



LITERATUR REVIEW: RISIKO KESEHATAN DAN KESELAMATAN KERJA AKIBAT PAPARAN POLUTAN BERBAHAYA PADA PETUGAS PEMADAM KEBAKARAN

Dini Agustin¹⁾, Annisa Ayu Pramesti¹⁾, Nur Muhammad Malikul Adil²⁾

¹⁾ Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Subang. Blok Kaleng Banteng Desa Cibogo, Kec. Cibogo, Kabupaten Subang, Jawa Barat 41285, Indonesia

²⁾ Politeknik Negeri Subang. Blok Kaleng Banteng Desa Cibogo, Kec. Cibogo, Kabupaten Subang, Jawa Barat 41285, Indonesia

*email korespondensi: dinniagustinn@gmail.com

INFORMASI ARTIKEL

Received:
09/05/2026

Received in revised:
10/05/2026

Accepted:
11/05/2025

ABSTRAK

Paparan polutan berbahaya pada pemadam kebakaran merupakan risiko kesehatan kerja yang sering terabaikan, meskipun dampaknya dapat bersifat akut maupun kronis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) yang muncul akibat paparan berbagai polutan seperti logam berat, partikulat halus, gas iritan, serta senyawa organik berbahaya selama aktivitas pemadaman. Metode penelitian menggunakan pendekatan mixed-methods melalui analisis meta-analisis, biomonitoring, pengukuran paparan lingkungan, uji toksikologi in vitro, dan survei kesehatan. Hasil kajian menunjukkan bahwa profesi pemadam kebakaran berkaitan dengan peningkatan risiko beberapa jenis kanker, termasuk mesothelioma, kanker kandung kemih, prostat, dan melanoma. Selain itu, biomonitoring membuktikan peningkatan kadar arsenik, kadmium, timbal, dan merkuri yang melampaui nilai ambang aman setelah pemadaman kebakaran hutan. Paparan PAHs juga ditemukan meningkat drastis dan terbukti mampu menurunkan viabilitas sel paru. Monitoring lapangan mengidentifikasi tingginya konsentrasi PM2.5, CO, dan SO₂ selama kebakaran terkontrol. Sementara itu, 90% pemadam kebakaran dilaporkan mengalami iritasi mata akibat asap. Temuan ini menunjukkan bahwa paparan polutan pada pemadam kebakaran bersifat kompleks dan signifikan, sehingga di perlukan strategi mitigasi komprehensif.

Kata Kunci : Pemadam Kebakaran, Polutan Berbahaya, PHAs, Logam Berat, Risiko Kesehatan

ABSTRACT

Exposure to hazardous pollutants among firefighter represent a critical occupational health risk, with both acute and chronic consequences. This study aims to analyze the OHS risk associated with exposure to heavy metals, fire particulates, irritant gases, and hazardous organic compounds encountered during firefighting activities. A mixed-methods approach was employed, combining meta-analysis, biomonitoring, environmental exposure assessment, in vitro toxicology testing, and health surveys. The findings indicate that firefighter is associated with an increased risk of several cancers, including mesothelioma, bladder cancers, prostate cancers, and melanoma. Biomonitoring results revealed elevated concentrations of arsenic, cadmium, lead, and mercury exceeding health-based reference values following wildland fire suppression. Exposure to PAHs was substantially increased as shown to reduce lung cell viability in laboratory test. Field monitoring also identified elevated levels of PM2.5, NO₂ and SO₂ during prescribed fires. Additionally, 90% of firefighter reported eye irritation caused by smoke exposure. These finding demonstrate that pollutant exposure among firefighters is complex and significant, underscoring the need for comprehensive mitigation strategies.

Keywords : Firefighter, Hazard Pollutans, PHAs, Heavy Metals, Health Risks

1. PENDAHULUAN

Profesi pemadam kebakaran (*firefighter*) merupakan salah satu pekerjaan dengan tingkat risiko kesehatan paling tinggi karena selalu berhadapan dengan kondisi darurat yang penuh paparan zat berbahaya. Saat bertugas, pemadam kebakaran tidak hanya menghadapi api, tetapi juga berbagai bahan kimia beracun hasil pembakaran material seperti plastik, karet, kayu, maupun bahan sintesis lainnya. Proses pembakaran tersebut menghasilkan karbon monoksida (CO), Nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), partikular halus (PM_{2.5}), hingga senyawa organik volatil (VOCs). Paparan ini dapat masuk ke tubuh melalui jalur pernapasan, kulit, maupun ingestion, dan jika terus-menerus dapat menimbulkan risiko kesehatan jangka pendek maupun jangka panjang (Barbosa et al., 2024).

