperoleh pemahaman mendalam mengenai pengalaman, persepsi, respons, dan pertimbangan awak ketika memanfaatkan IoT dalam situasi operasional. Data dapat dikumpulkan melalui wawancara mendalam dengan kepala kamar mesin, masinis, electrician, dan awak dinas jaga; observasi proses pemantauan dan respons terhadap alarm; serta pemeriksaan prosedur keselamatan, catatan alarm, laporan insiden, dan dokumen pemeliharaan. Pendekatan tersebut memungkinkan evaluasi dilakukan berdasarkan kondisi nyata, bukan hanya berdasarkan indikator performa teknis perangkat [11].

Berdasarkan permasalahan dan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pemanfaatan teknologi Internet of Things dalam mendukung deteksi dini risiko kebakaran dan paparan gas berbahaya di kamar mesin kapal berdasarkan pengalaman dan persepsi awak dan Mengidentifikasi faktor teknis, manusia, lingkungan, dan organisasi yang mendukung atau menghambat pemanfaatan teknologi Internet of Things serta merumuskan rekomendasi peningkatan efektivitas penerapannya.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan jenis studi kasus evaluatif untuk memperoleh pemahaman mendalam mengenai efektivitas penerapan teknologi Internet of Things (IoT) dalam mendeteksi risiko kebakaran dan gas berbahaya di kamar mesin kapal. Pendekatan ini digunakan untuk mengkaji pengalaman, persepsi, dan praktik awak kapal, serta faktor teknis, manusia, lingkungan, dan organisasi yang memengaruhi penerapan teknologi tersebut dalam kondisi operasional. Pendekatan kualitatif sesuai

untuk memahami fenomena secara menyeluruh berdasarkan kondisi alamiah dan pengalaman subjek penelitian [15]. Data dikumpulkan melalui wawancara semi-terstruktur dan observasi langsung. Wawancara digunakan untuk menggali pengalaman dan pandangan informan, sedangkan observasi digunakan untuk mengamati ketersediaan dan fungsi sensor, kejelasan informasi alarm, pelaksanaan pemeliharaan perangkat, serta kesiapan awak dalam merespons peringatan.

Data dianalisis secara tematik melalui pengodean, pengelompokan kategori, penentuan tema, interpretasi, dan penarikan kesimpulan. Keabsahan temuan diperkuat melalui triangulasi sumber dengan membandingkan keterangan antarinforman dan triangulasi teknik dengan memadankan setiap tema hasil wawancara dengan indikator observasi yang relevan. Data observasi digunakan untuk mengonfirmasi apabila kondisi lapangan sesuai dengan keterangan informan, melengkapi apabila memberikan informasi tambahan, dan menunjukkan perbedaan apabila kondisi yang diamati tidak sepenuhnya sesuai dengan hasil wawancara. Perbedaan tersebut tetap dianalisis sebagai variasi kondisi penerapan IoT. Dengan demikian, kesimpulan penelitian tidak hanya didasarkan pada persepsi informan, tetapi juga diperkuat dan dibatasi oleh kondisi lapangan yang diamati secara langsung [15].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Penelitian

Data wawancara dianalisis secara tematik melalui pengodean terhadap pernyataan informan mengenai pengalaman menggunakan IoT, manfaat sistem, kecepatan dan kejelasan peringatan, gangguan perangkat, respons awak, kondisi lingkungan kamar mesin, pemeliharaan, serta dukungan organisasi. Kode-kode yang memiliki kesamaan makna kemudian dikelompokkan ke dalam kategori dan menghasilkan lima tema yang saling berhubungan, yaitu pemantauan berkelanjutan dan ketersediaan teknologi, kecepatan dan kejelasan peringatan, keandalan sistem dan pengaruh lingkungan kamar mesin, kesiapan awak dalam merespons alarm, serta faktor-faktor yang menentukan efektivitas penerapan IoT. Triangulasi sumber dilakukan dengan membandingkan keterangan antarinforman, sedangkan triangulasi teknik dilakukan dengan memadankan setiap tema hasil wawancara dengan indikator observasi yang relevan.

Hasil wawancara menunjukkan bahwa informan yang telah menggunakan sistem pemantauan terintegrasi memandang IoT sebagai teknologi yang membantu pemantauan kondisi kamar mesin secara berkelanjutan. Sensor suhu, panas, asap, api, dan gas berbahaya dihubungkan dengan panel pemantauan di *Engine Control Room* atau anjungan. Pada beberapa sistem, informasi juga dapat diterima melalui komputer operasional atau perangkat bergerak. Ketika parameter yang terbaca melewati ambang batas aman, sistem memberikan alarm dan menampilkan informasi mengenai kondisi yang terdeteksi. Informan I04 menyatakan bahwa pemantauan secara *real-time* membantu awak mengetahui kenaikan suhu atau konsentrasi gas secara lebih cepat. Informan I06 juga menjelaskan bahwa integrasi beberapa sensor dengan panel pusat mengurangi kebutuhan awak untuk memeriksa setiap titik secara terus-menerus. Temuan ini memperlihatkan bahwa manfaat IoT tidak hanya terletak pada kemampuan sensor mendeteksi perubahan, tetapi juga pada kemampuannya mengumpulkan dan menyampaikan informasi dari beberapa titik ke pusat pemantauan.

