

Pengaruh Penambahan Nano Silika terhadap Volumetrik dengan Metode Pemadatan Marshall dan Superpave pada Campuran Beraspal Ac-Wc

Nurhafni Karina Resentia^(*)

Program Studi Doktor Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Email: n.karina@students.itb.ac.id

Bambang Sugeng Subagio

Kelompok Keahlian Rekayasa Transportasi, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Email: bsugengs@si.itb.ac.id

Eri Susanto Hariyadi

Kelompok Keahlian Rekayasa Transportasi, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Email: erisdi@yahoo.com

Rani Gayatri Kusumawardhani Pradoto

Kelompok Keahlian Manajemen dan Rekayasa Konstruksi, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Email: ranipradoto@itb.ac.id

Abstrak

Nano teknologi merupakan suatu teknologi rekayasa pada material kedalam ukuran atom atau molekul. Salah satu sifat unik dari nano material yaitu memiliki fraksi permukaan yang cukup besar dan kinerja permukaan yang cukup tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari penambahan nano material pada campuran aspal panas lapis aus (AC-WC). Material nano yang digunakan pada penelitian ini adalah material silika yang berasal dari pasir kuarsa Bangka Belitung yang kemudian diproses menjadi nano silika oleh Balai Besar Keramik Bandung. Aspal yang digunakan pada campuran adalah aspal pen 60/70 produksi Pertamina. Penggunaan material nano silika sebagai substitusi filler dapat mengurangi penggunaan kadar aspal yang mana dapat dilihat dari nilai kadar aspal optimum yang dihasilkan pada campuran dengan variasi 1%, 2%, 3% nano silika jika dibandingkan campuran beraspal konvensional. Selain itu, penggunaan alat pemadat yang berbeda memberikan pengaruh terhadap kepadatan yang dihasilkan pada campuran dengan penambahan nano silika. Hal tersebut terlihat bahwa kepadatan yang dihasilkan oleh alat pemadat superpave gyratory compactor (SGC) menghasilkan kepadatan yang lebih kecil dibandingkan dengan alat pemadat marshall. Selain itu, perbedaan metode pemadatan juga turut mempengaruhi jumlah rongga yang terdapat didalam campuran beraspal dan juga tinggi yang dihasilkan pada benda uji.

Kata-kata Kunci: Campuran aspal, filler, kadar aspal, nanosilika.

Abstract

Nanotechnology is an engineering technology on materials into atomic or molecular sizes. One of the unique properties of nanomaterials is that have a large surface fraction and high surface performance. This study aims to determine the effect of the addition of nanomaterials on hot mix asphalt (AC-WC). The nano material used is silica from Bangka Belitung quartz sand which is processed into nano silica by Balai Besar Keramik Bandung. The asphalt used in the mixture is asphalt pen 60/70 produced by Pertamina. Nano silica is used as a filler substitution so that it can reduce the asphalt content which could be seen from the optimum asphalt content value with mixed variations of 1%, 2%, 3% nano silica when compared to conventional asphalt mixtures. In addition, using different compactor has an effect on nano silica mixture asphalt density. It can be seen that density value from superpave gyratory compactor (SGC) is lower than marshall compactor. In addition, the difference in the compaction method also affects the number of void in mixture and specimen height.

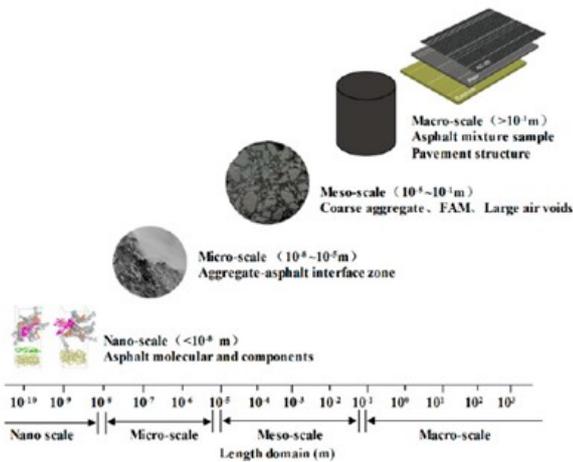
Keyword: Asphalt mixture, asphalt content, filler, nanosilica.

