

Evaluasi keselamatan kebakaran kendaraan bermotor

Yulianto Sulisty Nugroho^{a,1}, Mohammad Adhitya^a, Reza Adyanto Nugroho^a, dan
Muhammad Agung Santoso^a

^aDepartemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Depok, 16424

¹Email korespondensi: yulianto.nugroho@ui.ac.id

Abstrak. Risiko kebakaran kendaraan bermotor terus meningkat sejalan dengan meningkatnya populasi kendaraan bermotor serta mobilitas masyarakat. Kebakaran kendaraan bermotor dapat terjadi di perjalanan, di stasiun pengisian bahan bakar umum, atau di dalam bangunan saat kendaraan diparkir. Kebakaran kendaraan bermotor bukan saja menimbulkan kerusakan pada kendaraan, bangunan gedung parkir, tetapi juga dapat mengakibatkan cedera bahkan fatalitas pada penumpang kendaraan bermotor tersebut. Risiko kebakaran kendaraan bermotor, baik berupa kendaraan dengan mesin pembakaran dalam (internal combustion engine - ICE) maupun kendaraan listrik (electric vehicle – EV), ditandai dengan laju pelepasan kalor (heat release rate) akibat terbakarnya komponen/bahan yang mampu terbakar yang ada di dalam kendaraan maupun terbakarnya bahan bakar atau baterai sebagai sumber energi penggerak utama kendaraan bermotor. Untuk memberikan gambaran mengenai risiko kebakaran kendaraan bermotor, makalah ini menyajikan metode pengukuran laju pelepasan kalor, kajian literatur hasil pengukuran eksperimental, dan evaluasi keselamatan kebakaran kendaraan bermotor sebagai upaya meningkatkan kepedulian dan keselamatan masyarakat pada umumnya.

Keywords: keselamatan kebakaran, kaji risiko, kendaraan bermotor, laju pelepasan kalor, proteksi kebakaran.

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/qmde8743>

PENDAHULUAN

Kendaraan bermotor memegang peranan yang penting dalam sistem transportasi penumpang maupun logistik barang, mulai dari hasil bumi, bahan baku, dan produk hasil proses manufaktur. Perkembangan wilayah perkotaan, pemukiman, daerah pertanian, perkebunan dan kawasan industri telah mendorong peningkatan jumlah kendaraan bermotor. Sejalan dengan perkembangan jumlah kendaraan bermotor berbahan bakar minyak (*ICE*), dan dalam beberapa tahun terakhir ini juga bermunculan kendaraan bermotor listrik (*EV*) dan kendaraan hibrida (*hybrid*) maka turut tumbuh fasilitas penunjang, seperti SPBU (stasiun pengisian bahan bakar umum), SPKLU (stasiun pengisian kendaraan listrik umum), gedung parkir, dan bengkel-bengkel pemeliharaan dan perawatan kendaraan bermotor.

Salah satu tantangan dalam operasional kendaraan bermotor adalah terjadinya kebakaran kendaraan [1]. Kebakaran kendaraan bermotor dapat terjadi antara lain akibat: (i) terjadinya kecelakaan berupa benturan keras, (ii) komponen mesin kendaraan yang mengalami pemanasan berlebih, (iii) terjadinya gangguan sistem kelistrikan termasuk lampu, sound system, dan baterai, (iv) kerusakan pada saluran bahan bakar atau pelumas yang menyebabkan kebocoran bahan bakar, (v) kerusakan diikuti kebakaran pada sistem baterai utama pada kendaraan listrik dan hibrida, (vi) serta penyebab lainnya.

