



Perkembangan Teknologi Sistem Pemadam Kebakaran Modern Untuk

Meningkatkan Keselamatan Kapal

Kholid Mawardi

Universitas Maritim AMNI

Alamat : Jl. Arteri Soekarno-Hatta No. 180 Semarang

*Korespondensi penulis : mawardikholid66@gmail.com

Abstract. *This research is purposely conducted to evaluate and compare the effectiveness, efficiency, applicability and appropriateness of modern firefighting systems installed on board ships. As a result, the review attempt to ascertain the significance of firefighting systems on ships in terms of their safety, types, structure, principles as well as installations. In this way, the review tries to justify the importance of these systems on board ships. The design of this survey revolves around three basic elements that incorporate the complete firefighting procedure. These components include: modern technology of firefighting, different types of systems that are used on board ships and people traits in terms of drilling, firefighting training to deal with any incident of fire. In the previous decade, the globe has experienced massive destructions, harms and injuries resulting from fire incidents on ships. This has triggered and ignited enhanced fabrication and staging of new practices, technologies and inventions aimed at efficiently deal with fire incidents so as to support the safekeeping and reliability on these fire systems on board ships. Equally, through this technological enhancement, the firefighting systems have been designed to facilitate rapid detection capable of differentiating between real smokes or flames indicators in case of a fire event on board ship. In recent times, these technological developments have been viewed as strategies that help ship owners to ensure better protection of the crew's life, ship's inventories as well as minimising on the possible losses that occur as a result of fire events on board ship. Therefore, with the review of the recent or latest methods and technologies for speedy fire detection on ships, the review demonstrates enhancement attributes, features and qualities of these new systems. Additionally, the paper critically evaluates the components of these firefighting systems, as well as looking at their competences, capabilities, benefits and applicability on board ships.*

Keywords : *Shipboard Firefighting Systems; Fire Detection Technology; Maritime Safety.*

Abstrak. Penelitian ini sengaja dilakukan untuk mengevaluasi dan membandingkan efektivitas, efisiensi, penerapan, dan kesesuaian sistem pemadam kebakaran modern yang terpasang di atas kapal. Hasilnya, tinjauan ini berupaya untuk memastikan signifikansi sistem pemadam kebakaran di kapal dalam hal keselamatan, jenis, struktur, prinsip, serta instalasinya. Dengan cara ini, tinjauan ini mencoba untuk membenarkan pentingnya sistem-sistem ini di atas kapal. Desain survei ini berpusat pada tiga elemen dasar yang mencakup prosedur pemadam kebakaran lengkap. Komponen-komponen ini meliputi: teknologi pemadam kebakaran modern, berbagai jenis sistem yang digunakan di atas kapal, dan karakteristik manusia dalam hal latihan dan pelatihan pemadam kebakaran untuk menangani setiap insiden kebakaran. Dalam dekade terakhir, dunia telah mengalami kerusakan, kerugian, dan cedera besar akibat insiden kebakaran di kapal. Hal ini telah memicu dan mendorong peningkatan pembuatan dan penerapan praktik, teknologi, dan penemuan baru yang bertujuan untuk menangani insiden kebakaran secara efisien guna mendukung keamanan dan keandalan sistem pemadam kebakaran di atas kapal. Demikian pula, melalui peningkatan teknologi ini, sistem pemadam kebakaran telah dirancang untuk memfasilitasi deteksi cepat yang mampu membedakan antara asap atau api yang sebenarnya jika terjadi kebakaran di atas kapal. Akhir-akhir ini, perkembangan teknologi ini dipandang sebagai strategi yang membantu pemilik kapal untuk memastikan perlindungan yang lebih baik terhadap nyawa awak kapal, inventaris kapal, serta meminimalkan

Received Nov, 2025; Revised Nov, 2025; Accepted Dec, 2025

* Kholid Mawardi, mawardikholid66@gmail.com

kemungkinan kerugian yang terjadi akibat kebakaran di atas kapal. Oleh karena itu, dengan meninjau metode dan teknologi terbaru untuk deteksi kebakaran cepat di kapal, tinjauan ini menunjukkan peningkatan atribut, fitur, dan kualitas dari sistem-sistem baru ini. Selain itu, makalah ini secara kritis mengevaluasi komponen-komponen dari sistem pemadam kebakaran ini, serta melihat kompetensi, kemampuan, manfaat, dan penerapannya di atas kapal.

Kata kunci : Sistem Pemadam Kebakaran Kapal; Teknologi Deteksi Kebakaran; Keselamatan Pelayaran.

1. LATAR BELAKANG

Akhir-akhir ini, lingkungan laut telah menyaksikan peningkatan permintaan untuk mengurangi risiko, bahaya, dan ancaman yang disebabkan oleh kebakaran di atas kapal. Hal ini telah menghasilkan peningkatan inovasi, penemuan, dan penerapan strategi pemadam kebakaran baru dan lebih baik untuk mengatasi dan secara efisien mengendalikan dampak destruktif kebakaran ini. Di laut, peristiwa kebakaran dapat menyebabkan konsekuensi yang dahsyat dan merusak seperti hilangnya nyawa, harta benda, kerusakan besar pada kapal dan muatannya, serta merusak lingkungan dan ekosistemnya. Karena itu, perlindungan dan keselamatan kebakaran telah menjadi perhatian besar di kalangan produsen dan pemilik kapal.

Di masa lalu, kebutuhan dan prinsip dasar keselamatan kebakaran secara tradisional diintegrasikan pada uji mudah terbakar material dan komponen kapal lainnya. Ini menyiratkan bahwa hanya material yang memenuhi kriteria kurang mudah terbakar yang digunakan dalam pembuatan kapal. Namun, strategi ini telah mengalami berbagai masalah yang menyebabkan lebih banyak survei tentang cara mengatasi kesulitan yang dialami. Pada tahun 2001, survei ini menghasilkan fokus pembuatan kapal pada perancangan dan konfigurasi langkah-langkah dan solusi keselamatan kebakaran melalui pengembangan sistem yang sepenuhnya didedikasikan untuk mencegah insiden kebakaran di atas kapal. Tujuan utama dari sistem ini adalah untuk menyediakan dan memfasilitasi tingkat keselamatan kebakaran yang efisien di atas kapal (*International Maritime Organisation (IMO)*, 2023). Hal ini karena sebagian besar insiden atau kecelakaan kebakaran yang terjadi di laut terjadi karena kurangnya perlindungan dan langkah-langkah atau sistem keselamatan yang memadai untuk membantu mengatasi ancaman kebakaran di atas kapal. Ini berarti bahwa jika terjadi kebakaran di kapal, pelayaran laut bergantung pada bantuan dari darat (*International Maritime Organisation (IMO)*, 2023). Meskipun strategi ini efektif, strategi ini menjadi tidak efektif ketika kapal yang dalam bahaya tidak terlihat dari darat dan tidak ada komunikasi yang memungkinkan, sehingga orang-orang di atas kapal harus mengatasi insiden kebakaran tersebut, yang menyebabkan lebih banyak tragedi

(kehilangan nyawa dan harta benda). Oleh karena itu, hal ini memicu kebutuhan akan pelatihan yang memadai bagi awak kapal, pemasangan sistem dan peralatan pemadam kebakaran untuk membantu mengatasi setiap kebakaran bahkan ketika bantuan tidak dapat diberikan dari darat (*International Maritime Organisation* (IMO), 2023). Oleh karena itu, revolusi teknologi saat ini telah memungkinkan para perancang dan produsen kapal untuk mengembangkan dan mengkonfigurasi berbagai sistem dengan kemampuan yang beragam untuk membantu menangani dan mengatasi setiap insiden kebakaran di atas kapal. Demikian pula, kebijakan maritim modern menuntut agar para pelaut memiliki pengetahuan, keterampilan, dan kesadaran yang memadai tentang cara menangani kebakaran di berbagai tingkatan seperti pencegahan, pengendalian, dan pemadaman (Ueda, et al. 2019).

2. Permasalahan

Dalam lingkungan maritim modern, jumlah tragedi akibat kebakaran telah berkurang secara signifikan karena perkembangan sistem pemadam kebakaran yang terus berlanjut, yang memungkinkan deteksi dan komunikasi yang mudah terhadap setiap kejadian kebakaran di atas kapal. Efisiensi sistem, teknik, dan metode ini diyakini didasarkan pada penggunaan komputer yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian yang tepat terhadap aktivitas dan operasi pelayaran laut. Oleh karena itu, tinjauan ini bertujuan untuk mengungkap dan memahami efektivitas sistem pemadam kebakaran modern di atas kapal dibandingkan dengan mekanisme pemadam kebakaran tradisional, berkat inovasi teknologi yang semakin maju ini. Tinjauan ini juga akan mengevaluasi apakah perkembangan teknologi yang pesat ini dapat membantu merancang dan membangun strategi berbasis komputer yang dapat dikonfigurasi ke berbagai sistem untuk memfasilitasi respons segera begitu kebakaran terdeteksi di lokasi mana pun di kapal.