Meskipun demikian, perbandingan keterangan antarinforman menunjukkan bahwa penerapan teknologi tersebut belum merata. Informan I26 dan I35 menyatakan bahwa kapal tempat mereka bekerja belum dilengkapi sistem berbasis IoT, sedangkan I43 baru mengenal teknologi tersebut melalui pelatihan dan simulasi. Keterangan ini dikonfirmasi oleh hasil observasi yang menunjukkan bahwa 78 unit pengamatan atau 91,8% telah memiliki sensor kebakaran dan/atau gas berbahaya, sedangkan tujuh unit atau 8,2% belum menunjukkan ketersediaan sensor. Hasil triangulasi tersebut menunjukkan bahwa

teknologi pemantauan telah tersedia pada sebagian besar unit pengamatan, tetapi belum diterapkan secara merata pada seluruh lingkungan kerja informan.

Hasil pengodean terhadap pengalaman informan mengenai alarm memperlihatkan adanya kategori kecepatan transmisi, pengaturan ambang batas, kejelasan lokasi, jenis bahaya, dan kemudahan memahami informasi. Sebagian informan menilai bahwa sistem mampu menyampaikan peringatan dengan cepat setelah parameter bahaya melewati ambang batas. Informan I06 memperkirakan bahwa informasi diterima sekitar dua sampai tiga detik setelah kondisi berbahaya terdeteksi, sedangkan I08 menyebutkan waktu satu sampai tiga detik untuk pembacaan awal sensor. Informan I75 menyampaikan bahwa informasi bahaya dapat diterima dalam waktu kurang dari 30 detik. Perbedaan keterangan tersebut menunjukkan adanya variasi waktu penyampaian alarm yang dirasakan informan. Variasi ini berkaitan dengan jenis sensor, konfigurasi perangkat, proses pengolahan data, dan kondisi jaringan komunikasi yang digunakan pada masing-masing sistem.

Selain kecepatan, kejelasan informasi menjadi aspek penting dalam menentukan respons awak. Panel yang menampilkan jenis bahaya, nilai parameter, zona, dan titik sensor aktif dinilai lebih mudah digunakan dibandingkan sistem yang hanya menghasilkan bunyi alarm atau kode teknis. Informan I06 menjelaskan bahwa indikator titik sensor aktif membantu awak menentukan lokasi yang perlu diperiksa, sedangkan I34 menyatakan bahwa informasi mengenai lokasi munculnya asap memungkinkan tindakan awal dilakukan lebih cepat. Sebaliknya, pada sistem yang hanya menunjukkan zona yang luas, awak memerlukan waktu tambahan untuk menemukan sumber bahaya. Hasil observasi menunjukkan bahwa 73 unit atau 85,9% mampu menampilkan lokasi dan jenis bahaya secara jelas, sedangkan 12 unit atau 14,1% belum menunjukkan informasi tersebut secara memadai. Data observasi mengonfirmasi keterangan informan mengenai adanya variasi kejelasan informasi alarm. Namun, observasi tidak melakukan pengukuran waktu transmisi alarm secara langsung. Oleh karena itu, keterangan mengenai waktu penyampaian alarm tetap diposisikan sebagai pengalaman informan, sedangkan observasi digunakan untuk mengonfirmasi aspek kejelasan informasi dan membatasi interpretasi mengenai kecepatan sistem.

Tema keandalan sistem terbentuk dari kategori alarm palsu, kebersihan dan sensitivitas sensor, kerusakan perangkat, gangguan catu daya, kabel longgar, keterlambatan komunikasi, serta kondisi pemeliharaan. Sebagian informan menyatakan bahwa sistem bekerja dengan baik ketika perangkat diperiksa, dibersihkan, diuji, dan dikalibrasi secara teratur. Informan I53 dan I78 menghubungkan tidak terjadinya alarm palsu dan kegagalan deteksi dengan pemeriksaan serta pemeliharaan yang dilaksanakan secara rutin. Keterangan tersebut menunjukkan bahwa keandalan sistem tidak hanya ditentukan oleh kualitas awal perangkat, tetapi juga oleh konsistensi pemeliharaan selama perangkat digunakan.

Sebaliknya, sejumlah informan pernah mengalami alarm yang tidak sesuai dengan kondisi sebenarnya. Informan I04 dan I15 menjelaskan bahwa debu, kabut minyak, uap panas, serta permukaan sensor yang kotor dapat memicu alarm palsu. Informan I20 menyatakan bahwa sensor pernah mengalami kesulitan membedakan asap yang berasal dari kegiatan kerja dengan asap kebakaran. Informan I29 dan I81 juga menyebutkan gas buang, asap pengelasan, dan uap panas sebagai kondisi yang dapat mengaktifkan alarm. Gangguan komunikasi disampaikan oleh I30, I47, dan I84, antara lain berupa penurunan kualitas sinyal, interferensi elektromagnetik, serta sambungan kabel yang mengendur akibat getaran mesin dan konstruksi kapal.

