

Penggunaan Nanosilika Pada Campuran Aspal Berpori Dalam Meningkatkan Kinerja Campuran

Muhammad Gunawan Perdana¹⁾, Pratikso²⁾, Rachmat Mudiyo³⁾

¹⁾ Fakultas Teknik, Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Jl. Kaligawe Raya Km.4 Semarang, Jawa Tengah, 50112 ; PO Box 1054/SM, Indonesia; Telp. 0812-47308448. Email: gunawan0511@gmail.com

²⁾ Fakultas Teknik, Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Jl. Kaligawe Raya Km.4 Semarang, Jawa Tengah, 50112 ; PO Box 1054/SM, Indonesia; Telp. 0812-47308448; Email: pratikso@unissula.ac.id

³⁾ Fakultas Teknik, Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Jl. Kaligawe Raya Km.4 Semarang, Jawa Tengah, 50112 ; PO Box 1054/SM, Indonesia; Telp. 0812-47308448; Email: rachmat@unissula.ac.id

Abstrak

Penggunaan nanosilika dalam campuran aspal berpori telah menjadi perhatian utama dalam penelitian untuk meningkatkan kinerja campuran aspal. Nanosilika memiliki potensi dalam memperbaiki sifat mekanik dan reologi campuran, meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen, serta memperbaiki permeabilitas dan stabilitas struktural. Studi ini dilakukan dengan metode tinjauan pustaka (literature review) terhadap penelitian-penelitian terdahulu yang relevan guna memahami dampak nanosilika terhadap campuran aspal berpori. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas nanosilika dalam meningkatkan ketahanan mekanik, fleksibilitas, serta daya tahan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem. Hasil tinjauan pustaka menunjukkan bahwa penambahan nanosilika dalam kadar 2% hingga 6% dapat meningkatkan ketahanan terhadap rutting dan deformasi permanen. Selain itu, nanosilika juga berkontribusi dalam meningkatkan modulus geser kompleks, mengurangi kehilangan Cantabro, dan memperbaiki konektivitas rongga udara dalam campuran aspal berpori. Dengan demikian, nanosilika dapat menjadi bahan aditif yang menjanjikan dalam campuran aspal berpori untuk meningkatkan ketahanan struktural dan performa jangka panjang. Pemanfaatan nanosilika sebagai bahan tambahan dalam PA dapat menjadi solusi efektif untuk meningkatkan performa jalan. Penelitian lebih lanjut masih diperlukan untuk mengeksplorasi metode terbaik dalam pencampuran dan proporsi nanosilika yang optimal guna mencapai keseimbangan antara ketahanan, fleksibilitas, dan efisiensi biaya.

Kata kunci: nanosilika, aspal berpori, kinerja campuran, ketahanan mekanik, permeabilitas.

Abstract

The use of nanosilica in porous asphalt mixtures has become a major concern in research to improve the performance of asphalt mixtures. Nanosilica has the potential to improve the mechanical and rheological properties of mixtures, increase resistance to permanent death, and improve permeability and structural stability. This study was carried out using a literature reflection method (literature review) of relevant previous research to understand the impact of nanosilica on porous asphalt mixtures. This research aims to determine the effectiveness of nanosilica in increasing mechanical resistance, damage, and resistance to extreme environmental conditions. The results of the literature review show that the addition of nanosilica at levels of 2% to 6% can increase resistance to decay and permanent freezing. In addition, nanosilica also contributes to increasing the complex shear modulus, reducing Cantabro loss, and improving the connectivity of air voids in porous asphalt mixtures. Thus, nanosilica can be a promising additive in porous asphalt mixtures to improve structural durability and long-term performance. Further studies are needed to determine the optimal formulation to achieve a balance between stability, interference, and permeability.

Keywords: nanosilica, porous asphalt, mixture performance, mechanical resistance, permeability.



Copyright © 2022 The Author(s)

This is an open access article under the [CC -NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) license.

1. PENDAHULUAN

Penerapan perkerasan berpori semakin berkembang pesat, dimana antara lain Belanda

sudah menerapkan perkerasan aspal berpori pada kurang lebih 90% jaringan jalannya (Djakfar et al., 2015). Sementara kebijakan rehabilitasi jalan di Jepang adalah mengganti

perkerasan lama dengan perkerasan berpori (Djakfar et al., 2015). Di Amerika Serikat, lapisan perkerasan gradasi terbuka sudah diterapkan sejak tahun 1944, dan semakin populer di seluruh Amerika Serikat di sekitar tahun 1970 (Huber, 2000). Namun beberapa negara bagian berhenti menerapkannya karena masalah durabilitas, sedangkan beberapa negara bagian yang lain mendapatkan kinerja yang baik dengan menggunakan aspal polimer, menambahkan aditif atau menggunakan agregat yang lebih kasar (Kandhal & Mallick, 1999).

Campuran aspal berpori harus memiliki keseimbangan antara kinerja fungsional dan kinerja strukturalnya. Ketika keseimbangan tidak tercapai dengan baik, maka efeknya adalah lemahnya permeabilitas atau terjadi raveling. Raveling merupakan masalah yang paling banyak ditemukan pada aspal berpori. Penyebabnya bisa karena lemahnya ikatan antara aspal dan agregat. Sifat agregat, gradasi, kurangnya pemadatan, perencanaan campuran, serta penuaan aspal adalah faktor yang dapat menyebabkan raveling (Nekkanti et al., 2019). Masri & Arshad (2015) dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa aspal berpori mempunyai peluang terjadinya raveling yang menjadi penyebab kerusakan utama dan singkatnya umur pelayanan jalan (setengah dari aspal konvensional). Menurut mereka, raveling ini terjadi karena pengaruh temperatur dan cuaca.

Penelitian dan penerapan aspal berpori, sudah banyak dilakukan di negara-negara berkembang untuk penggunaan pada lapangan parkir, fasilitas pedestrian dan pesepeda (Chen & Wong, 2016). Penelitian di Indonesia, sudah mencapai kinerja struktural yang memenuhi spesifikasi campuran aspal berpori Australia, namun kinerja tersebut masih di bawah standar Bina Marga, sehingga masih terbatas dapat diterapkan di jalan dengan beban lalu lintas ringan (Arlia et al., 2018; Zaika & Djakfar, 2016). Dalam upaya meningkatkan stabilitas, beberapa peneliti di Indonesia menemukan bahwa permeabilitas sebagai kinerja fungsional campuran, belum memadai sebagai campuran aspal berpori (Noris & Mahardi, 2017; Ramadhan et al., 2014). Pengembangan penelitian masih perlu dilakukan untuk mencapai kinerja yang memadai baik struktural maupun fungsional. Pemilihan jenis dan sifat material dalam campuran, termasuk penggunaan modifikasi polimer, sangat

mempengaruhi kinerja campuran aspal berpori (Zhang et al., 2020).