3. Tujuan Penelitian

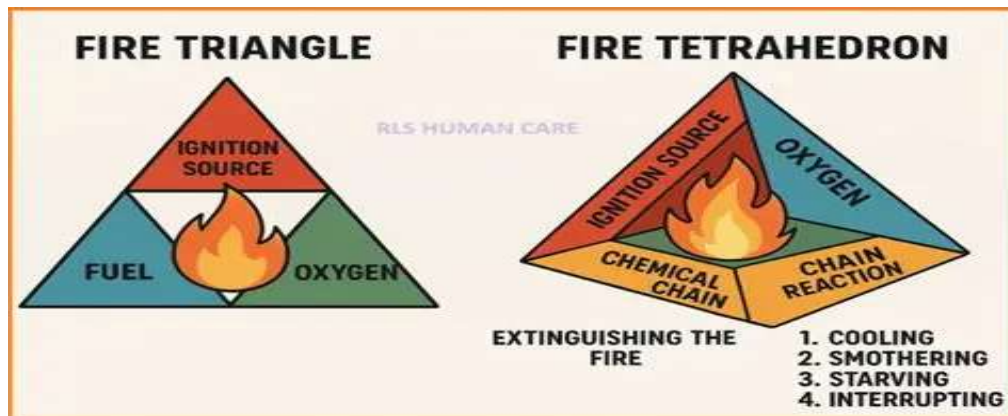
Sistem pemadam kebakaran mungkin merupakan komponen paling penting di atas kapal karena bertujuan untuk melindungi nyawa manusia, mencegah kehilangan harta benda, serta melindungi dari kerusakan lingkungan akibat kebakaran. Oleh karena itu, untuk mengatasi insiden kebakaran di atas kapal secara efektif, kru manajemen kerusakan dan setiap individu lain di kapal tidak hanya harus familiar dengan peralatan pemadam kebakaran dasar, tetapi juga memiliki pengetahuan tentang sistem pemadam kebakaran yang kompleks di atas kapal. Dengan demikian,

pemahaman tentang berbagai sifat dan karakteristik berbagai jenis kebakaran akan membantu kru untuk memilih taktik yang paling tepat dan mengadopsi sistem dan peralatan pemadam kebakaran yang sesuai untuk menyerang dan memadamkan kebakaran di atas kapal. Oleh karena itu, awak kapal perlu memahami bagaimana sistem pemadam kebakaran modern diterapkan dan digunakan dalam memadamkan api di atas kapal. Meskipun mahal untuk dipasang dan dipelihara, sistem pemadam kebakaran modern telah terbukti efektif sehingga secara signifikan mengurangi tragedi maritim. Namun, beberapa sistem ini memerlukan pengoperasian manual yang merupakan tantangan besar bagi awak kapal. Semua aspek ini sangat penting dan menjadi fokus utama dalam penelitian ini. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi bagaimana perkembangan teknologi terkini telah secara efektif mengubah sistem dan mekanisme pemadam kebakaran di atas kapal sehingga mengurangi tragedi di laut.

2. KAJIAN TEORITIS

1.1 Definisi Api

Api adalah aspek fundamental kehidupan yang populer bagi hampir semua orang karena memainkan peran penting dalam kehidupan sehari-hari manusia. Unsur ini digunakan setiap hari untuk berbagai alasan, mulai dari memasak hingga memanaskan atau menghangatkan rumah (Hurley, 2019). Ketika api dikelola, dikendalikan, dan digunakan dengan baik, ia melayani tujuan manusia secara memadai dan tepat. Di sisi lain, pengelolaan yang tidak tepat dan penggunaan api yang tidak terkendali dapat mengakibatkan kerusakan besar pada properti, kehidupan, dan segala sesuatu yang dilaluinya. Dari sudut pandang ilmiah, api dapat digambarkan sebagai proses kimia yang melibatkan oksidasi cepat suatu material dalam reaksi pembakaran, melepaskan panas, cahaya, dan produk reaksi lainnya. Unsur-unsur ini menghasilkan segitiga api, yang merupakan paradigma yang menyajikan konstituen penting dari api. Segitiga api menggambarkan bahwa proses pembakaran terjadi ketika tiga aspek penting ini (yaitu panas, bahan bakar, dan oksigen) hadir dalam proporsi yang tepat seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Namun, saat ini teori ini telah dikembangkan lebih lanjut untuk membentuk model baru yang disebut tetrahedron, yang memberikan perspektif baru tentang pembakaran. Dalam teori baru ini, dinyatakan bahwa api adalah reaksi berantai kimia yang terjadi ketika ketiga unsur tersebut tersedia dalam rasio yang tepat.



Gambar 2: Proses pembakaran terjadi ketika tiga aspek penting dari segitiga api (panas, bahan bakar, dan oksigen) hadir dalam proporsi yang tepat

1.2 Klasifikasi kebakaran

Selama proses pembakaran, nyala api adalah satu-satunya elemen yang terlihat dari reaksi kimia ini, sehingga ketika cukup panas, gas-gas tersebut terionisasi untuk menghasilkan plasma. Oleh karena itu, tergantung pada zat-zat yang terlibat dalam reaksi kimia dan pengotor di luarnya, warna dan intensitas api berbeda dan unik. Sebagai hasil dari sifat dan karakteristik api ini, efisiensi agen pemadam, metode, teknik, dan sistem bervariasi berdasarkan bahan bakar yang terlibat. Oleh karena itu, meskipun sistem tertentu efektif pada kebakaran yang mengandung bahan bakar tertentu, sistem tersebut mungkin tidak efektif atau bahkan menjadi berbahaya untuk digunakan pada jenis kebakaran lainnya. Contoh yang baik adalah penggunaan alat pemadam api portabel, di mana seperti yang kita ketahui, air adalah media pemadam api yang baik karena efisien dan efektif ketika menangani api yang membara, misalnya kayu yang terbakar atau sampah. Meskipun demikian, metode atau teknik ini kurang efektif ketika menangani kebakaran yang melibatkan panel listrik atau papan sakelar yang masih aktif karena aspek konduktivitas air dan kemungkinan gelombang kejutan dan gangguan yang dapat terjadi akibat penggunaan sistem pemadam kebakaran ini. Oleh karena itu, dengan mempertimbangkan berbagai bentuk kebakaran yang disebabkan oleh berbagai bahan bakar yang terlibat, berbagai agen dan mekanisme pemadaman, serta berbagai sistem yang digunakan untuk memadamkan setiap jenis kebakaran secara efektif dan efisien; penting untuk mengklasifikasikan setiap jenis kebakaran berdasarkan jenis sistem yang dapat memadamkan ancaman kebakaran secara efektif. Hal ini terutama bertujuan untuk memudahkan, memperlancar, dan memastikan pemilihan jenis sistem, teknik, metode, atau agen yang tepat untuk menangani dan mengendalikan setiap jenis kebakaran secara efektif. Dalam hal ini, kebakaran

dikategorikan menjadi empat jenis atau kelas yang ditandai dengan huruf "A" hingga "D".

Klasifikasi ini ditentukan oleh bahan bakar yang terlibat dalam setiap jenis kebakaran, dan setiap kelas terdiri dari zat-zat dengan sifat pembakaran yang terkait, sehingga memerlukan sistem dan metode pemadaman yang serupa. Untuk di atas kapal, pengetahuan dan kesadaran akan kelas-kelas ini sangat penting untuk memfasilitasi operasi pemadaman kebakaran secara memadai, serta memahami sifat mudah terbakar atau menyala dari material yang mungkin ditemukan di kapal. Tabel di bawah ini merangkum berbagai kelas atau jenis kebakaran dan jenis bahan bakar yang terlibat dalam setiap jenisnya.

Kelas atau jenis api	Jenis material atau bahan bakar yang terlibat
A	Kayu, kertas, kain, sampah, dan bahan-bahan umum lainnya.
B	Bensin, oli, cat, dan cairan mudah terbakar lainnya
C	Meliputi kebakaran yang disebabkan oleh peralatan listrik yang masih aktif tanpa membahayakan pengguna.
D	Melibatkan logam dan paduan logam yang mudah terbakar.
K	Bahan-bahan untuk memasak (minyak dan lemak nabati dan hewani)

Tabel 1: Ringkasan berbagai jenis kebakaran dan bahan bakar yang terlibat dalam setiap jenis kebakaran.

1.3 Perlindungan kebakaran

Pengetahuan dan kesadaran yang memadai dan efisien tentang berbagai jenis kebakaran memungkinkan setiap awak kapal untuk secara efektif mengatasi setiap kejadian kebakaran di atas kapal. Hal ini karena melalui kesadaran tersebut, awak kapal memahami cara memadamkan api pada berbagai tahapnya dengan menerapkan alat pemadam kebakaran portabel atau non-portabel yang sesuai mekanisme dan sistem yang dipasang dan dikonfigurasi pada kapal. Metode atau sistem pemadam kebakaran yang diterapkan bergantung pada tingkat kebakaran dan lokasi kebakaran di kapal. Secara umum, pemadaman kebakaran di atas kapal merupakan tanggung jawab setiap orang di kapal, baik yang memiliki keterampilan dan pengetahuan tentang jenis kebakaran dan cara menggunakan sistem pemadam kebakaran di kapal maupun tidak. Demikian pula, penting untuk memberitahukan kepada penumpang atau awak kapal tentang berbagai lokasi di mana sistem-sistem ini dipasang di kapal dan mengarahkan cara merespons jika terjadi kebakaran di atas kapal (Cote & Harrington, 2020). Hal ini diperlukan untuk menghindari kerusakan akibat

kebakaran, cedera, kehilangan nyawa dan harta benda.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur sistematis untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mensintesis hasil-hasil penelitian terkait sistem pemadam kebakaran di atas kapal. Penelusuran literatur dilakukan secara iteratif dan berkelanjutan selama periode Oktober 2023 hingga Mei 2024 guna memastikan cakupan sumber yang komprehensif dan mutakhir. Pencarian literatur dilakukan melalui beberapa sumber utama, yaitu mesin pencari ilmiah Google Scholar, basis data ProQuest, sistem pencarian perpustakaan Universitas Strathclyde (SUPrime), serta mesin pencari IMO untuk memperoleh dokumen standar, laporan teknis, dan publikasi yang relevan di bidang maritim. Kombinasi berbagai sumber ini digunakan untuk meminimalkan bias publikasi dan meningkatkan kelengkapan data.

Mengingat keterbatasan jumlah publikasi yang secara spesifik membahas topik ini, penelitian ini tidak menerapkan kriteria inklusi yang ketat berdasarkan kata kunci tertentu. Oleh karena itu, digunakan strategi pencarian bottom-up, di mana daftar referensi dari setiap artikel yang teridentifikasi ditelaah secara mendalam untuk menemukan sumber tambahan yang relevan (*snowballing technique*). Artikel yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan relevansi topik, kualitas sumber, dan kesesuaian dengan tujuan penelitian. Data yang terkumpul dianalisis secara kualitatif melalui proses pengelompokan tema untuk mengidentifikasi tren teknologi, jenis sistem pemadam kebakaran, serta aspek pelatihan dan implementasinya di lingkungan maritim.

