

Identifikasi Material *Clogging* Pada Simpang Jalan Akibat Polutan Kendaraan Berdasarkan Hasil Pengujian XRF

Muhammad Ichsanul Akbar Natsir¹, Taqia Rahman^{1*}, Latif Budi Suparma¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: taqia.rahman@ugm.ac.id

INTISARI

Porous Asphalt (PA) merupakan material perkerasan berpori dengan rongga yang memungkinkan air dapat masuk ke dalam lapisan jalan. Dengan karakteristik tersebut, perkerasan PA memiliki keunggulan dalam mengurangi limpasan air di permukaan, menurunkan suhu permukaan jalan dan mengurangi kebisingan. Namun, material perkerasan ini juga rentan terhadap sumbatan (*clogging*). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi jenis polutan kendaraan yang menyebabkan *clogging* pada PA dengan menganalisis sumber polutan di jalan. Pengambilan sampel dilakukan dengan menggunakan vakum penyedot karena lebih efektif mengumpulkan sedimen dan tidak merusak perkerasan. Metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) digunakan untuk menganalisis unsur kimia sampel secara kualitatif dan semi-kuantitatif, guna menentukan konsentrasi material *clogging*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa akumulasi sedimen terdiri dari berbagai sumber seperti emisi pabrik atau industri, aktivitas geogenik, polusi dari sumber antropogenik, polutan kendaraan, dan partikel dari material konstruksi. Polutan kendaraan terakumulasi di permukaan jalan karena pergerakan lalu lintas, angin, dan hujan. Al dan Fe merupakan unsur dengan konsentrasi tertinggi, berasal dari keausan komponen mesin. Jejak logam seperti Mn, Zn, Sr, dan Ba menunjukkan kontribusi dari pelumas dan bahan bakar. Sampel 04, yang diambil dari jalan dengan permukaan kasar (*ravelling*), menunjukkan kadar polutan tertinggi, yang menjadikannya representatif sebagai material *clogging* dalam pengujian permeabilitas PA. Konsentrasi polutan ini lebih tinggi di lokasi dengan aktivitas perlambatan dan akselerasi mendadak, terutama pada musim kemarau.

Kata kunci: *Clogging*, Polutan kendaraan, XRF, *porous asphalt*, *permeable pavement*

1 PENDAHULUAN

Permasalahan perkotaan seperti genangan air di jalan, tingkat kebisingan tinggi, suhu yang meningkat, dan permukaan jalan yang licin sering kali mempengaruhi kualitas lingkungan dan kenyamanan masyarakat (Rahman *et al.*, 2023). *Porous Asphalt* (PA) menjadi solusi untuk mengatasi genangan air karena memiliki ukuran agregat dan pori-pori yang lebih besar (15-35%), sehingga mempunyai *drainage performance* yang baik (Chen *et al.*, 2015; Gundrathi *et al.*, 2023). Permasalahan utama pada PA adalah *clogging*, yaitu penyumbatan pori-porinya yang menyebabkan penurunan permeabilitas. Penurunan permeabilitas ini diperparah oleh deformasi pada PA, terutama pada suhu tinggi sekitar 60°C, serta disebabkan oleh material dengan ukuran partikel tertentu (Chen *et al.*, 2015). Penyumbatan pori-pori ini dapat dibagi menjadi tiga jenis utama yaitu *physical clogging* akibat endapan partikel padat, *bioclogging* akibat proses biologis, dan *chemical clogging* akibat bahan kimiawi (Mishra *et al.*, 2013).

Chemical clogging pada PA salah satunya berasal dari aktivitas kendaraan seperti debu ban kendaraan, debu rem kendaraan, tetesan oli, bahan kimiawi lain dari kendaraan, serta emisi gas buang kendaraan (Loganathan *et al.*, 2013). Penelitian oleh Markiewicz *et al.* (2017) mengidentifikasi bahwa polutan kendaraan yang dominan adalah emisi gas buang, keausan ban, dan tetesan oli yang jatuh pada permukaan perkerasan. Pada persimpangan jalan, polutan jalan raya meningkat yang diakibatkan oleh kepadatan lalu lintas serta kendaraan dalam posisi *idle*. Polutan ini terakumulasi pada pori-pori PA melalui proses adsorpsi, membentuk kerak yang menyumbat pori dan mengubah sifat kimia permukaan PA, sehingga meningkatkan kerentanan terhadap *clogging* (Chen *et al.*, 2022). Saat terjadi hujan, polutan kendaraan tercuci ke dalam sistem drainase PA dan mengendap, membentuk lapisan sedimen yang mengurangi efektivitas drainase permukaan serta menyebabkan degradasi material PA (Ma *et al.*, 2019). Penelitian ini mengkaji mengenai kadar polutan kendaraan pada daerah simpang yang berpotensi sebagai material *clogging* pada *Porous Asphalt*.