Penambahan filler dalam campuran aspal berpori akan memberikan peranan penting dalam meningkatkan fleksibilitas dan durabilitas. Aspal yang berbentuk cair akan meleleh ke bawah dan mengalami kesulitan seperti binder drainage, tetapi hal tersebut dapat diatasi dengan memberikan bahan pengisi filler, sehingga campuran dapat menyerap aspal dengan baik. Filler yang mengisi rongga diantara agregat akan meningkatkan stabilitas campuran tanpa mengurangi kinerja fungsional. Untuk mendapatkan konstruksi campuran aspal berpori yang memenuhi standar, diperlukan persyaratan kadar filler yang sesuai, karena dapat terjadi perubahan karakteristik campuran jika mempunyai kadar filler yang berbeda. Komposisi filler yang digunakan dalam campuran aspal berpori bervariasi tergantung pada negara dan praktik yang diterapkan. Secara umum, filler yang paling banyak digunakan adalah kapur hidrat, yang biasanya terdiri dari 1% hingga 2% dari berat agregat kering. Jumlah filler yang tepat harus ditentukan dengan hati-hati, karena terlalu banyak filler dapat menyebabkan segregasi campuran, sementara terlalu sedikit tidak akan cukup untuk menyerap aspal (Zhang et al., 2020).

Penggunaan material silika sebagai filler pada campuran aspal berpori dimaksudkan untuk memodifikasi campuran aspal berpori sehingga menjadikan material penambah saat pelaksanaan konstruksi. Ukuran material silika yang kecil dapat mengisi rongga-rongga antara butiran agregat yang mengisi campuran suatu perkerasan jalan. Material silika adalah salah satu material tambang dari hasil pelapukan batuan yang mengandung mineral silika dan feldspar. Hasil pelapukan batuan tersebut dibawa oleh air atau angin yang mengendap di alam bebas, seperti berada di tepi sungai, danau atau laut. Material silika mempunyai sifat fisik bermacam-macam, antara lain seperti berwarna putih bening, abu-abu, kuning, coklat atau warna lain tergantung kepada senyawa pengotornya yang dibawa selama proses pengendapan. Material silika umumnya bisa didapatkan dari bahan alam maupun dengan buatan. Silika buatan biasanya diproses secara kimia dan banyak dijual secara komersial dipasaran. Sedangkan silika alam didapatkan dari bahan alam seperti pasir silika atau melalui

proses sintesis bahan alam lainnya seperti sekam padi, dan lain sebagainya.

Perubahan filler menjadi nanomaterial dalam campuran aspal berpori merupakan inovasi yang dapat meningkatkan kinerja campuran secara signifikan. Nanomaterial, seperti nano silika, nano clay, atau nano karbon, memiliki ukuran partikel sangat kecil, yang memberikan sifat unik dan kemampuan untuk memodifikasi struktur campuran aspal pada tingkat mikroskopis. Salah satu keuntungan utama dari penggunaan nanomaterial sebagai filler adalah peningkatan sifat mekanis campuran aspal. Nanomaterial dapat memperkuat ikatan antara aspal dan agregat, meningkatkan kekakuan, dan mengurangi deformasi permanen seperti alur. Pada penelitiannya Hadiwardoyo dkk (2020) menambahkan nano crumb rubber pada campuran beton aspal, dimana terjadi perubahan karakteristik pada campuran yang ditambahkan nanomaterial jika dibandingkan dengan campuran biasa. Selain itu pada penelitian lainnya dijelaskan campuran dengan fly ash yang dimodifikasi memiliki nilai stabilitas yang lebih tinggi dan permeabilitas yang lebih rendah dibandingkan dengan campuran standar dan campuran dengan fly ash alami. Penggunaan fly ash yang lebih halus (dalam rentang nanomaterial) meningkatkan kekuatan dan daya tahan campuran aspal berpori (Pradoto et al., 2019).

Dari uraian di atas, penelitian ini mencoba memanfaatkan kondisi alam Indonesia maupun pemanfaatan bahan-bahan lokal yang berupa material silika. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan suatu alternatif baru dalam teknologi aspal berpori, dimana melalui proses pengujian fisika akan menghasilkan partikel yang lebih halus atau dalam skala nano (1-250 nm). Nanomaterial silika dapat berfungsi sebagai filler untuk menghasilkan kekuatan dan daya tahan yang lebih tinggi sehingga diharapkan dapat meningkatkan keawetan aspal. Terkait volumetrik pada campuran aspal berpori mengacu pada pengukuran komponen volume seperti agregat kasar, rongga udara, aspal dan rongga dalam agregat. Agregat kasar memberikan struktur, sementara rongga udara yang tinggi memungkinkan drainase air. Volume aspal yang tepat memastikan fraksi agregat terikat dengan baik tanpa mengisi terlalu banyak rongga udara dan memastikan keseimbangan optimal yang berguna untuk

kinerja struktural dan fungsional pada campuran aspal berpori.

Penelitian ini akan menambah referensi bagi pengembangan dan inovasi material pada campuran aspal berpori, sehingga menunjang pengembangan yang mengarah kepada kelayakan penerapan aspal berpori terutama di Kalimantan Selatan, yang dimana jenis filler nanomaterial tersebut sangat mudah di dapatkan. Hal itulah yang mendasari Penulis untuk melakukan penelitian ini dengan judul “Penggunaan Nanosilika Pada Campuran Aspal Berpori Dalam Meningkatkan Kinerja Campuran”

2. METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah tinjauan pustaka (literature review), di mana berbagai sumber ilmiah dianalisis untuk memahami dampak nanosilika terhadap campuran aspal berpori. Studi ini mengacu pada penelitian terdahulu yang membahas aspek mekanik, reologi, serta karakteristik permeabilitas dari campuran aspal yang dimodifikasi dengan nanosilika. Dengan metode ini, data dari berbagai eksperimen sebelumnya dapat dibandingkan dan disintesis untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai efektivitas nanosilika dalam meningkatkan kinerja campuran aspal berpori.

Pendekatan tinjauan pustaka juga memungkinkan analisis terhadap berbagai metode desain campuran, pemilihan material, serta tantangan yang dihadapi dalam implementasi nanosilika pada aspal berpori. Selain itu, studi ini mengevaluasi keunggulan dan keterbatasan dari penggunaan nanosilika yang dilaporkan dalam penelitian sebelumnya untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai prospek penerapannya dalam konstruksi jalan. Dengan demikian, penelitian ini dapat berkontribusi dalam memberikan dasar teori yang kuat bagi pengembangan teknologi aspal berpori yang lebih inovatif dan berkelanjutan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini digunakan beberapa sumber yang dirangkum dalam tabel 1.