4. Hasil DAN PEMBAHASAN

5.1 Sistem tradisional

Secara konvensional, strategi, teknik, prosedur, dan sistem penahanan kebakaran selalu bergantung pada air, dengan mekanisme yang paling populer adalah sistem sprinkler. Berdasarkan hal ini, air telah banyak digunakan untuk mengendalikan dan mengatasi berbagai jenis kebakaran (SFPE Handbook, 2019). Namun, air tidak ideal untuk kebakaran yang terkait dengan peralatan listrik yang masih aktif, kebakaran cairan yang mudah terbakar, serta bahaya kebakaran lainnya yang bereaksi agresif dengan air sehingga menyebabkan lebih banyak bahaya bagi kehidupan dan harta benda. Misalnya, kebakaran yang tertutup pada peralatan listrik seperti lemari komputer, kabinet sakelar dan router, serta ruang server; tidak dapat dipadamkan menggunakan air karena

akan bereaksi dengan pengisi daya listrik yang dapat menyebabkan efek buruk bagi manusia, harta benda, dan lingkungan. Demikian pula, penggunaan air pada jenis peralatan listrik ini akan merusaknya sepenuhnya sehingga menyebabkan kerusakan atau membuatnya usang dan tidak dapat digunakan lagi (Gottuk & Lattimer, 2018).

Selain sistem berbasis air, sistem kimia kering juga banyak digunakan untuk mengendalikan kebakaran yang disebabkan oleh cairan mudah terbakar seperti kebakaran semprotan. Namun, sistem ini kurang efektif dalam menangani jenis kebakaran tersebut. Mekanisme sistem ini hanya memberikan sedikit efek pembekuan, yang kurang efisien terutama ketika bubuk telah mengendap. Dalam kategori sistem pemadam kebakaran ini, berbagai bentuk bubuk digunakan untuk menangani jenis kebakaran ini. Bubuk kimia dehidrasi yang populer digunakan adalah monoamonium fosfat, kalium dan natrium karbonat atau bikarbonat. Namun, sistem bubuk ini tidak disarankan untuk digunakan di ruang publik atau tempat yang ramai karena menimbulkan kerusakan lingkungan, yang juga dapat berdampak buruk pada kesejahteraan manusia. Selain itu, sistem karbon dioksida juga telah banyak digunakan dalam menangani kebakaran selama bertahun-tahun dan masih merupakan strategi umum yang digunakan untuk menangani insiden kebakaran hingga saat ini. Terlepas dari popularitasnya dalam pemadaman kebakaran, karbon dioksida menyebabkan sesak napas berdasarkan tingkat konsentrasi yang diperlukan untuk memadamkan api. Akibatnya, mekanisme ini harus dipertimbangkan dan diakui sebagai racun bagi awak kapal dan oleh karena itu model pengaliran penuh karbon dioksida tidak dapat dikontrol secara otomatis di ruang yang ditempati di kapal. Hal ini karena karbon dioksida efektif dikumpulkan pada tekanan tinggi dan konsentrasi sangat tinggi agar dapat secara efisien memadamkan api. Konsentrasi gas yang tinggi ini berbahaya bagi kehidupan manusia karena dapat menyebabkan pingsan dan sesak napas di antara awak kapal. Selain itu, sistem karbon dioksida juga mencakup peralatan yang besar dan berat menyulitkan penerapannya dalam beberapa kasus kebakaran. Demikian pula, adopsi dan penggunaan sistem busa ekspansi rendah dan menengah umum dan tepat untuk mengatasi kebakaran genangan cairan. Busa tersebut membentuk mekanisme penghalang untuk memutus pasokan oksigen serta mendinginkan bahan bakar sebagai akibat dari penyumbatan oksigen. Sistem busa tidak efektif terutama ketika menangani kebakaran semprotan (Gottuk & Lattimer, 2018). Sebaliknya, bahan bakar seperti alkohol dapat digunakan untuk mengurangi lapisan busa yang terbentuk untuk mengurangi proses pembakaran dan oleh

karena itu kehati-hatian yang tepat harus dipertimbangkan ketika memilih senyawa busa yang akan digunakan dalam menangani berbagai jenis kebakaran. Selain itu, busa yang dipilih tidak boleh digunakan untuk melindungi bahaya apa pun yang dapat bereaksi keras dengan berbagai jenis kebakaran.

Oleh karena itu, semua sistem pemadam kebakaran tradisional ini membantu dalam menangani insiden kebakaran baik di lepas pantai maupun di darat dan mereka menjalankan peran mereka dengan sempurna dalam situasi tertentu. Meskipun demikian, semua sistem pemadam kebakaran konvensional ini terbukti kurang memadai dan tidak efektif, terutama di atas kapal (SFPE Handbook, 2019). Karena ketidakefisienan dan ketidakefektifan sistem pemadam kebakaran tradisional ini, teknologi telah memicu pengembangan sistem pemadam kebakaran modern yang sangat efektif dan efisien yang benar-benar berdampak pada lingkungan laut.

5.2 Perkembangan modern dalam sistem pemadam kebakaran

Saat ini, terdapat peningkatan perkembangan dalam kreativitas sistem pemadam kebakaran yang dipasang dan dikonfigurasi di atas kapal. Hal ini bertujuan untuk menanggapi berbagai jenis kecelakaan kebakaran yang mungkin terjadi di kapal sehingga meminimalkan kehilangan nyawa dan harta benda di atas kapal (Papanikolaou, 2020). Beberapa pengembangan desain tersebut adalah sebagai berikut berdasarkan uraian dari para ahli sebelumnya.

5.2.1 Sistem pemadam kebakaran berbasis teknologi modern

Studi sebelumnya menunjukkan bahwa banyak hal telah dilakukan dalam desain berbagai jenis sensor deteksi kebakaran, tetapi sedikit yang menggambarkan bagaimana otomatisasi dapat diintegrasikan dan dikonfigurasi dalam sistem ini. Hal ini diilustrasikan melalui tinjauan oleh (National Fire Protection Association. 2022) yang menunjukkan desain sistem sirene kebakaran cerdas, yang menggunakan sensor panas, asap, dan inframerah untuk mendeteksi dan memberi sinyal terjadinya kebakaran. Tujuan utama dari hal ini adalah untuk meminimalkan gangguan yang dihasilkan oleh sensor asap, yang umum di berbagai area di atas kapal. Demikian pula, (National Fire Protection Association. 2022) mengembangkan sistem keselamatan yang berbasis pada sensor panas, asap, dan gerakan sehingga deteksi ketiga elemen ini dapat mengaktifkan bel alarm yang memberi sinyal kepada semua orang di atas kapal. (Babrauskas, 2021) menampilkan gambaran panel untuk keselamatan kebakaran yang dirancang dengan material komposit modern berbasis serat basal. Tinjauan tersebut menunjukkan bahwa material ini menawarkan suhu dinding yang

rendah dan daya sisa yang lebih baik, yang mencegah bencana kebakaran. Demikian pula, (Zhang, et al. 2020) menunjukkan prosedur penanganan penampilan untuk deteksi api dan asap otomatis secara real-time dalam pengaturan terowongan. Dalam desain ini, data warna dan gerakan dimanfaatkan untuk mengurangi deteksi yang salah atau keliru di lingkungan ini, sehingga memfasilitasi pengenalan akurat posisi pasti kejadian kebakaran di lingkungan terowongan ini. Seperti yang terlihat, sebagian besar studi ini lebih berfokus pada penginderaan dan deteksi kebakaran dengan sedikit perhatian yang diarahkan pada stimulus otomatisasi sistem pemadam kebakaran ini. Sebuah laporan survei yang dilakukan tentang proteksi kebakaran menunjukkan bahwa sebagian besar sistem sprinkler kebakaran bergantung pada pompa yang dioperasikan secara manual untuk secara efektif menjalankan dan menyelesaikan perannya dalam pemadaman kebakaran. Survei ini menunjukkan kesulitan sistem tersebut di atas kapal, sehingga menyulitkan pengendalian kebakaran jika terjadi kebakaran di kapal.

Di sisi lain, beberapa sistem yang baru dikembangkan dan digunakan dalam pemadam kebakaran menunjukkan adanya unsur otomatisasi di mana terdapat penggunaan ekstensif bola kaca peka panas yang dipasang pada saluran keluar berisi cairan yang mengembang dan pecah ketika suhu lingkungan terlampaui sehingga melepaskan bahan pemadam api seperti gas dan air (Cote & Harrington, 2020).

5.2.2 Sistem berbasis komputer

Kemajuan teknologi telah mempermudah pengendalian dan pengelolaan sistem pemadam kebakaran sehingga membuat operasi dan aktivitas pemadam kebakaran di atas kapal menjadi lebih mudah. Misalnya, (Astrom & Hagglund, 2020) mengembangkan sistem kontrol respons yang memantau dan mengatur suhu suatu proses pada berbagai titik pengaturan yang diinginkan sehingga memengaruhi inisiasi tindakan untuk mengatasi insiden ketika masih dalam tahap awal. (International Organization for Standardization, 2018) membangun ide rangkaian alarm asap yang sudah ada untuk menciptakan indikator kebakaran yang mengandalkan penginderaan dan deteksi keberadaan asap. Detektor ini dikonfigurasi dan dihubungkan ke sistem komputer yang memfasilitasi kontrol yang memungkinkan komunikasi informasi terkait kebakaran sebagai pesan kepada individu yang bertanggung jawab sehingga respons manusia secara instan dapat dimulai. Ini merupakan indikasi bahwa survei sedang berupaya untuk membangun sistem yang lebih efektif dan otomatis sehingga dapat merasakan, mendeteksi, dan memulai mekanisme untuk memadamkan api

kebakaran sambil memberi tahu awak kapal yang relevan tentang pemberitahuan pesan. Diharapkan bahwa pengembangan sistem pemadam kebakaran semacam itu akan secara memadai mengatasi tantangan kritis ini selama kebakaran di kapal. Secara keseluruhan, untuk sepenuhnya memenuhi kebutuhan akan sistem pemadam kebakaran yang tepat untuk menggantikan sistem tradisional, teknologi telah sangat mendukung pengembangan sistem pemadam kebakaran yang sesuai baru-baru ini. Berdasarkan ideologi teknologi, tinjauan ini secara kritis melihat beberapa sistem pemadam kebakaran yang baru dikembangkan dan banyak digunakan yang telah terbukti efisien dan efektif dalam menangani kejadian kebakaran di atas kapal (Das, 2019).

