

Analisis Kadar *Biological Clogging Materials* pada Jalan Raya dan Jalan Perkotaan

Estu Hanifan¹, Taqia Rahman^{1*}, Latif Budi Suparma¹

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

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

INTISARI

Aspal porus merupakan salah satu alternatif bahan permukaan jalan yang dapat mengurangi limpasan air di permukaan, memberikan suhu permukaan yang lebih rendah dan mengurangi kebisingan. Akan tetapi bahan tersebut memiliki kendala lain terkait sumbatan pada pori (*clogging*). Selain karena material endapan, sumbatan juga dapat disebabkan karena kandungan material biologis yang terdapat di jalan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kadar material biologis sebagai bahan penyumbat (*clogging material*) yang ada di jalan, terutama pada jalan raya dan jalan perkotaan. Sampel *clogging material* diambil di beberapa lokasi jalan dengan keberadaan vegetasi di tipikal jalan perkotaan dan antar kota. Sampel *clogging material* pasir berbutir digunakan sebagai sampel pembanding. Untuk mengetahui keberadaan material biologis, metode pengujian kadar c organik dengan gravimetri dilakukan. Hasil penelitian menunjukkan volume material endapan pada jalan raya lebih besar dibandingkan jalan perkotaan, tetapi kandungan material organik pada jalan perkotaan lebih banyak dibandingkan jalan raya. Hal tersebut dapat disebabkan karena material organik lebih banyak tertinggal dan mengendap pada badan jalan karena volume lalu lintas pada jalan perkotaan yang lebih rendah dibandingkan jalan raya.

Kata kunci: *biological clogging materials*, kadar c organik, gravimetri, jalan raya, jalan perkotaan

1 PENDAHULUAN

Perencanaan terkait jalan raya sangat berpengaruh terhadap usia layan dari jalan tersebut. Akan tetapi permasalahan yang masih sering terjadi pada jalan raya adalah adanya genangan air saat hujan yang dapat menyebabkan kecelakaan lalu lintas. Salah satu jenis perkerasan yang dapat mengatasi permasalahan terkait genangan air saat hujan adalah aspal porus. Hal tersebut dibuktikan oleh penelitian yang dilakukan oleh Elvik dan Greibe (2005) yang menjelaskan bahwa aspal porus dapat mengurangi genangan pada permukaan jalan disebabkan karena rongga pori yang besar sehingga air dapat melewati pori dalam campuran. Pengurangan genangan serta percikan air sangat signifikan hingga mencapai 95%. Dari sisi keselamatan, Zhang dkk. (2020) menjelaskan dengan adanya pengurangan genangan air di permukaan dapat mengurangi tingkat kecelakaan akibat kondisi hujan sebesar 57% pada kurun waktu 5 tahun setelah konstruksi. Selain itu, berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa aspal porus dapat memberikan suhu permukaan yang lebih rendah dan mengurangi kebisingan (Rahman dkk., 2023).

Terlepas dari berbagai keunggulan, aspal porus juga memiliki berbagai kendala diantaranya *clogging* atau sumbatan pada pori yang dapat mengurangi permeabilitas aspal porus. Chen dkk. (2015) menjelaskan bahwa jenis *clogging* yang terjadi pada aspal porus yaitu karena deformasi akibat beban lalu lintas serta karena sumbatan partikel. Partikel yang dapat menyumbat pori dibedakan berdasarkan jenisnya yaitu partikel fisik, zat kimia, serta material biologis. Coupe dkk. (2003) menyebutkan bahwa aspal porus dapat menangkap polutan jalan raya hingga 98,7%. Kandungan polutan tersebut disampaikan oleh Scholz dan Grabowiecki (2007) berupa sedimen dan endapan lain, limbah organik, minyak tumpahan bahan bakar dan oli, polutan terlarut (pestisida, nitrogen, herbisida, dan sebagainya) serta patogen. Limbah organik pada jalan raya tersebut dapat menyebabkan *biological clogging*. *Biological clogging* menurut Pintelon dkk. (2012) adalah pengurangan permeabilitas aspal porus akibat reaksi biologis yang menghasilkan biofilm pada permukaan agregat. *Bioclogging* dapat juga disebabkan oleh alga, bakteri, dan bahan organik lain di sekitar perkerasan (Mishra dkk., 2013). Wang dkk. (2020) menjelaskan bahwa permeabilitas aspal porus dapat berkurang seiring dengan jumlah bakteri serta *nutrient* yang terkandung dalam sampel material. Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, dapat dilakukan penelitian untuk mengetahui seberapa banyak kandungan material biologis yang terdapat pada jalan khususnya pada jalan raya dan jalan perkotaan yang berpotensi menimbulkan *clogging* apabila digunakan jenis aspal porus pada jalan raya dan jalan perkotaan.

