



JURNAL BIOSHELL

e-ISSN: 2623-0321

DOI: 10.56013/bio.v15i1.5427
<http://ejurnal.ujj.ac.id/index.php/BIO>



Dampak *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* (PAH) Asap Kebakaran Hutan Gambut terhadap Penyakit Paru di Kalimantan Tengah

Nira Meirita Wijayanti*, Sri Suhartati, Noor Fadillah

*E-mail of Corresponding Author: nirameiritawijayanti@umpr.ac.id

Universitas Muhammadiyah Palangka Raya

Article History

Received: February 1, 2026

Revised: February 5, 2026

Accepted: February 8, 2026

Available online: 9 February, 2026

ABSTRAK

Kajian ini bertujuan untuk mensintesis bukti ilmiah mengenai karakteristik emisi PAH dari kebakaran gambut serta implikasinya terhadap kesehatan paru. Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan *systematic review* terhadap literatur terindeks pada *PubMed/PMC*, *Scopus*, *Web of Science*, dan *Google Scholar* dalam rentang 2010–2025. Hasil kajian menunjukkan bahwa pembakaran gambut pada fase *smouldering* menghasilkan dominasi PAH berat yang bersifat persisten, karsinogenik, dan cenderung terikat pada fraksi partikulat halus $PM_{2.5}$ dan PM_{10} . Keterikatan ini meningkatkan stabilitas atmosferik, potensi transport jarak jauh, serta risiko paparan inhalasi hingga ke bronkiolus dan alveoli paru. Secara biologis, paparan PAH melalui inhalasi memicu stres oksidatif dan inflamasi kronis melalui aktivasi *Aryl hydrocarbon Receptor* (AhR) serta penurunan aktivitas enzim antioksidan, yang berkontribusi terhadap kerusakan epitel saluran napas, remodeling jaringan paru, dan peningkatan risiko asma, PPOK, serta kanker paru. Meskipun bukti epidemiologis spesifik di Kalimantan Tengah masih terbatas, sintesis literatur menunjukkan tingginya kerentanan kesehatan masyarakat terhadap paparan asap kebakaran gambut. Kata kunci: Kebakaran hutan gambut, Partikulat halus ($PM_{2.5}$), *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* (PAH), Penyakit paru, Kesehatan lingkungan

ABSTRACT

This review aims to synthesize scientific evidence regarding the characteristics of PAH emissions from peat fires and their implications for lung health. The study was conducted using a systematic review approach of literature indexed in *PubMed/PMC*, *Scopus*, *Web of Science*, and *Google Scholar* from 2010 to 2025. The findings indicate that peat combustion during the *smouldering* phase produces a dominance of high-molecular-weight PAHs that are persistent, carcinogenic, and predominantly associated with fine particulate fractions ($PM_{2.5}$ and PM_{10}). This association increases atmospheric stability, facilitates long-range transport, and enhances the risk of inhalation exposure reaching the bronchioles and alveoli of the lungs. Biologically, inhaled PAHs trigger oxidative stress and chronic inflammation through activation of the *aryl hydrocarbon receptor* (AhR) and suppression of antioxidant enzyme activity, contributing to airway epithelial damage, lung tissue remodeling, and an increased risk of asthma, chronic obstructive pulmonary disease (COPD), and lung cancer. Although specific epidemiological evidence in Central Kalimantan remains limited, the synthesized literature highlights a high level of public health vulnerability to peat fire smoke exposure. Key word: Peat forest fires; Particulate matter ($PM_{2.5}$); *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* (PAHs); Lung diseases; Environmental health

I. PENDAHULUAN

Kebakaran hutan dan lahan di Kalimantan Tengah menunjukkan fluktuasi luas area terbakar yang signifikan dalam satu dekade terakhir. Pada tahun 2019, total area terdampak mencapai 161.298 ha (BNPB, 2019), sedangkan pada tahun 2021 tercatat 369,92 Ha (Febriyana, 2021). Asap dari kebakaran hutan dan lahan ini menghasilkan emisi partikulat halus ($PM_{2.5}$), Karbon Monoksida (CO), karbon Dioksida (CO_2), Metana (CH_4) (Hayasaka et al., 2020; Kiely et al., 2020), yang berkontribusi pada kualitas udara dan kesehatan masyarakat sekitar kawasan kebakaran (Chen et al., 2021; Huijnen et al., 2016). Kebakaran tahun 2015 dan 2019, nilai konsentrasi partikulat halus $PM_{2.5}$ di Kalimantan Tengah menunjukkan 1303 $\mu g/m^3$ dan 870 $\mu g/m^3$ (Phung et al., 2025), nilai ini jauh melampaui standar nilai $PM_{2.5}$ yang direkomendasikan WHO sebesar 25 $\mu g/m^3$ untuk paparan harian (Uda et al., 2019).

Paparan jangka pendek dan kronis yang disebabkan senyawa $PM_{2.5}$ dan senyawa toksik yang terkandung dalam asap kebakaran terbukti berpengaruh pada infeksi saluran pernapasan akut (ISPA), asma, dan penyakit paru obstruktif kronik (PPOK) (Crippa et al., 2016; Kiely et al., 2020). Data kesehatan di Kalimantan Tengah menunjukkan dampak signifikan terhadap lonjakan jumlah kunjungan ke fasilitas kesehatan sebesar 74,4% selama periode kebakaran tahun 2015 dan 95% pada tahun 2019 (Phung et al., 2025). Kondisi ini memperkuat bukti epidemiologis dan morbiditas respirasi

bahwa peningkatan konsentrasi partikulat akibat kebakaran hutan dan lahan secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan beban penyakit paru di Kalimantan Tengah.