5.3 Berbagai jenis sistem pemadam di kapal

5.3.1 CO₂ Sistem

Baru-baru ini, pengembangan sistem pemadam kebakaran gas CO₂ modern memanfaatkan jet, pipa, dan silinder bertekanan untuk menyebarkan gas CO₂ dengan kecepatan sangat tinggi saat menangani kebakaran di kapal seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3: Sistem gas CO₂ di atas kapal.

Berdasarkan hal ini, awak kapal harus mempertimbangkan bahwa area yang menjadi target dapat menahan tekanan gas tanpa kegagalan yang dapat menyebabkan kerusakan pada bagian atau area yang bersangkutan. Dalam kelompok sistem pemadam kebakaran ini, dua jenis partikel gas banyak digunakan ketika menangani berbagai jenis kebakaran di kapal (*National Fire Protection Association*, 2023).

5.3.2 Inert Gas System

Dalam pemadaman kebakaran, mekanisme kerja utama sistem ini adalah untuk mengurangi pasokan oksigen dalam proses pembakaran dan dengan demikian memadamkan api. Di antara *gas inert* dasar yang memfasilitasi hal ini termasuk nitrogen, argon, dan helium, yang murni dan secara alami terdapat di atmosfer. Kesesuaian *gas inert* didasarkan pada fakta bahwa mereka memiliki ODP nol dan tidak memiliki kemampuan pemanasan global. Keuntungan lain dari gas-gas ini dalam proses pemadaman kebakaran adalah bahwa mereka tidak terpapar korosi termal dan oleh karena itu tidak membentuk produk sampingan pembakaran yang dapat membahayakan lingkungan sekitar (Nolan, 2020). Dengan menggunakan gas-gas ini, pengendali kebakaran bertujuan untuk memasukkan jumlah gas yang cukup ke lokasi kebakaran dengan tekanan tinggi untuk menurunkan kadar kandungan oksigen guna menghentikan proses pembakaran dan memastikan kebakaran tidak dapat berlanjut. Dari sudut pandang ilmiah, untuk mencapai faktor perlindungan yang memadai saat menangani kebakaran, sistem ini berfokus pada tujuan menurunkan kadar oksigen hingga sekitar 12,5% dengan memastikan konsentrasi gas-gas ini (*gas inert*) di lokasi kebakaran sebesar 50%. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4: *Inert Gas Fire Suppression System*

Saat ini, tiga sistem *gas inert* telah dirancang dan banyak digunakan untuk memadamkan kebakaran di atas kapal. Sistem-sistem tersebut adalah:

- 1) Metode *Aragonit* (IG-55) (terdiri dari 50% nitrogen dan 50% argon)
- 2) Metode *Inergen* (IG-541) (terdiri dari 52% nitrogen, 40% argon, dan 8% karbon dioksida)

3) Metode *Argon* (IG-01) (terbentuk dari 100% argon)

Di bawah pengaruh teknologi, ketiga sistem ini menggunakan prinsip pemadaman kebakaran yang sama, hanya metode *Inergen* yang menghasilkan laju pernapasan tinggi karena penambahan karbon dioksida sebagai salah satu komponennya. Hal ini membantu awak kapal yang menangani kebakaran untuk beroperasi tanpa terpengaruh oleh efek kekurangan oksigen dalam jangka waktu yang lebih lama saat menangani kebakaran (Nolan, 2020). Namun, perlu diperhatikan saat menggunakan gas-gas ini karena menghirup produk penyalaan dapat berdampak buruk bagi awak kapal dan lingkungan secara keseluruhan. Selain itu, gas-gas ini tidak dicairkan dan karenanya disimpan pada tekanan yang sangat tinggi sehingga membutuhkan tabung penyimpanan bertekanan tinggi yang mungkin mahal serta berdampak pada ruang dan berat di kapal.

5.3.3 Sistem halokarbon

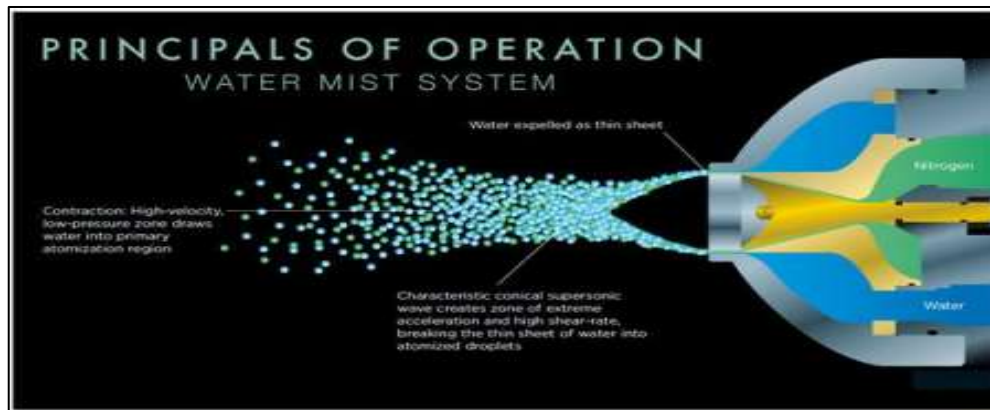
Halokarbon merupakan pengembangan lebih lanjut dari halon. Pengembangan ini didasarkan pada konstituen molekuler yang ditingkatkan untuk meminimalkan atau menghilangkan atom klorin dan bromida yang menyebabkan kerusakan ozon. Sistem ini menggunakan mekanisme pendinginan untuk melawan dan memadamkan api. Bahan kimia halokarbon yang paling populer bervariasi dalam hal sifat dasar, pengaruh lingkungan, dan toksisitas serta faktor kompetensi penahanan api. Teknik eksperimental pembakar cangkir terutama digunakan untuk menilai kemampuan pemadaman api dari berbagai partikel halokarbon di mana nyala api pembakar cangkir, yang merupakan konsentrasi partikel tersebut, digunakan untuk memadamkan api dalam proses pemadaman kebakaran (American Institute of Chemical Engineers, 2020). Namun, terlepas dari jenis bahan bakar yang terlibat dalam kebakaran, partikel halokarbon sangat efisien dalam memadamkan api dibandingkan dengan halon. Di sisi lain, untuk pemadaman kebakaran, dua elemen harus dipertimbangkan ketika menggunakan bahan-bahan ini. Elemen pertama adalah tingkat bahaya dari bahan itu sendiri dan kedua adalah toksisitas dari reaksi kimia yang dihasilkan selama proses pembakaran. Kedua aspek dari metode pemadaman kebakaran ini menentukan dampak lingkungan pada kapal. Hal ini karena menghirup halokarbon dan hidrokarbon berpengaruh pada fungsi normal jantung yang mengakibatkan sensitivitas terhadap peningkatan kadar adrenalin yang dapat menyebabkan aritmia jantung serta potensi serangan jantung (*National Fire Protection Association*, 2023). Survei teknologi telah membuktikan bahwa berbagai bahan kimia halokarbon (seperti FM-200 (HFC 227ea), FE-13 (HFC-23), NAF S-III (campuran HCFC), dan CEA-410 (FC-3-1-10)) memiliki

sifat yang serupa dan aman untuk digunakan di ruang publik, misalnya di atas kapal.

Untuk mengevaluasi mekanisme pasti pemadaman api menggunakan halokarbon, eksperimen pemadaman api skala menengah dan skala penuh dilakukan oleh Institut Penelitian Teknik Universitas New Mexico (NMERI). Dalam pemeriksaan skala menengah, evaluasi mencakup empat halokarbon dengan berbagai jenis kebakaran. Hasil pengujian ini menunjukkan kinerja pemadaman api yang relatif serupa di antara keempat halokarbon tersebut. Eksperimen tersebut juga mengungkap bahwa konsentrasi produk gas asam yang dihasilkan dari proses tersebut bergantung pada waktu yang dibutuhkan untuk memadamkan api serta ukuran api. Dalam eksperimen serupa lainnya yang dilakukan oleh Laboratorium Penelitian Angkatan Laut AS (NRL), ditemukan bahwa peningkatan konsentrasi partikel jelas menghasilkan pemadaman cepat dalam waktu singkat. Untuk mendukung hasil ini, pengujian lain dilakukan di atas kapal Ex-USS SHADWELL di Mobile Bay, Alabama dan hasilnya menunjukkan keberhasilan penahanan berbagai jenis kebakaran dalam jangka waktu 28 detik. Hal ini menunjukkan bahwa waktu pemadaman api berkurang seiring dengan peningkatan konsentrasi zat pemadam (*National Fire Protection Association*, 2023). Selain itu, juga diketahui bahwa api besar lebih mudah dan cepat dipadamkan dibandingkan api kecil. Secara umum, berdasarkan percobaan-percobaan ini dan banyak percobaan lain yang dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan kinerja halokarbon dalam pemadaman kebakaran, terungkap bahwa agen halokarbon memadamkan berbagai jenis kebakaran pada konsentrasi yang dirancang. Namun, hal ini sebagian besar ditentukan oleh jenis dan intensitas partikel, jenis dan ukuran kebakaran, serta durasi pelepasan dan penahanan. Demikian pula di sisi negatif, penggunaan partikel halokarbon menyebabkan pengaruh jangka panjang terhadap pemanasan global jika dilepaskan ke udara. Hal ini disebabkan oleh kemampuannya untuk bertahan di atmosfer dalam jangka waktu yang lama.