Keselamatan penumpang kendaraan bermotor pada saat terjadi peristiwa kebakaran, sangat dipengaruhi

oleh kemampuan seluruh penumpang untuk mengevakuasi diri keluar dari kendaraan yang mengalami kebakaran, serta kecepatan respons dalam menghadapi munculnya api awal kebakaran. Sebagaimana fenomena kebakaran yang terjadi di bangunan gedung, di kawasan industri, di alam terbuka, kebakaran kendaraan bermotor juga ditandai dengan terjadinya pelepasan energi termal dari reaksi pembakaran yang bersifat eksotermik. Risiko keselamatan jiwa dan harta benda dari terjadinya reaksi pembakaran yang bersifat eksotermik diindikasikan oleh terjadinya laju pelepasan kalor yang berkembang sejalan dengan perkembangan kebakaran yang terjadi. Pada bagian berikut ini akan disajikan dasar teori pengukuran laju pelepasan kalor, teknik eksperimental, dan gambaran umum mengenai besaran laju pelepasan kalor pada saat kendaraan bermotor mengalami kebakaran. Bagaimana pengemudi dan penumpang merespons terjadinya kebakaran pada kendaraan bermotor juga akan disajikan dalam makalah ini. Secara khusus, makalah ini akan mengevaluasi aspek keselamatan kebakaran kendaraan bermotor sebagai upaya meningkatkan kepedulian dan keselamatan publik.

RISIKO KEBAKARAN KENDARAAN BERMOTOR

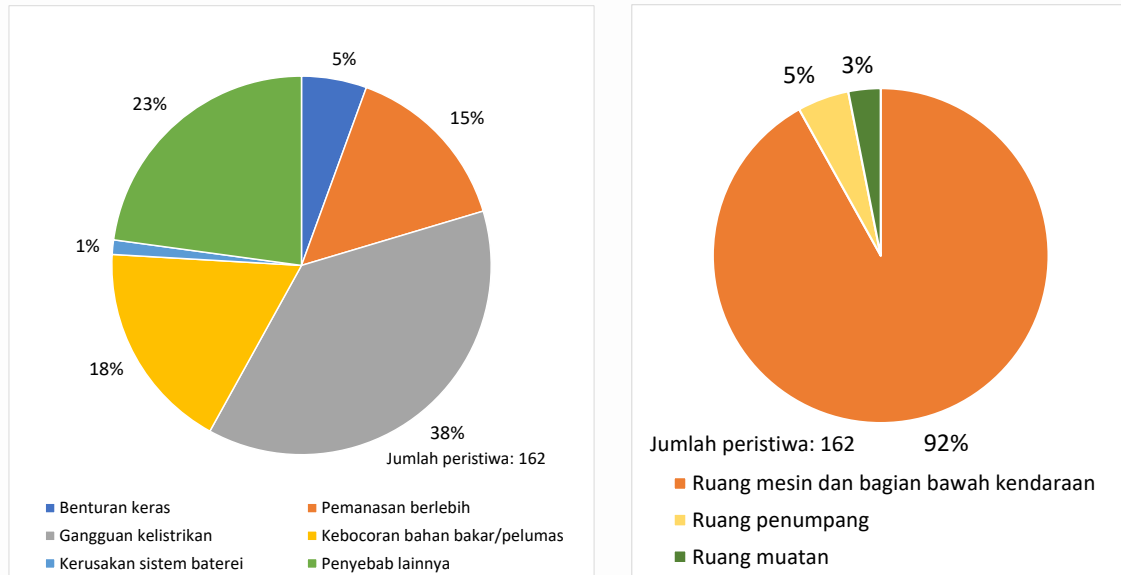
Statistik kebakaran kendaraan

Gambar 1 menunjukkan statistik kebakaran kendaraan berbagai jenis yang terjadi di DKI Jakarta dari tahun 2024 hingga pertengahan 2025. Pada periode tersebut

tercatat terjadi 162 peristiwa kebakaran kendaraan bermotor, dengan perkiraan penyebab dan lokasi kebakaran awal yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Dari Gambar 1 tampak bahwa kasus kebakaran kendaraan bermotor disebabkan oleh adanya gangguan kelistrikan (*electrical faults*), pemanasan berlebih (*overheating*), dan kebocoran bahan bakar atau

pelumas (*leakage of fuel and/or lubricants*). Dari sisi lokasi kejadian kebakaran awal pada kendaraan bermotor, pada umumnya terjadi pada ruang mesin dan lokasi di bagian bawah kendaraan bermotor. Data ini selaras dengan data di negara Singapura seperti diberikan dalam SCDF, Vehicle safety checklist (2025) [3].