2 METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi jenis polutan kendaraan yang menyebabkan *clogging*, dengan menganalisis sumber polutan yang teridentifikasi di jalan. Polutan kendaraan diidentifikasi menggunakan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) dengan menganalisis unsur kimia sampel secara kualitatif. Setelah komposisi kimia dari

polutan diketahui, analisis kadar polutan kendaraan secara semi-kuantitatif dalam sampel dilakukan untuk menentukan konsentrasi material *clogging*. Hasil ini dapat digunakan dalam pengujian permeabilitas untuk mengevaluasi respons PA terhadap *clogging* yang diakibatkan oleh polutan kendaraan.

2.1 Lokasi Pengambilan Sampel

Pemilihan lokasi pengambilan sampel *clogging* dilakukan pada jalan raya dengan lalu lintas yang padat. Hal tersebut didasarkan oleh penelitian Kayhanian et al. (2007), yang menjelaskan bahwa wilayah perkotaan dengan lalu lintas padat menghasilkan polutan kendaraan lebih tinggi jika dibandingkan dengan daerah rural. Simpang jalan dipilih karena berdasarkan penelitian oleh Loganathan et al. (2013), ketika kendaraan melambat atau berhenti seperti pada lampu lalu lintas, bundaran dan persimpangan tingkat akumulasi logam meningkat delapan kali lipat.



Keterangan:

1. Sampel 01 : Simpang Jalan Lampu Merah Monjali;
2. Sampel 02 : Simpang UTY Kronggahan;
3. Sampel 03 : Simpang Tugu Jogja;
4. Sampel 04 : Simpang Gramedia.

Ringroad : Sampel 01 dan 02

Non-ringroad : Sampel 03 dan 04

Jenis Perkerasan : Aspal

Gambar 1. Titik Pengambilan Sampel Polutan Kendaraan (Google Earth, 2024)

2.2 Metode Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan dengan metode vakum dengan memastikan hanya partikel halus yang tertangkap dan tersaring. Area pengambilan sampel terlebih dahulu dibagi menjadi tiga dengan masing - masing luasan 1 m². Kondisi jalan dipastikan dalam kondisi kering untuk memudahkan alat vakum menarik partikel sedimen yang terdeposit. Pengambilan sampel dengan vakum dilakukan proses pengambilan sampel lebih cepat, serta tidak merusak perkerasan. Gambar 2 menunjukkan bagaimana metode pengambilan dilakukan.



Gambar 2. Proses Pengambilan dan Analisis Sampel Polutan Kendaraan.

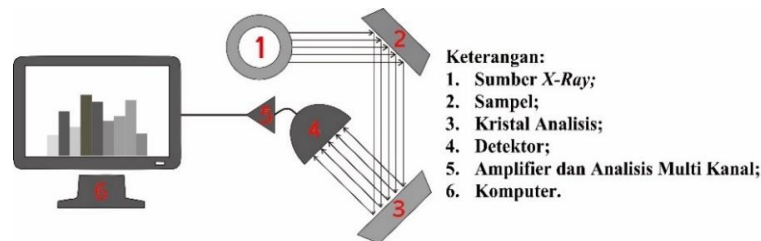
Titik pengambilan sampel dilakukan berdasarkan lokasi pengambilan yang telah ditentukan sebelumnya. Sampel yang telah ditimbang kemudian dibawa ke LPPT UGM untuk dilakukan pengujian dengan metode XRF.