Hasil observasi memperlihatkan bahwa 77 unit atau 90,6% memiliki sensor, panel, dan perangkat pendukung yang tampak baik dan berfungsi, sedangkan delapan unit atau 9,4% belum menunjukkan kondisi tersebut. Bukti pemeriksaan, pengujian, pemeliharaan, atau kalibrasi ditemukan pada 75 unit atau 88,2%, sedangkan pada 10 unit atau 11,8% bukti tersebut belum dapat diperlihatkan. Data observasi tersebut mengonfirmasi bahwa

sebagian besar perangkat berada dalam kondisi operasional dan memperoleh pemeliharaan. Namun, kondisi perangkat yang tampak baik pada saat observasi tidak sepenuhnya meniadakan pengalaman gangguan yang pernah dialami informan pada waktu sebelumnya. Perbedaan antara hasil wawancara dan observasi tersebut tidak diperlakukan sebagai pertentangan data, tetapi menunjukkan variasi kondisi sistem berdasarkan waktu penggunaan, keadaan lingkungan, dan pelaksanaan pemeliharaan. Observasi juga tidak mengukur akurasi sensor, frekuensi alarm palsu, atau kestabilan jaringan secara berkelanjutan. Dengan demikian, data observasi berfungsi mengonfirmasi kondisi perangkat saat diamati, sekaligus melengkapi dan membatasi interpretasi terhadap pengalaman gangguan yang disampaikan informan.

Pengodean terhadap kondisi lingkungan kamar mesin menunjukkan bahwa suhu tinggi, kelembapan, getaran, debu, kabut minyak, korosi, dan konstruksi baja kapal merupakan kondisi yang paling sering dikaitkan dengan penurunan keandalan perangkat. Informan menjelaskan bahwa kelembapan dapat mempercepat korosi pada bagian elektronik, getaran dapat menyebabkan kabel dan terminal menjadi longgar, sedangkan debu serta kabut minyak dapat menutupi permukaan sensor. Pada sistem yang menggunakan komunikasi nirkabel, konstruksi baja kapal dan interferensi dari peralatan listrik juga dapat memengaruhi kualitas sinyal. Temuan mengenai pengaruh lingkungan tersebut terutama diperoleh dari pengalaman informan karena indikator observasi belum mengukur perubahan kinerja perangkat dalam berbagai kondisi lingkungan secara terus-menerus. Oleh karena itu, kondisi lingkungan dipahami sebagai faktor yang berpotensi memengaruhi keandalan berdasarkan kesamaan pengalaman antarinforman, bukan sebagai hasil pengujian teknis langsung.

Hasil wawancara mengenai kesiapan awak menunjukkan bahwa tindakan setelah menerima alarm umumnya meliputi pemeriksaan panel, identifikasi jenis dan lokasi bahaya, verifikasi langsung, pelaporan, dan pelaksanaan tindakan pengendalian. Informan I06 menjelaskan bahwa awak perlu memeriksa zona sensor, melakukan verifikasi, mengisolasi sumber bahaya, mengendalikan bahan bakar dan ventilasi, serta melaporkan keadaan kepada anjungan. Informan I56 dan I79 juga menekankan bahwa setiap alarm harus diperiksa secara langsung sebelum tindakan keselamatan lanjutan dilakukan. Keterangan tersebut menunjukkan bahwa IoT digunakan sebagai pendukung pengambilan keputusan, sedangkan verifikasi dan tindakan pengendalian tetap memerlukan keterlibatan awak kapal.

Perbandingan antarinforman memperlihatkan adanya perbedaan tingkat pemahaman dalam merespons alarm. Sebagian informan mampu menjelaskan tahapan verifikasi, komunikasi, isolasi, dan pengendalian secara sistematis. Sebagian lainnya hanya menyebutkan tindakan dasar, seperti memeriksa lokasi, berhati-hati, berkumpul, atau menunggu arahan dari perwira yang bertanggung jawab. Hasil observasi menunjukkan bahwa pada 80 unit atau 94,1%, awak dapat menjelaskan atau menunjukkan tindakan dasar ketika menerima alarm, sedangkan pada lima unit atau 5,9% kemampuan tersebut belum diperlihatkan. Data observasi mengonfirmasi bahwa sebagian besar awak memiliki kesiapan dasar dalam merespons alarm. Namun, wawancara melengkapi dan membatasi hasil tersebut dengan menunjukkan bahwa kedalaman pemahaman dan kemampuan menghadapi situasi yang lebih kompleks belum merata. Dengan demikian, kemampuan menunjukkan tindakan dasar tidak secara langsung menunjukkan bahwa seluruh awak telah memiliki tingkat kompetensi operasional yang sama.

Pengelompokan kategori secara keseluruhan menunjukkan bahwa efektivitas penerapan IoT dipengaruhi oleh keterkaitan faktor teknis, manusia, lingkungan, dan organisasi. Faktor teknis meliputi kualitas sensor, ketepatan penempatan, integrasi panel, kestabilan jaringan, sumber daya listrik cadangan, serta kemampuan sistem menunjukkan lokasi dan jenis bahaya. Faktor manusia mencakup pengetahuan, pengalaman, kewaspadaan, kemampuan memahami alarm, dan kecepatan melakukan verifikasi. Faktor

lingkungan meliputi suhu, kelembapan, getaran, debu, kabut minyak, korosi, dan interferensi elektromagnetik. Sementara itu, faktor organisasi meliputi ketersediaan prosedur, pembagian tanggung jawab, pelaksanaan pelatihan, jadwal pemeliharaan, penyediaan suku cadang, dan dukungan manajemen perusahaan.