Gambar 1 Statistika kebakaran kendaraan bermotor di DKI Jakarta periode 2024 – pertengahan 2025 [2], diolah kembali.

Bahan mampu bakar di kendaraan bermotor

Kendaraan bermotor roda empat pada umumnya memiliki komponen utama yang bersifat mampu bakar, antara lain: (i) bahan bakar di dalam tangki (*fuel tank*), (ii) pelumas baik berupa pelumas mesin, pelumas transmisi dan pelumas sistem hidrolik untuk proses pengereman; (iii) elemen interior kendaraan bermotor, seperti *dashboard*, panel pintu, peredam suara di plafond, kursi kendaraan, dan karpet; (iv) system pengkabelan, dan komponen mesin lainnya yang terbuat dari bahan mampu bakar, serta (v) ban kendaraan bermotor yang terbuat utamanya dari bahan karet atau sintesis.

Kompleksitas bahan mampu bakar yang terdapat di dalam kendaraan berpotensi menghasilkan produk pembakaran dengan laju pelepasan kalor yang tinggi dan bersifat beracun (toksik). Untuk menurunkan tingkat kemudahan terbakar (*flammability*), bahan penyusun interior kendaraan bermotor telah dipersyaratkan bersifat tahan api, lambat menyebarkan api dan tidak menghasilkan uap yang bersifat beracun.

Untuk menurunkan tingkat risiko penyebaran kebakaran, kendaraan bermotor beroda empat atau lebih, juga telah menerapkan prinsip proteksi kebakaran pasif dengan memisahkan ruang mesin (*engine compartment*), dan tangki bahan bakar (*fuel*

tank) atau lokasi baterai (*battery compartment*), untuk kendaraan listrik, dengan ruang penumpang (*passenger compartment*). Pada kendaraan juga telah dilengkapi dengan sarana penyelamatan diri berupa pintu akses minimal dua buah dan sabuk keselamatan yang mudah dibuka pada kondisi darurat.

Gambaran respons pengemudi dan penumpang kendaraan bermotor pada kondisi darurat kebakaran

Dari hasil kaji literatur maupun cermatan catatan peristiwa kebakaran, respons cepat dan tepat dari pengemudi dan/atau penumpang kendaraan merupakan kunci utama dalam upaya mengatasi kebakaran awal yang terjadi, sehingga kebakaran lanjut dapat dicegah. Berdasarkan catatan peristiwa kebakaran seperti disajikan pada Gambar 1, secara umum respons pengemudi atau penumpang kendaraan saat terjadi peristiwa kebakaran dapat dibedakan menjadi 2 (dua) skenario, yaitu: (i) kebakaran terjadi di dalam kabin penumpang dan (ii) kebakaran terjadi di ruang mesin atau ruang muatan. Apabila peristiwa kedaruratan kebakaran terjadi pada saat kendaraan meluncur, maka waktu respons dari pengemudi untuk kedua peristiwa tersebut dapat diuraikan berdasarkan elemen waktu respons (t_{respons}) sebagai berikut:

$$t_{\text{respons}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 \quad (1)$$

dengan :

- t_1 adalah waktu pengemudi/penumpang mendeteksi/menyadari atau diberitahu adanya kondisi munculnya asap, percikan api, atau aroma dari material terbakar (s),
- t_2 adalah waktu yang diperlukan pengemudi untuk menepikan dan menghentikan kendaraan (s),
- t_3 adalah waktu mengevakuasi seluruh penumpang keluar dari kendaraan (s),
- t_4 adalah waktu untuk memastikan lokasi sumber kondisi darurat kebakaran (s),
- t_5 adalah waktu pengemudi/penumpang mengambil alat pemadam api portable (s),
- t_6 adalah waktu untuk membuka pengaman alat pemadam api portable dan mengarahkan ke sumber penyalan (s),
- t_7 adalah waktu pemadaman api awal (s).
- t_8 adalah waktu tambahan sebagai *margin of safety* dan waktu memanggil serta respons petugas pemadam kebakaran (s)

