

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Landasan Teori

Merupakan bagian dalam penelitian yang berisi konsep, teori, dan kerangka berpikir yang digunakan sebagai dasar dalam menganalisis permasalahan yang dikaji. Landasan teori membantu memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai topik penelitian serta menjadi acuan dalam pengembangan solusi yang diusulkan. Dalam studi ini, beberapa teori yang relevan antara lain:

1. PKP-PK

Pertolongan Kecelakaan Penerbangan dan Pemadam Kebakaran (PKP-PK) merupakan unit pelayanan di bandar udara yang bertugas memberikan pertolongan pada keadaan darurat penerbangan, khususnya kecelakaan pesawat udara dan kebakaran. Keberadaan PKP-PK menjadi salah satu komponen penting dalam sistem keselamatan penerbangan karena berperan dalam meminimalkan korban jiwa, mengurangi kerusakan pesawat, serta mencegah meluasnya dampak kecelakaan melalui tindakan penyelamatan dan pemadaman yang cepat, tepat, dan efektif (Abdullah *et al.*, 2024).

Berdasarkan Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor PR 30 Tahun 2022, tugas utama Pertolongan Kecelakaan Penerbangan dan Pemadam Kebakaran (PKP-PK) adalah menyelamatkan jiwa (*to save life*) dan melindungi harta benda dari kecelakaan pesawat udara maupun kebakaran di bandar udara. Dalam melaksanakan tugas utama tersebut, PKP-PK memiliki tiga tugas pokok, yaitu *operation*, *maintenance*, dan *training*. Tugas pokok *operation* berkaitan dengan pelaksanaan pelayanan penyelamatan dan pemadaman kebakaran pada keadaan darurat di bandar udara. Tugas pokok *maintenance* meliputi pemeliharaan kendaraan,

peralatan, fasilitas, dan media pemadam agar selalu berada dalam kondisi siap operasional. Sementara itu, tugas pokok *training* mencakup penyelenggaraan pendidikan, pelatihan, dan latihan secara berkala untuk menjaga serta meningkatkan kompetensi personel PKP-PK sehingga mampu melaksanakan tugas sesuai dengan standar keselamatan penerbangan.

2. *Foam* Pemadam Kebakaran

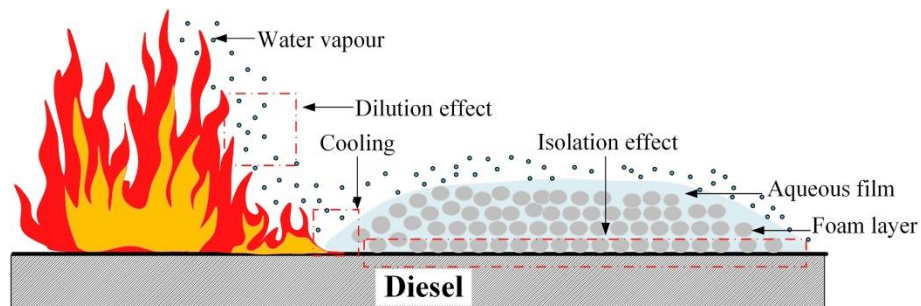
Menurut Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Udara PR 30 Tahun 2022, *foam* merupakan bahan pemadam utama yang berupa air dan *foam* konsentrat yang persenyawaannya dapat menghasilkan *foam*. Bahan pemadam ini efektif untuk memadamkan kebakaran Kelas B yang melibatkan cairan mudah terbakar. Dalam penerbangan, penggunaan *foam* sangat penting karena bahan bakar pesawat memiliki potensi untuk menyebarkan api dengan cepat. *Foam* yang dihasilkan dari kombinasi air dan *foam* konsentrat ini mampu menutupi permukaan bahan bakar, lalu menghentikan suplai oksigen dan mencegah pelepasan uap panas, sehingga proses pemadaman menjadi efektif. Maka dari itu *foam* menjadi bahan pemadam utama bagi unit PKP-PK.