Sejumlah penelitian internasional membuktikan adanya hubungan antara pekerjaan sebagai pemadam kebakaran dengan peningkatan risiko penyakit serius. Hasil meta-analisis oleh International Agency for Research on Cancer (IARC) menunjukkan bahwa profesi ini meningkatkan risiko berbagai jenis kanker seperti *mesothelioma*, kanker kandung kemih, prostat, testis, hingga melanoma (DeBono et al., 2023). Meta-analisis internasional menegaskan adanya peningkatan signifikan pada insidensi beberapa jenis kanker pada pemadam kebakaran, artinya, profesi pemadam kebakaran bukan hanya menuntut kesiapan fisik untuk menghadapi api, tetapi juga membawa ancaman kesehatan yang sifatnya laten dan bisa muncul bertahun-tahun setelah masa kerja (DeBono et al., 2023).

Selain kanker, penelitian biomonitoring mengungkapkan bahwa pemadam kebakaran sering terpapar logam berat berbahaya, terutama saat memadamkan kebakaran hutan. Unsur seperti arsenik (As), kadmium (Cd), timbal (Pb), merkuri (Hg), dan nikel (Ni) terdeteksi pada sampel urine dengan konsentrasi melebihi batas aman (Paiva et al., 2024). Paparan logam berat yang melebihi ambang batas aman juga dilaporkan dalam studi biomonitoring terbaru. Kondisi ini berpotensi memicu gangguan ginjal, penyakit kardiovaskular, hingga kerusakan sistem saraf. Temuan ini semakin menegaskan bahwa risiko kesehatan pada pemadam kebakaran sangat kompleks dan tidak bisa dianggap sepele (Paiva et al., 2024).

Paparan lain yang banyak diteliti adalah *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs), yaitu senyawa hasil pembakaran tidak sempurna yang bersifat karsinogenik dan mutagenik. Studi menemukan bahwa kadar PAHs yang dihirup pemadam saat bertugas bisa puluhan kali lebih tinggi dibandingkan kondisi normal di pos pemadam (Teixeira et al., 2024), bahkan uji *in vitro* menunjukkan penurunan signifikan pada viabilitas sel paru akibat paparan tersebut. Penelitian lain menggunakan *wristband* silikon juga membuktikan bahwa paparan senyawa kimia berbahaya seperti PAHs, PFAS, dan flame retardants lebih tinggi ketika *on-duty* dibandingkan *off-duty* (Levasseur et al., 2022). Peningkatan paparan PAHs dan toksisitasnya terhadap sel paru manusia telah ditunjukkan melalui uji *in vitro* (Teixeira et al., 2024). Selain itu, pemadam juga menghadapi paparan PM_{2.5}, NO₂, dan SO₂ dalam tingkat berbahaya selama *prescribed fire*, temuan ini menegaskan bahwa paparan bahan kimia terjadi secara konsisten selama aktivitas pemadaman (Barbosa et al., 2024).

Selain itu, efek asap kebakaran tidak hanya berdampak pada sistem pernapasan dan organ dalam, tetapi juga pada organ mata. Studi di Australia melaporkan bahwa sekitar 90% pemadam kebakaran mengalami iritasi mata selama bekerja, dengan gejala seperti mata merah, pedih, berair, hingga gangguan penglihatan sementara (Jaiswal et al., 2024). Survei kesehatan memperlihatkan bahwa 90% pemadam mengalami iritasi mata akibat paparan asap walaupun pelindung lensa tersedia, banyak pemadam terpaksa melepasnya karena kendala kenyamanan, seperti lensa yang berembun atau terasa panas. Hal ini menunjukkan pentingnya inovasi pada alat pelindung diri (APD) agar lebih efektif sekaligus nyaman digunakan. (Jaiswal et al., 2024).

Selain paparan langsung dari asap dan polutan selama proses pemadaman, risiko kesehatan pemadam kebakaran juga diperburuk oleh akumulasi polutan yang menempel pada pakaian, APD, dan peralatan kerja. Studi menunjukkan bahwa residu kimia seperti PAHs, PFAS, dan flame retardants dapat tetap menempel pada seragam pemadam bahkan setelah proses pembersihan rutin, sehingga memicu paparan sekunder ketika pemadam kembali ke pos (Levasseur et al., 2022). Paparan SVOCs tambahan seperti PFAS dan *flame retardants* terjadi baik selama maupun setelah bertugas, hal ini menandakan bahwa paparan pemadam tidak hanya terjadi selama operasi lapangan, tetapi juga pada saat istirahat atau di lingkungan kerja internal (Levasseur et al., 2022).