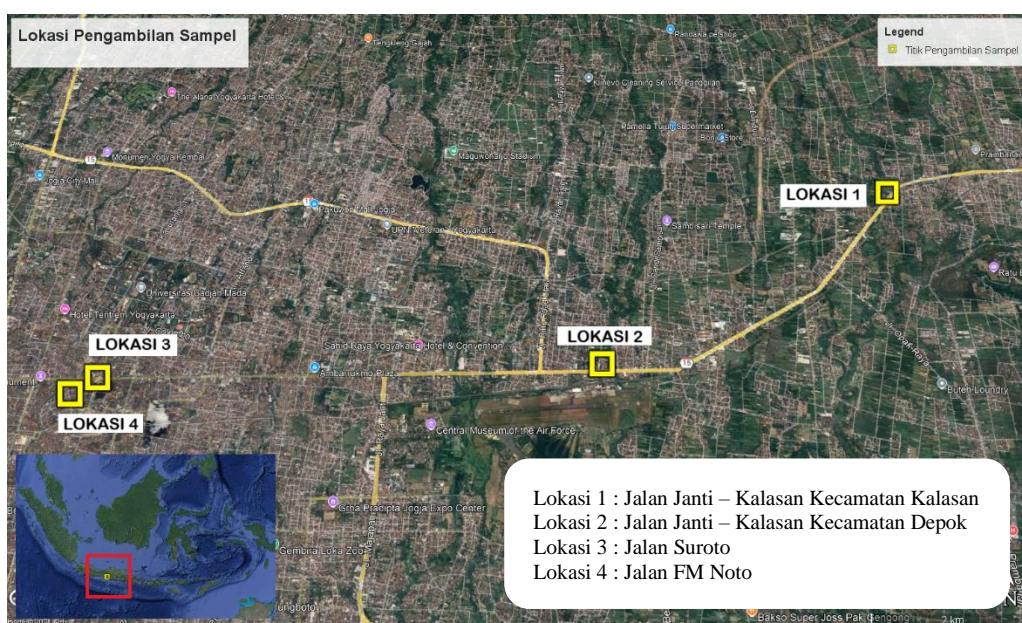
2 METODE PENELITIAN

Penelitian terkait *biological clogging materials* yang terdapat di jalan raya dan jalan perkotaan dibagi menjadi dua tahap. Tahap pertama adalah pengumpulan material di jalan raya dan jalan perkotaan. Sedangkan tahap kedua adalah pengujian material.

2.1 Penentuan Lokasi

Dalam menentukan lokasi, digunakan dasar hasil penelitian ilmiah dari beberapa peneliti terdahulu. Henderson dan Tighe (2012) menjelaskan bahwa permeabilitas pada jalan raya lebih rendah dibandingkan dengan area parkir. Hal ini menunjukkan bahwa kadar polutan pada jalan raya lebih tinggi dibandingkan dengan kadar polutan di area parkir. Penelitian yang dilakukan oleh Kayhanian dkk. (2007) menyebutkan bahwa kadar polutan pada jalan raya lebih tinggi dibandingkan dengan polutan pada jalan lainnya. Kayhanian dkk. (2012) dalam penelitiannya yang lain menyebutkan bahwa salah satu faktor yang berpengaruh terhadap permeabilitas adalah adanya vegetasi di sekitar jalan tersebut.

Berdasarkan beberapa hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa jalan raya dengan vegetasi memiliki potensi yang lebih besar untuk terjadinya *clogging*. Lokasi jalan raya dengan vegetasi di sekitarnya dipilih ruas Jalan Nasional Janti – Kalasan pada segmen Kecamatan Kalasan dan Kecamatan Depok. Sebagai perbandingan, diambil sampel pada jalan perkotaan seperti Jalan Suroto dan Jalan Faridan Muridan Noto. Sedangkan data kontrol yang digunakan adalah material sampel dari PT. SKS untuk diketahui kadar organiknya. Lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi pengambilan sampel material *clogging*

2.2 Pengumpulan Sampel Material

Pengambilan sampel material dilakukan menggunakan alat pengisap debu (*vacuum*) serta sapu kecil. Hal ini sama seperti yang dilakukan oleh Welker dkk. (2013) dalam mengumpulkan sampel material pada aspal porus di area parkir mobil. Proses pengambilan sampel material dijelaskan sebagai berikut.