Foam yang digunakan oleh pemadam kebakaran diproduksi melalui proses pencampuran tiga komponen utama, yaitu konsentrat *foam*, air, dan udara, yang berinteraksi untuk membentuk struktur *foam* yang membantu dalam proses pemadaman kebakaran. *Foam* konsentrat terlebih dahulu bercampur dengan air pada perbandingan tertentu (*induction ratio*) sehingga membentuk *foam solution*, kemudian udara masuk melalui peralatan pembangkit *foam* dan menghasilkan gelembung-gelembung *foam*. Tingkat pencampuran udara sangat bergantung pada tipe dan ukuran peralatan yang digunakan, yang akan menentukan rasio ekspansi dan karakteristik *foam* yang dihasilkan. Struktur *foam* ini berfungsi untuk menyelimuti permukaan bahan bakar cair dan mempertahankan lapisan

pelindung selama proses pemadaman, sehingga menjadikan kualitas campuran sebagai faktor penentu dalam kinerja *foam* pemadam kebakaran (NFPA 11, 2022).

3. *Aqueous Film Forming Foam*

AFFF adalah jenis bahan pemadam api berbentuk *foam* yang dirancang khusus untuk menangani kebakaran Kelas B, yang melibatkan cairan yang mudah terbakar seperti bensin, solar, minyak mentah, dan bahan bakar hidrokarbon lainnya (Yan *et al.*, 2023). AFFF didesain untuk menghasilkan lapisan air tipis yang menyebar secara pesat di permukaan bahan bakar, kemudian memutus kontak antara uap bahan bakar dan oksigen di udara, serta mencegah terjadinya pembakaran ulang. Menurut Xu *et al.* (2020) Efektivitas AFFF dalam memadamkan kebakaran hidrokarbon terletak pada kemampuannya untuk membentuk lapisan tipis yang menekan pelepasan uap bahan bakar dan menghambat proses pembakaran.



Gambar 2. 1. Mekanisme Kerja AFFF pada kebakaran bahan bakar cair
Sumber: (Xu et al., 2020)

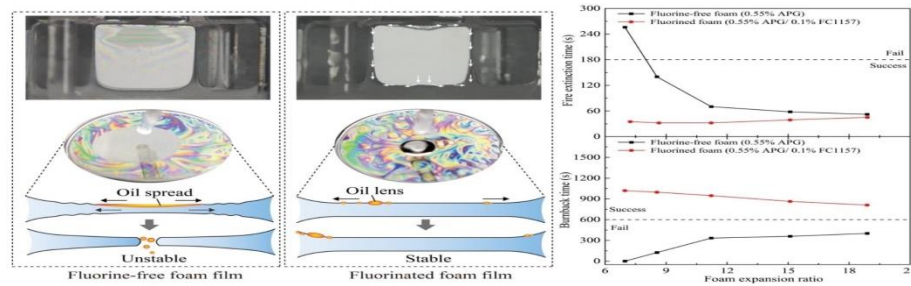
Secara kimiawi, AFFF terdiri dari perpaduan air, surfaktan, pelarut organik, dan beragam bahan tambahan yang berfungsi untuk meningkatkan stabilitas dan kinerja *foam* (Place & Field, 2012). Kandungan utama yang membuat AFFF berbeda dari jenis *foam* lainnya adalah adanya surfaktan berfluorinasi yang dapat secara signifikan mengurangi tegangan permukaan air, memungkinkan pembentukan

lapisan film tipis namun stabil di permukaan cairan hidrokarbon. Ruyle *et al.* (2023) menunjukkan bahwa stabilitas kimia senyawa PFAS pada beberapa formulasi AFFF membuatnya sulit terurai secara alami dan berpotensi mencemari tanah dan air tanah. Pada beberapa formulasi lama, AFFF mengandung zat per-polifluoroalkil (PFAS), yang bersifat tahan panas dan kimia, tetapi juga diketahui sangat persisten di lingkungan.

Pada beberapa formulasi, AFFF mengandung senyawa *Per- and Polyfluoroalkyl Substances* (PFAS) yang berfungsi meningkatkan kemampuan pembentukan film dan kestabilan foam. Senyawa ini memiliki ikatan karbon–fluorin yang sangat kuat sehingga bersifat sangat stabil dan sulit terdegradasi secara alami (Ruyle *et al.*, 2023). Oleh karena itu, selain dikenal memiliki performa pemadaman yang baik, AFFF juga banyak dikaji dari aspek karakteristik kimia dan dampaknya terhadap lingkungan.