Meskipun $PM_{2.5}$ sebagai indikator dalam kesehatan udara, diperlukan adanya perhatian khusus pada kandungan kimia yang bersifat toksik yang terkandung dalam partikulat tersebut. Salah satu senyawa yang terkandung dalam asap akibat kebakaran hutan dan lahan gambut adalah kelompok senyawa PAH yang ditimbulkan akibat proses pembakaran yang tidak sempurna bahan organik (Zhang et al., 2022). Senyawa PAH memiliki karakteristik hidrofobik, persisten di lingkungan, terabsorpsi pada partikulat halus ($PM_{2.5}$) (Zelinkova & Wenzl, 2015). Senyawa PAH ini memiliki kemampuan terdispersi di atmosfer dan berpotensi terhirup pada saluran pernapasan manusia yang berpotensi sebagai salah satu penyebab penyebab kanker paru, karena bersifat karsinogenik dan genotoksik (Department of Cancer Prevention and Environment, 2022; Marques et al., 2022).

Dalam konteks kebakaran hutan dan lahan gambut di Kalimantan Tengah, emisi PAH diakibatkan proses pembakaran pada lapisan gambut bawah yang bersifat lambat dalam suhu rendah (*smouldering*) yang menghasilkan pelepasan senyawa organik semi volatil dalam jumlah besar dibandingkan kebakaran vegetasi non gambut (George et al., 2016; Jayarathne et al., 2018). Berbagai studi menunjukkan bahwa dampak emisi PAH yang meningkatkan risiko kesehatan saluran

pernapasan yang berimplikasi pada sistem respirasi (Reid et al., 2016). Akan tetapi, penelitian-penelitian tersebut umumnya berfokus pada karakterisasi konsentrasi ambien atau kajian toksikologi eksperimental, tanpa mengintegrasikan secara spesifik data paparan PAH dengan indikator epidemiologis penyakit paru pada wilayah terdampak berulang.

Pada wilayah Kalimantan Tengah, selama ini, kajian lebih banyak menekankan pada hubungan antara peningkatan PM_{2.5} dan lonjakan kasus ISPA, sementara analisis yang secara khusus mengevaluasi kontribusi fraksi kimia partikulat terutama PAH terhadap risiko penyakit paru masih sangat terbatas. Dengan demikian, terdapat kesenjangan pengetahuan pada tingkat regional terkait peran spesifik PAH sebagai komponen toksik utama dalam asap kebakaran gambut dan implikasinya terhadap beban penyakit paru. Selain itu, sebagian besar bukti empiris mengenai dampak PAH terhadap sistem respirasi berasal dari studi di wilayah subtropis atau kebakaran biomassa non gambut, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan karakteristik kebakaran gambut tropis, khususnya di Kalimantan Tengah.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis bukti ilmiah yang tersedia mengenai karakteristik emisi PAH dari kebakaran hutan gambut serta potensi dampaknya terhadap kesehatan paru, dengan menempatkan Kalimantan Tengah sebagai wilayah dengan tingkat paparan tinggi dan kejadian kebakaran berulang. Dengan memfokuskan analisis pada PAH sebagai

komponen toksik kunci dalam asap kebakaran, kajian ini diharapkan dapat memperjelas kontribusi kimia partikulat terhadap morbiditas respirasi serta memberikan dasar ilmiah bagi pendekatan kesehatan lingkungan yang lebih spesifik di wilayah rawan kebakaran gambut.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis bukti ilmiah yang tersedia mengenai karakteristik emisi PAH dari kebakaran hutan gambut serta potensi dampaknya terhadap kesehatan paru, dengan menempatkan Kalimantan Tengah sebagai wilayah dengan tingkat paparan tinggi dan kejadian kebakaran berulang. Dengan memfokuskan analisis pada PAH sebagai komponen toksik kunci dalam asap kebakaran, kajian ini diharapkan dapat memperjelas kontribusi kimia partikulat terhadap morbiditas respirasi serta memberikan dasar ilmiah bagi pendekatan kesehatan lingkungan yang lebih spesifik di wilayah rawan kebakaran gambut.

II. METODE PENELITIAN

Kajian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan sistematikal review dengan menelaah literatur ilmiah terindeks pada basis data *PubMed/PMC*, *Scopus*, *Web of Science (WoS)*, serta dilengkapi dengan pencarian sekunder melalui *Google Scholar* dan laporan ilmiah dari lembaga nasional dan internasional pada rentang waktu 2010 hingga 2025. Kata kunci utama yang digunakan meliputi *forest fire*, *peat fire*, *effect of fire smoke*, *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons/PAH*, *respiratory diseases*, *lung diseases*, dan *asthma* menggunakan perangkat lunak *Publish or Perish v.8.18.5252.9447* (Harzing, 2016).