Hasil triangulasi menunjukkan bahwa data observasi mendukung sebagian besar kategori tersebut. Ketersediaan dan kondisi perangkat mengonfirmasi aspek teknis, kemampuan awak menunjukkan tindakan dasar melengkapi temuan mengenai faktor manusia, sedangkan bukti pemeliharaan atau kalibrasi mengonfirmasi sebagian bentuk dukungan organisasi. Namun, pengaruh kondisi lingkungan, kualitas pelatihan, kecukupan anggaran, dan dukungan manajemen tidak dinilai secara langsung melalui lembar observasi. Oleh karena itu, interpretasi terhadap faktor-faktor tersebut tetap didasarkan pada perbandingan keterangan antarinforman. Informan juga menyampaikan bahwa peningkatan efektivitas membutuhkan penggunaan perangkat berstandar maritim, penempatan sensor berdasarkan tingkat risiko, pembersihan dan kalibrasi terjadwal, pemeriksaan kabel dan sumber daya listrik, penyediaan komunikasi cadangan, penyederhanaan tampilan alarm, serta pelatihan awak secara berkala. Pemeriksaan perangkat juga dinilai perlu dimasukkan ke dalam *Planned Maintenance System*, sedangkan tindak lanjut terhadap alarm perlu diintegrasikan ke dalam prosedur keselamatan kapal.

Tabel 1. Hasil observasi sistem pemantauan kebakaran dan gas berbahaya

Aspek yang diamati	Ya, n (%)	Tidak, n (%)
Tersedia sensor kebakaran dan/atau gas berbahaya	78 (91,8%)	7 (8,2%)
Sensor, panel, dan perangkat pendukung tampak baik dan berfungsi	77 (90,6%)	8 (9,4%)
Sistem menampilkan lokasi dan jenis bahaya secara jelas	73 (85,9%)	12 (14,1%)
Tersedia bukti pemeriksaan, pengujian, pemeliharaan, atau kalibrasi	75 (88,2%)	10 (11,8%)
Awak dapat menunjukkan tindakan ketika menerima alarm	80 (94,1%)	5 (5,9%)

Secara keseluruhan, triangulasi sumber menunjukkan adanya kesamaan keterangan antarinforman mengenai manfaat IoT dalam mendukung pemantauan berkelanjutan dan penyampaian peringatan dini. Pada saat yang sama, ditemukan variasi pengalaman mengenai ketersediaan perangkat, kecepatan penyampaian alarm, gangguan sistem, dan tingkat pemahaman awak. Triangulasi teknik menunjukkan bahwa observasi mengonfirmasi ketersediaan sensor, kondisi perangkat, kejelasan informasi alarm, bukti pemeliharaan, dan kesiapan dasar awak. Observasi juga melengkapi dan membatasi hasil wawancara dengan menunjukkan bahwa tingginya ketersediaan perangkat belum selalu berarti bahwa sistem sepenuhnya andal atau kompetensi awak telah merata. Berdasarkan pemadanan kedua teknik pengumpulan data tersebut, efektivitas IoT dalam mendukung deteksi dini dinilai cukup baik, tetapi keberhasilannya tetap dipengaruhi oleh keterpaduan kondisi teknologi, kompetensi awak, lingkungan kamar mesin, pemeliharaan perangkat, dan dukungan organisasi.

3.2 Pembahasan

3.2.1 Pemanfaatan IoT dalam Mendukung Deteksi Dini

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pemanfaatan IoT memberikan perubahan penting dalam pemantauan keselamatan kamar mesin. Sensor yang sebelumnya dapat bekerja secara terpisah dihubungkan dengan panel pemantauan terpusat sehingga data suhu, asap, api, dan gas dapat diterima secara berkelanjutan. Kemampuan tersebut mengurangi ketergantungan pada pemeriksaan manual sebagai satu-satunya cara

mengetahui perubahan kondisi. Awak tetap melakukan inspeksi langsung, tetapi sistem memberikan informasi awal yang membantu menentukan lokasi dan prioritas pemeriksaan.

Temuan ini sejalan dengan Durlik et al. [10], yang menjelaskan bahwa IoT maritim memungkinkan data dari berbagai sensor dikumpulkan, ditransmisikan, dan dianalisis secara waktu nyata untuk mendukung pemantauan kondisi dan pengambilan keputusan. Dalam konteks kamar mesin, kemampuan tersebut sangat relevan karena perubahan suhu, asap, atau konsentrasi gas dapat berkembang dengan cepat. Informasi awal memberi kesempatan kepada awak untuk melakukan pemeriksaan sebelum kondisi berubah menjadi keadaan darurat.

AlQahtani et al. [9] juga menjelaskan bahwa sistem keselamatan kebakaran berbasis IoT dapat mengintegrasikan fungsi deteksi, pengolahan data, pelokalan bahaya, dan penyampaian peringatan. Hasil penelitian ini memperkuat pendapat tersebut melalui pengalaman informan yang menyatakan bahwa sistem tidak hanya membunyikan alarm, tetapi juga dapat menunjukkan zona atau titik sensor aktif. Integrasi tersebut membantu memperpendek jarak antara terdeteksinya anomali dan dimulainya tindakan pemeriksaan.

Meskipun demikian, penelitian ini tidak melakukan pengujian eksperimental terhadap akurasi setiap jenis sensor. Penilaian efektivitas didasarkan pada pengalaman dan persepsi awak yang diperkuat oleh observasi. Oleh karena itu, kesimpulan bahwa IoT cukup efektif tidak dimaksudkan untuk menyatakan bahwa seluruh sistem mempunyai tingkat akurasi yang sama. Efektivitas dalam penelitian ini terutama terlihat pada kemampuan sistem membantu pemantauan, menyampaikan peringatan, menunjukkan kemungkinan lokasi bahaya, dan mendukung respons awal awak.