2.3 Pengujian Sampel dengan Metode XRF

Pengujian dengan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) merupakan teknik analisis unsur kimia kualitatif. Dengan menggunakan kristal analitik yang mempunyai jarak antar bidang atom yang tetap, sinar X yang dipancarkan dari permukaan sampel dapat terdeteksi dengan akurat berdasarkan Hukum Difraksi Bragg (Nasrazadani and Hassani, 2016). Ilustrasi mengenai prinsip kerja alat XRF seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Karakteristik sinar X sangat mempengaruhi atom dekat permukaan, sehingga XRF dominan menganalisis lapisan permukaan luar, meskipun kedalaman analisis bergantung pada massa atom unsur yang ada. Perbedaan kedalaman analisis ini memberikan informasi tentang kandungan mineral atau oksida dalam material yang diuji (Goodman et

al., 2015). Kuang et al. (2004) menjelaskan bahwa konsentrasi unsur dalam sampel dapat diukur menggunakan teknik fluoresensi sinar-X (XRF). Salah satu metode yang digunakan adalah *Energy-Dispersive X-ray Fluorescence* (EDXRF), yang dapat menganalisis konsentrasi unsur-unsur berat seperti Mangan (Mn), Besi (Fe), Tembaga (Cu), Seng (Zn), Timbal (Pb), dll. EDXRF memiliki keunggulan dengan batas deteksi rendah untuk sebagian besar logam berat dan kemampuan analisis simultan yang cepat. Bahkan pada konsentrasi rendah, jejak logam dari polutan kendaraan tetap dapat teridentifikasi karena sifatnya yang persisten di lingkungan dan cenderung terakumulasi. Tabel 1 menyajikan rincian jejak logam polutan kendaraan berdasarkan sumbernya.



Gambar 3. Cara Kerja Pengujian XRF

Tabel 1. Sumber Partikel Polutan Kendaraan

Sumber	Komponen Unsur Penyusun
Kearausan mesin, ban, dan lapisan rem	Fe, Al, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, Cd, Ni
Pelumas	Zn, B, Mn, Ni
Bahan bakar	Pb, Mn, Ba, Sr, S

Sumber: Kuang et al. (2004); Gilbert and Clausen (2006); Kayhanian et al. (2012); Ulrich et al. (2012); Agarwal et al. (2015); Ahmad et al. (2017).

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

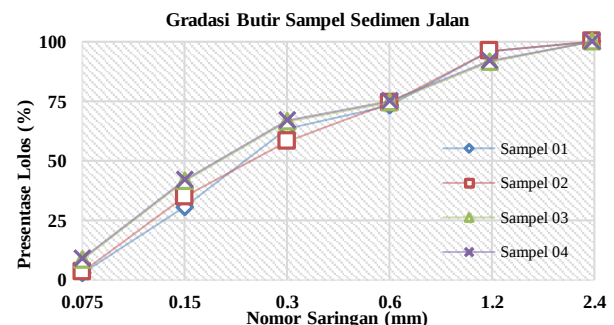
3.1 Ukuran fraksi Sampel pada Simpang Jalan

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur yang ada pada sampel polutan. Metode uji yang digunakan adalah ED-XRF Kualitatif (*Fundamental Parameter/ Standardless*). Teknik pengambilan sampel menggunakan mesin vakum karena tidak merusak sampel dan efektif dalam penggunaannya. Pada simpang jalan dengan lampu lalu lintas polutan kendaraan terakumulasi lebih banyak, dikarenakan kendaraan cenderung dalam posisi *idle*. Faktor tersebut meningkatkan suhu dan emisi knalpot kendaraan, sehingga abrasi komponen kendaraan serta interaksi ban terhadap permukaan jalan menambah polutan yang terakumulasi (Loganathan et al., 2013). Akumulasi polutan juga lebih banyak ditemukan pada permukaan jalan yang mengalami *revelling* atau permukaannya kasar (Ahmad et al., 2017). Pergerakan lalu lintas, angin, dan air hujan membuat akumulasi polutan tersebut terangkut ke dalam pori atau sistem drainase perkerasan. Seiring waktu partikel-partikel tersebut menyebabkan *clogging* dan mengurangi laju infiltrasi (Kia et al., 2017). Sampel yang diperoleh kemudian dianalisis ukuran butirnya menggunakan saringan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Tabel 2. Peresentase Ukuran Butir Sampel