- Pada jalan yang akan diambil sampel materialnya diberi penanda dengan ukuran 1 x 1 meter. Hal ini untuk memudahkan luasan yang akan diambil sampel materialnya.
- Pengambilan sampel dilakukan pada 3 titik yang berbeda pada setiap jalannya.
- Pengambilan sampel dilakukan menggunakan alat pengisap debu (*vacuum*) dan juga sapu kecil untuk material yang tidak dapat terisap oleh alat pengisap.
- Sampel material dari 3 titik tadi ditimbang dan disaring menggunakan saringan nomor 200 untuk mengetahui kadar *filler* atau kadar lumpur. Proses pengambilan sampel material dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Proses pengambilan sampel material pada jalan raya.

2.3 Pengujian Material

Sampel material yang sudah diperoleh dari lapangan diuji kadar c organiknya untuk mengetahui kandungan organik dalam sampel tersebut. Pengujian dilakukan di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu Universitas Gadjah Mada. Metode pengujian kadar c organik yang digunakan adalah Metode Gravimetri. Metode Gravimetri adalah metode untuk mengetahui kandungan organik dengan cara mengukur kehilangan berat sampel setelah dipanaskan dalam oven selama 2,5 jam pada suhu 550°C. Proses pengujian material dengan Metode Gravimetri dijelaskan sebagai berikut.

- Wadah kosong (krus porselen) ditimbang dan dicatat beratnya (A).
- Sampel material ditimbang dan dimasukkan dalam wadah krus porselen (B).
- Wadah dan sampel material dimasukkan dalam oven pada suhu 105°C selama 3 jam hingga berat konstan.
- Wadah berisi sampel dikeluarkan dan dimasukkan dalam desikator lalu ditimbang berat keringnya (C). Untuk mengetahui berat kering sampel dapat menggunakan Persamaan (1).
- Selanjutnya wadah ditutup dan dimasukkan dalam furnace dan dipanaskan pada suhu 300°C selama 1,5 jam hingga berat konstan.
- Krus porselen dikeluarkan dari oven dan dimasukkan dalam desikator dan ditimbang beratnya (D). Untuk mengetahui kadar 300°C dapat menggunakan Persamaan (2).
- Krus ditutup dan dimasukkan lagi dalam *furnace* pada suhu 550°C selama 2,5 jam.
- Setelah itu krus porselen dimasukkan dalam desikator dan ditimbang beratnya (E). Untuk menghitung kadar 550°C dapat menggunakan Persamaan (3).
- Dihitung kadar C Organik dengan menggunakan Persamaan (4).
- Proses pengujian kadar c organik dapat dilihat pada Gambar 3 (Hach Company, 2023).