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *mixed-methods* dengan menggabungkan data dari meta-analisis, biomonitoring, monitoring lapangan, hingga survei kesehatan. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh gambaran komprehensif mengenai jenis paparan, tingkat kontaminasi, serta dampak Kesehatan jangka pendek maupun jangka panjang yang dialami pemadam kebakaran.

Tahap pertama adalah analisis *epidemiologis* melalui meta-analisis data kohort yang sudah dipublikasikan. Data tersebut digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara paparan pekerjaan sebagai pemadam kebakaran dengan risiko kanker, khususnya pada organ-organ yang sebelumnya sudah

diidentifikasi rentan. Analisis dilakukan dengan model *random-effects* untuk mengakomodasi heterogenitas antar studi serta menilai potensi bias seperti *confounding* dan *medical surveillance bias* (DeBono et al., 2023).

Tahap kedua adalah biomonitoring biologis yang dilakukan dengan mengukur kadar logam berat (metal(loid)s) pada sampel urine pemadam kebakaran. Pengambilan sampel dilakukan baik sebelum maupun sesudah bertugas di kebakaran hutan, dengan jumlah partisipan ratusan orang dari berbagai pos pemadam. Data kemudian dianalisis menggunakan instrumen kimia canggih seperti ICP-MS untuk mendeteksi logam seperti arsenik (As), kadmium (Cd), timbal (Pb), merkuri (Hg), dan nikel (Ni). Selain itu, faktor individu seperti usia, kebiasaan merokok, serta lama karier turut dianalisis untuk melihat korelasi dengan tingkat paparan (Paiva et al., 2024).

Tahap ketiga adalah pengukuran paparan lingkungan secara langsung. Dalam hal ini digunakan dua pendekatan berbeda, yakni pemasangan *polyurethane foam* (PUF) sampler untuk mengukur konsentrasi *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs) di udara pernapasan pemadam serta penggunaan *wristband* silikon untuk mendeteksi senyawa organik semi-volatil (SVOCs) yang menempel selama masa kerja (Teixeira et al., 2024). Analisis kimia dilakukan dengan GC-MS dan LC-MS/MS, selain pengukuran konsentrasi, sampel udara yang diperoleh dari PUF juga diuji secara *in vitro* menggunakan sel paru manusia untuk menilai dampak toksitas pada tingkat seluler.

Tahap keempat adalah monitoring lapangan polutan udara di lokasi kebakaran terkontrol. Pengukuran mencakup konsentrasi PM_{2.5}, CO, NO₂, SO₂, dan VOCs dengan menggunakan instrumen pemantau kualitas udara. Partikel yang terkumpul kemudian dianalisis lebih lanjut menggunakan teknik FT-IR dan SEM-EDS untuk mengetahui komposisi kimia yang berpotensi membahayakan kesehatan (Barbosa et al., 2024).

Tahap kelima adalah untuk menilai dampak biologi, digunakan analisis toksikologi *in vitro* dari ekstrak udara lapangan terhadap sel paru A549 dan Calu-3. Pengujian ini memberikan gambaran langsung mengenai kerusakan seluler yang terjadi akibat paparan PAHs konsentrasi tinggi (Teixeira et al., 2024)

Tahap terakhir adalah pengumpulan data persepsi dan gejala kesehatan melalui survei online terhadap ratusan pemadam kebakaran aktif. Survei ini berfokus pada gejala iritasi mata, kebiasaan penggunaan alat pelindung diri (APD), serta kendala dalam pemakaian APD di lapangan. Data survei kemudian dianalisis menggunakan regresi logistik untuk mengidentifikasi faktor yang berhubungan dengan tingkat keparahan gejala (Jaiswal et al., 2024).