1. Pendahuluan

Pada perkembangannya, mulai banyak dilakukan penelitian multiskala untuk memahami secara komprehensif material konstruksi yang mengalami pembebanan dan suhu yang berbeda. Berdasarkan teori dan metode numerik

yang dilakukan oleh Underwood dkk (2013) dan Yin dkk (2011) yang dikutip oleh Gong dkk (2019) bahwa campuran aspal sangat bergantung pada skala ukuran material penyusunnya seperti yang terlihat pada **Gambar 1**. Campuran aspal panas umumnya terdiri dari 4 (empat) bagian yaitu rongga udara yang besar,

* Penulis Korespondensi: n.karina@students.itb.ac.id



Gambar 1. Klasifikasi skala ukuran campuran beraspal
(Gong dkk, 2019)

interface zona agregat kasar dan aspal, aspal matrix agregat halus atau fine aggregate matrix (FAM) dan agregat kasar. Pada campuran beraspal skala mikro terdiri dari zona ikatan permukaan antara agregat dan aspal, yang mana juga memiliki peranan penting terhadap kinerja campuran beraspal, sedangkan skala nano terdiri dari molekul aspal dan komponen penyusunnya.

Material silika umumnya bisa didapatkan dari bahan alam maupun dengan buatan. Silika buatan biasanya diproses secara kimia dan banyak dijual secara komersil dipasaran. Sedangkan silika alam didapatkan dari bahan alam seperti pasir kuarsa atau melalui proses sintesis bahan alam lainnya seperti sekam padi, dan lain sebagainya. Menurut Iriansyah, (2011) jenis pasir kuarsa memiliki perlekatan yang kurang baik terhadap aspal (stripping) karena mineralnya sebagian besar mengandung electron positif. Untuk mengakomodir kelemahan material pasir kuarsa, maka dilakukan sintesa untuk memisahkan senyawa silika dengan senyawa penyusun lain pada pasir kuarsa. Balai Keramik Bandung melakukan sintesa tersebut menggunakan material pasir kuarsa yang berasal dari Bangka Belitung, hingga menghasilkan silika yang mencapai skala nanometer.

Penelitian dengan penambahan nano material juga telah banyak dikembangkan di beberapa negara. Di Indonesia sendiri masih belum terlalu banyak penelitian dengan menggunakan nano material sebagai bahan tambah dalam campuran aspal. beberapa diantaranya adalah Hadiwardoyo dkk (2020) dan Pradoto dkk (2020). Pada penelitiannya Hadiwardoyo dkk (2020) menambahkan nano crumb rubber pada campuran aspal. Pada penelitian tersebut terlihat bahwa terjadi perubahan karakteristik campuran pada campuran yang ditambahkan nano material jika dibandingkan dengan campuran biasa. Hal tersebut terlihat dari hasil pengujian deformasi pada campuran. pada penelitian yang dilakukan Pradoto dkk (2020), terlihat bahwa penambahan nano material, dalam hal ini adalah fly ash berukuran nano pada campuran beraspal dapat meningkatkan kekuatan campuran, yang mana hal tersebut terlihat dari uji stabilitas marshall. Pematatan marshall sering digunakan dalam penentuan kadar aspal dan sifat dasar dari campuran