$$\text{Berat Kering (F)} : C - A \quad (1)$$

$$\text{Kadar } 300^{\circ}\text{C} : \frac{D - A}{F} \times 100\% \quad (2)$$

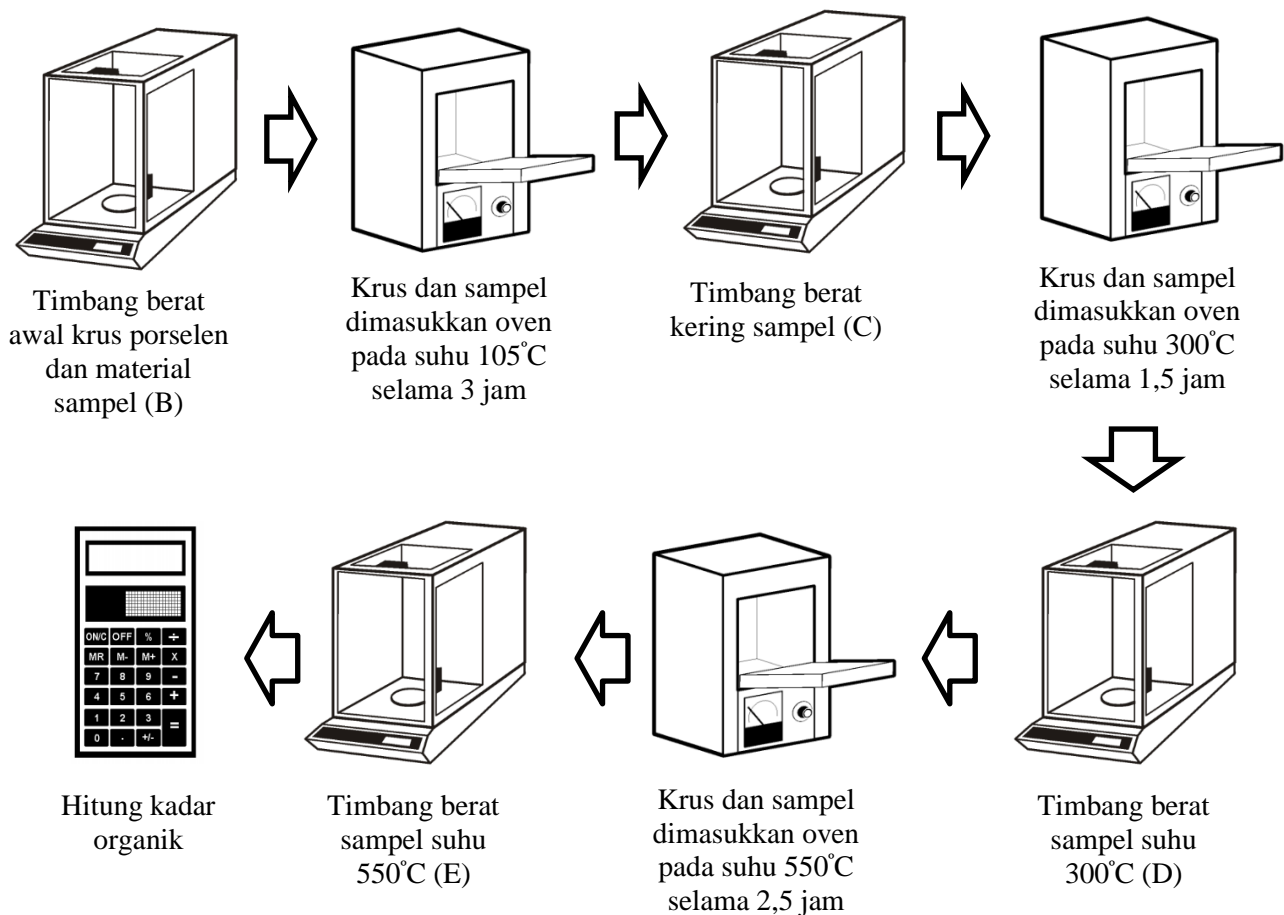
$$\text{Kadar } 500^{\circ}\text{C} : \frac{E - A}{F} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{Kadar C} : \text{Kadar } 300^{\circ}\text{C} - \text{Kadar } 500^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Jumlah material sampel

Jalan Janti – Kalasan Kecamatan Kalasan termasuk Jalan Raya (*Highway*) yang menghubungkan Kota Yogyakarta dengan Kabupaten Klaten. Jalan ini memiliki konfigurasi jalan 2 jalur 2 lajur tidak terbagi, serta memiliki jalur lambat. Median pemisah jalur lambat ditanami pohon – pohon yang rindang seperti Pohon Ketapang (*Terminalia catappa*), Pohon Glodokan Tiang (*Monoon longifolium*), dan Pohon Tanjung (*Mimusops elengi*). Dalam pengambilan sampel didapatkan jumlah material sebanyak 47 gram. Analisa hasil ayakan dengan saringan nomor 200 didapatkan kandungan *clay* dalam material sampel sebesar 3 gram.



Gambar 3. Tahapan pengujian kadar c organik (Hach Company, 2023)

Tipikal jalan yang berbeda pada Kecamatan Kalasan, Jalan Janti – Kalasan Kecamatan Depok memiliki konfigurasi jalan 2 jalur 4 lajur terbagi. Jenis vegetasi yang terdapat pada jalan tersebut adalah Pohon Glodokan Tiang (*Monoon longifolium*) yang ditanam di tengah median jalan. Hasil pengambilan sampel pada Jalan Janti – Kalasan Kecamatan Depok didapatkan material sebanyak 95 gram serta hasil analisis saringan nomor 200 didapatkan material *clay* sebanyak 4 gram.