5.3.4 Sistem kabut air

Air telah lama digunakan dan dianggap sebagai agen pemadam api yang efektif. Hal ini disebabkan oleh kapasitas pemanasan dan penguapannya yang tinggi, yang memungkinkannya menyerap sejumlah besar panas dari api dan bahan bakar sehingga secara efektif memadamkan berbagai jenis kebakaran. Namun, teknologi telah memungkinkan modifikasi mekanisme pemadaman air ini untuk menciptakan apa yang saat ini disebut sebagai kabut air. Istilah kabut air menggambarkan semburan atau pancaran air tipis di mana 99% dari jumlah semprotan tersebut terdiri dari tetesan yang diameternya kurang dari 1000 mikron seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5: Sistem kabut air menyemburkan air tipis berupa pancuran atau pancaran di mana 99% dari jumlah semprotan tersebut terdiri dari tetesan dengan diameter kurang dari 1000 mikron.

Kemunculan sistem kabut air dalam pemadam kebakaran dapat ditelusuri kembali pada pertengahan tahun 1950-an dan diyakini sebagai solusi atau pengganti sistem gas, yang memiliki masalah toksisitas terhadap lingkungan (Shelley & Cole, 2019). Hal ini karena air tidak beracun, mudah diakses, dan hemat biaya dibandingkan dengan sebagian besar bahan kimia atau campuran yang belum teruji yang digunakan dalam sistem gas. Selain itu, kabut air menawarkan pendinginan bahan bakar, nyala api, atau kebakaran yang efisien dan berpotensi menghambat penyalan kembali dalam bentuk apa pun, yang merupakan praktik umum untuk gas. Sebagai hasil dari pendinginan yang efektif dan durasi pembersihan yang singkat, teknik kabut air dapat bekerja secara efektif di tempat umum atau ruang yang ditempati tanpa menimbulkan bahaya. Demikian pula, kabut air lebih menguntungkan daripada alat penyiram air tradisional dalam berbagai hal seperti penurunan laju aliran air sehingga meminimalkan kehilangan air atau kerusakan pada peralatan dan penghuni yang sensitif. Selain itu, laju aliran air yang rendah ini memiliki manfaat dalam hal ruang dan berat pasokan air. Selain itu, kabut air mempermudah pengendalian kebakaran cairan yang mudah terbakar yang tidak dapat dilakukan oleh sprinkler konvensional karena percikan dan kebocoran bahan bakar. Penelitian ekstensif dan intensif telah dilakukan pada sistem kabut air dalam upaya untuk menetapkan mekanisme pemadam kebakarannya serta parameter tetesan maksimum yang memenuhi persyaratan pemadaman kebakaran yang efisien di atas kapal. Dalam pemadaman kebakaran, penanggulangan api menggunakan sistem kabut air pada dasarnya merupakan mekanisme praktis dan tidak melibatkan bahan kimia apa pun. Penelitian sebelumnya mengungkapkan bahwa pendinginan api dan disartikulasi oksigen adalah strategi paling populer yang digunakan dalam penahanan api dengan kabut air. Sejalan dengan itu, studi terbaru mengusulkan adanya mekanisme tambahan dalam sistem

pengendalian api kabut air. Di antara mekanisme tambahan ini adalah atenuasi radiasi (pelemahan atau pengurangan) yang ditawarkan oleh kabut air dan dapat menghentikan penyebaran api ke permukaan bahan bakar yang belum terbakar serta meminimalkan laju dehidrasi pada permukaan bahan bakar di atas kapal. Sebuah studi yang dilakukan oleh *Fire Safety Research Institute* (FSRI) menetapkan bahwa kabut air mengurangi panas radiasi hingga 70%. Mekanisme pemadaman kebakaran lainnya yang disediakan oleh sistem kabut air meliputi pengenceran uap yang mudah terbakar serta pembasahan dan pendinginan langsung bahan yang mudah terbakar.

Karakteristik kabut air, termasuk ukuran tetesan, fluiditas massa, dan kekuatan semprotan, memiliki pengaruh langsung terhadap efektivitasnya dalam pemadaman kebakaran. Hal ini karena agar sistem kabut air dapat mencapai efisiensi dalam pemadaman kebakaran, sistem tersebut harus menghasilkan dan menyebarkan partikel air (tetesan) berukuran optimal dengan konsentrasi dan kekuatan yang memadai pada api. Ukuran tetesan ini bergantung pada kemungkinan ukuran api, karakteristik bahan yang terbakar, serta tingkat hambatan yang ditimbulkan. Berbagai mekanisme kabut air telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir untuk membantu pemadaman kebakaran di atas kapal. Beberapa strategi yang dirancang menggunakan air bertekanan tinggi atau menengah yang disemprotkan melalui rongga saluran keluar untuk menghasilkan dan menyemprotkan kabut air, sementara yang lain menggunakan saluran keluar fluida ganda (air dan udara). Sistem pemadam kebakaran berbasis air ini telah menunjukkan keuntungan signifikan di atas kapal, seperti kemampuan penahanan api terbaik, tidak ada dampak atmosfer akibat toksisitas atau emisi kimia ke udara. Karena itu, pemadaman kebakaran kabut air telah diadopsi dan diimplementasikan dalam berbagai situasi nyata di atas kapal. Dalam aplikasi pemadaman kebakaran di atas kapal, kabut air terbukti efektif dan memiliki prospek untuk pemadaman kebakaran yang efisien. Hal ini diilustrasikan oleh berbagai studi yang dilakukan oleh FSRI (*Fire Safety Research Institute*), yang memverifikasi bahwa kabut air dapat secara efektif memadamkan kebakaran besar dengan menggunakan sedikit air. Selain itu, telah ditetapkan bahwa kabut air dapat secara efektif memadamkan api bahkan ketika ventilasi alami seperti pintu dan jendela terbuka, yang berbeda dengan penggunaan agen gas. Sistem ini juga dengan cepat menurunkan suhu lingkungan sehingga memungkinkan akses bebas ke lokasi kebakaran (*Fire Safety Research Institute* (FSRI), 2025).

Unsur lain yang menjadikan kabut air sebagai pengganti halon potensial adalah perlindungan peralatan listrik dan elektronik. Sebuah studi yang meneliti kelayakan sistem kabut air

dalam pemadaman kebakaran elektronik mengkonfirmasi bahwa sistem ini efektif dalam menahan api tanpa menyebabkan korsleting serta kerusakan lain pada barang, objek, atau peralatan listrik (Farrell, K., et al. 2023). Studi penelitian telah menunjukkan potensi keuntungan kabut air dengan menyatakan bahwa pengaruh negatifnya terhadap peralatan elektronik tidak dapat dibandingkan dengan kerusakan yang diakibatkan oleh produk korosi termal dari agen gas. (*National Fire Protection Association*, 2023) menetapkan bahwa penggunaan agen gas halokarbon pada kebakaran listrik yang membara dapat menyebabkan korosi yang menghasilkan gas yang sangat berbahaya.

Sebuah studi terbaru yang dilakukan oleh FSRI (*Fire Safety Research Institute*) memverifikasi bahwa kinerja pemadaman api dengan kabut air dapat ditingkatkan dengan mengadopsi dan menerapkan pola pelepasan siklik. Hal ini karena pelepasan siklik meningkatkan dan memperbaiki kinerja pemadaman. Demikian pula, penggunaan pelepasan siklik lebih lanjut mengurangi volume air yang digunakan untuk memadamkan api selain mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk memadamkan api. Selain itu, penggunaan pelepasan siklik menghasilkan volume uap air yang besar, yang mendorong laju penipisan oksigen sehingga meningkatkan proses pemadaman api di atas kapal.

5.3.5 Sistem busa udara bertekanan

Selama beberapa dekade, pemadam kebakaran juga telah menyaksikan penggunaan busa udara bertekanan sebagai sistem kompresi api yang efektif, terutama di industri kimia dan perminyakan. Busa udara bertekanan diproduksi dengan menggabungkan tiga elemen berikut: air, udara, dan zat pembentuk busa. Prosedur pembuatan busa ini melibatkan pencampuran zat pembentuk busa dengan air untuk membuat larutan busa. Larutan yang dihasilkan kemudian dialiri udara melalui mekanisme aerasi yang sesuai untuk menghasilkan gelembung udara. Intensitas busa yang sesuai tercapai ketika proporsi yang tepat dari ketiga komponen tersebut digunakan seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6: Busa udara bertekanan adalah sistem pemadam api yang efektif, terutama di industri kimia dan perminyakan.