Tabel 1. Literatur Review

NO	PENELITI	METODE	VARIABEL
1	Xiang Ma et al. (2020)	Uji permeabilitas, CT scan sinar-X	Rongga udara, tortuositas
2	Ludfi Djakfar et al. (2017)	Simulasi beban akselerasi	Jenis lapisan, beban, lokasi deformasi
3	Zhang, Z. et al. (2020)	Tinjauan literatur	Desain campuran, faktor lingkungan
4	Repik, T.S. (2017)	Uji agregat, Cantabro	Nilai abrasi, porositas
5	Nekkanti, H. et al. (2019)	Uji laboratorium OGFC	Gradasi agregat, ukuran maksimum agregat
6	Fang, M. et al. (2018)	Tinjauan literatur	Teori dan desain gradasi agregat
7	Gupta, A. et al. (2019)	Tinjauan literatur tentang aditif	Jenis dan kandungan aditif
8	Xu, B. et al. (2016)	Uji Marshall	Suhu dan jumlah pemadatan
9	Wu, M. et al. (2022)	Uji Cantabro, draindown	Jenis serat, kandungan aspal
10	Zaika, Y. & Djakfar, L. (2016)	Uji CBR, porositas	Jenis material, gradasi
11	Zhang, H. et al. (2019)	Analisis mikromekanik	Kekakuan kerangka batu
12	Wu, H. et al. (2020)	Tinjauan literatur, uji mekanik	Daya tahan, fungsionalitas, biaya-manfaat
13	Wang, X. et al. (2018)	Uji Cantabro, permeabilitas	Konten agregat F&E
14	Pradoto, R. et al. (2019)	Uji Marshall, Cantabro, permeabilitas	Kandungan fly ash, OBC
15	Shukry, M.N.A. et al. (2018)	Uji permeabilitas, modulus resilien	Jenis pengisi (kapur, semen, diatomit)
16	Mocini, A.R. et al. (2019)	Uji reologi, rheometer	Jenis nanosilika, kandungan aspal
17	Hadiwardoyo, S.P. et al. (2020)	Uji Marshall, Wheel Tracking Machine	Kandungan NCR, suhu
18	Ghanoona, S.A. et al. (2019)	Uji DSR, MSCR	Nano-silika, suhu uji
19	Jiang, Y. et al. (2020)	Uji ketahanan, umur lelah	Metode desain campuran, konten aspal
20	Sukhijaa, M. et al. (2021)	Uji reologi, XRD, SEM	Dosis NS, jenis aspal, suhu
21	Król, J.B. et al. (2018)	CT scan sinar-X, uji permeabilitas	Rongga udara, ukuran agregat
22	Zhang, Z. et al. (2020)	Tinjauan literatur	Bahan aspal, desain gradasi

Penggunaan nanosilika dalam campuran aspal berpori telah menjadi topik penelitian yang signifikan dalam meningkatkan kinerja campuran aspal. Nanosilika memiliki potensi untuk memperbaiki sifat mekanik dan

fungsional dari aspal, termasuk meningkatkan ketahanan terhadap deformasi dan mengurangi efek rutting. Adapun gap penelitian dari penelitian terdahulu terlihat dalam tabel 2.

Tabel 2. Gap Penelitian

NO	PENELITI	HASIL	GAP PENELITIAN
1	Xiang Ma et al. (2020)	Permeabilitas bervariasi tergantung struktur mikro pori	Belum mempertimbangkan peran nanosilika dalam mengoptimalkan struktur pori
2	Ludfi Djakfar et al. (2017)	Porous HMA cocok untuk daerah hujan tinggi	Belum mengeksplorasi peningkatan ketahanan terhadap deformasi dengan nanosilika
3	Zhang, Z. et al. (2020)	Tantangan utama pada ketahanan dan pemeliharaan	Tidak meneliti efek nanosilika terhadap daya tahan jangka panjang
4	Repik, T.S. (2017)	Agregat LA tinggi meningkatkan ketahanan abrasi	Tidak meneliti bagaimana nanosilika dapat meningkatkan daya tahan agregat
5	Nekkanti, H. et al. (2019)	Gradasi lebih baik meningkatkan kinerja OGFC	Tidak mengeksplorasi bagaimana nanosilika dapat mempengaruhi sifat mekanis OGFC
6	Fang, M. et al. (2018)	Gradasi agregat berpengaruh signifikan pada kinerja aspal	Belum mempertimbangkan interaksi nanosilika dengan berbagai desain gradasi
7	Gupta, A. et al. (2019)	Aditif meningkatkan ketahanan dan daya tahan	Perlu penelitian lebih lanjut mengenai kombinasi nanosilika dengan aditif lain
8	Xu, B. et al. (2016)	Suhu pemadatan lebih berpengaruh dibanding jumlah pemadatan	Belum meneliti pengaruh nanosilika pada parameter desain Marshall
9	Wu, M. et al. (2022)	Serat lignin lebih meningkatkan stabilitas dibanding serat basalt	Efektivitas kombinasi nanosilika dengan serat masih belum dikaji
10	Zaika, Y. & Djakfar, L. (2016)	Stone crush memiliki CBR tertinggi	Tidak membahas dampak nanosilika terhadap stabilitas reservoir base
11	Zhang, H. et al. (2019)	Pemadatan lebih tinggi meningkatkan kontak batu	Belum meneliti bagaimana nanosilika dapat memperkuat interaksi antar partikel
12	Wu, H. et al. (2020)	OGFC meningkatkan keselamatan, tapi daya tahan masih jadi tantangan	Belum ada analisis penggunaan nanosilika untuk memperpanjang umur OGFC
13	Wang, X. et al. (2018)	F&E tinggi menurunkan ketahanan campuran	Tidak mengeksplorasi bagaimana nanosilika dapat mengurangi efek negatif F&E
14	Pradoto, R. et al. (2019)	Fly ash meningkatkan stabilitas dan mengurangi permeabilitas	Tidak ada kajian perbandingan fly ash dengan nanosilika dalam campuran PA
15	Shukry, M.N.A. et al. (2018)	Diatomit meningkatkan ketahanan rutting	Belum meneliti kombinasi nanosilika dengan berbagai jenis pengisi
16	Moeini, A.R. et al. (2019)	Nanosilika fibrous lebih efektif dibanding sferis	Masih perlu eksplorasi terhadap proporsi optimal nanosilika