Pengambilan sampel material pada jalan perkotaan yang pertama dilakukan pada Jalan Suroto. Jalan Suroto berstatus sebagai Jalan Kota yang menghubungkan Stadion Kridosono Yogyakarta dengan Kampus Universitas Gadjah Mada. Konfigurasi Jalan Suroto adalah 2 jalur 4 lajur terbagi, dengan median yang digunakan sebagai pedestrian. Vegetasi yang ada pada Jalan Suroto adalah Pohon Tanjung (*Mimusops elengi*) yang berada di median jalan. Hasil pengambilan sampel didapatkan material sebanyak 19 gram. Hasil ayakan saringan nomor 200 didapatkan kandungan *clay* sebanyak 2 gram.

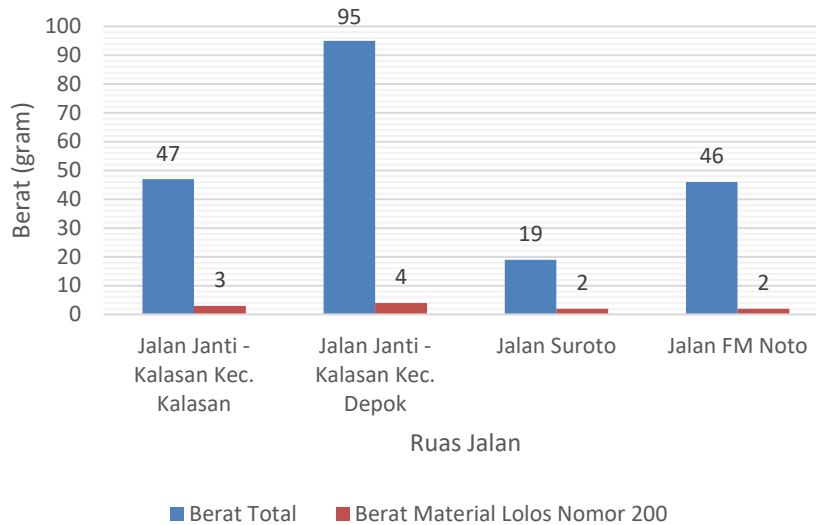
Jalan perkotaan yang dilakukan pengambilan sampel adalah Jalan Faridan Muridan Noto (Jalan FM Noto) dengan konfigurasi jalan 2 jalur dan 4 lajur terbagi median yang digunakan sebagai pedestrian. Jenis tanaman yang ada pada Jalan FM Noto adalah Pohon Tanjung (*Mimusops elengi*) yang ditanam pada median. Hasil pengambilan sampel didapatkan material sebanyak 46 gram dengan hasil saringan nomor 200 sebanyak 2 gram.

Berdasarkan keempat lokasi pengambilan sampel material di jalan, dapat disimpulkan bahwa material pada jalan raya lebih banyak dibandingkan material yang terdapat pada jalan perkotaan. Hal ini juga berlaku pada jumlah material halus lolos saringan nomor 200 (*clay*) dimana jumlah material lolos saringan 200 pada jalan raya lebih banyak dibandingkan jalan perkotaan. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Kayhanian dkk. (2007) yang menyebutkan bahwa polutan pada jalan raya lebih banyak dibandingkan polutan pada selain jalan raya. Hal ini disebabkan karena volume lalu lintas yang padat sehingga menambah jumlah polutan berupa debu, pasir, dan material

lainnya yang tertinggal oleh kendaraan saat melintas. Perbandingan jumlah material pada jalan raya dan jalan perkotaan dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 4.