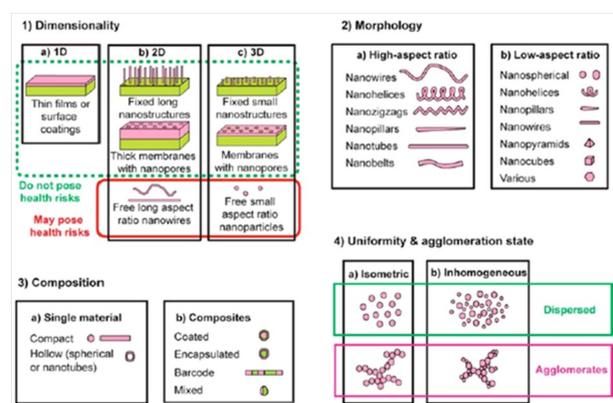
beraspal. Menurut Jiang dkk (2020) proses tumbukan pada pendekatan marshall memberikan pengaruh pada gradasi agregat, sehingga agregat menjadi mudah hancur. Sedangkan pada penelitian yang dilakukan Cui dkk (2014) menyatakan bahwa pematatan dengan menggunakan alat gyratori dapat mengurangi pecahnya agregat kasar, sehingga memberikan dampak yang cukup baik terhadap kinerja campuran. Berdasarkan beberapa hal tersebut terkait campuran beraspal dengan nano material, maka dilakukan penelitian untuk mengidentifikasi kinerja mekanistik campuran beraspal panas dengan nano material. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan volumetrik yang dihasilkan antara alat pematat marshall dan alat pematat giratori. Adapun campuran yang digunakan pada penelitian ini adalah campuran aspal pen 60/70 dan campuran beraspal dengan penambahan nano material. Parameter volumetric yang ditinjau adalah parameter rongga dalam campuran dan kepadatan campuran beraspal. Peran nano silika alam pada campuran adalah sebagai substitusi filler.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Nano material pada campuran aspal

Nano material merupakan material yang memiliki komposisi struktur partikel lebih kecil dari 1µm minimal dalam 1 dimensi. Nano partikel memiliki bentuk amorphous atau crystalline yang mana permukaannya dapat berfungsi sebagai carrier terhadap cairan droplets atau gas. Menurut Buzea dkk (2007) terdapat 2 faktor yang menyebabkan nano material berbeda dengan bulk material yaitu efek terhadap permukaan dan efek quantum. Efek permukaan menghasilkan ukuran sifat halus yang disebabkan oleh fraksi atom yang terdapat pada permukaan. Efek quantum menghasilkan pemutusan perilaku yang disebabkan oleh efek selubung quantum pada material dengan delokalisasi elektron. Struktur nano material sendiri diklasifikasikan berdasarkan beberapa aspek (**Gambar 2**) yaitu :

- Dimensi : 1D, 2D, dan 3D
- Morfologi : high aspect ratio dan low aspect ratio
- Komposisi : single material dan komposit
- Keseragaman dan aglomerasi : isometric dan inhomogeneous



Gambar 2. Klasifikasi nanostruktur material
(Buzea dkk, 2007)

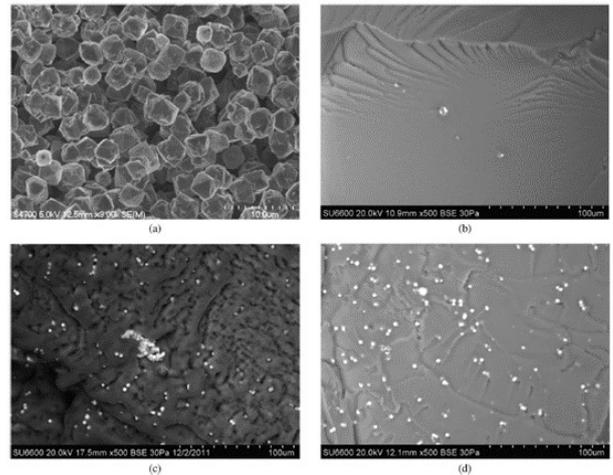
Hingga saat ini telah banyak dilakukan penelitian menggunakan nano partikel sebagai bahan aditif untuk memodifikasi aspal maupun sebagai filler pada campuran aspal. Nano partikel yang hingga saat ini telah digunakan dalam modifikasi aspal diantaranya nano clay, nano silika, nano TiO₂, nano CaCO₃, nano polyethylene, nano iron dan lain sebagainya. Keuntungan dari modifikasi aspal dengan nano materials beberapa diantaranya yaitu untuk meningkatkan ketahanan terhadap alur, retak dan fatigue (Shafabakhsh dan Ani, 2015).