4. *Flourine Free Foam*

Flourine Free Foam adalah bahan pemadam api berbentuk *foam* yang diformulasikan secara khusus tanpa mengandung senyawa fluorin, khususnya senyawa *per- and polyfluoroalkyl* (PFAS) (Barrett *et al.*, 2024). FFF dibuat sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan bagi *Aqueous Film Forming Foam* (AFFF), sebagai respon terhadap kekhawatiran global yang semakin meningkat mengenai sifat persisten dan potensi bioakumulasi PFAS dalam ekosistem. Secara umum, FFF didesain untuk tetap mampu memadamkan kebakaran Kelas B, terutama yang melibatkan cairan hidrokarbon, meskipun mekanisme kerjanya berbeda dengan AFFF, yang bergantung pada pembentukan lapisan film. Sebagaimana dikemukakan oleh Hinnant *et al.* (2017), FFF bergantung pada kestabilan *foam* dan pengaplikasian teknik yang tepat untuk menghasilkan efektivitas pemadaman yang setara pada kebakaran bahan bakar hidrokarbon.



Gambar 2. 2. Perbandingan Stabilitas *Foam* dan Efektivitas Pemadaman antara AFFF dan FFF

Sumber: Zhang *et al.* (2020)

Secara komposisi, FFF tersusun atas campuran air, surfaktan hidrokarbon (*non-fluorinated surfactant*), pelarut organik, serta aditif penstabil *foam* yang diformulasikan tanpa menggunakan senyawa *fluorinated* seperti PFAS, dimana kombinasi ini dirancang untuk menghasilkan stabilitas *foam* optimal melalui kerja sama antara surfaktan dan agen pembentuk *foam* berbasis hidrokarbon. Menurut Hinnant *et al.* (2017), *foam* bebas fluor dihasilkan menggunakan *campuran* surfaktan hidrokarbon dan pelarut organik yang mampu menciptakan struktur *foam* stabil tanpa memanfaatkan sifat pembentukan film dari *surfaktan fluorinated*, dimana surfaktan tersebut bekerja dengan menurunkan tegangan permukaan air sehingga menghasilkan *foam* dengan struktur gelembung yang kokoh. Berbeda dengan AFFF yang membentuk lapisan film tipis di atas permukaan bahan bakar, FFF mengandalkan pembentukan *foam* blanket yang tebal dan stabil untuk menutupi permukaan cairan mudah terbakar, sehingga menghambat pelepasan uap bahan bakar dan memutus suplai oksigen ke sumber api.

5. Uji Mutu *Foam*

Pengujian mutu *foam* merupakan proses penilaian yang dilakukan untuk memastikan bahwa bahan *pemadam foam* memenuhi standar teknis serta memiliki kinerja yang layak digunakan dalam situasi kebakaran (Lou *et al.*, 2023). Melalui pengujian ini, konsentrat dan larutan *foam* diperiksa

dari berbagai aspek, seperti karakteristik fisik, kemampuan menghasilkan dan mempertahankan *foam*, serta efektivitasnya dalam memadamkan api, sehingga dapat dipastikan media tersebut berfungsi secara optimal dan aman saat digunakan. Dalam operasional di bandar udara, ketentuan mengenai pengujian ini juga diatur dalam PR 30 Tahun 2022 yang mengharuskan *foam* konsentrat yang telah diisikan ke tangki kendaraan PKP-PK untuk diuji secara berkala setiap enam bulan dengan melibatkan Kantor Otoritas Bandar Udara setempat, serta dapat dilakukan pengujian tahunan apabila dipandang perlu oleh Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, sebagai bentuk pengawasan terhadap kesiapan peralatan pemadam kebakaran.