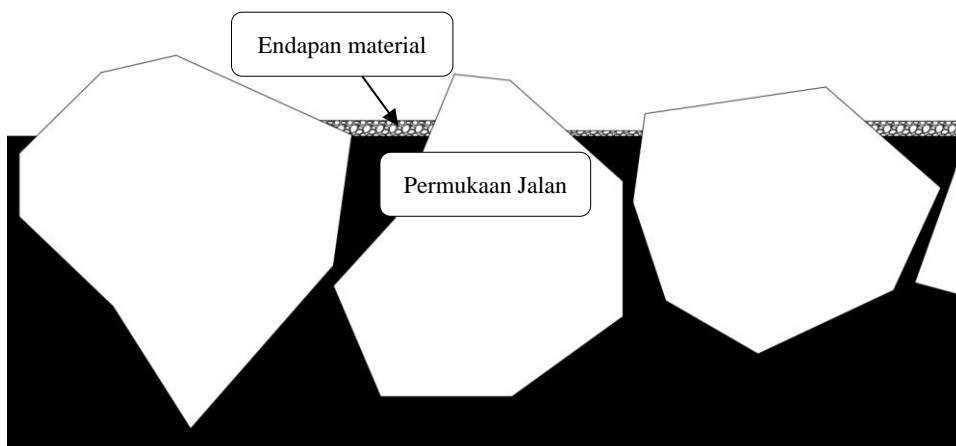
Tabel 1. Jumlah material pada jalan raya dan jalan perkotaan

	Jalan Raya (<i>Highway</i>)		Jalan Perkotaan (<i>Urban</i>)	
	Jalan Janti – Kalasan Kec. Kalasan	Jalan Janti – Kalasan Kec. Depok	Jalan Suroto	Jalan FM Noto
Berat Total (gram)	47	95	19	46
Berat Material Lolos Saringan Nomor 200 (gram)	3	4	2	2



Gambar 4. Perbandingan jumlah material total dan material lolos nomor 200 pada jalan raya dan jalan perkotaan.

Jumlah material di jalan juga dipengaruhi oleh tekstur permukaan jalan. Apabila permukaan jalan bertekstur kasar maka material sedimen akan semakin banyak mengendap pada celah bebatuan. Sedangkan jika permukaan jalan halus maka endapan partikel akan semakin sedikit. Sketsa permukaan jalan yang kasar beserta material endapannya dapat dilihat pada Gambar 5. Pada jalan raya, Jalan Janti – Kalasan Kecamatan Depok memiliki tekstur permukaan lebih kasar dibandingkan Jalan Janti – Kalasan Kecamatan Kalasan. Oleh karena itu jumlah material yang terdapat pada Jalan Janti – Kalasan Kecamatan Depok lebih banyak dibandingkan Jalan Janti – Kalasan Kecamatan Kalasan. Pada jalan perkotaan, Jalan FM Noto memiliki permukaan yang lebih kasar dibandingkan Jalan Suroto sehingga material endapan pada Jalan FM Noto lebih banyak dibandingkan Jalan Suroto.



Gambar 5. Sketsa permukaan jalan kasar yang terisi oleh material endapan.

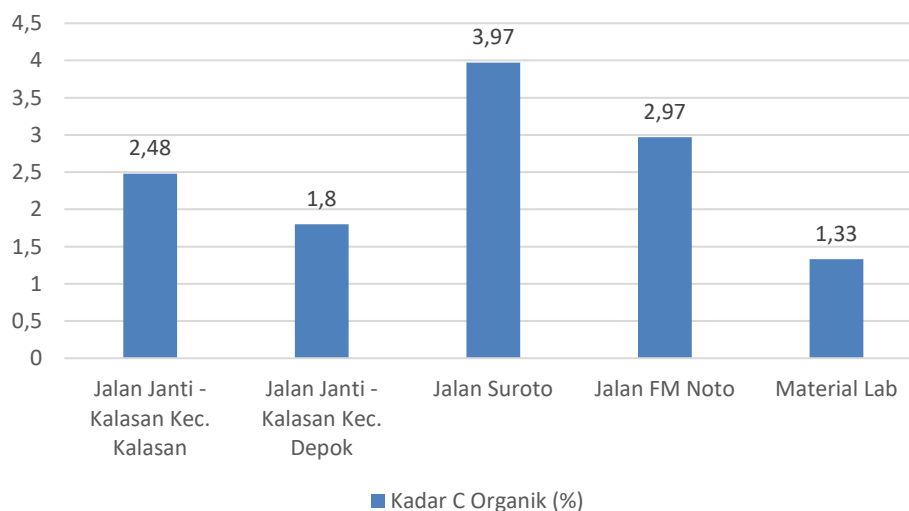
3.2 Kandungan Biologis pada Material Endapan

Metode gravimetri merupakan salah satu metode pengujian kadar organik dengan menggunakan pembakaran secara tidak langsung. Prinsip dasarnya adalah dengan melakukan pembakaran secara tidak langsung pada suhu 550°C untuk menghilangkan kadar karbon yang secara tidak langsung merupakan kandungan yang terdapat pada bahan organik. Penggunaan metode ini juga dapat mencegah terbentuknya *biochar* akibat proses pembakaran karbon (Peces dkk., 2014).