3.2.2 Kecepatan Peringatan dan Ketepatan Informasi

Kecepatan peringatan menjadi salah satu manfaat utama yang dirasakan informan. Beberapa informan menyebutkan bahwa alarm dapat aktif dalam hitungan detik setelah sensor mendeteksi parameter yang melewati ambang batas. Meskipun waktu yang disampaikan informan berbeda-beda, kecenderungan hasil menunjukkan bahwa sistem memberikan informasi lebih cepat daripada menunggu bahaya dikenali melalui pemeriksaan manual. Dalam situasi kebakaran atau kebocoran gas, perbedaan waktu beberapa detik atau menit dapat memengaruhi kesempatan awak mengendalikan sumber bahaya.

Zou et al. [2] memperlihatkan bahwa model berbasis machine vision dapat digunakan untuk mendeteksi asap di kamar mesin sebagai gejala awal kebakaran. Penelitian tersebut menegaskan pentingnya mengenali tanda bahaya sebelum api berkembang. Temuan itu sesuai dengan pengalaman informan yang menyatakan bahwa sensor dapat memberikan peringatan ketika muncul asap, kenaikan suhu, atau perubahan gas, sebelum terjadi kebakaran yang lebih besar.

Kim dan Ruy [3] menjelaskan bahwa detektor konvensional dapat mengalami keterlambatan apabila panas atau asap belum mencapai posisi sensor. Penggabungan saluran RGB dan inframerah dapat meningkatkan kemampuan sistem mengenali tanda kebakaran pada lingkungan kapal. Hal tersebut menunjukkan bahwa kecepatan deteksi dipengaruhi bukan hanya oleh kecepatan transmisi data, tetapi juga oleh jenis sensor, posisi pemasangan, dan kemampuan perangkat mengenali karakteristik bahaya.

Temuan observasi menunjukkan bahwa 85,9% unit pengamatan mampu menampilkan lokasi dan jenis bahaya secara jelas, tetapi masih terdapat 14,1% yang belum mampu menunjukkan informasi tersebut dengan memadai. Hasil ini penting karena alarm yang cepat belum tentu menghasilkan respons cepat apabila awak tidak mengetahui sumber alarm. Ketika panel hanya menampilkan kode teknis atau zona yang terlalu luas, awak membutuhkan waktu tambahan untuk menerjemahkan informasi dan mencari titik bahaya. Oleh sebab itu, efektivitas peringatan perlu dinilai dari kecepatan sensor mendeteksi, kecepatan data dikirimkan, dan kejelasan informasi ketika diterima awak.

3.2.3 Keandalan Sistem dan Alarm Palsu

Alarm palsu merupakan salah satu keterbatasan utama yang ditemukan dalam wawancara. Debu, kabut minyak, uap panas, asap pengelasan, kelembapan, perubahan temperatur, dan sensor yang kotor dapat dibaca sebagai indikasi kebakaran. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sensor sebenarnya memberikan respons terhadap perubahan lingkungan, tetapi responsnya tidak selalu menggambarkan adanya keadaan darurat yang sebenarnya.

Kim [3] menunjukkan bahwa peningkatan sensitivitas deteksi dapat mempercepat pengenalan bahaya, tetapi juga dapat meningkatkan kemungkinan kesalahan deteksi. Sumber panas, pantulan cahaya, uap, dan aktivitas kerja tertentu dapat mempunyai karakteristik yang menyerupai api atau asap. Temuan tersebut menjelaskan pengalaman informan mengenai alarm yang dipicu oleh asap pengelasan, uap minyak, gas buang, atau perubahan suhu ketika mesin mulai dioperasikan.

Akhmedov et al. [16] menunjukkan bahwa gangguan visual, termasuk kabut dan rendahnya visibilitas, dapat menurunkan kemampuan sistem pengenalan kebakaran pada kapal. Integrasi algoritma dehazing digunakan untuk meningkatkan kemampuan model mengenali api dalam kondisi visual yang terganggu. Hasil tersebut relevan dengan kamar mesin yang dapat mengandung asap, uap, debu, dan kabut minyak. Baik pada sensor konvensional maupun sistem visual, kontaminasi lingkungan dapat mengurangi kemampuan perangkat membedakan kondisi normal dan kondisi berbahaya.

Alarm palsu yang terjadi sesekali masih dapat ditangani melalui verifikasi. Namun, alarm palsu yang berulang dapat menimbulkan penurunan kepercayaan atau alarm fatigue. Awak dapat menganggap alarm berikutnya sebagai gangguan yang sama dan menunda pemeriksaan. Oleh karena itu, setiap alarm palsu seharusnya dicatat dan dianalisis untuk mengetahui penyebabnya, bukan hanya dihentikan atau diatur ulang. Pemeriksaan harus mencakup kebersihan sensor, kesesuaian jenis sensor, posisi pemasangan, pengaturan ambang batas, kondisi kabel, riwayat kalibrasi, dan kestabilan komunikasi.

Hasil observasi menunjukkan bahwa 11,8% unit pengamatan belum memperlihatkan bukti pemeriksaan, pengujian, pemeliharaan, atau kalibrasi. Temuan tersebut menjelaskan mengapa sebagian informan masih mengalami alarm palsu dan penurunan sensitivitas. Sebaliknya, informan yang menyatakan tidak pernah mengalami gangguan umumnya menghubungkan keandalan sistem dengan pemeliharaan dan pengujian rutin. Dengan demikian, keandalan bukan hanya karakteristik bawaan perangkat, melainkan hasil dari kualitas perangkat, kesesuaian instalasi, serta disiplin pemeliharaan.