Secara keseluruhan metode ini memadukan analisis epidemiologi, biomonitoring biologis, pengukuran paparan lingkungan, uji toksikologi *in vitro*, serta survei gejala kesehatan. Dengan kombinasi tersebut, penelitian ini mampu memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai risiko kesehatan pemadam kebakaran sekaligus memberikan dasar ilmiah bagi upaya pencegahan. Perbandingan metode penelitian dari review ini dapat dilihat pada Tabel 1:

Tabel 1. Perbandingan Metode Penelitian

No	Jurnal	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Sampel/ Responden	Analisis
1	(DeBono et al., 2023)	Menilai hubungan profesi pemadam kebakaran dengan risiko kanker	Meta-analisis, <i>cohort studies</i>	16 studi kohort internasional	<i>Random-effects meta-analysis</i>
2	(Paiva et al., 2024)	Menilai paparan logam berat pada pemadam kebakaran	Biomonitoring biologis (<i>urine pre-post exposure</i>)	188 pemadam (<i>smoker & non-smoker</i>)	ICP-MS, analisis korelasi karier/usia
3	(Teixeira et al., 2024)	Mengukur paparan PAHs selama kebakaran terkontrol	Monitoring personal air + uji <i>in vitro</i>	20 pemadam	<i>Passive air sampler</i> , GC-MS, uji sel A549 & Calu-3
4	(Levasseur et al., 2022)	Mengukur paparan SVOCs <i>on-duty vs off-duty</i>	<i>Wristband silicone passive sampling</i>	20 pemadam	GC-MS, LC-MS/MS, analisis perbandingan kondisi kerja
5	(Barbosa et al., 2024)	Menilai paparan polutan pada kebakaran hutan	Monitoring lapangan (PM _{2.5} , CO, NO ₂ , SO ₂) + analisis partikel	7 kebakaran terkontrol	Sensor kualitas udara, FT-IR, SEM-EDS
6	(Jaiswal et al., 2024)	Menilai iritasi mata & penggunaan alat pelindung diri	Survei <i>cross-sectional</i>	338 pemadam Australia	Kuesioner online, analisis regresi logistik

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

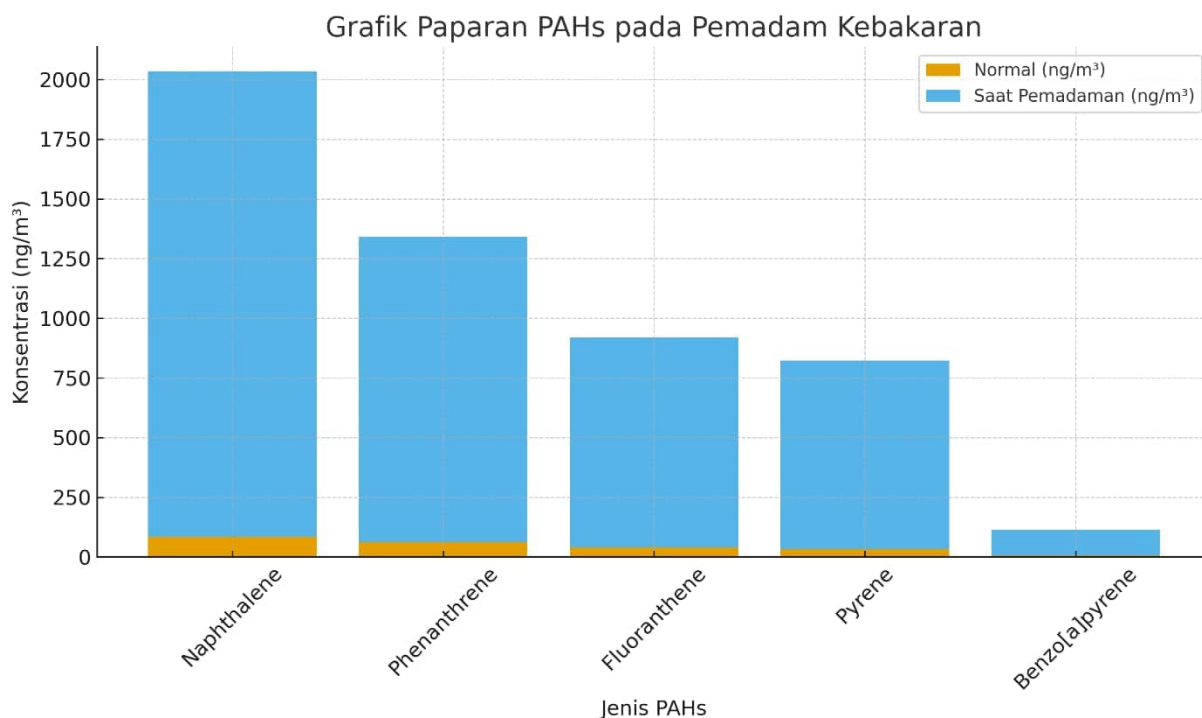
Hasil penelitian dari berbagai jurnal menunjukkan bahwa pemadam kebakaran menghadapi risiko kesehatan yang sangat serius akibat paparan zat berbahaya selama bertugas. Meta-analisis yang dilakukan oleh IARC memperlihatkan adanya peningkatan signifikan pada beberapa jenis kanker seperti mesothelioma, kanker kandung kemih, prostat, testis, hingga melanoma. Temuan ini memperkuat bukti bahwa profesi pemadam kebakaran bukan sekedar pekerjaan fisik, tetapi juga berkaitan dengan risiko laten yang bisa muncul bertahun-tahun kemudian. Selain kanker, biomonitoring terhadap logam berat juga memperlihatkan kadar arsenik, kadmium, timbal, dan merkuri yang melebihi ambang batas aman pada sampel urine pemadam kebakaran. Korelasi dengan usia, kebiasaan merokok, dan lama karier menunjukkan bahwa paparan ini bersifat akumulatif dan semakin berisiko seiring waktu.