Saringan (mm)	Persentase Lolos (%)			
	Sampel 01	Sampel 02	Sampel 03	Sampel 04
2,36	100,00	100,00	100,00	100,00
1,18	96,00	96,06	91,49	92,00
0,6	73,15	74,27	74,49	75,04
0,3	63,49	58,14	66,48	67,03
0,15	30,58	34,90	41,48	42,03
0,075	2,79	3,34	8,48	9,00

Fraksi Halus: <0,0075 mm

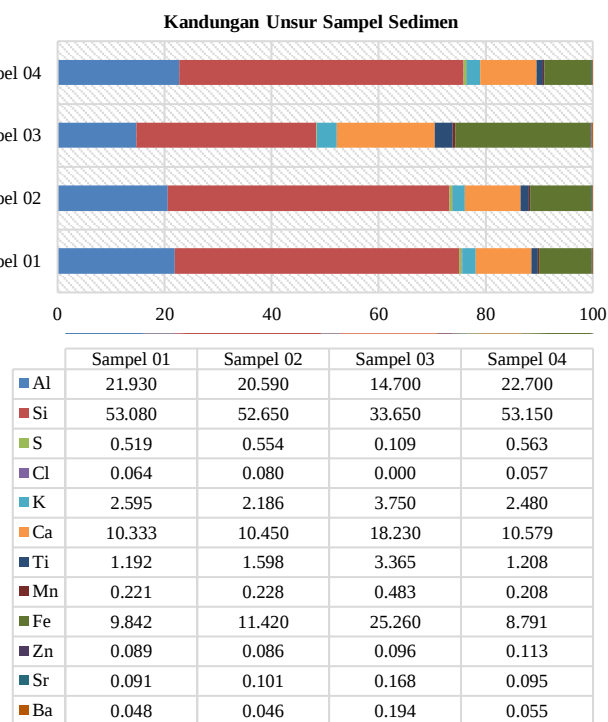


Gambar 4. Gradasi Ukuran Butir Keseluruhan Sampel

Berdasarkan Gambar 4 terlihat bahwa gradasi ukuran pada sampel yang diperoleh didominasi oleh fraksi kasar (0,075–0,6 mm), serta terdapat fraksi halus (<0,075 mm). Polutan akibat keausan mesin, ban dan lapisan rem terdeposit pada fraksi kasar, sedangkan polutan akibat bahan bakar dan pelumas terdeposit pada fraksi yang lebih halus. Fraksi kasar biasanya mengandung polutan sekitar 38–57% terhadap berat total sampel, sedangkan fraksi halus mengandung sekitar 7–10% dari total sampel (Dong and Lee, 2009; Duong and Lee, 2011).

3.2 Hasil Pengujian Sampel dengan metode XRF

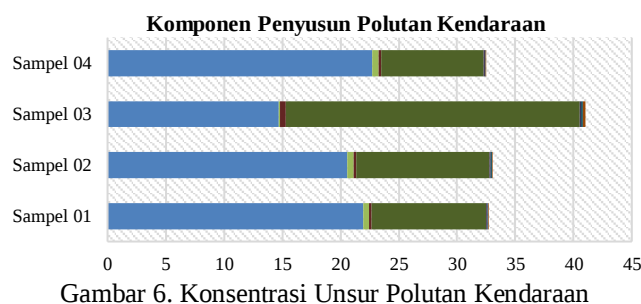
Hasil pengujian XRF sampel sedimen pada simpang jalan dapat dilihat pada Gambar 5. Unsur-unsur yang terdeteksi yaitu Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Sr, dan Ba yang merupakan hasil akumulasi dari berbagai sumber. Loganathan *et al.* (2013) menjelaskan bahwa sumber konsentrasi tersebut dapat diidentifikasi berdasarkan penelitian sebelumnya (Tabel 1) yang menjelaskan mengenai keberadaan unsur-unsur pada sumber polutan kendaraan, pengambilan langsung sampel pada lokasi jalan raya atau simpang, serta melakukan analisis statistik mengenai koefisien unsur dari sumber yang sama. Dari hasil korelasi tersebut, didapatkan sumber polutan kendaraan berdasarkan unsur penyusunnya seperti pada Tabel 3.