Untuk kedua skenario kebakaran di atas, maka waktu respons untuk kendaraan penumpang dengan 5 - 7 tempat duduk, diperkirakan akan mencapai kisaran 4 menit untuk kebakaran yang terjadi di kabin penumpang; hingga lebih dari 5 menit untuk kebakaran yang terjadi di ruang mesin. Berbagai literatur dan *best practice* dengan mempertimbangkan kesulitan dan bahaya jilatan api pada saat membuka tutup mesin (hood), maka kebakaran pada ruang mesin akan lebih efektif dipadamkan oleh petugas pemadam kebakaran lengkap dengan sumber media pemadaman dan alat bantu teknis lainnya. Upaya pemadaman kebakaran awal oleh pengemudi/penumpang lebih ditujukan untuk mengurangi laju pertumbuhan api, sambil menunggu kedatangan petugas pemadam kebakaran.

METODOLOGI PENGUKURAN LAJU PELEPASAN KALOR

Prinsip pengukuran laju pelepasan kalor

Penelitian yang dilakukan oleh Huggets [4] memperlihatkan adanya suatu nilai konstanta sebesar 13,100 kJ/kg oksigen yang dikonsumsi pada pembakaran gas, cairan, maupun padatan. Konstanta Huggett ini telah memungkinkan pengukuran laju pelepasan kalor dari suatu bahan yang mampu dibakar, diukur menggunakan prinsip laju konsumsi oksigen menggunakan Persamaan (2).

$$\dot{Q}(t) = A_f(t) \cdot \dot{m}''(t) \cdot \Delta H_{\text{efektif}} \quad (2)$$

dengan $\dot{Q}(t)$ adalah laju pelepasan kalor (kW), $A_f(t)$ adalah luas permukaan horizontal bahan mampu bakar (m^2), $\dot{m}''(t)$ adalah laju pembakaran per satuan luas permukaan ($\text{g}/(\text{m}^2\text{s})$), dan $\Delta H_{\text{efektif}}$ adalah nilai kalor pembakaran efektif (kJ/g).

Seperti tampak pada Gambar 2, saluran dakting dipergunakan untuk mengukur laju aliran dan konsentrasi gas produk pembakaran. Penurunan

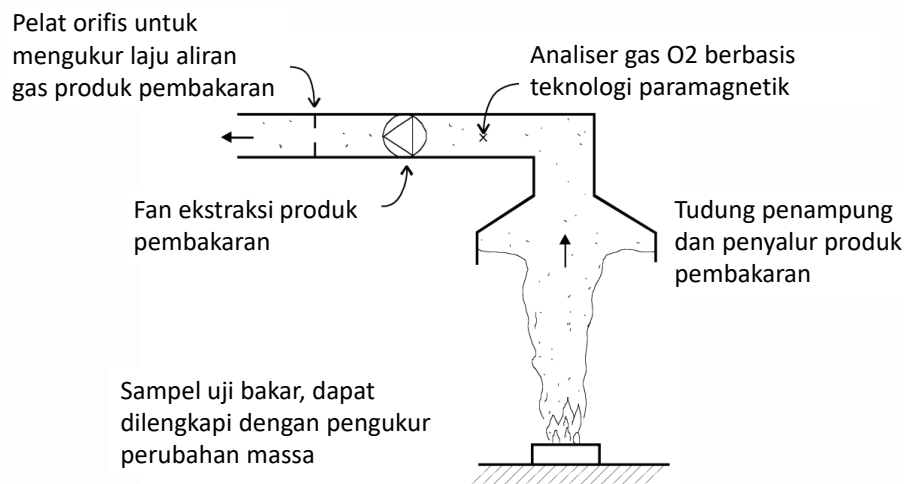
konsentrasi oksigen dari kondisi ambien (atau konsentrasi oksigen yang dikonsumsi) ditambah dengan konsentrasi karbon dioksida (CO_2) dan karbon monoksida (CO) dipergunakan untuk menghitung nilai laju pelepasan kalor. Dengan mengadaptasi pendekatan yang digunakan Parker [5] dan Janssens [6], nilai laju pelepasan kalor teoritis dapat dihitung dengan Persamaan (3) dan (4).