Paparan polutan organik juga terbukti signifikan, penelitian menunjukkan bahwa kadar *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs) yang terhirup oleh pemadam kebakaran meningkat drastis saat bertugas bahkan terbukti secara biologis mampu menurunkan viabilitas sel paru manusia hingga mengindikasikan potensi kerusakan jaringan. Data paparan PAHs pada pemadam kebakaran selama pemadaman ditunjukkan pada Tabel 2:

Tabel 2. Data Paparan PAHs pada Pemadam Kebakaran

No	Jenis PAHs	Konsentrasi Normal (ng/m ³)	Konsentrasi Saat Pemadaman (ng/m ³)	Kenaikan
1	Naphthalene	85	1.950	+2194%
2	Phenanthrene	62	1.280	+1964%
3	Fluoranthene	40	880	+2100%
4	Pyrene	33	790	+2194%
5	Benzo[a]pyrene	5	110	+2100%

Gambar 1 menampilkan peningkatan signifikan konsentrasi PAHs sesuai hasil pengukuran personal air sampling:



Gambar 1. Grafik Data Paparan PAHs pada Pemadam Kebakaran

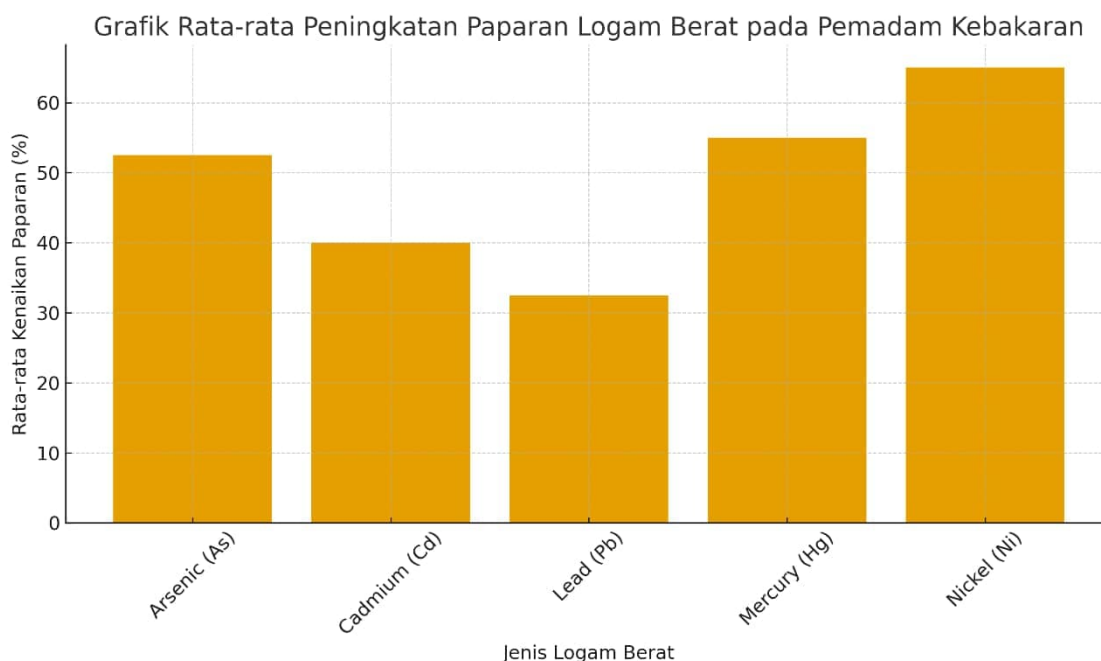
Wristband silikon yang digunakan pada penelitian lain semakin menegaskan bahwa paparan senyawa organik semi-volatil (SVOCs), termasuk PAHs, PFAS, dan *flame retardants*, jauh lebih tinggi ketika pemadam dalam kondisi *on-duty* dibandingkan pemadam dalam kondisi *off-duty*. Selain itu, monitoring lapangan pada kebakaran terkontrol menemukan konsentrasi PM_{2.5}, NO₂, dan SO₂ yang melebihi ambang batas kerja, dengan partikel yang teridentifikasi mengandung senyawa berbahaya seperti silika dan aluminium silikat. Kondisi ini sangat berbahaya karena pemadam bekerja dalam intensitas fisik tinggi, yang membuat mereka menghirup polutan lebih banyak dibandingkan orang biasa. Penggunaan *wristband* silikon sebagai alat