Gambar 5. Analisis XRF Kandungan Sampel

Tabel 3. Unsur Penyusun Sumber Polutan Kendaraan

Unsur Penyusun	Sumber
Al, Fe	Kearsan mesin, ban, dan lapisan rem
S, Sr, Ba	Bahan bakar
Mn, Zn	Pelumas



Gambar 6. Konsentrasi Unsur Polutan Kendaraan

Tabel 4. Kadar (mass%) Polutan Kendaraan Pada Sampel

Sumber Polutan Kendaraan	Sampel 01	Sampel 02	Sampel 03	Sampel 04	Rata-Rata
Kearsan mesin, ban, dan lapisan rem	31,772	32,010	39,960	31,491	33,808
Bahan bakar	0,658	0,701	0,471	0,713	0,636
Pelumas	0,310	0,314	0,579	0,321	0,381

Dari Tabel 3 diambil pernyataan bahwa sumber polutan kendaraan akibat Kearsan mesin, ban, dan lapisan rem, unsur penyusunnya adalah Al, dan Fe. Sumber polutan kendaraan akibat bahan bakar adalah S, Sr, dan Ba. Sumber yang berasal dari pelumas kendaraan adalah Mn dan Zn. Berdasarkan Tabel 4 dinyatakan bahwa Al dan Fe adalah unsur dengan konsentrasi tertinggi pada tiap sampel. Unsur-unsur lain seperti S, Mn, Zn, Sr, dan Ba hadir dengan konsentrasi rendah. Konsentrasi unsur ada dapat mencirikan sumber dari polutan (Loganathan *et al.*, 2013), namun dalam penentuannya beberapa unsur dapat mencirikan lebih dari satu sumber polutan. Dapat dijelaskan bahwa sumber polutan akibat kearsan mesin, ban, dan lapisan rem merupakan sumber utama dan konsentrasi paling banyak (Rata-rata 33,808% dari berat sampel). Hal tersebut sejalan dengan penelitian yang menjelaskan bahwa kearsan mesin, ban dan lapisan rem terdeposit cukup tinggi (38–57%) dari total sampel polutan yang ada di jalan raya dan terdapat pada fraksi ukuran kasar (Tabel 2). Sumber polutan kendaraan akibat bahan bakar dan pelumas rerata konsentrasinya berdasarkan unsur penyusunnya adalah 0,636% dan 0,381%. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa kedua sumber tersebut hadir dan terkonsentrasi pada partikel halus. Konsentrasi rendah tersebut juga sesuai dengan penelitian (Loganathan *et al.*, 2013) bahwa polutan akibat emisi bahan bakar dan pelumas hadir dalam jejak logam (konsentrasi logam rendah). Konsentrasi kedua sumber tersebut terdapat pada partikel yang lebih halus dan biasanya lebih tinggi dari partikel yang lebih kasar. Namun jika melihat berat sampel secara keseluruhan konsentrasi partikel yang lebih halus hanya sekitar 7–10% dari total sampel (Tabel 2).

3.3 Kadar Polutan Kendaraan pada Material Clogging

Polutan kendaraan terakumulasi di permukaan jalan karena pergerakan lalu lintas, angin, dan air hujan. Saat hujan, akumulasi polutan cenderung lebih rendah karena polutan kendaraan tercuci oleh aliran air. Kepadatan lalu lintas dan peningkatan kecepatan kendaraan juga berkontribusi terhadap konsentrasi polutan, dengan kecepatan yang lebih tinggi memberikan dampak lebih signifikan. Tabel 1, polutan ini bersumber dari kearsan mesin, minyak pelumas, dan bahan bakar. Fokus penelitian ini adalah mengukur kadar polutan kendaraan melalui analisis kuantitatif unsur-unsur dalam sampel, yang diidentifikasi melalui pengujian XRF seperti pada.

Tabel 5. Perbandingan Kadar Polutan terhadap Sampel

Kode Sampel	Massa Sampel (g)	Massa Polutan (g)	Kadar (mass%)
Sampel 01 (<i>ringroad</i>)	40,45	13,24	32,74
Sampel 02 (<i>ringroad</i>)	65,21	21,54	33,03
Sampel 03 (<i>non-ringroad</i>)	92,58	37,97	41,01
Sampel 04 (<i>non-ringroad</i>)	80,37	26,14	32,53
Rata-rata	69,65	24,26	34,83