Berdasarkan KP 605 Tahun (2015), pengujian konsentrat *foam* difokuskan pada dua parameter pokok yang harus dipenuhi. Parameter wajib tersebut meliputi *Expansion ratio* serta *25% drainage time*. Kedua indikator ini digunakan sebagai acuan utama dalam menilai kualitas dan kinerja *foam* pemadam kebakaran, dengan penjelasan masing-masing parameter sebagai berikut:

a. *Expansion ratio*

Berdasarkan KP 605 Tahun 2015, pengujian *Expansion ratio* bertujuan untuk menentukan perbandingan antara volume awal *foam solution* yang digunakan dengan volume yang dihasilkan setelah larutan konsentrat tersebut mengembang menjadi *foam*. Sementara itu, merujuk pada ICAO Doc 9137-AN/898 *Airport Services Manual Part 1 Chapter 8 – Extinguishing Agent* (2015), nilai *Expansion ratio* juga menjadi salah satu pertimbangan dalam menilai tingkat optimalisasi kinerja konsentrat *foam* ketika dicampurkan dengan air. Berikut dicantumkan rumus *expansion ratio*.

$$\text{Expansion Ratio} = \frac{1000 \text{ mL}}{(\text{Berat Total} - \text{Berat Kosong})}$$

Menurut PR 30 tahun 2022 standar nilai *expantion ratio* adalah 8-15.

b. *Drainage time*

Mengacu pada ICAO Doc 9137-AN/898 *Airport Services Manual Part 1 – Rescue and Firefighting, Fourth Edition (2015), Chapter 5: Factors in the Specifcation Process for Rescue and Firefighting Vehicles*, dijelaskan bahwa *drainage time* berperan penting dalam meningkatkan efektivitas kinerja media pemadam berbasis *foam*. Parameter ini digunakan untuk memastikan lapisan *foam* mampu bertahan cukup lama di atas permukaan bahan bakar cair, sehingga dapat mencegah terjadinya penyalaan kembali (*burn-back*) pada lapisan minyak yang terbakar. Adapun perhitungan *drainage time* dapat dilakukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$25\% \text{ Drainage Time} = \frac{1}{4} \times \text{Berat busa (gelas ukur)}$$

Menurut PR 30 tahun 2022 standar nilai *drainage time* harus dilakukan lebih dari 3 menit dan dihitung sampai *foam* menyeluruh menjadi air dalam 25 % dari berat total tabung *foam solution*.

c. Nilai pH

Nilai pH merupakan salah satu parameter kimia dalam pengujian mutu *foam* yang menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan larutan *foam* setelah dicampur dengan air pada konsentrasi operasional. Parameter ini penting karena sifat kimia larutan dapat memengaruhi stabilitas *foam* (Emami *et al.*, 2022), ketahanan terhadap degradasi, serta konsistensi performa saat diaplikasikan pada kebakaran bahan bakar cair. Penelitian menunjukkan bahwa karakteristik kimia larutan *foam*, termasuk pH, berkontribusi terhadap kestabilan struktur gelembung dan daya tahan *foam* selama proses pemadaman (Houtz *et al.*, 2016). Oleh karena itu, pengukuran pH menjadi bagian dari evaluasi mutu *foam* untuk memastikan bahwa

konsentrat yang digunakan tetap berada dalam rentang spesifikasi teknis yang mendukung kinerja pemadaman secara optimal.

6. Biaya Operasional

Biaya operasional dapat diartikan sebagai seluruh pengeluaran yang muncul akibat berlangsungnya suatu aktivitas operasional yang bertujuan mempertahankan kelancaran fungsi layanan agar tetap berjalan secara efektif (Maulidia & Prayudi, 2025). Pada penggunaan bahan pemadam *foam*, biaya operasional meliputi berbagai kebutuhan yang secara langsung berkaitan dengan proses pemakaian, pengelolaan, penyimpanan, hingga pengawasan penggunaan bahan tersebut, baik dalam kegiatan latihan maupun saat penanganan keadaan darurat. Pemahaman mengenai biaya operasional tidak hanya berfokus pada jumlah biaya yang dikeluarkan, tetapi juga pada efektivitas pemanfaatan sumber daya agar mampu menghasilkan kinerja yang maksimal (Allu *et al.*, 2024). Dengan demikian, pengelolaan biaya operasional menjadi faktor penting untuk memastikan penggunaan *foam* berlangsung secara efisien, terencana, dan berkelanjutan.