Konsentrat busa yang paling umum digunakan dalam produksi busa udara ini adalah 3% dan 6% dari konsentrat yang digunakan dalam pembuatan larutan busa. Misalnya, ketika konsentrat 3% digunakan, ini berarti 3 bagian konsentrat harus dikombinasikan dengan 97 bagian air untuk menghasilkan 100 bagian larutan busa, dan hal yang sama berlaku untuk konsentrat 6%. Produk busa dalam proses ini dikompresi untuk membentuk busa udara, yang kemudian disemprotkan ke api menggunakan sistem busa pipa tetap. Namun, sistem busa tradisional tidak stabil dan tidak konsisten sehingga rasio ekspansinya tidak setinggi yang diinginkan untuk secara efektif memadamkan kebakaran di atas kapal. Sebaliknya, jika larutan ini dikompresi menggunakan peralatan aerasi yang sesuai, produk yang dihasilkan adalah busa udara terkompresi yang memiliki kualitas unggul dan kecepatan injeksi yang cukup tinggi. Momentum tinggi dari agen pemadam api ini ditentukan oleh kecepatan integrasi larutan busa dan udara. Teknik pemadaman kebakaran ini memiliki beberapa keunggulan; (i) momentum busa yang tinggi dan meningkat memudahkan penetrasi yang lebih cepat ke dalam awan api hingga mencapai dasar api; (ii) memiliki stabilitas terbaik dalam hal drainase dibandingkan dengan busa yang dihisap. Hal ini karena ditunjukkan oleh penyebaran ukuran gelembung yang tipis. Upaya untuk menggabungkan busa udara bertekanan ke dalam instalasi tetap di kapal masih menghadapi tantangan akibat dua kendala prosedural penting: (1) nosel tipe sprinkler konvensional tidak mendukung penyebaran busa udara bertekanan tanpa membongkarnya dan (2) busa yang dihasilkan hancur dalam pipa statis. Namun, akhir-akhir ini FSRI (*Fire Safety Research Institute*) melalui penelitian yang ekstensif telah menetapkan cara untuk mengatasi masalah ini dalam lingkungan pipa tetap dengan mengembangkan cara memproduksi busa udara bertekanan Kelas A dan B. Kemampuan ini didasarkan pada inovasi dan penemuan nosel distribusi busa (Crampton & Kim,

2019). Fragmentasi busa yang sebelumnya menghambat desain inovasi ini telah dikurangi melalui desain rekayasa kritis nosel dan sistem perpipaan. Dalam pemadaman kebakaran, sistem busa menghasilkan busa udara terkompresi yang terdiri dari gelembung-gelembung tipis dan berukuran sama, yang disemprotkan melalui nosel tanpa mengganggu sifat-sifatnya. Busa yang disemprotkan membentuk lapisan busa di permukaan cairan atau area yang terbakar sehingga menghalangi uap yang mudah terbakar keluar dari permukaan sekaligus mencegah oksigen mencapai bahan bakar. Hasil dari proses ini adalah pemadaman api yang efektif karena busa ini memadamkan api. Demikian pula, kandungan air dalam busa menghasilkan efek pendinginan sehingga memungkinkan busa untuk menurunkan suhu lingkungan sehingga mengurangi penyebaran api akibat efek radiasi.

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk menentukan kinerja sistem busa udara bertekanan dalam pemadaman kebakaran (*National Fire Protection Association*, 2020). Hasil evaluasi keseluruhan dari semua penelitian ini menunjukkan bahwa sistem busa udara bertekanan menunjukkan kinerja yang unggul dalam memadamkan api, khususnya api bahan bakar cair dan tumpukan kayu, dengan menggunakan sedikit volume air. Selain itu, busa udara bertekanan membutuhkan jumlah konsentrat busa yang minimal untuk memberikan pemadaman api yang efisien dibandingkan dengan sistem yang berbasis pada nosel aspirasi udara. Dalam penelitian lain yang dilakukan oleh FSRI (*Fire Safety Research Institute*), ditemukan bahwa sistem busa udara bertekanan pipa tetap memiliki kinerja yang lebih baik daripada metode aspirasi (*National Fire Protection Association*, 2020). Selain itu, penelitian tersebut menetapkan bahwa busa menyebar dengan mudah untuk menutupi permukaan api dengan kemampuan kohesif yang efisien untuk secara efektif mengembangkan dan mempertahankan lapisan kedap uap yang mempertahankan cukup kelembapan (air) untuk memberikan segel yang tahan lama karena kehilangan air yang cepat mengakibatkan busa mengering dan layu karena suhu api yang tinggi. Demikian pula, busa tersebut tidak memiliki berat sehingga mudah mengapung di atas cairan atau permukaan yang mudah terbakar, selain juga tahan terhadap angin. Sifat fisik busa udara terkompresi berikut memungkinkan tercapainya semua hal tersebut selama proses pemadaman kebakaran, khususnya di kapal.

- 1) Hambatan bahan bakar.
- 2) Penekanan uap.
- 3) Ketahanan terhadap panas dan radiasi.
- 4) Kecepatan dan alur penghancuran.

Berbagai teknik digunakan di atas kapal saat memadamkan api menggunakan sistem busa udara bertekanan. Teknik-teknik tersebut meliputi :

- a) *Bounce-off procedure*: yang melibatkan penggunaan nosel dan selama aplikasi praktis, busa harus dipantulkan dari objek penghalang seperti dinding, dll
- b) *Bank-in procedure*: di sini busa digulirkan ke permukaan api dengan cara menepuk-nepuk permukaan di depan tumpahan agar busa menumpuk di depan tumpahan. Momentum aliran tersebut mengayunkan busa ke arah api
- c) *Rain-down procedure*: Dalam prosedur ini, nosel diarahkan lurus ke depan dan busa dibiarkan menembus dan mencapai kondisi optimalnya

Secara keseluruhan, busa udara bertekanan telah menunjukkan berbagai keunggulan dalam pemadaman kebakaran. Beberapa keunggulan tersebut antara lain sebagai agen pemadam yang efisien serta memberikan efek pendinginan selama proses pemadaman api; membentuk lapisan atau penghalang busa pada permukaan api; mampu menahan uap air untuk menciptakan lingkungan yang sejuk dan tidak memerlukan volume air yang besar untuk memadamkan api. Di sisi lain, sistem ini memiliki berbagai keterbatasan, termasuk bersifat konduktif listrik karena adanya uap air; tidak direkomendasikan untuk memadamkan logam yang mudah terbakar serta kebakaran yang melibatkan gas.

5.4 Perbandingan sistem pemadam kebakaran tradisional dan modern

Perbandingan sistem pemadam kebakaran didasarkan pada berbagai faktor seperti metode pengolahan, peringkat masing-masing sistem, dan metode pengembangan seperti yang diilustrasikan pada tabel perbandingan matriks di bawah ini (Corbett, 2019).

	Sistem tradisional	Sistem modern
Metode Pemrosesan	Sebagian besar dioperasikan secara manual. Memiliki efek samping yang merugikan bagi lingkungan. Melibatkan peralatan yang rumit, besar, dan berat. Memakan waktu	Meskipun masih terdapat aspek pengoperasian manual, pengoperasiannya bersifat otomatis. Praktis dan mudah dioperasikan. Lebih hemat waktu
Peringkat sistem	Kurang efektif dan efisien karena pengoperasiannya manual. Menggunakan sejumlah besar air dan bahan kimia	Sangat efektif dan efisien sebagai hasil dari peningkatan perkembangan teknologi. Sangat ekonomis dalam hal kuantitas air dan bahan yang digunakan serta waktu yang dibutuhkan untuk memadamkan api

Desain dan metode perkembangan	Menggabungkan peralatan yang besar dan berat sehingga menyulitkan untuk melakukan peningkatan.	Dirancang berdasarkan teknologi sehingga mudah dan nyaman digunakan serta meningkatkan efektivitas dan efisiensinya. Perkembangan terkini didasarkan pada pemantauan dan pengoperasian komputer, dan sedang dievaluasi apakah robot dapat dimanfaatkan dalam pemadaman kebakaran dengan menggunakan strategi ini.
--------------------------------	--	---

Tabel 2: Perbandingan antara sistem pemadam kebakaran tradisional dan modern.

Secara keseluruhan, analisis perbandingan ini jelas menunjukkan bahwa desain dan pengembangan sistem pemadam kebakaran modern telah menghasilkan pemadaman kebakaran yang efektif dan efisien dibandingkan dengan metode konvensional. Seiring perkembangan teknologi terus meningkatkan kemampuan sistem pemadam kebakaran modern, sehingga memungkinkan penanganan insiden kebakaran di atas kapal yang memadai dan efisien. Oleh karena itu, tragedi kebakaran di lingkungan maritim dapat ditangani dengan baik, sehingga mencegah kerusakan harta benda dan hilangnya nyawa.

5.5 Industri baru pembuatan kapal oleh International Maritime Organisation (IMO)

Sehubungan dengan tren teknologi yang memungkinkan desain dan pengembangan sistem yang lebih efektif dan efisien, *International Maritime Organisation* (IMO) telah memberikan pedoman, kebijakan, dan prinsip yang harus dipatuhi oleh industri perkapalan, khususnya para produsen, untuk memastikan keselamatan, keamanan, dan efisiensi upaya manusia dalam memerangi ancaman kebakaran di atas kapal. Di bawah peraturan ini, terdapat peningkatan permintaan agar kapal modern dirancang dan dikembangkan sedemikian rupa sehingga meminimalkan risiko dan meningkatkan keselamatan dan keamanan jiwa serta harta benda. Hal ini mendorong para perancang dan produsen kapal untuk mengembangkan dan menerapkan solusi konseptual yang melindungi kesejahteraan awak kapal, penumpang, dan harta benda di atas kapal dari insiden, khususnya kebakaran (Papanikolaou & Soares, 2020). Seperti yang kita ketahui, kebakaran merupakan peristiwa paling berbahaya yang dapat mengakibatkan konsekuensi buruk seperti kerusakan pada kapal, sistemnya, menyebabkan hilangnya nyawa dan harta benda, serta merusak lingkungan laut.

Langkah-langkah yang tepat harus diterapkan untuk membantu penanganan ancaman kebakaran ini secara efektif dan efisien. Oleh karena itu, berdasarkan IMO, keselamatan dan

perlindungan kebakaran di kapal merupakan prioritas utama dalam desain dan pengembangan kapal (*International Maritime Organisation*, 2022). Berkaitan dengan perlindungan dan keselamatan manusia di laut, IMO melalui konvensi SOLAS menawarkan kerangka kerja bagi produsen dalam mendesain kapal dengan mengintegrasikan dan mengkonfigurasi berbagai sistem pemadam kebakaran. SOLAS adalah singkatan dari *Safety of Life at Sea*, sebuah perjanjian laut internasional yang bertanggung jawab untuk memantau dan mengendalikan standar pembangunan peralatan, sistem, dan lain-lain di laut demi perlindungan dan keselamatan pengguna laut. Hal ini telah mendorong peningkatan otomatisasi sistem pemadam kebakaran di atas kapal untuk memastikan peningkatan keandalan, keselamatan, keamanan, dan fungsionalitas jika terjadi kebakaran (Hurley, 2019). Otomatisasi mencakup sistem alarm deteksi kebakaran, sistem sirene deteksi asap, sistem pemantauan kebakaran berbasis komputer, dll.