Sampel 01 dan 02 diambil dari ruas jalan *ringroad* di wilayah Sleman, DIY yang merupakan bagian dari jalan nasional dengan permukaan perkerasan yang halus. Sebaliknya, sampel 03 dan 04 dikumpulkan dari ruas jalan *non-ringroad* dengan permukaan kasar yang mengalami *ravelling*. Sampel 03 memiliki rasio polutan terhadap berat sampel tertinggi di antara semua sampel. Kadar pada sampel 03 dapat dijadikan material *clogging* pada pengujian permeabilitas PA karena mewakili kondisi ekstrem dalam penumpukan polutan. Ruas jalan dengan permukaan kasar (*ravelling*), cenderung menahan dan mengakumulasi lebih banyak polutan. Polutan kendaraan dalam sampel menunjukkan kombinasi antara abrasi komponen kendaraan dan emisi bahan bakar, yang relevan untuk mempelajari dampak *clogging* pada PA. Lokasi pengambilan sampel di persimpangan dengan lampu lalu lintas—tempat aktivitas perlambatan dan akselerasi mendadak sering terjadi—juga memperparah penumpukan polutan akibat peningkatan suhu, asap knalpot, dan abrasi mekanis. Selain itu, faktor cuaca memperburuk akumulasi polutan di permukaan jalan selama musim kemarau, ketika polutan tidak tercuci oleh hujan. Dengan demikian, sampel 03 dapat digunakan sebagai kadar polutan kendaraan sebagai material *clogging*.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa pada sedimen jalan terdapat sumber, salah satunya polutan kendaraan. Sumber akibat polutan kendaraan diidentifikasi dengan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) dengan pendekatan pada studi terdahulu, pengambilan sampel spesifik pada simpang jalan, serta korelasi nilai kandungan unsur. Polutan kendaraan penyebab *clogging* pada simpang jalan yang teridentifikasi adalah unsur Al dan Fe bersumber dari keausan mesin, roda, dan rem. Unsur S, Sr, dan Ba berasal dari emisi bahan bakar. Serta Zn dan Mn bersumber dari pelumas kendaraan. Fraksi kasar sampel polutan (0,075 - 0,6 mm) merupakan keausan mesin, roda dan rem sedangkan fraksi halus (<0,075 mm) merupakan emisi bahan bakar dan pelumas kendaraan. Berat sampel yang terkumpul berbeda-beda namun polutan kendaraan terdeteksi dengan konsentrasi signifikan pada tiap sampel sedimen jalan. Sampel 03 menunjukkan rasio polutan tertinggi terhadap berat sampel, yang dapat dijadikan sebagai material *clogging* pada pengujian permeabilitas untuk mengevaluasi *drainage performance* pada *Porous Asphalt*. Faktor-faktor seperti kepadatan lalu lintas, aktivitas akselerasi dan perlambatan di persimpangan, serta kondisi permukaan jalan yang mengalami *ravelling* berkontribusi besar terhadap akumulasi polutan, khususnya pada permukaan kasar yang lebih mudah menangkap dan menahan partikel polutan. Selain itu, konsentrasi polutan meningkat saat kondisi kering namun menurun saat hujan karena partikel tercuci oleh limpasan air.

REFERENSI

- Agarwal, A.K., Gupta, T., Bothra, P. and Shukla, P.C. (2015), "Emission profiling of diesel and gasoline cars at a city traffic junction", *Particuology*, Vol. 18, pp. 186–193, doi: 10.1016/j.partic.2014.06.008.
- Ahmad, K.A., Abdullah, M.E., Abdul Hassan, N., Daura, H.A. and Ambak, K. (2017), "A review of using porous asphalt pavement as an alternative to conventional pavement in stormwater treatment", *World Journal of Engineering*, Vol. 14 No. 5, pp. 355–362, doi: 10.1108/WJE-09-2016-0071.
- Chen, J., Li, H., Huang, X. and Wu, J. (2015), "Permeability Loss of Open-Graded Friction Course Mixtures due to Deformation-Related and Particle-Related Clogging: Understanding from a Laboratory Investigation", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27 No. 11, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001282.
- Chen, S., Chen, L., Liu, X., Pan, Y., Zhou, F., Guo, J., Huang, T., *et al.* (2022), "Unexpected nitrogen flow and water quality change due to varying atmospheric deposition", *Journal of Hydrology*, Vol. 609, p. 127679, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127679.
- Dong, T.T.T. and Lee, B.-K. (2009), "Characteristics, toxicity, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Ulsan, Korea", *Chemosphere*, Vol. 74 No. 9, pp. 1245–1253, doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.11.035.