Efisiensi dalam pengelolaan biaya operasional penggunaan *foam* akan memberikan dampak positif terhadap efektivitas kegiatan penanggulangan keadaan darurat. Penggunaan bahan pemadam secara tepat dan terkontrol mampu mengurangi pemborosan konsentrat, menekan biaya pengadaan ulang, serta meminimalkan kebutuhan penanganan limbah setelah kegiatan pemadaman maupun latihan. Selain itu, efisiensi tersebut juga berkontribusi pada peningkatan kualitas kesiapsiagaan operasional serta menjaga keberlanjutan penggunaan bahan pemadam yang lebih aman bagi lingkungan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *foam* dapat dikatakan efisien apabila pengelolaan input dan output, khususnya dalam aspek pemakaian,

penyimpanan, dan pengendalian konsumsi bahan, dilaksanakan secara optimal dan sesuai prosedur.

B. Kajian Penelitian Terdahulu

Kajian penelitian sebelumnya merupakan pembahasan terhadap penelitian-penelitian yang telah dilakukan dan memiliki hubungan dengan topik yang sedang diteliti. Bagian ini bertujuan untuk melihat sejauh mana perkembangan penelitian pada bidang tersebut, mengetahui hasil-hasil yang telah diperoleh, serta menemukan bagian yang masih belum banyak dikaji atau masih memiliki kekurangan. Selain itu, kajian ini juga menjadi dasar dalam menyusun dan memperkuat penelitian yang sedang dilakukan. Berikut beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini:

Tabel 2. 1. Penelitian terdahulu

No	Nama Penulis (Tahun), Judul	Fokus Penelitian	Gap Penelitian	Relevansi dengan Penelitian saat ini
1.	Jahura <i>et al.</i> (2024), Exploring the Prospects and Challenges of Fluorine-Free Firefighting Foams (F3) as Alternatives to Aqueous Film-Forming Foams (AFFF): A	Menilai dan membandingkan kinerja pemadaman, toksisitas, dampak lingkungan, dan risiko kesehatan antara AFFF dan F3 (fluorine-free	Penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada perbandingan kinerja teknis dan dampak lingkungan antara AFFF dan F3, namun belum mengkaji	Kajian terdahulu menunjukkan bahwa meskipun F3 lebih ramah lingkungan dan lebih mudah terurai di lingkungan dibandingkan AFFF, performanya belum

No	Nama Penulis (Tahun), Judul	Fokus Penelitian	Gap Penelitian	Relevansi dengan Penelitian saat ini
	Review	<i>foam</i>) sebagai alternatif pemadam kebakaran kelas B.	secara menyeluruh mutu <i>foam</i> berdasarkan parameter operasional serta aspek biaya dalam konteks penerapan di bandar udara. Selain itu, belum ada kajian terpadu yang mengintegrasikan aspek teknis, ekonomi, dan regulatif sebagai dasar pengambilan keputusan transisi menuju <i>foam</i> ramah lingkungan	sepenuhnya setara dalam seluruh skenario kebakaran Kelas B serta masih terdapat variasi efektivitas berdasarkan jenis bahan bakar dan kondisi pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa transisi dari AFFF ke F3 memerlukan pertimbangan tidak hanya dari aspek lingkungan, tetapi juga mutu teknis, efektivitas operasional, dan implikasi biaya, sehingga relevan

No	Nama Penulis (Tahun), Judul	Fokus Penelitian	Gap Penelitian	Relevansi dengan Penelitian saat ini
			pada sistem ARFF.	dengan penelitian ini yang menganalisis perbandingan mutu <i>foam</i> dan biaya operasional sebagai dasar implementasi.
2.	Chen <i>et al.</i> (2023), Research on suppression effect of low- <i>Expansion AFFF</i> , <i>AFFF/AR</i> and <i>FFFP foam</i> on hot oil fire for oil-immersed transformers	Penelitian ini menitikberatkan pada evaluasi kinerja beberapa jenis <i>foam</i> pemadam kebakaran ekspansi rendah, yaitu <i>AFFF</i> , <i>AFFF/AR</i> , dan <i>FFFP</i> , dalam menangani kebakaran minyak panas pada	Penelitian sebelumnya membahas perbandingan antara <i>foam AFFF</i> , <i>AFFF/AR</i> , dan <i>FFFP</i> sedangkan pada penelitian ini membandingkan antara <i>AFFF</i> dan <i>FFFP</i> berdasarkan biaya	Penelitian tersebut relevan karena sama-sama membahas efektivitas teknis <i>foam</i> pemadam ekspansi rendah terhadap kebakaran cairan mudah terbakar melalui perbandingan kinerja beberapa jenis <i>foam</i> . Hasil kajian tersebut