17	Hadiwardoyo, S.P. et al. (2020)	NCR 1.25% memberikan kinerja terbaik	Kombinasi nanosilika dengan NCR belum dikaji
18	Ghanoona, S.A. et al. (2019)	Nano-silika meningkatkan ketahanan rutting	Belum ada analisis dampak nanosilika pada aspek kelelahan aspal
19	Jiang, Y. et al. (2020)	VVTM meningkatkan kinerja dibanding Marshall & SGC	Tidak membahas interaksi nanosilika dengan metode pemadatan
20	Sukhijaa, M. et al. (2021)	NS meningkatkan PG dan ketahanan rutting	Masih perlu analisis pengaruh nanosilika terhadap kelelahan aspal
21	Król, J.B. et al. (2018)	Permeabilitas dipengaruhi konektivitas rongga udara	Pengaruh nanosilika pada stabilitas rongga udara belum dikaji
22	Zhang, Z. et al. (2020)	Modifikasi polimer mempengaruhi stabilitas PA	Belum ada kajian efek nanosilika dalam kombinasi dengan polimer

Menurut penelitian oleh Moeini et al. (2019), nanosilika dengan morfologi fibrous lebih efektif dibandingkan dengan nanosilika sferis dalam meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen serta meningkatkan modulus geser kompleks dan sudut fase aspal yang dimodifikasi.

Selain itu, penelitian oleh Ghanoona dan Tanzadeh (2019) menunjukkan bahwa penambahan nanosilika dalam kadar 2% hingga 6% secara signifikan meningkatkan ketahanan aspal terhadap rutting. Pengujian menggunakan Dynamic Shear Rheometer (DSR) dan Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) mengungkapkan bahwa nilai J_{nr} menurun seiring dengan peningkatan kadar nanosilika, yang menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap deformasi akibat beban lalu lintas yang berulang.

Dampak nanosilika terhadap sifat reologi aspal juga telah dibuktikan oleh Sukhija et al. (2021), yang menemukan bahwa nanosilika dapat meningkatkan suhu kegagalan aspal serta meningkatkan resistensi terhadap deformasi pada kondisi suhu tinggi. Namun, penelitian ini juga mencatat bahwa peningkatan kadar nanosilika dapat mengurangi ketahanan terhadap kelelahan jika tidak diimbangi dengan komponen lain yang memperbaiki sifat fleksibilitas campuran aspal.

Studi Zhang et al. (2020) menyoroti bahwa desain campuran aspal berpori yang tepat harus memperhitungkan pemilihan material, desain gradasi, serta pemilihan bahan aditif seperti nanosilika untuk memastikan stabilitas dan permeabilitas optimal. Penggunaan nanosilika sebagai bahan aditif dalam campuran aspal

berpori terbukti dapat meningkatkan ketahanan mekanik tanpa mengurangi kapasitas drainase campuran.

Perbaikan kinerja campuran aspal berpori melalui penggunaan nanosilika juga diamati dalam penelitian oleh Pradoto et al. (2019), yang menunjukkan bahwa penggunaan fly ash yang diubah menjadi nanomaterial dapat meningkatkan stabilitas Marshall dan mengurangi kehilangan Cantabro, sehingga memperpanjang umur pakai campuran aspal berpori.

Dalam aspek permeabilitas, studi oleh Król et al. (2018) menunjukkan bahwa struktur internal campuran aspal berpori sangat mempengaruhi permeabilitasnya. Penggunaan nanosilika dapat membantu meningkatkan kepadatan campuran dengan tetap mempertahankan konektivitas rongga udara yang diperlukan untuk drainase efektif.

Lebih lanjut, penelitian oleh Djakfar et al. (2017) menemukan bahwa porous hot mix asphalt (HMA) memiliki kinerja yang sebanding dengan HMA konvensional, terutama dalam aspek drainase dan ketahanan terhadap deformasi. Penggunaan nanosilika dalam campuran porous HMA berpotensi meningkatkan daya tahan terhadap kelelahan akibat beban akselerasi yang tinggi.

Hasil penelitian oleh Wu et al. (2022) juga menunjukkan bahwa kombinasi nanosilika dengan serat lignin atau basalt dapat lebih lanjut meningkatkan ketahanan residu dan stabilitas dinamis campuran aspal berpori. Ini menegaskan bahwa penggunaan nanosilika dalam kombinasi dengan bahan aditif lain dapat

memberikan peningkatan kinerja yang lebih signifikan.

Pada sisi lain, penelitian oleh Xu et al. (2016) menekankan pentingnya suhu pemadatan dalam desain Marshall untuk campuran aspal berpori. Penggunaan nanosilika dapat berinteraksi dengan suhu pemadatan, yang berpengaruh pada stabilitas dan daya tahan campuran.

Terakhir, pengalaman internasional terkait campuran aspal berpori yang dirangkum oleh Zhang et al. (2020) menunjukkan bahwa pemilihan jenis dan kadar bahan modifikasi, termasuk nanosilika, sangat mempengaruhi ketahanan dan pemeliharaan jangka panjang dari campuran aspal berpori. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan formulasi campuran dengan nanosilika agar dapat mencapai keseimbangan optimal antara ketahanan, fleksibilitas, dan permeabilitas aspal berpori.

Selain faktor mekanik dan permeabilitas, penelitian oleh Wu et al. (2020) menunjukkan bahwa nanosilika dapat membantu dalam mengurangi raveling dan rutting yang sering terjadi pada campuran aspal berpori. Faktor ini sangat penting dalam meningkatkan umur pakai jalan dan mengurangi biaya pemeliharaan.

Fang et al. (2018) juga menyebutkan bahwa gradasi agregat yang dikombinasikan dengan nanosilika dapat menghasilkan struktur campuran yang lebih stabil dan tahan terhadap deformasi permanen. Dengan pendekatan desain yang tepat, nanosilika dapat membantu dalam meningkatkan kekuatan struktural dari campuran aspal berpori.

Dalam studi oleh Repik (2017), ditemukan bahwa pemilihan agregat dengan nilai abrasi Los Angeles yang lebih rendah dapat dikombinasikan dengan nanosilika untuk meningkatkan ketahanan abrasi pada campuran Open Graded Friction Course (OGFC). Ini menunjukkan bahwa nanosilika dapat memberikan peningkatan kinerja jika dikombinasikan dengan agregat berkualitas tinggi.