Kriteria meliputi artikel berbahasa Inggris dan Indonesia yang terpublikasi dalam jurnal peer-review, berfokus pada emisi PAH atau dampak kesehatan respirasi akibat kebakaran hutan gambut di Kalimantan Tengah, dan relevan dengan konteks Indonesia atau wilayah tropis serupa. Seluruh literatur yang memenuhi kriteria selanjutnya disintesis secara tematik berdasarkan dua fokus utama, yaitu karakteristik emisi PAH dari kebakaran gambut dan implikasinya terhadap kesehatan paru, untuk selanjutnya dianalisis sebagai dasar diskusi dalam kajian ini. Mengingat keterbatasan jumlah studi yang secara eksplisit dilakukan di Kalimantan Tengah, kajian ini juga memasukkan literatur di Indonesia secara umum serta wilayah tropis dan subtropis lain yang memiliki karakteristik kebakaran gambut serupa sebagai dasar komparatif dalam analisis.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis penelusuran literatur menggunakan perangkat lunak *Publish or Perish* pada basis data *PubMed/PMC*, *Scopus*, *WoS*, dan *Google Scholar* diperoleh sebanyak 2.541 publikasi yang berkaitan dengan kata kunci utama. Selanjutnya dilakukan proses penyaringan berdasarkan judul, dan abstrak untuk menganalisis kesesuaian dengan ruang lingkup kajian, yaitu keterkaitan antara emisi PAH dari kebakaran hutan gambut dan implikasinya terhadap kesehatan paru-paru. Berdasarkan hasil klasifikasi menunjukkan empat kelompok utama, yaitu: (1) studi karakteristik dan komposisi emisi PAH dari kebakaran gambut dan hutan tropis (2.186 publikasi), (2) studi

dampak kebakaran terhadap penyakit paru dan gangguan respirasi (17 publikasi), (3) studi paparan asap kebakaran dan partikulat halus (PM_{2.5}) sebagai media transport senyawa toksik (111 publikasi), serta (4) studi kebakaran hutan dan dampaknya dalam konteks regional (227 publikasi).

Berdasarkan pengelompokan tematik tersebut, penyajian hasil dalam kajian ini difokuskan pada tiga aspek utama, yang meliputi (1) karakteristik emisi PAH dari kebakaran hutan gambut dan hutan tropis, (2) paparan asap kebakaran dan partikulat halus sebagai media transport PAH, serta (3) dampak paparan tersebut terhadap penyakit paru dan gangguan respirasi. Dari keseluruhan publikasi yang teridentifikasi, hanya artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan memiliki relevansi langsung dengan fokus kajian yang dianalisis secara mendalam dan disintesis dalam pembahasan.

A. Karakteristik Emisi (PAH) dari Kebakaran Hutan Gambut dan Tropis

Kebakaran hutan gambut dan tropis merupakan sumber utama emisi PAH yang terdispersi ke atmosfer yang ditimbulkan akibat pembakaran tidak sempurna pada fase smouldering, yang ditandai oleh suhu rendah, oksigen terbatas, rendahnya efisiensi oksidasi karbon organik, dan durasi pembakaran yang panjang (Stockwell et al., 2016; Zacccone et al., 2014). Kondisi ini didukung oleh studi pembakaran gambut pada skala laboratorium yang menunjukkan PAH dihasilkan secara signifikan baik pada fase gas maupun fase partikulat selama proses pembakaran smouldering (Black et al.,

2016; George et al., 2016). Berbeda dengan kebakaran biomassa mineral yang didominasi fase flaming dan menghasilkan emisi dengan efisiensi oksidasi lebih tinggi, kebakaran gambut menunjukkan kondisi yang lebih stabil dan reduktif, sehingga lebih mendukung pembentukan senyawa PAH (Hu et al., 2018). Emisi PAH yang dihasilkan kebakaran gambut berdasarkan studi laboratorium dan analisis aerosol menunjukkan emisi PAH pada fase partikulat didominasi oleh PAH berat yang terdiri dari empat hingga enam cincin aromatik, seperti *fluoranthene*, *pyrene*, *chrysene*, *benzo[b]fluoranthene* (BbF), dan *benzo[a]pyrene* (BaP) (Nim et al., 2023; Samburova et al., 2016; Sengupta et al., 2023). Dominasi PAH berat ini mencerminkan karakteristik konsisten sumber pyrogenic yang kuat sebagaimana ditunjukkan pada berbagai eksperimen pembakaran gambut terkontrol (Hatch et al., 2015; Koss et al., 2018). Pembakaran gambut dengan menggunakan teknik Thermogravimetric Analysis - Fourier Transform Infrared Spectroscopy (TG-FTIR) juga menunjukkan peningkatan pembentukan PAH yang berkorelasi erat dengan suhu pembakaran menengah dan laju dekomposisi bahan organik gambut (Yang et al., 2016).