3.2.4 Pengaruh Lingkungan Kamar Mesin

Hasil wawancara menempatkan lingkungan kamar mesin sebagai salah satu faktor paling menentukan. Suhu tinggi dapat memengaruhi stabilitas komponen elektronik dan memperpendek umur perangkat. Kelembapan mempercepat korosi pada sambungan dan terminal. Getaran dapat mengendurkan kabel, mengubah posisi sensor, atau merusak komponen internal. Debu dan kabut minyak dapat menutup permukaan sensor, sedangkan konstruksi baja serta peralatan listrik dapat mengganggu transmisi sinyal.

Al-Okby et al. [5] menjelaskan bahwa kinerja sensor gas dipengaruhi oleh jenis sensor, temperatur, kelembapan, konsentrasi gas, waktu respons, konsumsi daya, dan teknologi komunikasi. Pendapat tersebut mendukung hasil penelitian bahwa pemilihan sensor tidak dapat dilepaskan dari karakteristik lingkungan tempat perangkat digunakan. Sensor yang akurat pada kondisi laboratorium belum tentu mempertahankan tingkat kinerja yang sama ketika terpapar panas, getaran, minyak, dan kelembapan secara terus-menerus.

Rajakumar [6] juga menempatkan temperatur dan kelembapan sebagai parameter penting dalam sistem pemantauan gas beracun pada ruang terbatas. Hal tersebut menunjukkan bahwa interpretasi pembacaan gas perlu mempertimbangkan kondisi di sekitar sensor. Pada kamar mesin, distribusi gas juga dipengaruhi oleh berat jenis gas, ventilasi, aliran udara, konstruksi ruangan, dan posisi sumber kebocoran. Sensor gas yang

ditempatkan terlalu tinggi atau terlalu jauh dari sumber risiko dapat terlambat membaca peningkatan konsentrasi.

Implikasinya, perangkat yang digunakan perlu mempunyai spesifikasi marine-grade dan perlindungan yang sesuai terhadap panas, kelembapan, getaran, minyak, korosi, dan interferensi elektromagnetik. Penempatan sensor harus didasarkan pada penilaian risiko, bukan hanya kemudahan instalasi. Titik pemasangan perlu mempertimbangkan lokasi bahan bakar, purifier, boiler, mesin induk, bilga, sistem ventilasi, peralatan listrik, serta kemungkinan akumulasi gas. Pemilihan teknologi komunikasi juga harus mempertimbangkan hambatan struktur baja dan ketersediaan jalur cadangan.

3.2.5 Peran Manusia dalam Menentukan Efektivitas Sistem

Kesiapan awak memperoleh hasil observasi tertinggi, yaitu 94,1%. Akan tetapi, wawancara menunjukkan variasi kedalaman pemahaman. Sebagian informan mampu menjelaskan tahapan respons secara lengkap, sedangkan sebagian lainnya hanya menyebutkan tindakan umum. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa kemampuan menyatakan tindakan dasar belum selalu mencerminkan kemampuan menghadapi situasi kompleks.

El Bouchikhi et al. [11] menjelaskan bahwa penerapan IoT dalam keselamatan dan kesehatan kerja perlu mempertimbangkan keterlibatan pekerja, pemahaman pengguna, kejelasan tujuan, tata kelola informasi, serta perubahan praktik kerja akibat penggunaan teknologi. Sistem yang semakin canggih tidak selalu menghasilkan keselamatan yang lebih baik apabila pekerja tidak memahami arti data atau terlalu bergantung pada keputusan otomatis.

Dalam penelitian ini, alarm IoT tetap membutuhkan tiga rangkaian tindakan manusia, yaitu verifikasi, komunikasi, dan pengendalian. Verifikasi diperlukan karena sistem dapat memberikan alarm palsu. Komunikasi diperlukan agar perwira jaga, anjungan, dan pihak yang bertanggung jawab memperoleh informasi yang sama. Tindakan pengendalian diperlukan untuk menghentikan perkembangan bahaya. Kegagalan pada salah satu tahap tersebut dapat mengurangi manfaat peringatan dini.

Ketergantungan yang berlebihan pada teknologi juga perlu dihindari. Sistem dapat mengalami kerusakan, kehilangan daya, gangguan koneksi, atau penurunan sensitivitas. Karena itu, teknologi tidak boleh menggantikan pemeriksaan langsung, kewaspadaan awak, penciuman terhadap bau yang tidak biasa, pengamatan kebocoran, pemeriksaan temperatur, dan pertimbangan profesional. IoT sebaiknya menjadi lapisan tambahan dalam sistem pertahanan keselamatan, bukan satu-satunya sumber informasi.

3.2.6 Dukungan Organisasi dan Integrasi dengan Sistem Keselamatan Kapal

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dukungan organisasi menentukan keberlanjutan fungsi teknologi. Sensor yang berkualitas tetap dapat kehilangan efektivitas apabila tidak dibersihkan, diuji, dan dikalibrasi. Awak yang telah memperoleh pelatihan juga tidak dapat bekerja optimal apabila tidak tersedia SOP, suku cadang, anggaran pemeliharaan, atau dukungan teknis.

El Bouchikhi et al. [11] menegaskan bahwa penerapan IoT untuk keselamatan merupakan persoalan sosioteknis. Teknologi, manusia, tata kelola data, pembagian tanggung jawab, dan organisasi kerja harus dipertimbangkan sebagai satu kesatuan. Temuan penelitian ini mendukung pandangan tersebut. Gangguan yang dialami informan tidak hanya berasal dari sensor, tetapi juga dari kurangnya pemeliharaan, konektivitas, dokumentasi, pelatihan, dan tindak lanjut organisasi.