biomonitoring pasif memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai variasi paparan kimia yang dialami pemadam kebakaran dibandingkan metode tradisional seperti pengukuran udara atau penilaian area kerja. Hasil analisis menunjukkan bahwa wristband yang digunakan selama dinas (on-duty) mampu mendeteksi konsentrasi senyawa semi-volatil (SVOCs) seperti PAHs, PFAS, dan flame retardants pada tingkat yang jauh lebih tinggi dibandingkan wristband yang digunakan saat tidak bertugas (off-duty). Pada kondisi on-duty, jumlah senyawa PAHs yang terdeteksi meningkat hingga 5–8,5 kali lipat, sementara kelompok PFAS dan flame retardants juga menunjukkan peningkatan signifikan antara 2 hingga 6 kali lipat, menandakan tingginya intensitas paparan selama aktivitas pemadaman kebakaran (Levasseur et al., 2022). Hal ini menjelaskan mengapa paparan off-duty tetap terdeteksi, meskipun berada pada tingkat yang lebih rendah. Mekanisme ini semakin jelas ketika mempertimbangkan bahwa seragam dan APD pemadam kebakaran diketahui menyimpan residu PAHs dan flame retardants, bahkan setelah proses pembersihan standar dilakukan. Kenaikan kadar logam berat berdasarkan biomonitoring urine pemadam kebakaran dapat di lihat pada Tabel 3:

Tabel 3. Data Peningkatan Kadar Logam Berat Setelah Pemadaman

No	Unsur Logam	Rata-rata Kenaikan Setelah Pemadaman	Nilai Batas Aman	Interpretasi
1	Arsenik (As)	+45% – 60%	15 µg/L	Melebihi batas aman dan berisiko toksik
2	Kadmium (Cd)	+30% – 50%	1 µg/L	Meningkat signifikan, berpotensi nefrotoksik
3	Timbal (Pb)	+25% – 40%	5 µg/dL	Di atas batas aman, memengaruhi sistem saraf
4	Merkuri (Hg)	+40% – 70%	5 µg/L	Melebihi nilai referensi, berisiko neurotoksik
5	Nikel (In)	+50% – 80%	10 µg/L	Peningkatan tertinggi, berisiko karsinogenik

Gambar 2 memperlihatkan visualisasi rata-rata peningkatan unsur logam berat pasca pemadaman:



Gambar 2. Grafik Rata-rata Peningkatan Paparan Logam Berat pada Pemadam Kebakaran

Dampak paparan asap kebakaran tidak hanya dirasakan pada organ dalam, tetapi juga pada organ mata. Survei terhadap ratusan pemadam kebakaran di Australia menunjukkan bahwa hampir 90% responden mengalami iritasi mata selama bertugas, dengan gejala seperti mata merah, pedih, berair, hingga pandangan kabur. Walaupun pelindung mata tersedia penggunaannya masih terbatas karena kendala kenyamanan, misalnya lensa berembun atau terasa panas saat dipakai. Tercatat 64% responden melepas APD selama