Pengujian kadar organik pada Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu Universitas Gadjah Mada mengambil sampel masing – masing seberat ± 1 gram. Hasil pengujian kadar c organik pada Jalan Janti – Kalasan Kecamatan Kalasan didapatkan data kadar organik sebesar 2,48%. Sedangkan kadar organik pada Jalan Janti – Kalasan Kecamatan Depok sebesar 1,8%. Pada jalan perkotaan, Jalan Suroto didapatkan kadar organik sebesar 3,97% dan pada Jalan FM Noto sebesar 2,97%. Kadar organik pada sampel material di laboratorium hanya mengandung 1,33% kadar organik. Data pengujian selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 6.

Tabel 2. Data hasil pengujian kadar c organik

Lokasi	(B) Berat sampel (gram)	(A) Berat Krus Kosong (gram)	(C) Berat 105°C (gram)	(D) Berat 300°C (gram)	(E) Berat 550°C (gram)	(F) Berat Kering (gram)	Kadar 300°C (%)	Kadar 550°C (%)	Kadar C Organik (%)
Jalan Janti – Kalasan Kec.Kalasan	1,0356	39,4638	40,4916	40,4720	40,4465	1,03	98,09	95,61	2,48
Jalan Janti – Kalasan Kec.Depok	1,0240	33,9785	34,9970	34,9853	34,9657	1,03	98,95	96,93	1,92
	1,0110	34,2275	35,2330	35,2223	35,2054	1,01	98,94	97,26	1,68
								Rerata	1,80
Jalan Suroto	1,0082	40,9943	41,9909	41,9629	41,9233	1,00	97,19	93,22	3,97
Jalan FM Noto	1,0113	38,8687	39,8711	39,8473	39,8175	1,00	97,63	94,65	2,97
Material Lab	1,0151	40,0353	41,0363	41,0362	41,0235	1,00	99,99	98,72	1,27
	1,0133	40,1983	41,1964	41,1951	41,1812	1,00	99,87	98,48	1,39
								Rerata	1,33



Gambar 6. Kandungan organik material sampel.

Berdasarkan Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk dkk. (2023) kandungan organik dikelompokkan menjadi 5 (lima) kelompok. Pengelompokan didasarkan pada kadar kandungan organik pada suatu tanah. Pengelompokan kandungan organik tanah dapat dilihat pada Tabel 3. Dalam penelitian ini sampel berupa pasir serbuk dan dapat diidentifikasi sebagai tanah, dan didapatkan hasilnya yaitu Jalan Janti – Kalasan Kecamatan Depok dan material sampel laboratorium memiliki kandungan organik yang tergolong rendah. Sedangkan Jalan Janti – Kalasan Kecamatan Kalasan dan Jalan FM Noto memiliki kandungan organik yang tergolong sedang. Jalan Suroto memiliki kandungan organik yang tergolong tinggi.

Tabel 3. Pengelompokan tanah berdasarkan kandungan organik (Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk dkk., 2023)

Parameter	Sangat Rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
C (%)	<1	1-2	2-3	3-5	>5

Kandungan organik pada material sampel yang diperoleh pada jalan perkotaan khususnya Jalan Suroto (3,97%) lebih besar dibandingkan kandungan organik yang terdapat pada jalan raya dan material laboratorium. Hal ini dapat disebabkan karena jalan raya memiliki lalu lintas yang lebih padat sehingga kandungan organik menjadi terbawa oleh ban kendaraan dan limpasan air hujan. Berbeda dengan jalan perkotaan yang memiliki volume lalu lintas yang lebih rendah dibandingkan jalan raya, material organik lebih banyak mengendap pada jalan perkotaan.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan di atas, dapat disimpulkan bahwa jalan raya memiliki material endapan yang lebih banyak dibandingkan perkotaan. Hal ini terjadi karena lalu lintas yang lebih padat pada jalan raya sehingga meninggalkan material endapan berupa partikel debu kendaraan, perkerasan yang tererosi, dan partikel lain yang tertinggal di jalan. Selain itu tekstur perkerasan yang kasar membuat material endapan tertinggal di jalan raya dan tidak mudah tersapu oleh angin dan air limpasan hujan. Akan tetapi material endapan di jalan raya berbanding terbalik dengan kandungan organiknya yang lebih sedikit dibandingkan jalan perkotaan. Hal ini disebabkan karena material organik pada jalan perkotaan masih banyak yang tertinggal di badan jalan dan mengendap dikarenakan volume lalu lintas yang lebih rendah sehingga partikel organik tidak banyak terbawa kendaraan serta terlimpas ke tepi jalan.