AlQahtani et al. [9] mengidentifikasi keandalan sensor, interoperabilitas, pemrosesan data waktu nyata, kemampuan adaptasi, dan keamanan data sebagai tantangan penerapan sistem keselamatan kebakaran berbasis IoT. Dalam lingkungan kapal, tantangan tersebut perlu dikelola melalui Safety Management System. Sistem IoT tidak seharusnya berdiri sebagai perangkat tambahan tanpa tanggung jawab yang jelas.

Pemeriksaan, pembersihan, pengujian, kalibrasi, penggantian sensor, dan pemeriksaan jaringan perlu dimasukkan ke dalam Planned Maintenance System.

Rekaman alarm juga perlu diintegrasikan dengan pelaporan keselamatan. Setiap alarm palsu, keterlambatan, kegagalan komunikasi, dan kejadian near miss dapat menjadi sumber pembelajaran. Data tersebut dapat digunakan untuk mengevaluasi posisi sensor, pengaturan ambang batas, kondisi lingkungan, kualitas pemeliharaan, dan kecepatan respons awak. Dengan demikian, data IoT tidak hanya digunakan ketika alarm berbunyi, tetapi juga untuk mencegah berulangnya kondisi yang sama.

3.2.7 Implikasi Praktis Hasil Penelitian

Hasil penelitian ini memiliki implikasi praktis bagi operator kapal, perusahaan pelayaran, dan pengembangan kebijakan keselamatan maritim. Bagi operator kapal, sistem IoT perlu digunakan sebagai pendukung deteksi dini dan pengambilan keputusan, bukan sebagai pengganti pemeriksaan langsung serta pertimbangan profesional awak. Setiap alarm harus segera diverifikasi berdasarkan prosedur keselamatan, disertai pencatatan jenis bahaya, lokasi, waktu kejadian, dan tindakan penanganan. Pelatihan serta simulasi respons alarm juga perlu dilaksanakan secara berkala agar awak mampu membedakan alarm aktual, alarm palsu, dan gangguan perangkat. Bagi perusahaan pelayaran, hasil penelitian menegaskan pentingnya penggunaan perangkat berstandar maritim, penempatan sensor berdasarkan tingkat risiko, kalibrasi dan pemeliharaan terjadwal melalui *Planned Maintenance System*, penyediaan jaringan komunikasi cadangan, serta integrasi sistem IoT ke dalam *Safety Management System*. Upaya tersebut diperlukan karena efektivitas IoT tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan perangkat, tetapi juga oleh keandalan sistem, kompetensi awak, dan dukungan organisasi.

Bagi pengembangan kebijakan keselamatan maritim, temuan penelitian dapat menjadi dasar penyusunan standar minimum penerapan IoT di kapal yang mencakup spesifikasi perangkat, penempatan sensor, pengujian dan kalibrasi, keamanan serta penyimpanan data, kompetensi awak, dan prosedur tindak lanjut terhadap alarm. Regulator juga perlu mendorong audit berkala terhadap integrasi IoT dengan sistem keselamatan kapal serta menetapkan mekanisme pelaporan gangguan, alarm palsu, dan kegagalan komunikasi. Kebijakan yang terpadu akan mencegah penerapan IoT hanya sebagai pemenuhan perangkat teknis dan mengarahkannya menjadi bagian dari sistem keselamatan maritim yang andal, responsif, dan berkelanjutan. Hal ini sejalan dengan pandangan bahwa keberhasilan IoT dalam keselamatan dipengaruhi oleh integrasi teknologi, pengelolaan data, faktor manusia, dan tata kelola organisasi [10], [11].

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa teknologi *Internet of Things* (IoT) efektif dalam mendukung deteksi dini risiko kebakaran dan paparan gas berbahaya di kamar mesin kapal. Teknologi ini memungkinkan pemantauan kondisi secara berkelanjutan, mempercepat penyampaian peringatan, serta membantu awak mengenali jenis dan lokasi bahaya untuk menentukan tindakan awal. Namun, IoT harus ditempatkan sebagai sistem pendukung, bukan pengganti pemeriksaan langsung dan pertimbangan profesional awak. Efektivitasnya juga belum sepenuhnya optimal karena dipengaruhi oleh keandalan sensor dan konektivitas, ketepatan penempatan perangkat, kondisi lingkungan kamar mesin, konsistensi pemeliharaan dan kalibrasi, kompetensi awak, kejelasan prosedur, serta dukungan organisasi perusahaan.

Kontribusi utama penelitian ini adalah menegaskan bahwa efektivitas IoT dalam keselamatan kamar mesin bersifat sosioteknis. Keberhasilan sistem tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan sensor atau kecepatan penyampaian alarm, tetapi merupakan hasil keterpaduan antara teknologi, manusia, lingkungan kerja, dan tata kelola organisasi. Pemahaman ini memperluas penilaian efektivitas IoT dari pendekatan yang berpusat pada perangkat menuju pendekatan keselamatan yang lebih menyeluruh. Alarm yang cepat dan

akurat tidak akan menghasilkan perlindungan optimal apabila informasinya tidak dipahami, perangkat tidak dipelihara secara konsisten, atau awak belum mampu memverifikasi dan menindaklanjutinya sesuai prosedur keselamatan.