No	Nama Penulis (Tahun), Judul	Fokus Penelitian	Gap Penelitian	Relevansi dengan Penelitian saat ini
		transformator berisi minyak melalui pengujian eksperimental berskala laboratorium. Kajian dilakukan dengan melihat pengaruh variasi jenis dan konsentrasi <i>foam</i> , metode pembentukan <i>foam</i> , serta intensitas penyemprotan terhadap efektivitas pemadaman dan pola perkembangan api, guna mengidentifika si agen <i>foam</i>	operasional dan uji mutu <i>foam</i> berdasarkan parameter parameter <i>Expansion</i> <i>ratio, drainage</i> <i>time</i> , dan nilai pH.	dapat menjadi dasar dalam menilai mutu dan performa <i>foam</i> , yang kemudian dapat dikaitkan dengan analisis perbandingan AFFF dan NFFF dalam konteks penerapannya di bandar udara.

No	Nama Penulis (Tahun), Judul	Fokus Penelitian	Gap Penelitian	Relevansi dengan Penelitian saat ini
		yang paling optimal digunakan.		
3.	Alfajri (2025), Kajian Uji Mutu <i>Foam</i> Sebagai Kesiapan Operasional PKP-PK Di Bandar Udara Internasional Kualanamu	Penelitian ini berfokus pada pengujian mutu <i>foam</i> yang dilakukan sebagai langkah untuk mempersiapkan layanan PKP- dalam menghadapi keadaan darurat yang melibatkan jenis api yang relevan pada untuk bahan pemadam <i>foam</i> .	Pada penelitian tersebut mengkaji pelaksanaan uji mutu <i>foam</i> sebagai langkah persiapan layanan PKP- dalam menghadapi keadaan darurat sedangkan pada penelitian ini membandingkan antara dua jenis <i>foam</i> berdasarkan aspek biaya operasional dan uji mutu	Kedua penelitian ini relevan karena sama-sama membahas tentang uji mutu <i>foam</i> dan pada konteks operasional layanan PKP-PK bandara.

No	Nama Penulis (Tahun), Judul	Fokus Penelitian	Gap Penelitian	Relevansi dengan Penelitian saat ini
4.	Filipovic <i>et al.</i> (2015), <i>Chemosphere Historical usage of aqueous film forming foam : A case study of the widespread distribution of perfluoroalkyl acids from a military airport to groundwater , lakes , soils and fish.</i>	Investigasi kontaminasi PFAS akibat penggunaan AFFF pada tanah, air permukaan, sedimen, dan media lingkungan lainnya di lokasi dengan riwayat penggunaan AFFF.	Penelitian tersebut hanya menitikberatkan pada pengujian mutu <i>foam</i> dan belum membahas perbandingan antara jenis AFFF dan FFF, serta belum mengaitkan hasil pengujian mutu dengan biaya operasional maupun implikasinya terhadap implementasi <i>foam</i> ramah lingkungan di bandar udara.	Penelitian ini relevan karena menggunakan parameter pengujian mutu yang sama, yaitu <i>expansion ratio</i> , <i>drainage time</i> , dan pH, sebagai dasar penilaian kualitas <i>foam</i> . Namun, penelitian yang dilakukan penulis mengembangkan kajian tersebut dengan membandingkan AFFF dan FFF, menambahkan analisis biaya operasional, serta mengkaji implikasinya

No	Nama Penulis (Tahun), Judul	Fokus Penelitian	Gap Penelitian	Relevansi dengan Penelitian saat ini
				terhadap implementasi <i>foam</i> ramah lingkungan di bandar udara. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengevaluasi mutu <i>foam</i>, tetapi juga mempertimbangkan aspek ekonomis dan lingkungan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam operasional PKP-PK.