bertugas karena masalah fogging pada pelindung mata yang menghambat pandangan, hal ini menandakan adanya celah dalam efektivitas alat pelindung diri (APD) yang seharusnya menjadi garis pertahanan utama. Secara keseluruhan, dari berbagai penelitian ini menunjukkan bahwa risiko kesehatan pemadam kebakaran sangat kompleks, mencakup kanker, gangguan pernapasan, kerusakan organ internal, hingga masalah penglihatan. Oleh karena itu, diperlukan strategi mitigasi komprehensif, mulai dari inovasi APD yang lebih nyaman, biomonitoring rutin, hingga regulasi kesehatan kerja yang lebih ketat, agar kesehatan pemadam kebakaran dapat terlindungi secara berkelanjutan. Penelitian-penelitian tersebut menegaskan bahwa meskipun APD tersedia, tingkat perlindungan sangat bergantung pada kualitas desain, efektivitas sistem ventilasi, serta kepatuhan dan kenyamanan pengguna. Oleh karena itu, peningkatan teknologi APD misalnya pelindung mata dengan anti-fog, ventilasi termal, atau lapisan anti kontaminasi menjadi kebutuhan mendesak untuk mengurangi risiko iritasi mata pada pemadam kebakaran. Berikut data hasil survei pengambilan sampler para pemadam kebakaran yang mengalami iritasi mata: Data survei iritasi mata pada pemadam kebakaran Australia diperlihatkan pada Tabel 4:

Tabel 4. Data Survei Iritasi Mata pada Pemadam Kebakaran

No	Variabel Survei	Persentase (%)	Keterangan
1	Pemadam yang mengalami iritasi mata	90%	Keluhan paling umum
2	Mata berair	79%	Penglihatan terganggu
3	Mata Merah	83%	Inflamasi akut
4	Sensasi terbakar	68%	Kontak asap intens
5	Menggunakan APD mata	42%	Rendah karena ketidaknyamanan
6	Melepas APD karena lensa berembun	64%	Penyebab utama ketidakpatuhan

Berdasarkan hasil dari keenam jurnal, ditemukan beberapa temuan penting:

1. Risiko Kanker Meningkat
 - Pekerjaan sebagai pemadam kebakaran terbukti meningkatkan risiko kanker, terutama *meothelioma*, kanker kandung kemih, prostat, testis, dan melanoma.
2. Paparan Logam Berat Signifikan
 - Pemadam kebakaran hutan memiliki kadar logam seperti arsenik, kadmium, timbal, dan merkuri lebih tinggi dari batas aman. Hal ini berhubungan dengan karier dan umur.
3. Paparan PAHs dan Senyawa Kimia Lainnya
 - Kadar PAHs meningkat drastis saat pemadaman. Hasil uji in vitro menunjukkan kerusakan pada sel paru manusia.
 - *Wristband* silikon membuktikan bahwa paparan SVOCs lebih tinggi saat *on-duty*, terutama pada PAHs dan PFAS.
4. Paparan Partikular dan Gas Berbahaya
 - Konsentrasi PM_{2.5}, NO₂, dan SO₂ sering melebihi ambang batas kerja selama *prescribed fire*. Hal ini dapat menyebabkan penyakit paru kronis.
5. Gangguan Pada Mata
 - 90% pemadam kebakaran mengalami iritasi mata akibat asap, dengan banyak yang terpaksa melepas kacamata pelindung karena kendala teknis.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian dari enam jurnal yang dianalisis, dapat disimpulkan bahwa profesi pemadam kebakaran merupakan salah satu pekerjaan dengan tingkat risiko kesehatan paling tinggi. Paparan zat berbahaya yang mereka hadapi tidak hanya bersifat akut, seperti sesak napas atau iritasi, tetapi juga bersifat kronis dan laten, seperti kanker, kerusakan organ internal, hingga gangguan metabolik. Hal ini dibuktikan dengan meta-analisis internasional yang menegaskan adanya peningkatan signifikan pada insidensi beberapa jenis kanker di kalangan pemadam kebakaran. Fakta ini menunjukkan bahwa risiko yang dihadapi pemadam kebakaran jauh lebih kompleks dibandingkan persepsi umum yang hanya melihat bahaya fisik dari api semata.

Temuan biomonitoring memperlihatkan bahwa logam berat seperti arsenik, kadmium, timbal, dan merkuri terakumulasi dalam tubuh pemadam kebakaran, bahkan melebihi ambang batas aman. Risiko ini bersifat akumulatif sehingga semakin lama masa kerja, semakin besar pula potensi gangguan kesehatan yang dialami. Kondisi ini mengindikasikan perlunya pemantauan kesehatan berkala melalui pemeriksaan biologis,

misalnya tes urine atau darah, untuk mendeteksi dini adanya kontaminasi logam berat. Dengan demikian, tindakan preventif dapat dilakukan sebelum gejala penyakit kronis muncul.