Secara praktis, penelitian ini menghasilkan dasar penerapan IoT yang dapat digunakan oleh operator kapal, perusahaan pelayaran, dan pembuat kebijakan untuk memperkuat sistem keselamatan maritim. Penerapan tersebut mencakup penggunaan perangkat berstandar maritim, penempatan sensor berbasis risiko, pemeliharaan dan kalibrasi terjadwal, penyediaan komunikasi cadangan, pelatihan serta simulasi respons alarm, dan integrasi IoT ke dalam *Safety Management System*. Bagi regulator, hasil penelitian ini memberikan landasan untuk mengembangkan kebijakan yang tidak hanya mengatur spesifikasi perangkat, tetapi juga kompetensi awak, tata kelola data, pengujian sistem, pelaporan gangguan, dan audit berkala. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi dalam membangun kerangka penerapan IoT yang lebih andal, terintegrasi, dan berorientasi pada pencegahan kecelakaan kapal.

Penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk mengevaluasi kinerja IoT menggunakan data operasional secara *real-time*, sehingga waktu respons, akurasi sensor, frekuensi alarm palsu, dan kestabilan konektivitas dapat diukur secara objektif. Penelitian juga dapat mengembangkan integrasi IoT dengan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) untuk mengenali pola kondisi abnormal, memprediksi potensi bahaya, serta membedakan ancaman aktual dari gangguan sensor. Pengujian pada berbagai jenis dan ukuran kapal diperlukan agar diperoleh model deteksi dini yang lebih akurat, adaptif, dan dapat diterapkan secara luas dalam sistem keselamatan maritim.

5. REFERENCES

- [1] J. Zhu, J. Zhang, Y. Wang, Y. Ge, Z. Zhang, and S. Zhang, "Fire Detection in Ship Engine Rooms Based on Deep Learning," *Sensors*, vol. 23, no. 14, 2023, doi: 10.3390/s23146552.
- [2] Y. Zou *et al.*, "Smoke Detection of Marine Engine Room Based on a Machine Vision Model (CWC-Yolov5s)," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 8, 2023, doi: 10.3390/jmse11081564.
- [3] D. H. Kim and W. S. Ruy, "CNN-based fire detection method on autonomous ships using composite channels composed of RGB and IR data," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 14, p. 100489, 2022, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2022.100489.
- [4] H. Wu, Y. Hu, W. Wang, X. Mei, and J. Xian, "Ship Fire Detection Based on an Improved YOLO Algorithm with a Lightweight Convolutional Neural Network Model," *Sensors*, vol. 22, no. 19, 2022, doi: 10.3390/s22197420.
- [5] M. F. R. Al-Okby, S. Neubert, T. Roddelkopf, and K. M. Thurow, "Mobile detection and alarming systems for hazardous gases and volatile chemicals in laboratories and industrial locations," *Sensors*, vol. 21, 2021, doi: 10.3390/s21238128.
- [6] J. P. P. Rajakumar and J. -. Choi, "Helmet-Mounted Real-Time Toxic Gas Monitoring and Prevention System for Workers in Confined Places," *Sensors*, vol. 23, 2023, doi: 10.3390/s23031590.
- [7] H. Lee *et al.*, "AI-enhanced fire detection and suppression system for autonomous ships," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 16, no. November, 2024, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2024.100628.
- [8] Z. Zhang, L. Tan, and R. L. K. Tiong, "Ship-Fire Net: An Improved YOLOv8 Algorithm for Ship Fire Detection," *Sensors*, pp. 1–199, 2024, doi: 10.1205/psep06035.
- [9] A. A. S. AlQahtani, M. Sulaiman, T. Alshayeb, and H. Alamleh, "From Inception to Innovation: A Comprehensive Review and Bibliometric Analysis of IoT-Enabled Fire Safety Systems," *Safety*, vol. 11, no. 2, pp. 1–44, 2025, doi: 10.3390/safety11020041.
- [10] I. Durlik, 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," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 17, 2023, doi: 10.3390/app13179742.
- [11] M. El Bouchikhi, S. Weerts, and C. Clavien, "The internet of things deployed for occupational health and safety purposes: A qualitative study of opportunities and ethical issues," *PLoS One*, vol. 19, no. 12 December, pp. 1–24, 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0315671.
- [12] K. Avazov, M. K. Jamil, B. Muminov, A. B. Abdusalomov, and Y.-I. Cho, "Fire Detection and Notification Method in Ship Areas Using Deep Learning and Computer Vision Approaches," *Sensors*, pp. 1–5, 2023, doi: 10.3390/s23167078.
- [13] A. Ergasheva, F. Akhmedov, A. Abdusalomov, and W. Kim, "Advancing Maritime Safety: Early Detection of Ship Fires through Computer Vision, Deep Learning Approaches, and Histogram Equalization Techniques," *Fire*, vol. 7, no. 3, 2024, doi: 10.3390/fire7030084.
- [14] J. Praveenchandar *et al.*, "IoT-Based Harmful Toxic Gases Monitoring and Fault Detection on the Sensor Dataset Using Deep Learning Techniques," *Sci. Program.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/7516328.
- [15] Z. Abdussamad, *Metode penelitian kualitatif*. Makassar: CV Syakir Media Press, 2021.
- [16] F. Akhmedov, R. Nasimov, and A. Abdusalomov, "Dehazing Algorithm Integration with YOLO-v10 for Ship Fire Detection," *Fire*, vol. 7, no. 9, pp. 1–19, 2024, doi: 10.3390/fire7090332.