$$Q = EAC \sqrt{\frac{\Delta p_e}{T_e}} X_{O_2}^o \left(\frac{\phi - B(1-\phi)X_{CO}/X_{O_2}}{(1-\phi) + \alpha\phi} \right) \quad (3)$$

$$\phi = \frac{X_{O_2}^o(1-X_{CO_2}-X_{CO}) - X_{O_2}(1-X_{CO_2}^o)}{X_{O_2}^o(1-X_{O_2}-X_{CO_2}-X_{CO})} \quad (4)$$

dimana X adalah fraksi mol senyawa dengan o menunjukkan nilai pada kondisi ambien, T_e temperatur di dalam dakting (K), Δp_e adalah perbedaan tekanan (Pa) gas yang melintasi pelat orifis, E Adalah laju pelepasan kalor per unit massa oksigen, 13,100 (kJ/kg), A Adalah luas penampang dakting, C adalah

parameter kalibrasi untuk laju aliran massa, α adalah faktor ekspansi molar dari bahan mampu bakar dan udara menjadi produk, dan B adalah nilai kuantifikasi penurunan laju pelepasan energi akibat pembentukan produk pembakaran yang tidak sempurna (misal CO).

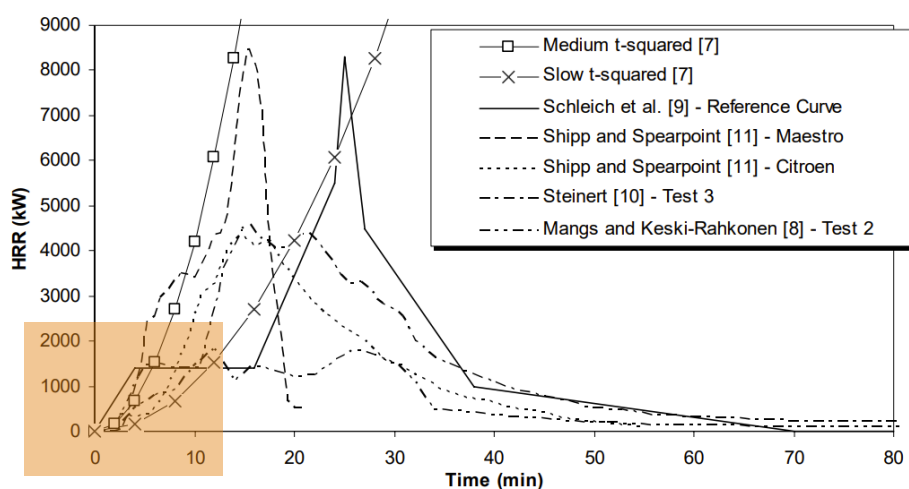


Gambar 2 Skematika kalorimeter berbasis konsumsi oksigen yang digunakan untuk mengukur laju pelepasan kalor sampel uji mampu bakar [7].