Proses pembakaran smouldering menghasilkan partikel berukuran kecil dengan luas permukaan yang tinggi, yang secara efektif akan mengadsorpsi PAH berat selama dan setelah pembentukan aerosol khususnya pada fraksi partikulat halus $PM_{2.5}$ dan PM_{10} (Black et al., 2016; Hatch et al., 2015). Akumulasi PAH pada fraksi partikulat halus ini meningkatkan

persistensi aerosol di atmosfer, yang berimplikasi pada potensi kemampuan transport jarak jauh dan perluasan distribusi PAH pada skala regional hingga lintas wilayah (Jayarathne et al., 2018; Kiely et al., 2020). Karakteristik emisi PAH yang dominan terikat pada partikulat halus ini menjadi penting dalam konteks kesehatan, mengingat fraksi $PM_{2.5}$ dan PM_{10} memiliki kemampuan penetrasi tinggi ke saluran pernapasan.

B. Paparan Asap Kebakaran dan Partikulat Halus ($PM_{2.5}$) sebagai Media Transport PAH

Senyawa PAH yang terabsorpsi pada atmosfer sebagai fraksi partikulat halus ($PM_{2.5}$ dan PM_{10}) berperan sebagai media utama transport lingkungan sekaligus jalur utama paparan inhalasi pada manusia (Cheruiyot et al., 2015). Studi menunjukkan bahwa PAH dengan berat molekul tinggi memiliki afinitas yang kuat terhadap aerosol karbon organik berukuran kecil, sehingga cenderung teradsorpsi pada fase partikulat dibandingkan berada dalam fase gas (Bandowe & Meusel, 2017; Chimjarn et al., 2021; Oliveira et al., 2019). PAH yang terikat pada $PM_{2.5}$ dan PM_{10} menunjukkan persistensi atmosfer yang relatif tinggi akibat rendahnya kecepatan deposisi gravitasi serta stabilitas fisikokimia aerosol halus (Cheruiyot et al., 2015). Kondisi ini memungkinkan terjadinya transport jarak jauh mengikuti dinamika atmosfer regional hingga lintas negara (Keyte et al., 2013; Yang et al., 2017; Zhang et al., 2022). Di kawasan Asia Tenggara, fenomena ini sangat menonjol selama periode kebakaran gambut di Indonesia, di mana asap

kebakaran terbukti meningkatkan konsentrasi $PM_{2.5}$ dan PAH secara signifikan di wilayah regional, termasuk Malaysia dan Singapura (Fujii et al., 2017; Payus et al., 2023; Reddington et al., 2014).

Sejumlah penelitian berbasis pengukuran lapangan dan pemodelan atmosfer menunjukkan bahwa kontribusi kebakaran gambut terhadap PAH pada $PM_{2.5}$ lebih dominan dibandingkan sumber antropogenik lainnya selama periode kabut asap, dengan karakteristik komposisi yang didominasi oleh PAH berat bersifat karsinogenik seperti *benzo[a]pyrene* dan *benzo[b]fluoranthene* (Chaisongkaew et al., 2023; Fujii et al., 2017; Kim et al., 2013). Temuan ini menegaskan peran penting $PM_{2.5}$ sebagai vektor utama distribusi PAH hasil pembakaran biomassa dan gambut. Dalam konteks paparan kesehatan manusia, $PM_{2.5}$ dan PM_{10} yang mengandung PAH memiliki implikasi serius karena ukurannya memungkinkan penetrasi hingga bronkiolus terminal dan alveoli paru.

Partikel halus tersebut meningkatkan bioavailabilitas PAH di jaringan paru-paru, memicu stres oksidatif, inflamasi, serta berkontribusi terhadap peningkatan risiko penyakit pernapasan kronis dan kanker paru melalui paparan inhalasi jangka panjang (Holme et al., 2023; Thangavel et al., 2022; Valavanidis et al., 2008). Dengan demikian, partikulat halus tidak hanya berfungsi sebagai indikator kualitas udara, tetapi juga sebagai penghubung utama antara emisi kebakaran gambut dan dampak kesehatan pernapasan pada populasi yang terpapar.

C. Dampak Paparan Asap Kebakaran terhadap Penyakit Paru dan Gangguan Respirasi

PAH merupakan kelompok senyawa organik persisten yang memiliki sifat toksik, mutagenik, dan karsinogenik, terutama PAH dengan berat molekul tinggi yang dominan dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna biomassa dan gambut (Gupta et al., 2025). Jika PAH menempel pada partikel halus seperti $PM_{2.5}$ dan PM_{10} , zat ini menjadi jauh lebih berbahaya. Ukurannya yang sangat kecil membuat partikel tersebut mudah terhirup dan mampu masuk lebih dalam hingga ke bagian bawah paru-paru. Akibatnya, PAH lebih mudah terdeposit di saluran pernapasan dan meningkatkan risiko gangguan kesehatan, baik pada sistem pernapasan maupun secara keseluruhan (sistemik). Berbagai penelitian mendukung bahwa inhalasi merupakan jalur utama paparan PAH yang terikat pada partikel, dan partikel halus memungkinkan senyawa tersebut mencapai jaringan paru yang lebih dalam (Yang et al., 2021). Partikel berukuran kecil cenderung mengandung PAH lebih tinggi karena memiliki luas permukaan yang besar untuk mengikat senyawa tersebut (Cheruiyot et al., 2015), yang menyebabkan peradangan, penyempitan otot polos saluran napas, dan bahkan berpotensi mengganggu perkembangan paru-paru (Låg et al., 2020).