Menurut You dkk (2011), penambahan nano clay dapat meningkatkan shear complex modulus dan mengurangi tingkat kegagalan regangan pada base aspal. Yao dkk (2013) menyatakan bahwa penambahan nano silika pada modifikasi aspal memberikan peningkatan yang signifikan terhadap kinerja anti aging dan retak lelah. Selain itu, nano silika meningkatkan sifat anti stripping pada campuran aspal sehingga terjadi peningkatan yang signifikan pada ketahanan terhadap alur. Yusoff dkk (2014) turut pula menyatakan bahwa penambahan nano silika dapat meningkatkan moisture susceptibility pada campuran. Selain nano silika, terdapat pula beberapa jenis nano partikel yang telah digunakan untuk meningkatkan kinerja dari campuran aspal. beberapa jenis nano partikel yang telah diteliti diantaranya nano clay, nano CaCO₃, nano TiO₂, nano polyethylene, nano bentonite, nano rubber dan lain sebagainya.

Yao dkk (2013) melakukan penelitian mengenai sifat reologi dan ikatan kimia pada pada aspal modifikasi nano silika dengan kada 4% dan 6% dari berat bitumen. Nano silika yang digunakan pada penelitian tersebut berbentuk quartz dan cubic polymorph (lihat **Gambar 3**). Dari **Gambar 3** terlihat bahwa masih terjadi aglomerasi pada campuran walaupun beberapa bagian telah terdispersi dengan baik.

2.2 Kinerja campuran dengan penambahan nano material

Crucho dkk (2018) melakukan penelitian dengan membandingkan beberapa nano partikel dengan kadar 4% dalam memodifikasi aspal. Nano partikel yang digunakan adalah nano silika, nano zero valent iron, dan nano bentonite. Dari hasil penelitian tersebut bahwa penambahan dengan nano silica memberikan efek yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan nano partikel lainnya. Dari hasil pengujian wheel tracking terlihat bahwa terjadi penurunan nilai kedalaman alur yang dihasilkan pada campuran dengan penambahan berbagai jenis nano material jika dibandingkan dengan campuran kontrol. Hal tersebut mengindikasikan bahwa penambahan



Gambar 3. Hasil SEM: (a) nano silika pada pembesaran 3000x (b) base aspal pada pembesaran 500x (c) modifikasi 4% nano silika dengan base aspal pada pembesaran 500x (d) modifikasi 6% nano silika dengan base aspal pada pembesaran 500x (Yao dkk, 2013)

nano material pada campuran aspal dapat meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan alur pada campuran beraspal khususnya menggunakan material nano silika. Peneliti lainnya, Taherkhani dan Tajdini, (2019) melakukan penelitian dengan membandingkan penggunaan 2%, 4% dan 6% nano silika dengan hydrated lime pada modifikasi aspal. Berdasarkan hasil pengujian modulus resilien terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai modulus yang dihasilkan jika dibandingkan dengan campuran kontrol. Selain peningkatan nilai modulus, terjadi pula peningkatan umur fatigue pada campuran dengan penambahan nano material jika dibandingkan dengan campuran kontrol.

Penggunaan nano silika pada campuran beraspal juga telah banyak dilakukan oleh peneliti – peneliti lainnya. Beberapa studi terdahulu terkait penggunaan nano silika pada campuran aspal dengan berbagai variasi dapat dilihat pada **Tabel 2**. Namun, pada studi tersebut, nano silika yang banyak digunakan adalah nano silika yang didapatkan melalui proses sol gel, bottom up atau beberapa pendekatan kimia lainnya. Sehingga kandungan silika yang terdapat pada material tersebut merupakan material dengan senyawa silika murni 99%.