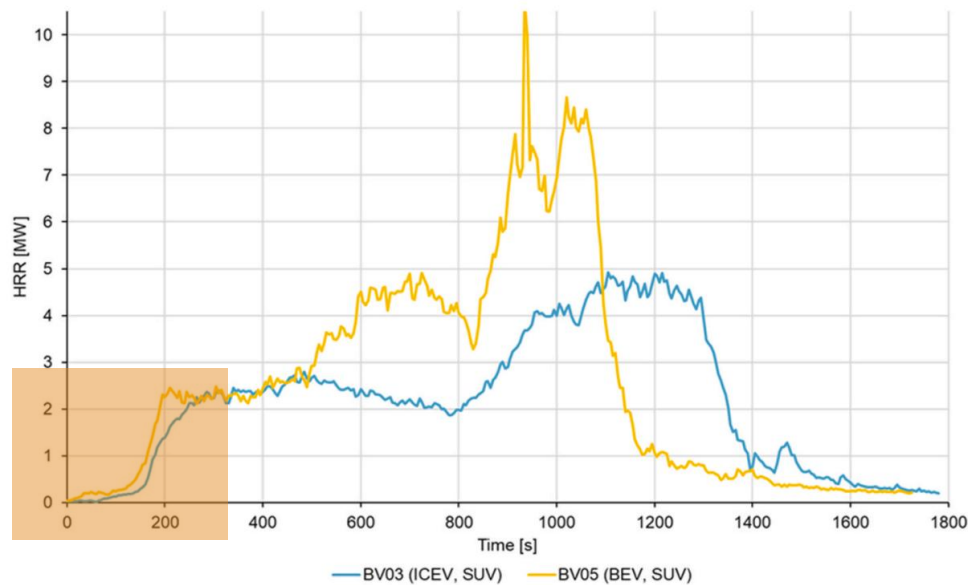
PENGUMPULAN DATA UJI LAJU PELEPASAN KALOR

Dalam upaya menggambarkan tingkat keparahan (*severity*) ketika terjadi kebakaran kendaraan bermotor, Li Y, Spearpoint M J. [8] telah melakukan kajian pertumbuhan laju pelepasan kalor sebagai fungsi waktu. Gambar 3 memperlihatkan profil laju pelepasan kalor untuk kendaraan dengan mesin pembakaran dalam. Tampak bahwa dengan menggunakan pendekatan profil t kuadrat untuk pertumbuhan lambat maupun menengah serta grafik dari penelitian lainnya, dalam periode waktu 5 menit pertama setelah terjadi penyalan (*ignition*), besarnya laju pelepasan kalor dapat mencapai kisaran 1 MW hingga mendekati 2 MW.

Pengukuran laju pelepasan kalor kendaraan bermesin pembakaran dalam (ICE) dan kendaraan listrik dilakukan oleh Peter Strun et al. [9], di dalam terowongan menggunakan pendekatan pengukuran entalpi pada daerah hulu dan hilir titik pengujian kebakaran kendaraan. Profil laju pelepasan kalor untuk kedua jenis kendaraan disajikan pada Gambar 4. Sebagaimana hasil penelitian Li Y, Spearpoint M J. [8], menit-menit pertama sejak penyalan (*ignition*) dilakukan, terjadi peningkatan laju pelepasan kalor mengikuti pola t -kuadrat. Pada kisaran waktu 200 s, untuk kendaraan bermesin pembakaran dalam dapat tercapai nilai laju pelepasan kalor 1 MW – 1,5 MW. Selanjutnya, pertumbuhan kebakaran kendaraan akan terus meningkat hingga dapat mencapai nilai puncak laju pelepasan kalor pada kisaran 5 MW.



Gambar 3 Profil laju pelepasan kalor untuk kendaraan dengan mesin pembakaran dalam [8].



Gambar 4 Profil laju pelepasan kalor untuk kendaraan dengan mesin pembakaran dalam dan kendaraan listrik [9].

EVALUASI KESELAMATAN KEBAKARAN KENDARAAN BERMOTOR

Tingkat keselamatan kebakaran dapat digambarkan oleh kemampuan penyelamatan jiwa (tidak terjadi cedera maupun gangguan kesehatan) dan harta benda (tingkat kerugian minimum). Untuk mencapai tujuan keselamatan jiwa, waktu yang tersedia untuk melakukan upaya penyelamatan jiwa harus lebih singkat daripada terjadinya kondisi yang membahayakan jiwa akibat peningkatan laju pelepasan kalor.