Selain logam, paparan senyawa organik PAHs, PFAS, *flame retardants*, dan partikel PM2.5 terbukti signifikan pada saat pemadaman. Senyawa-senyawa tersebut tidak hanya berbahaya bagi sistem pernapasan, tetapi juga berpotensi menyebabkan mutasi genetik dan kerusakan sel yang berdampak jangka panjang. Sementara itu, hasil survei kesehatan menunjukkan bahwa hampir seluruh pemadam kebakaran mengalami iritasi mata akibat asap. Meskipun APD sudah tersedia, kenyamanan penggunaan masih menjadi masalah, sehingga pemadam sering memilih untuk melepaskannya. Ini menjadi indikasi bahwa teknologi APD perlu dikembangkan lebih lanjut agar tidak hanya melindungi tetapi juga nyaman digunakan dalam kondisi ekstrem.

Kesimpulannya, profesi pemadam kebakaran memerlukan perhatian khusus dari sisi kesehatan kerja. Strategi mitigasi harus dilakukan secara komprehensif, mulai dari peningkatan kualitas dan kenyamanan APD, penerapan biomonitoring rutin, hingga regulasi ketat terkait standar keselamatan kerja. Selain itu, edukasi mengenai bahaya laten paparan asap juga penting agar pemadam lebih asar terhadap risiko yang dihadapi. Dengan langkah-langkah tersebut, diharapkan kualitas hidup pemadam kebakaran dapat terlindungi, sekaligus meningkatkan keselamatan kerja mereka dalam melaksanakan tugas mulia menyelamatkan masyarakat.

5. UCAPAN TERIMA KASIH (Jika ada)

Ucapan terima kasih para penulis dengan penuh rasa syukur menyampaikan penghargaan dan mengucapkan terima kasih atas dukungan yang diberikan oleh Politeknik Negeri Subang, khususnya Jurusan Teknik Mesin, atas dukungan fasilitas, arahan, dan kesempatan yang diberikan selama proses penyusunan penelitian dan penulisan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan, baik berupa data, masukan ilmiah, maupun dukungan teknis, sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Barbosa, J. V., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G., & Sousa, S. I. V. (2024). Occupational exposure of firefighters to hazardous pollutants during prescribed fires in Portugal. *Chemosphere*, 352(January), 141355. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141355>
- DeBono, N. L., Daniels, R. D., Beane Freeman, L. E., Graber, J. M., Hansen, J., Teras, L. R., Driscoll, T., Kjaerheim, K., Demers, P. A., Glass, D. C., Kriebel, D., Kirkham, T. L., Wedekind, R., Filho, A. M., Stayner, L., & Schubauer-Berigan, M. K. (2023). Firefighting and Cancer: A Meta-analysis of Cohort Studies in the Context of Cancer Hazard Identification. *Safety and Health at Work*, 14(2), 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2023.02.003>
- Jaiswal, S., Jalbert, I., Olsen, N., Burnett, A., & Golebiowski, B. (2024). Blinded by smoke: Wildfire smoke exposure and eye irritation in australian wildland firefighters. *Ocular Surface*, 34(May), 381–391. <https://doi.org/10.1016/j.jtos.2024.09.001>
- Levasseur, J. L., Hoffman, K., Herkert, N. J., Cooper, E., Hay, D., & Stapleton, H. M. (2022). Characterizing firefighter's exposure to over 130 SVOCs using silicone wristbands: A pilot study comparing on-duty and off-duty exposures. *Science of the Total Environment*, 834(February), 155237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155237>
- Paiva, A. M., Barros, B., Azevedo, R., Oliveira, M., Alves, S., Esteves, F., Fernandes, A., Vaz, J., Alves, M. J., Slezakova, K., Pereira, M. do C., Teixeira, J. P., Costa, S., Almeida, A., & Morais, S. (2024). Biomonitoring of firefighters' exposure to priority pollutant metal(loid)s during wildland fire combat missions: Impact on urinary levels and health risks. *Science of the Total Environment*, 953(May). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176105>
- Teixeira, J., Bessa, M. J., Delerue-Matos, C., Sarmiento, B., Santos-Silva, A., Rodrigues, F., & Oliveira, M. (2024). Firefighters' personal exposure to gaseous PAHs during controlled forest fires: A case study with estimation of respiratory health risks and in vitro toxicity. *Science of the Total Environment*, 908(July 2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168364>