REFERENSI

- Balai Pengujian Standar Instrumen Tanah dan Pupuk, Sulaeman Lenita Herawaty Linca Anggria Usman Hesti Eka Tantika Rini Prihatini Puji Wuningrum Penyunting, E., Adamy Sipahutar Heri Wibowo Adha Fatmah Siregar Ladiyani Retno Widowati Tia Rostaman, I., Supardi Ulfa Mutamimah Ananda Febrian, D., Pertanian Republik Indonesia Jl Tentara Pelajar No, K., Penelitian Pertanian, K., 2023. ANALISIS KIMIA TANAH, TANAMAN, AIR, DAN PUPUK Penerbit, Petunjuk Teknis Edisi.
- Chen, J., Li, H., Huang, X., 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* 27. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001282](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001282)
- Coupe, S.J., Smith, H.G., Newman, A.P., Puehmeier, T., 2003. Biodegradation and microbial diversity within permeable pavements.
- Elvik, R., Greibe, P., 2005. Road safety effects of porous asphalt: A systematic review of evaluation studies. *Accid Anal Prev* 37, 515–522. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.01.003>
- Hach Company, 2023. Solids, Total Volatile and Fixed Gravimetric Method 1 Method 8276.
- Henderson, V., Tighe, S., 2012. Evaluation of pervious concrete pavement performance in cold weather climates. *International Journal of Pavement Engineering* 13, 197–208. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.572970>
- Kayhanian, M., Anderson, D., Harvey, J.T., Jones, D., Muhunthan, B., 2012. Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. *J Environ Manage* 95, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.09.021>
- Kayhanian, M., Suverkropp, C., Ruby, A., Tsay, K., 2007. Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration. *J Environ Manage* 85, 279–295. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.09.024>
- Mishra, K., Zhuge, Y., Karunasena, W., 2013. CLOGGING MECHANISM OF PERMEABLE CONCRETE: A REVIEW.
- Peces, M., Astals, S., Mata-Alvarez, J., 2014. Assessing total and volatile solids in municipal solid waste samples. *Environmental Technology (United Kingdom)* 35, 3041–3046. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.929182>

- Pintelon, T.R.R., Picioreanu, C., van Loosdrecht, M.C.M., Johns, M.L., 2012. The effect of biofilm permeability on bio-clogging of porous media. *Biotechnol Bioeng* 109, 1031–1042. <https://doi.org/10.1002/bit.24381>
- Rahman, T., Zudhy Irawan, M., Noor Tajudin, A., Rizka Fahmi Amrozi, M., Widyatmoko, I., 2023. Knowledge mapping of cool pavement technologies for urban heat island Mitigation: A Systematic bibliometric analysis. *Energy Build.* <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113133>
- Scholz, M., Grabowiecki, P., 2007. Review of permeable pavement systems. *Build Environ* 42, 3830–3836. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>
- Wang, H., Xin, J., Zheng, X., Li, M., Fang, Y., Zheng, T., 2020. Clogging evolution in porous media under the coexistence of suspended particles and bacteria: Insights into the mechanisms and implications for groundwater recharge. *J Hydrol (Amst)* 582. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124554>
- Welker, A.L., Asce, A.M., Gilbert Jenkins, J.K., Mccarthy, ; Leslie, Nemirovsky, E., 2013. Examination of the Material Found in the Pore Spaces of Two Permeable Pavements. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE))
- Zhang, Z., Sha, A., Liu, X., Luan, B., Gao, J., Jiang, W., Ma, F., 2020. State of the art of porous asphalt pavement: Experience and considerations of mixture design. *Constr Build Mater* 262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119998>