Dari prediksi waktu respons pengemudi dan penumpang terhadap kondisi darurat kebakaran, seperti diilustrasikan pada bagian di atas, diperlukan waktu sekitar 4 menit untuk dapat merespons kondisi darurat kebakaran. Pada waktu ini, besaran laju pelepasan kalor diperkirakan telah mencapai kisaran 1 MW - 2 MW. Untuk mempercepat waktu evakuasi dan penyelamatan jiwa dalam kondisi darurat kebakaran di kendaraan bermotor, maka beberapa upaya dapat dilakukan, antara lain: (i) meningkatkan kepedulian akan terjadinya risiko kebakaran pada kendaraan bermotor, (ii) tidak melakukan modifikasi sistem kelistrikan tanpa memahami batasan kemampuan material dan sistem secara keseluruhan, (iii) meningkatkan tingkat ketahanan api material interior, (iv) penyediaan alat pemadam kebakaran portable yang mempunyai tingkat pemadaman api (*fire rating*) yang sesuai dengan potensi risiko kebakaran yang ada.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Z. Mohd Tohir and C. Martín-Gómez, "Evaluating fire severity in electric vehicles and internal combustion engine vehicles: A statistical approach to heat release rates," *Fire Technology*, pp. 1-42, 2025.
- [2] D. P. K. d. P. D. Jakarta, "Data Statistik Kebakaran Kendaraan Bermotor Tahun 2024 – 2025 pertengahan," ed, 2025.

KESIMPULAN

Risiko kebakaran kendaraan bermotor terus dikaji sejalan dengan perkembangan teknologi dan rancangan kendaraan. Statistik kebakaran kendaraan menunjukkan bahwa pada sebagian besar kasus, kebakaran terjadi di ruang mesin dan di bagian bawah kendaraan. Dengan demikian, kemampuan merespons penumpang kendaraan untuk melakukan upaya penyelamatan jiwa dan, apabila kondisi memungkinkan, upaya pemadaman awal menjadi sangat penting untuk dipersiapkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Dinas Penanggulangan Kebakaran dan Penyelamatan Provinsi DKI Jakarta (Bapak Suheri) yang telah menyediakan data kebakaran kendaraan.

KONTRIBUSI PENULIS

Yulianto S Nugroho berkontribusi dalam mempersiapkan naskah orisinal, mereview. Reza A Nugroho berkontribusi pada pengolahan data dan pembuatan grafik serta format penulisan, Mohammad A Santoso berkontribusi dalam memberikan telaah diskusi aspek sains kebakaran, serta Muhammad Adhitya berkontribusi dalam mengkaji teknologi kendaraan bermotor dan risiko operasional.

- [3] SCDF. "Vehicle safety checklist." [https://www.scdf.gov.sg/docs/default-source/media-room-\(publications\)/posters--leaflets--booklets/vehicle-fire-checklist-\(april-2025\).pdf](https://www.scdf.gov.sg/docs/default-source/media-room-(publications)/posters--leaflets--booklets/vehicle-fire-checklist-(april-2025).pdf) (accessed).
- [4] C. Huggett, "Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements," *Fire and materials*, vol. 4, no. 2, pp. 61-65, 1980.
- [5] W. J. Parker, "Calculations of the heat release rate by oxygen consumption for various applications," *Journal of fire sciences*, vol. 2, no. 5, pp. 380-395, 1984.
- [6] M. L. Janssens, "Measuring rate of heat release by oxygen consumption," *Fire technology*, vol. 27, no. 3, pp. 234-249, 1991.
- [7] B. Karlsson and J. Quintiere, *Enclosure fire dynamics*. CRC press, 1999.
- [8] Y. Li and M. Spearpoint, "Analysis of vehicle fire statistics in New Zealand parking buildings," *Fire technology*, vol. 43, no. 2, pp. 93-106, 2007.
- [9] P. Sturm *et al.*, "Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels," *Fire Safety Journal*, vol. 134, p. 103695, 2022.