Paparan PAH melalui inhalasi dikaitkan dengan berbagai gangguan paru non-kanker, terutama melalui mekanisme stres oksidatif dan inflamasi kronis (Vogel et al., 2020). Aktivasi Aryl Hydrocarbon Receptor (AhR) oleh PAH tidak hanya

memicu ekspresi sitokin proinflamasi dan enzim metabolik fase I, tetapi juga menekan aktivitas enzim antioksidan seperti glutathione S-transferase (GST) (Zimmerman et al., 2024). Penurunan aktivitas GST ini melemahkan sistem pertahanan antioksidan sel dan meningkatkan stres oksidatif pada sel epitel saluran napas kecil manusia. Dampak jangka panjang paparan PAH meliputi kerusakan epitel saluran napas, gangguan fungsi seluler, serta remodeling atau perubahan struktur jaringan paru, yang pada akhirnya dapat meningkatkan risiko terjadinya penyakit pernapasan seperti asma dan Penyakit Paru Obstruktif Kronis (PPOK) (Chiba et al., 2012). Beberapa studi epidemiologis dan eksperimental menunjukkan hubungan antara paparan PAH dengan peningkatan prevalensi asma, eksaserbasi asma, bronkitis kronis, serta penurunan fungsi paru yang ditandai dengan berkurangnya FEV₁ dan FVC (Nwaozuzu et al., 2021). Pada paparan berulang, PAH juga berkontribusi terhadap perkembangan PPOK, terutama pada populasi yang terpapar asap kebakaran secara musiman (Muliase, 2023). PAH telah lama diidentifikasi sebagai karsinogen lingkungan, dengan beberapa senyawa seperti benzo[a]pyrene diklasifikasikan sebagai karsinogen kelompok 1 oleh International Agency for Research on Cancer (IARC) (Das & Ravi, 2022). Metabolisme PAH di jaringan paru menghasilkan metabolit reaktif yang dapat membentuk adduk DNA, meningkatkan frekuensi mutasi genetik dan inisiasi kanker paru (Moorthy et al., 2015).

Pada konteks kebakaran hutan dan gambut, dominasi PAH berat pada PM_{2.5} memperkuat kekhawatiran terhadap peningkatan risiko kanker paru pada populasi yang mengalami paparan kronis kabut asap (Hasan, 2020; Wulan & Subagio, 2016). Selain sistem pernapasan, PAH yang terhirup dapat memasuki sirkulasi sistemik dan memengaruhi organ lain. Bukti ilmiah menunjukkan keterkaitan paparan PAH dengan penyakit kardiovaskular melalui mekanisme disfungsi endotel, peningkatan tekanan darah, dan inflamasi sistemik (Poursafa et al., 2017; Zanotto et al., 2024). Paparan PAH juga dikaitkan dengan gangguan metabolik, termasuk resistensi insulin dan peningkatan risiko diabetes mellitus tipe 2 (Zanotto et al., 2024).

IV. KESIMPULAN

Kebakaran hutan dan lahan gambut di Kalimantan Tengah menghasilkan emisi partikulat halus (PM_{2.5}) yang mengandung PAH dalam konsentrasi signifikan, terutama PAH berat yang bersifat persisten dan karsinogenik. Keterikatan PAH pada fraksi partikulat halus meningkatkan potensi transport atmosferik serta risiko paparan inhalasi hingga ke saluran pernapasan bagian dalam. Secara biologis, paparan PAH melalui inhalasi berkontribusi terhadap stres oksidatif, inflamasi kronis, kerusakan epitel saluran napas, dan peningkatan risiko penyakit respirasi seperti asma dan PPOK, serta berpotensi meningkatkan risiko kanker paru pada paparan jangka panjang.

Sejalan dengan fokus kajian ini, diperlukan penguatan pemantauan kualitas udara yang tidak hanya mengukur konsentrasi PM_{2.5}, tetapi juga menganalisis

komposisi kimia partikulat, khususnya kandungan PAH yang bersifat toksik dan karsinogenik. Instansi terkait perlu mengintegrasikan data paparan PAH dengan data morbiditas penyakit paru melalui sistem surveilans epidemiologis yang terpadu. Fasilitas pelayanan kesehatan di wilayah rawan kebakaran perlu meningkatkan deteksi dini dan penanganan gangguan respirasi, terutama pada kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan penderita penyakit paru kronis. Selain itu, penelitian longitudinal berbasis populasi diperlukan untuk menilai dampak jangka panjang paparan PAH terhadap risiko penyakit paru dan kanker paru di Kalimantan Tengah.