Zaika dan Djakfar (2016) meneliti gradasi material untuk reservoir base dari porous pavement, menemukan bahwa gradasi yang lebih seragam memberikan porositas yang lebih tinggi. Penggunaan nanosilika dalam material tersebut dapat membantu meningkatkan

ketahanan struktur terhadap tekanan lalu lintas yang tinggi.

Zhang et al. (2019) juga menemukan bahwa kontak batu-ke-batu dalam campuran aspal berpori dapat diperkuat dengan nanosilika, yang secara signifikan meningkatkan modulus kekakuan dan stabilitas mekanik campuran.

Jiang et al. (2020) meneliti metode pemadatan yang berbeda dalam pembuatan campuran SMA-13 dan menemukan bahwa nanosilika dapat membantu meningkatkan densitas campuran tanpa mengorbankan porositas yang dibutuhkan untuk drainase.

Hasil penelitian oleh Gupta et al. (2019) menunjukkan bahwa kombinasi nanosilika dengan polimer dapat meningkatkan ketahanan campuran aspal berpori terhadap suhu ekstrem, baik panas maupun dingin, sehingga lebih tahan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem.

Mayank et al. (2021) menyatakan bahwa nanosilika berperan dalam meningkatkan kinerja viskoelastis dari binder aspal, yang berkontribusi dalam peningkatan ketahanan terhadap retak dan deformasi permanen dalam campuran aspal berpori.

Akhirnya, kombinasi dari berbagai penelitian ini menegaskan bahwa nanosilika memiliki potensi besar dalam meningkatkan kinerja campuran aspal berpori, baik dari segi ketahanan mekanik, stabilitas struktural, maupun daya tahan terhadap faktor lingkungan. Dengan penelitian lebih lanjut, formulasi campuran yang optimal dapat dikembangkan untuk memastikan bahwa aspal berpori yang dimodifikasi dengan nanosilika memiliki kinerja yang unggul dalam berbagai kondisi operasional.

4. SIMPULAN

Penggunaan nanosilika dalam campuran aspal berpori terbukti memberikan berbagai manfaat, mulai dari peningkatan ketahanan terhadap deformasi dan abrasi hingga peningkatan daya tahan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem. Berbagai studi menunjukkan bahwa NS mampu memperbaiki stabilitas mekanis, ketahanan rutting, serta permeabilitas campuran. Dengan demikian, pemanfaatan nanosilika sebagai bahan tambahan dalam PA dapat menjadi solusi efektif untuk meningkatkan performa jalan. Namun,

penelitian lebih lanjut masih diperlukan untuk mengeksplorasi metode terbaik dalam pencampuran dan proporsi nanosilika yang optimal guna mencapai keseimbangan antara ketahanan, fleksibilitas, dan efisiensi biaya.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih banyak kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan Hidayah-Nya dalam pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih banyak kepada kedua orang tua, semua keluarga besar, anak, sahabat, rekan dan seluruh keluarga besar yang telah mendukung saya. Terima kasih banyak kepada segenap civitas akademika Universitas Islam Kalimantan MAB Banjarmasin dan Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah banyak memberikan bantuan berupa materil dan immateril.

6. DAFTAR PUSTAKA

- AAPA, A.A.P.A. 2002, National Asphalt Specification, Australian Asphalt Pavement Association.
- AAPA, A.A.P.A. 2004, National Asphalt Specification, Australian Asphalt Pavement Association.
- Afonso, M.L., Dinis-Almeida, M. and Fael, C.S. 2017, Study of the Porous Asphalt Performance with Cellulosic Fibres, *Construction and Building Materials*, Vol. 135, pp. 104-111.
- Ahmad, K.A., Abdullah, M.E., Hassan, N.A., 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.
- Alvarez, A.E., Martin, A.E. and Estakhri, C. 2011, A Review of Mix Design and Evaluation Research for Permeable Friction Course Mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 25 No.3, pp. 1159-1166.
- Alvarez, A.E., Martin, A.E., Estakhri, C.K., Button, J.W., Glover, C.J. and Jung, S.H. 2006, Report No. FHWA/TxDOT Report 0-5262-1: Synthesis of Current Practice on the Design, Construction, and Maintenance of Porous Friction Courses, Texas Transportation Institute, Vol. 7 No.2, pp. 86.
- Aman, M. Y., Shahadan, Z. and Tamin, N.R.M. 2015, A Comparative Study on Properties of Malaysian Porous Asphalt Mixes with Different Bitumen Contents, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 9 No. 10, pp. 797- 806.
- Arlia, L., Saleh, S.M. and Anggraini, R. 2018, Karakteristik Campuran Aspal berpori Dengan Substitusi Gondorukem Pada Aspal, *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syiah V Kuala*, Vol. 1 No.2004, pp. 657–666.
- Arshad, A. K., Samsudin, M. S., Masri, K. A., Karim, M. R., & Abdul Halim, A. G. 2017, Multiple stress creep and recovery of nanosilica modified asphalt binder, *MATEC Web of Conferences* 103, 09005.
- Asmuni. 2010. Karakterisasi Pasir Kuarsa (SiO₂) dengan Metode XRD. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sumatra Utara. Medan
- ASTM. 2008, Standard Practice for Open Graded Friction Course (OGFC) Mix Design, ASTM D 7064.
- Aziz, M.M.A., Hamad, A.W., Maleka, A.M. and Jakarni, F.M. 2015, Effect of Viscoelastic Behavior of Cellulose Oil Palm Binder (COPF) Modified 60-70 Asphalt Binder for Deterioration for Roads and Highways, *Jurnal Teknologi UTM*, Vol. 2, pp. 45-50.
- Barksdale, R.D. 1993, *The Aggregate Handbook*, National Stone Association, Washington DC, USA.
- Bria, O. K., Saputro, I. T., Samaila, M. A., & Mangi, J. 2018. Kinerja campuran aspal porus berbagai gradasi pada aspal penetrasi 60/70. *Jurnal Karkasa*, 4(2).
- Buzea, C., Pacheco, I. I., & Robbie, K. 2007. Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. *Biointerphases*, 2(4), MR17–MR71.
- Castillo, D., Caro, S., Darabi, M. and Masad, E. 2018, Influence of Aggregate Morphology on the Mechanical Performance of Asphalt Mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 19 No.4, pp. 972-991.
- Chen, J.-S., Lee, C.-T. and Lin, Y.-Y. 2016, Influence of Engineering Properties of Porous Asphalt Concrete on Long-Term Performance, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 29 No.4, pp. 04016246.
- Chen, J.-S., Sun, Y.-C., Liao, M.-C. and Huang, C.-C. 2012, Effect of Binder Types on Engineering Properties and Performance of Porous Asphalt Concrete, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2293 No. 1, pp. 55-62.
- Chen, M.J. and Wong, Y.D. 2016, Gradation Design of Porous Asphalt Mixture (PAM) for Low-Strength Application in Wet Environment, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 19 No.7, pp. 611-622.
- Cooley, L., Brown, E. and Watson, D. 2000, Evaluation of Open-Graded Friction Course Mixtures Containing Cellulose Fibers, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1723 No.00, pp. 19-25.