- Duong, T.T.T. and Lee, B.-K. (2011), “Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 92 No. 3, pp. 554–562, doi: 10.1016/j.jenvman.2010.09.010.
- Gilbert, J.K. and Clausen, J.C. (2006), “Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut”, *Water Research*, Vol. 40 No. 4, pp. 826–832, doi: 10.1016/j.watres.2005.12.006.
- Goodman, P.D., Skipper, R. and Aitken, N. (2015), “Modern instruments for characterizing degradation in electrical and electronic equipment”, *Reliability Characterisation of Electrical and Electronic Systems*, Elsevier, pp. 43–62, doi: 10.1016/B978-1-78242-221-1.00004-6.
- Google Earth. (2024), “Titik Pengambilan Sampel”, <https://Earth.Google.Com/Web/@-7.56402895,110.36655697,-48594.73075173a,61245.97191461d,35y,0.00080566h,24.69012351t,0r/Data=CgRCAggBOgMKATBCAggASgOI> ARAA, November.
- Gundrathi, N.G., Swetha, K., Sriharsha, G., Sabitha, G. and Ruchitha, G. (2023), “Feasibility study and mix design of porous asphalt with waste plastics”, *Materials Today: Proceedings*, doi: 10.1016/j.matpr.2023.02.320.
- Kayhanian, M., Anderson, D., Harvey, J.T., Jones, D. and Muhunthan, B. (2012), “Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 95 No. 1, pp. 114–123, doi: 10.1016/j.jenvman.2011.09.021.
- Kayhanian, M., Suverkropp, C., Ruby, A. and Tsay, K. (2007), “Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 85 No. 2, pp. 279–295, doi: 10.1016/j.jenvman.2006.09.024.
- Kia, A., Wong, H.S. and Cheeseman, C.R. (2017), “Clogging in permeable concrete: A review”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 193, pp. 221–233, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.02.018.
- Kuang, C., Neumann, T., Norra, S. and Stüben, D. (2004), “Land Use-related Chemical Composition of Street Sediments in Beijing”, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 11 No. 2, pp. 73–83, doi: 10.1007/BF02979706.
- Loganathan, P., Vigneswaran, S. and Kandasamy, J. (2013), “Road-Deposited Sediment Pollutants: A Critical Review of their Characteristics, Source Apportionment, and Management”, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 43 No. 13, pp. 1315–1348, doi: 10.1080/10643389.2011.644222.
- Ma, Y., He, W., Zhao, H., Zhao, J., Wu, X., Wu, W., Li, X., *et al.* (2019), “Influence of Low Impact Development practices on urban diffuse pollutant transport process at catchment scale”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 213, pp. 357–364, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.198.
- Markiewicz, A., Björklund, K., Eriksson, E., Kalmykova, Y., Strömvall, A.-M. and Siopi, A. (2017), “Emissions of organic pollutants from traffic and roads: Priority pollutants selection and substance flow analysis”, *Science of The Total Environment*, Vol. 580, pp. 1162–1174, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.074.
- Mishra, K., Zhuge, Y. and Karunasena, W. (2013), *CLOGGING MECHANISM OF PERMEABLE CONCRETE: A REVIEW*.
- Nasrazadani, S. and Hassani, S. (2016), “Modern analytical techniques in failure analysis of aerospace, chemical, and oil and gas industries”, *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry*, Elsevier, pp. 39–54, doi: 10.1016/B978-0-08-100117-2.00010-8.
- Rahman, T., Zudhy Irawan, M., Noor Tajudin, A., Rizka Fahmi Amrozi, M. and Widyatmoko, I. (2023), “Knowledge mapping of cool pavement technologies for urban heat island Mitigation: A Systematic bibliometric analysis”, *Energy and Buildings*, Vol. 291, p. 113133, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113133.
- Ulrich, A., Wichser, A., Hess, A., Heeb, N. V., Emmenegger, L., Czerwiński, J., Kasper, M., *et al.* (2012), “Particle and metal emissions of diesel and gasoline engines-Are particle filters appropriate measures ?”