DAFTAR PUSTAKA

- Bandowe, B. A. M., & Meusel, H. (2017). Nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons (nitro-PAHs) in the environment – A review. *Science of The Total Environment*, 581–582, 237–257.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.115>
- Black, R. R., Aurell, J., Holder, A., George, I. J., Gullett, B. K., Hays, M. D., Geron, C. D., & Tabor, D. (2016). Characterization of gas and particle emissions from laboratory burns of peat. *Atmospheric Environment*, 132, 49–57.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.02.024>
- BNPB, P. (2019). *Badan Nasional Penanggulangan Bencana*. BNPB.
<https://bnpb.go.id/berita/kerugian-kebakaran-hutan-dan-lahan-sepanjang-2019-capai-rp-75-triliun>
- Chaisongkaew, P., Dejchanchaiwong, R., Inerb, M., Mahasakpan, N., Nim, N., Samae, H., Intra, P., Morris, J., Ingviya, T., Limna, T., & Tekasakul, P. (2023). *PM2.5 and chemical compositions in a naturally clean background air of Thailand's deep south, impact of transboundary haze from peatland fires and source apportionment by Principal Component Analysis*. In Review.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2528684/v1>
- Chen, C. C., Wang, Y. R., Yeh, H. Y., Lin, T. H., Huang, C. S., & Wu, C. F. (2021). Estimating monthly PM2.5 concentrations from satellite remote sensing data, meteorological variables, and land use data using ensemble statistical modeling and a random forest approach. *Environmental Pollution*, 291, 118159.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.118159>
- Cheruiyot, N. K., Lee, W.-J., Mwangi, J. K., Wang, L.-C., Lin, N.-H., Lin, Y.-C., Cao, J., Zhang, R., & Chang-Chien, G.-P. (2015). An Overview: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emissions from the Stationary and Mobile Sources and in the Ambient Air. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(7), 2730–2762.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.11.0627>
- Chiba, T., Chihara, J., & Furue, M. (2012). Role of the Arylhydrocarbon Receptor (AhR) in the Pathology of Asthma and COPD. *Journal of Allergy*, 2012, 1–8.
<https://doi.org/10.1155/2012/372384>
- Chimjarn, S., Delhomme, O., & Millet, M. (2021). Temporal Distribution and

- Gas/Particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Atmosphere of Strasbourg, France. *Atmosphere*, 12(3), 337. <https://doi.org/10.3390/atmos12030337>
- Crippa, P., Castruccio, S., Archer-Nicholls, S., Lebron, G. B., Kuwata, M., Thota, A., Sumin, S., Butt, E., Wiedinmyer, C., & Spracklen, D. V. (2016). Population exposure to hazardous air quality due to the 2015 fires in Equatorial Asia. *Scientific Reports*, 6(1), 37074. <https://doi.org/10.1038/srep37074>
- Das, D. N., & Ravi, N. (2022). Influences of polycyclic aromatic hydrocarbon on the epigenome toxicity and its applicability in human health risk assessment. *Environmental Research*, 213, 113677. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113677>
- Department of Cancer Prevention and Environment, L. B. C. (2022). *Hydrocarbures aromatiques polycycliques et effets sur la santé • Cancer Environnement*. Cancer Environnement. <https://www.cancer-environnement.fr/fiches/exposition-s-environnementales/hydrocarbures-aromatiques-polycycliques-hap/>
- Febriyana, W. (2021, July 23). *Luas Kebakaran Hutan dan Lahan Kalteng Capai 369,92 ha*. mmckalteng. <https://mmc.kalteng.go.id/berita/read/35148/luas-kebakaran-hutan-dan-lahan-kalteng-capai-369-92-ha>
- Fujii, Y., Tohno, S., Amil, N., & Latif, M. T. (2017). Quantitative assessment of source contributions to PM_{2.5} on the west coast of Peninsular Malaysia to determine the burden of Indonesian peatland fire. *Atmospheric Environment*, 171, 111-117. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.10.009>
- George, I. J., Black, R. R., Geron, C. D., Aurell, J., Hays, M. D., Preston, W. T., & Gullett, B. K. (2016). Volatile and semivolatile organic compounds in laboratory peat fire emissions. *Atmospheric Environment*, 132, 163-170. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.02.025>
- Gupta, R., Mansuri, M., Anand, P. K., Yadav, S., & Perumal, S. (2025). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Respiratory Toxicity: A Review. *International Journal of Current Science Research and Review*, 08(04). <https://doi.org/10.47191/ijcsrr/V8-i4-23>
- Harzing, A.-W. (2016, February 6). *Publish or Perish*. Harzing.Com. <https://harzing.com/resources/publish-or-perish>
- Hasan, N. Y. (2020). Senyawa Toksik Pencemar Udara: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). *Jurnal Reka Lingkungan*, 8(2), 67-77. <https://doi.org/10.26760/rekalingkungan.v8i2.67-77>
- Hatch, L. E., Luo, W., Pankow, J. F., Yokelson, R. J., Stockwell, C. E., & Barsanti, K. C. (2015). Identification and quantification of gaseous organic compounds emitted from biomass burning using two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(4), 1865-1899.