- Cooley, L.A., Brumfield, J. W., Mallick, R.B. and Mogawer, W.S. 2009, Construction and Maintenance Practices for Permeable Friction Courses.
- Crucho, J. M. L., Neves, J. M. C. das, Capitão, S. D., & Picado-Santos, L. G. de. (2018). Mechanical performance of asphalt concrete modified with nanoparticles: Nanosilica, zero-valent iron and nanoclay. *Construction and Building Materials*, 181, 309–318.
- Djakfar, L., Bowoputro, H., Zaika, Y. and Harimurti. 2015, Evaluation of the Use of Steel Slag and Pyrophyllite Materials in the Porous Asphalt Mix, *International Journal of Civil and Structural Engineering IJCSE*, Vol. 2 No. 1, pp. 147–151.
- Djakfar, L., Zaika, Y. and Bowoputro, H. 2016, Pengaruh Penambahan Aditif Terhadap Kinerja Campuran Beraspal berpori, *Jurnal Transportasi*.
- Djakfar, L., Zaika, Z. and Harimurti. 2017, Evaluation of Porous Hotmix Asphalt Performance Under Accelerated Loading, *International Journal of Geomate*, Vol. 13 No.39.
- Djumari, and Sarwono, D. 2009, Perencanaan Gradasi Aspal berpori Menggunakan Material Lokal Dengan Metode Pemampatan Kering, *Media Teknik Sipil*, Vol. IX V No. 1, pp. 9-14.
- Eldeen, G.I.S. 2018, Evaluation of Marshall Compactor Effect on the Degradation of Recycled Concrete Aggregate, *Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering*, Vol. 3 No.5, pp. 133.
- Fang, M., Park, D., Singuranayo, J.L., Chen, H., Fang, M., Park, D., Singuranayo, J.L. and Chen, H. 2018, Aggregate Gradation Theory, Design and Its Impact on Asphalt Pavement Performance: A Review, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 8436, pp. 1-17.
- Fernlund, J.M.R. 2005, 3-D Image Analysis Size and Shape Method Applied to the Evaluation of the Los Angeles Test, *Engineering Geology*, Vol. 77 No. 1-2, pp. 57- 67.
- Ghanoon, S. A., & Tanzadeh, J. 2019, Laboratory evaluation of nano-silica modification on rutting resistance of asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 223
- Gupta, A., Rodriguez-Hernandez, J. and Castro-Fresno, D. 2019, Incorporation of Additives and Fibers in Porous Asphalt Mixtures: A Review, *Materials*, Vol. 12 No. 19.
- Hadiwardoyo, S. P., Imansyah, F. N. P., Sumabrata, R. J., & Iskandar, D. (2020). Rut depth characteristics on hot mix asphalt with addition nano crumb rubber. *Civil Engineering and Architecture*, 8(4), 525–532.
- Hamzah, M.O., Hasan, M.R.M., Che Wan, C.N. and Abdullah, N.H. 2010, A Comparative Study on Performance of Malaysian Porous Asphalt Mixes Incorporating Conventional and Modified Binders, *Journal of Applied Sciences*, Vol. 10 No.20, pp. 2403-2410.
- Hassan, N.A., Mahmud, M.Z.H., Adi, N., Rahmat, N., Hainin, M.R. and Jaya, R.P. 2016, Effects of Air Voids Content on the Performance of Porous Asphalt Mixtures, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 11 No.20, pp. 11884-11887.
- Hassan, N.A., Mahmud, M.Z.H., Ahmad, K.A., Hainin, M.R., Jaya, R.P. and Mashros, N. 2016, Air Voids Characterisation and Permeability of Porous Asphalt Gradations Mallic Used in Different Countries, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 11 No.24, pp. 14043-14047.
- Hassan, N.A., Zul, M., Mahmud, H. and Ramadhansyah, P.J. 2014, Air Void Characterisation in Porous Asphalt Using X-Ray Computed Tomography, *Advanced Materials Research*, Vol. 911, pp. 443-448.
- Hendrik, Setiawan, A. and Mashuri. 2014, Karakteristik Campuran Aspal berpori Dengan Agregat Dari Loli Dan Taipa, *The 17th FSTPT International Symposium*, Jember V Nash University, No. August, pp. 22-24.
- Hernandez-Saenz, M.A., Caro, S., Arámbula-Mercado, E. and Epps Martin, A. 2016, Mix Design, Performance and Maintenance of Permeable Friction Courses (PFC) in the United States: State of the Art, *Construction and Building Materials*, Vol. 111, pp. 358–367.
- Hsu, T.-W., Chen, S.-C. and Hung, K.-N. 2010, Performance Evaluation of Asphalt Rubber in Porous Asphalt-Concrete Mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23 No.3, pp. 342-349.
- Huber, G. 2000, Performance Survey on Open-Graded Friction Course Mixes, *National Academy Press*, Washington DC, USA.
- Jiang, W., Sha, A. and Xiao, J. 2015, Experimental Study on Relationships among Composition, Microscopic Void Features, and Performance of Porous Asphalt Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27 No.11, pp. 04015028.
- Jiang, Y., Zhang, Y., Xue, J., Deng, C., & Tian, T. 2020, Performance of stone mastic asphalt mixtures fabricated by different compaction methods. *Applied Sciences*.
- Kandhal, P.S. and Mallick, R.B. 1998, Open-Graded Friction Course: State of The Practice, *Transportation Research Circular E-C005*, No. December, pp. 20.
- Kandhal, P.S. and Mallick, R.B. 1999, Design of New-Generation Open-Graded Friction Course, *NCAT Report 99-03*, No. December, pp. 3-64.
- Kline, L. 2010, "Comparison of Open Graded