Perkembangan terbaru dari teknologi canggih ini adalah inovasi dan penemuan oleh Angkatan Laut AS berupa robot yang dilengkapi dengan teknologi dan sistem modern untuk memfasilitasi deteksi dini, asal mula, dan respons cepat terhadap insiden kebakaran. Selain itu, penggunaan teknologi komputer telah diintegrasikan pada teknologi kapal untuk meningkatkan keamanan serta memantau setiap insiden kebakaran di kapal. Hal ini dicapai melalui penggabungan multi-sensor pintar baru yang memungkinkan penggunaan teknologi video (kamera CCTV) yang secara signifikan membantu mendeteksi kejadian kebakaran dan merespons dengan cepat sehingga dapat memadamkan api secara efisien. Berdasarkan hal tersebut, IMO telah memperjuangkan dan mengkampanyekan keselamatan dan perlindungan awak kapal dengan menekankan dan merekomendasikan standar-standar berikut yang perlu dipertimbangkan dalam desain dan pengembangan kapal.

5.5.1 Konfigurasi teknologi alarm kebakaran

Karena meningkatnya pembangunan kapal-kapal berukuran lebih besar, IMO menekankan perlunya pemasangan sistem deteksi dan peringatan kebakaran yang tepat untuk memastikan respons dini dan cepat dalam memadamkan kebakaran sebelum semakin parah, seperti yang ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7: *Teknologi alarm kebakaran.*

Rekomendasi IMO ini bertujuan untuk membangun perlindungan dan keselamatan kapal selama keadaan darurat kebakaran. Teknologi ini juga mencakup integrasi sistem sensor kebakaran, yang memungkinkan deteksi asap, api, atau bahan bakar pada tahap awal sehingga meningkatkan kesadaran awak kapal melalui sirene, bunyi lonceng, serta prosedur pemberitahuan komputer. Secara umum, konfigurasi teknologi alarm kebakaran sengaja ditujukan untuk pemadaman kebakaran yang lebih cepat, efektif, dan efisien. Hal ini mendorong inisiasi tindakan perlindungan yang berlaku dalam waktu singkat menggunakan teknologi pemadaman kebakaran canggih yang dijelaskan di atas kapal (Beard and Carvel, 2018). Melalui pemasangan teknologi alarm telah membantu personel terkait di atas kapal untuk:

- 1) Secara otomatis mengidentifikasi asal dan lokasi kebakaran.
- 2) Evaluasi otomatis terhadap ukuran kebakaran dan tingkat ancaman.
- 3) Secara otomatis memulai respons penanggulangan untuk memadamkan api.
- 4) Memungkinkan pemilihan dan penerapan metode pemadaman kebakaran yang efisien.
- 5) Memfasilitasi pengambilan keputusan terpusat untuk mengatasi insiden kebakaran yang telah teridentifikasi.

5.5.2 Penggunaan teknologi video (kamera CCTV) dalam deteksi kebakaran dan asap

Baru-baru ini, perkembangan dalam pemadaman kebakaran telah menyaksikan penggunaan kamera CCTV yang memainkan peran penting dalam menekan kebakaran di atas kapal. Pemasangan teknologi ini di kapal memfasilitasi pemantauan dan pengendalian yang tepat terhadap seluruh kapal sehingga jika terjadi kebakaran, mudah untuk mengidentifikasi asal dan lokasi kebakaran sebelum menyebar ke area lain di kapal. Hal ini didukung oleh wawasan teknologi baru, yang telah mendorong inovasi sensor optik yang sangat canggih, ke kemampuan

prosesor yang lebih besar, dan keandalan elektronik yang lebih baik yang memungkinkan pengenalan optik otomatis terhadap kebakaran bahkan dalam kondisi atmosfer ekstrem. Teknologi CCTV memberikan kontribusi penting terhadap efektivitas sistem alarm kebakaran yang terpasang, khususnya di atas kapal. Teknologi ini menghasilkan gambar yang kemudian ditampilkan di ruang kendali, mengidentifikasi area kejadian secara real-time sehingga mengaktifkan sistem alarm di zona tersebut dan memungkinkan respons cepat yang memadai untuk memadamkan kebakaran. Dipadukan dengan deteksi dini kebakaran, asap, dan nyala api secara real-time, teknologi video memberikan sensitivitas visual terhadap kejadian kebakaran di semua bagian kapal, sehingga meningkatkan perlindungan kebakaran dan keselamatan di atas kapal (International Organisation for Standardization, 2018).

Teknologi modern dalam desain dan konfigurasi pembuatan kapal mencakup deteksi kebakaran video, citra nyala api, pengenalan asap dan api, serta pemantauan yang telah meningkatkan dan memperkuat efisiensi dalam pemadaman kebakaran di kapal saat ini. Contoh ruang kendali yang dilengkapi dengan sistem dan teknologi modern untuk memantau operasi dan aktivitas di kapal sehingga dapat mendeteksi kejadian kebakaran ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 8: Contoh ruang kendali yang dilengkapi dengan sistem dan teknologi modern.

Namun, efektivitas dan efisiensi semua sistem deteksi kebakaran, nyala api, dan asap ini bergantung pada pemilihan algoritma pemrograman yang digunakan. Akibatnya, hal ini telah memicu lebih banyak penelitian tentang algoritma mana yang lebih efektif di bidang ini, sehingga berbagai algoritma telah dikembangkan dan masih terus dikembangkan serta diintegrasikan di atas kapal menggunakan citra video, sehingga menyediakan sistem pemantauan yang memadai di

kapal. Beberapa algoritma modern yang digunakan untuk deteksi kebakaran di atas kapal meliputi:

- 1) Model citra (video) wavelet berbasis pengenalan asap secara real-time
- 2) Kategorisasi nyala api atau kebakaran menggunakan piksel berdasarkan logika *fuzzy* dan pola aritmatika gradasi warna.
- 3) Sistem pengenalan kebakaran cerdas secara *real-time* yang mengandalkan pemrosesan video.
- 4) Sistem pengolahan citra komputer bergantung pada deteksi waktu nyata.
- 5) Pengawasan dan pemantauan rutin otomatis terhadap insiden kebakaran di atas kapal menggunakan pencitraan video.

5.5.3 Pemodelan sistem untuk meminimalkan skenario penyebaran api di atas kapal

Berkaitan dengan jenis dan ukuran kapal, kebakaran di atas kapal dapat menimbulkan konsekuensi buruk jika dibiarkan menyebar. IMO melalui SOLAS telah mengidentifikasi bahwa sebagian besar insiden kebakaran terjadi di bagian ruang mesin untuk kapal kargo dan di kabin superstruktur untuk kapal penumpang. Berdasarkan hal ini, SOLAS merekomendasikan strategi pencegahan untuk menghentikan penyebaran api ke area lain di kapal (Papanikolaou & Soares, 2020). Akibatnya, alat penyemprot kabut air otomatis dipasang dan dikonfigurasi di area ini sehingga jika terjadi kebakaran, alat tersebut secara otomatis aktif dan memberikan efek pendinginan yang menghambat penyebaran api ke area lain. Selain itu, pemodelan juga menjadi pusat perhatian dalam pembangunan kapal untuk memastikan bahwa operasi tertentu seperti perencanaan zona kebakaran, penempatan sensor dan detektor dipertimbangkan. Semua ini bertujuan untuk secara efektif menahan penyebaran api di kapal, yang sebagian besar ditentukan oleh kondisi lingkungan sekitar (lembap atau kering), asal api, dan jenis bahan bakar di sekitarnya. Berikut adalah beberapa program simulasi modern yang digunakan untuk menampilkan penyebaran api di atas kapal:

- 1) Simulator dinamika api, bahan bakar, atau nyala api.
- 2) Simulator api dan asap.
- 3) Model gabungan hamburan api dan asap.

5.5.4 Organisasi dan latihan pencegahan kebakaran

Pemadaman kebakaran yang efektif di kapal tidak hanya mencakup sistem deteksi dan teknik pemadaman kebakaran yang terpasang di kapal, tetapi juga mencakup kesiapan personel terkait dan semua orang di kapal. Ini berarti bahwa pencegahan kebakaran dimulai dengan

berfokus pada bagaimana menghentikan atau menghilangkan kemungkinan terjadinya kebakaran di kapal, dan ini dimulai dengan desain kapal yang tepat seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, diikuti oleh organisasi yang baik dan tepat dari awak kapal dan semua orang di kapal. Di kapal, organisasi yang baik dicapai melalui kebijakan yang dirumuskan dengan tepat yang dapat dilaksanakan secara efektif oleh awak kapal (*International Maritime Organisation (IMO)*, 2022). Dengan demikian, area yang paling penting untuk mencapai organisasi yang baik adalah unsur manusia (dalam hal latihan dan pelatihan pemadaman kebakaran) di kapal. Organisasi yang tepat di kapal memastikan inisiasi tindakan yang memadai secara cepat dan efisien oleh awak kapal untuk menangani insiden kebakaran di kapal secara efektif. Melalui perencanaan yang tepat inilah rencana keselamatan yang menggambarkan strategi dan peralatan penyelamatan jiwa dijelaskan bagaimana cara mengakses dan menggunakannya jika terjadi kebakaran.

5.5.5 Unsur manusia

Meskipun merupakan penyebab utama kecelakaan kebakaran di atas kapal, unsur manusia merupakan komponen fundamental dalam pencegahan, pengendalian, dan pemadaman kebakaran yang efektif dan efisien di kapal. Akibatnya, fokus dalam pemadaman kebakaran lebih banyak diberikan pada kemampuan awak kapal. Hal ini berakar pada tingkat pengetahuan, keterampilan, dan keahlian mereka tentang berbagai aspek kebakaran seperti penyebab, pengurangan risiko kebakaran, serta frekuensi kebakaran. Ini membantu mereka memahami prosedur terbaik yang harus diadopsi dalam menangani berbagai jenis kebakaran di atas kapal menggunakan berbagai sistem, teknik, dan metode pemadaman kebakaran, serta memastikan perlindungan dan keselamatan jiwa dan harta benda di kapal. Berbagai praktik diadopsi dan diimplementasikan oleh awak kapal sebagai indikasi kesiapan dan persiapan menghadapi insiden kebakaran (*International Maritime Organisation (IMO)*, 2022).