- https://doi.org/10.5194/acp-15-1865-2015
- Hayasaka, H., Usup, A., & Naito, D. (2020). New Approach Evaluating Peatland Fires in Indonesian Factors. *Remote Sensing*, 12(12), 2055. https://doi.org/10.3390/rs12122055
- Holme, J. A., Vondráček, J., Machala, M., Lagadic-Gossmann, D., Vogel, C. F. A., Le Ferrec, E., Sparfel, L., & Øvreivik, J. (2023). Lung cancer associated with combustion particles and fine particulate matter (PM_{2.5})—The roles of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and the aryl hydrocarbon receptor (AhR). *Biochemical Pharmacology*, 216, 115801. https://doi.org/10.1016/j.bcp.2023.115801
- Hu, Y., Fernandez-Anez, N., Smith, T. E. L., & Rein, G. (2018). Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes. *International Journal of Wildland Fire*, 27(5), 293–312. https://doi.org/10.1071/WF17084
- Huijnen, V., Wooster, M. J., Kaiser, J. W., Gaveau, D. L. A., Flemming, J., Parrington, M., Inness, A., Murdiyarso, D., Main, B., & Van Weele, M. (2016). Fire carbon emissions over maritime southeast Asia in 2015 largest since 1997. *Scientific Reports*, 6(1), 26886. https://doi.org/10.1038/srep26886
- Jayarathne, T., Stockwell, C. E., Gilbert, A. A., Daugherty, K., Cochrane, M. A., Ryan, K. C., Putra, E. I., Saharjo, B. H., Nurhayati, A. D., Albar, I., Yokelson, R. J., & Stone, E. A. (2018). Chemical characterization of fine particulate matter emitted by peat fires in Central Kalimantan, Indonesia, during the 2015 El Niño. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(4), 2585–2600. https://doi.org/10.5194/acp-18-2585-2018
- Keyte, I. J., Harrison, R. M., & Lammel, G. (2013). Chemical reactivity and long-range transport potential of polycyclic aromatic hydrocarbons – a review. *Chemical Society Reviews*, 42(24), 9333. https://doi.org/10.1039/c3cs60147a
- Kiely, L., Spracklen, D. V., Wiedinmyer, C., Conibear, L., Reddington, C. L., Arnold, S. R., Knote, C., Khan, M. F., Latif, M. T., Syaufina, L., & Adrianto, H. A. (2020). Air quality and health impacts of vegetation and peat fires in Equatorial Asia during 2004–2015. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094054. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9a6c
- Kim, K.-H., Jahan, S. A., Kabir, E., & Brown, R. J. C. (2013). A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environment International*, 60, 71–80. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.07.019
- Koss, A. R., Sekimoto, K., Gilman, J. B., Selimovic, V., Coggon, M. M., Zarzana, K. J., Yuan, B., Lerner, B. M., Brown, S. S., Jimenez, J. L., Krechmer, J., Roberts, J. M., Warneke, C., Yokelson, R. J., & De Gouw, J. (2018). Non-methane organic gas emissions from biomass burning: Identification, quantification, and emission factors

- from PTR-ToF during the FIREX 2016 laboratory experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(5), 3299–3319. <https://doi.org/10.5194/acp-18-3299-2018>
- Låg, M., Øvrevik, J., Refsnes, M., & Holme, J. A. (2020). Potential role of polycyclic aromatic hydrocarbons in air pollution-induced non-malignant respiratory diseases. *Respiratory Research*, 21(1), 299. <https://doi.org/10.1186/s12931-020-01563-1>
- Marques, C., Fiolet, T., Frenoy, P., Severi, G., & Mancini, F. R. (2022). Association between polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) dietary exposure and mortality risk in the E3N cohort. *Science of The Total Environment*, 840, 156626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156626>
- Moorthy, B., Chu, C., & Carlin, D. J. (2015). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: From Metabolism to Lung Cancer. *Toxicological Sciences*, 145(1), 5–15. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv040>
- Muliase, I. N. (2023). Analisis Patogenesis, Faktor Risiko, dan Pengelolaan Penyakit Paru Obstruktif Kronik: Studi Literatur. *Jurnal Sehat Indonesia (JUSINDO)*, 6(01), 249–255. <https://doi.org/10.59141/jsi.v6i01.71>
- Nim, N., Morris, J., Tekasakul, P., & Dejchanchaiwong, R. (2023). Fine and ultrafine particle emission factors and new diagnostic ratios of PAHs for peat swamp forest fires. *Environmental Pollution*, 335, 122237. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122237>
- Nwaozuzu, C. C., Partick-Iwuanyanwu, K. C., & Abah, S. O. (2021). Systematic Review of Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Obstructive Lung Disease. *Journal of Health and Pollution*, 11(31), 210903. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-11.31.210903>
- Oliveira, M., Slezakova, K., Delerue-Matos, C., Pereira, M. C., & Morais, S. (2019). Children environmental exposure to particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons and biomonitoring in school environments: A review on indoor and outdoor exposure levels, major sources and health impacts. *Environment International*, 124, 180–204. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.052>
- Payus, C., Anuar, S. I., Chee, F. P., Rumaling, M. I., & Soegianto, A. (2023). 2019 Southeast Asia Transboundary Haze and its Influence on Particulate Matter Variations: A Case Study in Kota Kinabalu, Sabah. *AIMS Environmental Science*, 10(4), 547–558. <https://doi.org/10.3934/environsci.2023031>
- Phung, V. L. H., Ueda, K., Yulianti, N., Ohashi, M., Kawasaki, M., Fatmaria, F., Arifin, S., Kahanjak, D. N., Putra S, R. A. A. H. S., Bakring, A., Kusin, K., & Naito, D. (2025). Effects of smoke haze on respiratory clinic visits in Central Kalimantan, Indonesia according to different haze characteristics. *International Journal of Epidemiology*, 54(6), dyaf169. <https://doi.org/10.1093/ije/dyaf169>