- Friction Course Mix Design Methods Currently Used in the United States, "Clemson University, US.
- Kou, H., Jing, H., Wu, C., Ni, P., Wang, Y., & Horpibulsuk, S. 2021, Microstructural and mechanical properties of marine clay cemented with industrial waste residue-based binder (IWRB). *Acta Geotechnica*, 4.
- Król, J.B., Khan, R. and Collop, A.C. 2018, The Study of the Effect of Internal Structure on Permeability of Porous Asphalt, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 19 No.4, pp. 935-951.
- Liu, Z., Luo, S., Quan, X., Wei, X., Yang, X. and Li, Q. 2019, Laboratory Evaluation of Performance of Porous Ultra-Thin Overlay, *Construction and Building Materials*, Vol. 204 No. February, pp. 28-40.
- Luxman, N.N., Hassan, N.A., Jaya, R.P., Warid, M.N.M., Azahar, N.M., Mahmud, M.Z.H. and Ismail, S. 2019, Effect of Compaction Temperature on Porous Asphalt Performance, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 244 No. 1.
- Lyons, K.R. and Putman, B.J. 2013, Laboratory Evaluation of Stabilizing Methods for Porous Asphalt Mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 49, pp. 772– 780.
- Ma, X., Jiang, J., Zhao, Y., & Wang, H. 2020, Characterization of the interconnected pore and its relationship to the directional permeability of porous asphalt mixture, *Construction and Building Materials*.
- Mallick, R.B., Kandhal, P.S., Cooley, L.A. and Watson, D.E. 2000, Design, Construction, and Performance of New- Generation Open-Graded Vol. NCAT Repor No. No. 2000-01.
- Mansour, T.T.N., Putman, B.J.B. and Asce, A.M. 2013, Influence of Aggregate Gradation on the Performance Properties of Porous Asphalt Mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25 No.2, pp. 281-288.
- Mariamah. 2023, The Effect of Natrium Hydroxide Molarity Variation and Alkali Ratio on the Compressive Strength of Geopolymer Paste and Mortar, *Earth and Environmental Science*.
- Masri, K.A. and Arshad, A.K. 2015, Performance Tests of Porous Asphalt Mix - A Review, *ResearchGate*, No. September 2016.
- Mayuni, S. 2023, Kajian kekerasan agregat terhadap permeabilitas campuran aspal berpori (Disertasi Doktor, Program Doktor Ilmu Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro). Universitas Diponegoro.
- Moeini, A. R., Badiei, A., & Rashidi, A. M. 2019, Effect of nanosilica morphology on modification of asphalt binder, *Road Materials and Pavement Design*.
- Nashir Muh, Parung, H., Ali, N. and Hariyanto, T. 2013, Kinerja Campuran Aspal Berpori Dengan Menggunakan Aspal Polimer Starbit Jenis E-55, *SEminar Nasional IX-2013 V Teknik Sipil ITS*.
- Nekkanti, H., Putman, B.J. and Danish, B. 2019, Influence of Aggregate Gradation and Nominal Maximum Aggregate Size on the Performance Properties of OGFC Mixtures, *Transportation Research Record*.
- Nielsen, C.B. 2006, *Durability of porous asphalt*, Denmark.
- Noris, T.G. and Mahardi, P. 2017, Analisa Pemanfaatan Limbah Styrofoam Sebagai Bahan Substitusi Ke Dalam Aspal Penetrasi 60/70 Terhadap Karakteristik / Campuran Aspal berpori, *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil UNS*, Vol. 01 No.01, pp. 65- 70.
- Nurchaya, A., Subagio, B.S., Rahman, H. and Weningtyas, W. 2015, Analisis Kinerja Campuran Aspal berpori Menggunakan Aspal Pen 60/70 Dan Aspal Modifikasi V Polimer Elvaloy, *Jurnal UNILA*.
- Poulidakos, L.D. and Partl, M.N. 2010, Investigation of Porous Asphalt Microstructure Using Optical and Electron Microscopy, *Journal of Microscopy*, Vol. 240 No.2, pp. 145-154.
- Pradoto, R., Puri, E., Hadinata, T., Rahman, Q. D., & Az-Zuchruf, R. M. 2019, Improving Strength of Porous Asphalt: Utilizing Fly Ash into Nanomaterials in Experimental Approach. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 15(2), 75-89
- Public Work Department Malaysia. 2008, *Standard Specification for Road Work*, section 4, Flexible Pavement.
- Punith, V.S., Suresha, S.N., Raju, S., Bose, S. and Veeraragavan, A. 2011, Laboratory Investigation of Open-Graded Friction-Course Mixtures Containing Polymers and Cellulose Fibers, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 138 No. 1, pp. 67–74.
- Putman. 2021, *Evaluation of Open Graded Friction Courses: Construction, Maintenance, and Performance Phase II*, South Carolina Department of Transportation.
- PUPR. 2018, *Spesifikasi Umum 2018 Bina Marga*, Kementerian PUPR, Jakarta, Indonesia
- Ramadhan, N., B, R.R., Djakfar, L. and Bowoputro, H. 2014, Pengaruh Penambahan Additive Gilsonite HMA Modifier Grade Terhadap Kinerja Aspal, *Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya*, pp. 1-12.
- Ranieri, V., Sansalone, J.J. and Shuler, S. 2010, Relationships among Gradation Curve, Clogging Resistance, and Pore-Based Indices of Porous Asphalt Mixes, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 11 No. October 2014, pp. 507–525.
- Ravanamma, R., Muralidhara Reddy, K., Venkata Krishnaiah, K., & Ravi, N. 2021, Structure and morphology of yttrium doped barium titanate ceramics for multi-layer capacitor