Inspeksi dan pemeliharaan adalah praktik yang banyak diadopsi dan diimplementasikan yang bertujuan untuk meningkatkan kesiapan pencegahan keselamatan kebakaran. Ini melibatkan pemeriksaan peralatan dan sistem pemadam kebakaran untuk memastikan kemungkinan kegagalan yang kecil jika terjadi kebakaran di atas kapal. Proses inspeksi juga melibatkan evaluasi risiko untuk menentukan kemungkinan adanya bahan yang mudah terbakar serta potensi terjadinya kebakaran. Dengan cara ini, awak kapal dapat menetapkan strategi pencegahan dan pengendalian yang tepat untuk menanggulangi terjadinya kebakaran. Selain itu, penilaian

peralatan dan sistem deteksi kebakaran dan pemadam kebakaran memastikan kinerja yang tepat jika terjadi kebakaran di atas kapal. Ini juga merupakan rekomendasi yang diberikan oleh IMO serta kebijakan di sebagian besar organisasi maritim. Peralatan dan sistem pemadam kebakaran dapat diuji selama latihan kebakaran untuk mengevaluasi efisiensinya. Latihan kebakaran membantu awak kapal untuk bekerja sebagai unit yang kohesif yang dipandu oleh rencana pemadam kebakaran yang telah dipersiapkan dengan baik.

5.5.6 Latihan kebakaran

Tujuan utama latihan kebakaran adalah untuk menguji efisiensi dan efektivitas organisasi awak kapal dengan memberikan berbagai macam tantangan jika terjadi bencana kebakaran. Oleh karena itu, latihan kebakaran berorientasi pada tujuan, yaitu untuk memberikan kerangka solusi terhadap situasi yang dimaksud. Dengan demikian, latihan yang sukses membutuhkan tujuan yang jelas sebelum dilakukan dan oleh karena itu melibatkan definisi tujuan, penentuan durasi, serta prosedur yang akan diadopsi untuk menangani masalah yang dimaksud. Melalui latihan kebakaran, awak kapal memiliki kesempatan untuk mempelajari perencanaan yang efisien dan menerapkan teknik, sistem, dan prosedur pengendalian kebakaran dalam situasi pemadaman kebakaran, serta menguasai respons kebakaran dan strategi pengendalian yang diperlukan (*International Maritime Organisation (IMO)*, 2022).



Gambar 9:Latihan kebakaran.

Sebelum latihan dilakukan, penting untuk memberitahukan kepada individu-individu di atas kapal agar terhindar dari rasa takut dan kecurigaan. Latihan kemudian dimulai dengan membunyikan alarm kebakaran dan komunikasi yang keras, diikuti dengan kecepatan reaksi menuju area atau lokasi kejadian. Strategi pemadaman yang diterapkan pada kebakaran akan bergantung pada skenario (sumber, ukuran, dan lingkungan sekitar). Latihan kebakaran

mengintegrasikan berbagai jenis kekacauan untuk mengevaluasi respons dan kemampuan awak kapal dalam mengendalikan situasi. Berkaitan dengan latihan tersebut, penilaian apakah tujuan latihan telah tercapai dapat dilakukan untuk menentukan pelajaran yang diperoleh melalui latihan tersebut. Hal ini membantu personel terkait untuk meningkatkan standar kompetensi pemadam kebakaran di antara anggota awak kapal sehingga menyempurnakan sistem pemadam kebakaran di atas kapal (*International Maritime Organisation (IMO)*, 2022).

Sebagai hasil dari pelatihan simulasi kebakaran, awak kapal berkembang menjadi sistem keselamatan kritis yang dilengkapi dengan baik, terampil, dan berpengetahuan dalam menangani proses pemadaman kebakaran. Pelatihan ini membekali personel tersebut dengan keahlian yang memadai dalam penilaian dan pengambilan keputusan yang efektif untuk mengatasi insiden kebakaran di atas kapal.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian ini, terbukti bahwa penerapan sistem dan teknologi pemadam kebakaran modern membantu dalam deteksi dini kebakaran dan asap di kapal, sehingga mendukung respons cepat menggunakan peralatan dan metode efektif yang terpasang di kapal. Hal ini berdampak positif yang besar dalam memerangi insiden kebakaran di atas kapal, sehingga melindungi nyawa dan harta benda. Demikian pula, perancangan dan pembangunan sensor kebakaran otomatis yang terhubung ke sistem kapal memungkinkan awak kapal untuk membangun sistem pemantauan yang lebih baik dan berkualitas yang memungkinkan deteksi mudah terhadap potensi ancaman kebakaran di atas kapal, sehingga memicu pengambilan keputusan yang tepat waktu dan efektif untuk memadamkan insiden tersebut.

Studi ini secara jelas menggambarkan bagaimana teknologi (jenis terbaru), sistem (berbagai jenis yang digunakan di atas kapal), dan orang-orang (latihan, pelatihan pemadam kebakaran) bekerja secara kohesif untuk mencapai pemadaman kebakaran yang efisien dan efektif di atas kapal. Penelitian ini menunjukkan bahwa perkembangan terbaru dalam sistem pemadam kebakaran telah meningkatkan prosedur dan teknik pemadaman kebakaran sehingga memudahkan untuk mengatasi ancaman kebakaran di kapal laut.

Selain itu, pelatihan awak kapal melalui latihan membantu membekali awak kapal dengan informasi, pengetahuan, keterampilan, dan keahlian yang memadai dalam proses

pemadaman kebakaran. Pengetahuan ini juga memicu pengambilan keputusan yang tepat dan efektif yang secara khusus bertujuan untuk memastikan perlindungan dan keselamatan jiwa dan harta benda di atas kapal serta mencegah penyebaran api. Studi ini juga mengakui bahwa pemadaman kebakaran di atas kapal merupakan elemen yang diakui secara global dan didefinisikan dengan baik melalui konvensi yang telah ditetapkan yang menyediakan kerangka kerja yang tepat untuk keselamatan dan keamanan jiwa dan harta benda di laut. Secara umum, perkembangan terkini dalam pemadaman kebakaran telah merevolusi konsep pemadaman kebakaran menjadi kerangka kerja yang lebih aplikatif dan efektif.

DAFTAR REFERENSI

- American Institute of Chemical Engineers (AIChE). (2020). *Guidelines for fire protection in chemical, petrochemical, and hydrocarbon processing facilities* (3rd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2020). *Advanced PID control*. Research Triangle Park, NC: ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- Babrauskas, V. (2021). *Passive fire protection materials and systems*. Oxford: Elsevier.
- Beard, A., & Carvel, R. (2018). *The handbook of tunnel fire safety* (2nd ed.). London: ICE Publishing.
- Corbett, G. P. (2019). *Fire engineering's handbook for firefighter I & II*. Tulsa, OK: PennWell Corporation.
- Cote, A. E., & Harrington, G. E. (2020). *NFPA fire protection handbook* (21st ed.). Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- Crampton, G. P., & Kim, A. K. (2019). Advances in clean agent fire suppression technologies. *Fire Technology*, 55(4), 1123–1145. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0782-4>
- Das, A. K. (2019). *Principles of fire safety engineering*. New Delhi: PHI Learning.
- Farrell, K., Hassan, M.K., Hossain, M.D., Ahmed, B., Rahnamayiezekavat, P., Douglas, G., & Saha, S. (2023). *Water Mist Fire Suppression Systems for Building and Industrial Applications: Issues and Challenges*. *Fire*, 6(2), 40.
- Fire Safety Research Institute (FSRI). (2025). *Fire Safety Research Reports and Technical Papers*. Northbrook, IL: UL FSRI.
- Gottuk, D. T., & Lattimer, B. Y. (2018). Warehouse fire detection and suppression challenges. *Fire Technology*, 54(2), 455–480. <https://doi.org/10.1007/s10694-017-0664-1>
- Hurley, M. J. (Ed.). (2019). *SFPE handbook of fire protection engineering* (5th ed.). New York, NY: Springer.
- International Maritime Organization. (2022). *Fire safety systems (FSS Code)*. London: IMO Publishing.
- International Maritime Organization. (2023). *Model course: Advanced fire fighting*. London: IMO Publishing.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 7240: Fire detection and alarm systems*. Geneva: ISO.
- National Fire Protection Association. (2020). *NFPA 13: Standard for the installation of*

- sprinkler systems*. Quincy, MA: NFPA.
- National Fire Protection Association. (2021). *NFPA 301: Code for safety to life from fire on merchant vessels*. Quincy, MA: NFPA.
- National Fire Protection Association. (2021). *NFPA 750: Standard on water mist fire protection systems*. Quincy, MA: NFPA.
- National Fire Protection Association. (2022). *NFPA 72: National fire alarm and signaling code*. Quincy, MA: NFPA.
- National Fire Protection Association. (2023). *NFPA 2001: Standard on clean agent fire extinguishing systems*. Quincy, MA: NFPA.
- Nolan, D. P. (2019). *Fire pump systems at industrial facilities*. Oxford: Elsevier.
- Nolan, D. P. (2020). *Fire, explosion, and toxic gas hazards in industrial facilities* (2nd ed.). Oxford: Elsevier.
- Papanikolaou, A., & Soares, C. G. (2020). *Risk-based ship design: Methods, tools and applications* (2nd ed.). Berlin: Springer.
- Shelley, C. H., & Cole, A. R. (2019). *Industrial fire fighting for municipal firefighters*. Tulsa, OK: PennWell Corporation.
- Ueda, K., Takenaka, T., & Fujimoto, H. (2019). *Manufacturing systems and technologies for the new frontier*. Cham: Springer.
- Zhang, H., Li, W., & Wang, X. (2020). Real-time fire and smoke detection for tunnel safety using deep learning. *Fire Safety Journal*, 113, 102963. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102963>.