- Poursafa, P., Moosazadeh, M., Abedini, E., Hajizadeh, Y., Mansourian, M., Pourzamani, H., & Amin, M.-M. (2017). A Systematic Review on the Effects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on Cardiometabolic Impairment. *International Journal of Preventive Medicine*, 8(1). https://doi.org/10.4103/ijpvm.IJPVM_144_17
- Reddington, C. L., Yoshioka, M., Balasubramanian, R., Ridley, D., Toh, Y. Y., Arnold, S. R., & Spracklen, D. V. (2014). Contribution of vegetation and peat fires to particulate air pollution in Southeast Asia. *Environmental Research Letters*, 9(9), 094006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/9/094006>
- Reid, C. E., Brauer, M., Johnston, F. H., Jerrett, M., Balmes, J. R., & Elliott, C. T. (2016). Critical Review of Health Impacts of Wildfire Smoke Exposure. *Environmental Health Perspectives*, 124(9), 1334–1343. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409277>
- Samburova, V., Connolly, J., Gyawali, M., Yatavelli, R. L. N., Watts, A. C., Chakrabarty, R. K., Zielinska, B., Moosmüller, H., & Khlystov, A. (2016). Polycyclic aromatic hydrocarbons in biomass-burning emissions and their contribution to light absorption and aerosol toxicity. *Science of The Total Environment*, 568, 391–401. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.026>
- Sengupta, D., Samburova, V., Bhattarai, C., Moosmüller, H., & Khlystov, A. (2023). Emission factors for polycyclic aromatic hydrocarbons from laboratory biomass-burning and their chemical transformations during aging in an oxidation flow reactor. *Science of The Total Environment*, 870, 161857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161857>
- Stockwell, C. E., Jayarathne, T., Cochrane, M. A., Ryan, K. C., Putra, E. I., Saharjo, B. H., Nurhayati, A. D., Albar, I., Blake, D. R., Simpson, I. J., Stone, E. A., & Yokelson, R. J. (2016). Field measurements of trace gases and aerosols emitted by peat fires in Central Kalimantan, Indonesia, during the 2015 El Niño. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(18), 11711–11732. <https://doi.org/10.5194/acp-16-11711-2016>
- Thangavel, P., Park, D., & Lee, Y.-C. (2022). Recent Insights into Particulate Matter (PM2.5)-Mediated Toxicity in Humans: An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7511. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127511>
- Uda, S. K., Hein, L., & Atmoko, D. (2019). Assessing the health impacts of peatland fires: A case study for Central Kalimantan, Indonesia. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(30), 31315–31327. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06264-x>
- Valavanidis, A., Fiotakis, K., & Vlachogianni, T. (2008). Airborne Particulate Matter and Human Health: Toxicological Assessment and Importance of Size and Composition of Particles for Oxidative Damage and Carcinogenic Mechanisms. *Journal of*

- Environmental Science and Health, Part C*, 26(4), 339–362.
<https://doi.org/10.1080/10590500802494538>
- Vogel, C. F. A., Van Winkle, L. S., Esser, C., & Haarmann-Stemmann, T. (2020). The aryl hydrocarbon receptor as a target of environmental stressors – Implications for pollution mediated stress and inflammatory responses. *Redox Biology*, 34, 101530. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101530>
- Wulan, A. J., & Subagio, S. (2016). Efek Asap Kebakaran Hutan terhadap Gambaran Histologis Saluran Pernapasan. *Majority*, 5(3), 162–167.
- Yang, J., Chen, H., Zhao, W., & Zhou, J. (2016). Combustion kinetics and emission characteristics of peat by using TG-FTIR technique. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 124(1), 519–528. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5168-x>
- Yang, L., Zhang, H., Zhang, X., Xing, W., Wang, Y., Bai, P., Zhang, L., Hayakawa, K., Toriba, A., & Tang, N. (2021). Exposure to Atmospheric Particulate Matter-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Health Effects: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 2177. <https://doi.org/10.3390/ijerph18042177>
- Yang, W., Wang, G., & Bi, C. (2017). Analysis of Long-Range Transport Effects on PM_{2.5} during a Short Severe Haze in Beijing, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(6), 1610–1622. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.06.0220>
- Zaccone, C., Rein, G., D’Orazio, V., Hadden, R. M., Belcher, C. M., & Miano, T. M. (2014). Smouldering fire signatures in peat and their implications for palaeoenvironmental reconstructions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 137, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.04.018>
- Zanotto, T. M., Gonçalves, A. E. D. S. S., & Saad, M. J. A. (2024). Pulmonary hypertension and insulin resistance: A mechanistic overview. *Frontiers in Endocrinology*, 14, 1283233. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1283233>
- Zelinkova, Z., & Wenzl, T. (2015). The Occurrence of 16 EPA PAHs in Food – A Review. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 35(2–4), 248–284. <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.918550>
- Zhang, H., Zhang, X., Wang, Y., Bai, P., Hayakawa, K., Zhang, L., & Tang, N. (2022). Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Open Burning and Stove Burning of Biomass: A Brief Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), 3944. <https://doi.org/10.3390/ijerph19073944>
- Zimmerman, E., Zhang, M. A., Helms, M. N., & Paine, R. (2024). Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) activation of AhR inhibits glutathione S-transferase (GST) activity in primary human small airway epithelial cells (hSAECs).

Physiology, 39(S1), 1897.
<https://doi.org/10.1152/physiol.2024.39.S1.1897>