- applications. *Materials Today: Proceedings*, 46, 259-262
- Repik, T.S. 2017, "Laboratory Evaluation Of The Influence Of Aggregate Los Angeles (LA) Abrasion on Performance Of Open Graded Friction Course (OGFC) Mixtures," Clemson University, US.
- Rondonuwu F.O.H. Kaseke, A.L.E. Rumayar, M.R.E.M. 2013, Pengaruh Sifat Fisik Agregat Terhadap Rongga Dalam Campuran Beraspal Panas Vol. 1 No.3, pp. 1-6.
- Sangiorgi, C., Eskandarsefat, S., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C. and Dondi, G. 2017, A Complete Laboratory Assessment of Crumb Rubber Porous Asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 132, pp. 500-507.
- Sarwono, D. and Wardhani, A.K. 2007, Pengukuran Sifat Permeabilitas Campuran Porous Asphalt, *Media Teknik Sipil*, pp. 131-138.
- Schaus Lori. 2007, Porous Asphalt Pavement Designs: Proactive Design for Cold Climate Use, pp. 105, http://uppercharterscreek.org/Porous_Pavement/Lori_Schaus_THESIS_2.pdf.
- Senior-Arrieta, J.E.C.-M., V., S.-A. and J.E., C.-M. 2017, Mechanical Characterization of Porous Asphalt Mixes Modified with Fatty Acid Amides -FAA- Caracterización Mecánica de Mezclas Asfálticas Porosas, *Ingeniería e Investigación* vol. 37 n° 1, april, Vol. 37, pp. 43-48.
- Setyawan, A. 2005, Design and Properties of Hot Mixture Porous Asphalt for Semi- Flexible Pavement Applications, *Media Teknik Sipil*, Vol. 5 No.2, pp. 41-45.
- Setyawan, A. and Sanusi. 2008, Observasi Properties Aspal berpori Berbagai Gradasi Dengan, *Media teknik Sipil*, pp. 15-20.
- Shafabakhsh, G. H., & Ani, O. J. (2015). Experimental investigation of effect of Nano TiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, 98, 692-702
- Shukry, M.N.A., Hassan, N.A., Abdullah, M.E., Hainin, M.R., Md Yusoff, N.I., Jaya, R.P. and Mohamed, A. 2018, Effect of Various Filler Types on the Properties of Porous Asphalt Mixture, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 342 No. 1.
- Singapore Land Traffic Authority. 2010, Materials & Workmanship Specifications for https://www.lta.gov.sg/content/ltaweb/en/industry-Civil&Structural_Works_matters/development-and-building-and-construction-and-utility-works/civil-standards.html.
- Sukhija, M., Saboo, N., Yadav, A. K., & Rath, C. 2021, Laboratory study on the suitability of nano-silica as a modifier for asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 302.
- Sukirman, S. 2016, *Beton Aspal Campuran Panas*, Institut Teknologi Nasional, Bandung.
- Suresha, S.N., George, V. and Shankar, A.R. 2010, Effect of Aggregate Gradations on Properties of Porous Friction Course Mixes, *Materials and Structures* 43(6):789- 801, Vol. 43 No.6, pp. 789-801.
- Suresha, S.N., George, V. and Shankar, A.U.R. 2009, Evaluation of Properties of Porous Friction Course Mixes for Different Gyrations Levels, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 21 No. 12, pp. 789-796.
- Suresha, S.N., Varghese, G. and Ravi Shankar, A.U. 2010, Laboratory and Theoretical Evaluation of Clogging Behaviour of Porous Friction Course Mixes, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 11 No. 1, pp. 61-70.
- Ugur, I., Demirdag, S. and Yavuz, H. 2010, Effect of Rock Properties on the Los Angeles Abrasion and Impact Test Characteristics of the Aggregates, *Materials Characterization*, Vol. 61 No. 1, pp. 90-96.
- Vardanega, P.J. 2014, State of the Art: Permeability of Asphalt Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 26 No. 1, pp. 54-64.
- Wang, X., Gu, X., Dong, Q. and Wu, J. 2018, Effects of Flat and Elongated Aggregates on the Performance of Porous Asphalt Mixture, *Journal of Southeast University (English Edition)*, Vol. 34 No. 1, pp. 87-94.
- Watson, D., Moore, K., Williams, K. and Cooley, L. 2003, Refinement of New- Generation Open-Graded Friction Course Mix Design, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1832 No.03, pp. 78- 85.
- Widhiyanto, B., Setyawan, A. and Sarwono, D. 2013, Desain Aspal berpori Dengan Gradasi Seragam Sebagai Bahan Konstruksi Jalan Yang Ramah Lingkungan, *E-Jurnal Matriks teknik Sipil*, No. 1, pp. 165-170.
- Wirawan, B., Setyawan, A. and Sumarsono, A. 2016, Analisis Petrografi Agregat Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Lentur Beton Perkerasan Kaku, *Matriks Teknik Sipil*, No.36, pp. <https://matriks.sipil.ft.uns.ac.id/index.php/MaTekSi/article/view/497>.
- Wu, H., Yu, J., Song, W., Zou, J., Song, Q. and Zhou, L. 2020, A Critical State-of-the- Art Review of Durability and Functionality of Open-Graded Friction Course Mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 237, pp. 117759.
- Wu, Y., Parker, F. and Kandhal, P.S. 1998, Aggregate Toughness/Abrasion Resistance and Durability/Soundness Tests Related to

- Asphalt Concrete Performance in Pavements, Transportation Research Record, No. 1638, pp. 85–93.
- Wu, M., Zhao, J., Cai, H., Liang, J. 2022, Effect of Fibers on the Performance of a Porous Friction Course, ACS Omega, 7, 28324–28333
- Xian, X., & Shao, Y. 2021, Microstructure of cement paste subject to ambient pressure carbonation curing. Construction and Building Materials, 296, 123652
- Xing, M., Chen, S., Wang, B. and Wei, S. 2010, Research on Influence of Aggregate Gradation on the Performance of Porous Asphalt Pavement, In ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems-Green Intelligent Reliable, pp. 3046-3054. ASCE.
- Xu, B., Chen, J., Zhou, C. and Wang, W. 2016, Study on Marshall Design Parameters of Porous Asphalt Mixture Using Limestone as Coarse Aggregate, Construction and Building Materials, Vol. 124, pp. 846–854.
- Yao, H. 2012, Properties and chemical bonding of asphalt and asphalt mixtures modified with nanosilica, Journal of Materials in Civil Engineering.
- Yao, H., You, Z., Li, L., Lee, C. H., Wingard, D., Yap, Y. K., Shi, X., & Goh, S. W. (2013). Rheological Properties and Chemical Bonding of Asphalt Modified with Nanosilica. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(11), 1619–1630.
- You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J. M., Roy, S., Odegard, G. M., Dai, Q., & Goh, S. W. (2011). Nanoclaymodified asphalt materials: Preparation and characterization. Construction and Building Materials, 25(2), 1072–1078
- Yusoff, N. I. M., Breem, A. A. S., Alattug, H. N. M., Hamim, A., & Ahmad, J. (2014). The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures. Construction and Building Materials, 72, 139–147.
- Zaika, Y. and Djakfar, L. 2016, Gradation Band of Some Types Material for Reservoir Base of Porous Pavement, International Journal of Geomate, Vol. 11 No.3, pp. 2486-2492.
- Zhang, H., Anupam, K., Scarpas, A., Kasbergen, C. and Erkens, S. 2019, Effect of Stone-on-Stone Contact on Porous Asphalt Mixes: Micromechanical Analysis, International Journal of Pavement Engineering, pp. 1-12.
- Zhang, Z., Sha, A., Liu, X., Luan, B., Gao, J., Jiang, W. and Ma, F. 2020, State-of-the-Art of Porous Asphalt Pavement: Experience and Considerations of Mixture Design, Construction and Building Materials, Vol. 262.
- Zhao, Y. and Huang, X. 2010, Design Method and Performance for Large Stone Porous Asphalt Mixtures, Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition, Vol. 25 No. 5, pp. 871-876