2.3 Parameter mekanistik campuran beraspal

Menurut Yamin (2004) yang dikutip oleh Sihombing (2020) menyatakan bahwa kinerja mekanistik campuran beraspal dipengaruhi oleh tegangan dan regangan yang

Tabel 1. Studi terdahulu tentang efek penambahan nano silika pada campuran aspal (Sukhija dkk, 2021)

No	Penulis	Kadar Nano silika	Jenis aspal
1.	(Yao et al., 2013)	4%, 6%	PG 58 – 34
2.	(Saltan et al., 2017)	0,1%; 0,3%; 0,5%	PG 64 – 22
3.	(Arshad et al., 2017)	1%, 2%, 3%, 4%, 5%	Pen 60/70
4.	(Nazari et al., 2018)	2%, 4%	Pen 60/70
5.	(Ghanoon & Tanzadeh, 2019)	2%, 4%, 6%	PG 64 – 22
6.	(Leiva-villacorta & Vargas-nordbeck, 2017)	0,5%; 3%; 6%	PG 64 – 22
7.	(Moeini et al., 2019)	2%, 4%, 6%	PG 64 - 16

terjadi pada struktur perkerasan akibat beban lalu lintas, kerusakan perkerasan, dan umur perkerasan. Beberapa parameter yang diperlukan dalam menentukan kinerja mekanistik baik untuk perencanaan maupun evaluasi struktural campuran beraspal yaitu:

1. Modulus kekakuan aspal dan campuran beraspal
2. Angka poisson aspal dan campuran beraspal
3. Ketahanan campuran beraspal terhadap deformasi permanen
4. Ketahanan campuran beraspal terhadap beban berulang

3. Material dan Metodologi

3.1 Material

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah aspal pertamina pen 60/70, agregat yang berasal dari PT. Kadi dan nano silika alam hasil pemrosesan oleh Balai Keramik Bandung. Hasil pengujian karakteristik dasar material yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**. Berdasarkan hasil uji ukuran butir, nano silika alam tersebut memiliki ukuran dalam rentang 2500 – 250 nanometer. Nano silika sendiri berasal dari pasir kuarsa Bangka Belitung yang telah melewati beberapa proses untuk didapatkan senyawa silika yang masuk kedalam rentang skala nanometer.

3.2 Metodologi penelitian

Jenis campuran beraspal pada penelitian ini adalah campuran beraspal panas lapis aus. Gradasi yang digunakan pada campuran berdasarkan spesifikasi umum 2018 revisi 2 yang dikeluarkan oleh ditjen bina marga, kementerian PUPR. Selanjutnya campuran yang telah direncanakan tersebut dibuat benda uji dengan proses pemadatan yang berbeda. Metode pertama yaitu menggunakan alat pemadat marshall yang mengacu pada pedoman SNI 2489-2018. Sedangkan metode kedua yaitu menggunakan alat

pemadat superpave gyratory compaction (SGC) yang mengacu pada standar SUPERPAVE dan AASTHO. Benda uji yang sudah dipadatkan selanjutnya diukur volumetriknya untuk diketahui parameternya dan juga density pada tiap variasi campuran. bagan alir penelitian secara rinci dapat dilihat pada **Gambar 4**.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Gradasi campuran beraspal

Agregat yang telah didapatkan dari PT. Kadi selanjutnya diuji karakteristik dasarnya. Berdasarkan hasil uji karakteristik dasar agregat kasar, halus dan filler, material tersebut memenuhi spesifikasi yang ditetapkan oleh Bina Marga dan dapat digunakan didalam campuran. Selanjutnya dilakukan perencanaan gradasi campuran untuk mendapatkan proporsi material yang cocok yang digunakan pada campuran. Kurva gradasi campuran dapat dilihat pada **Gambar 5**.

4.2 Analisa perbandingan metode Marshall dan Superpave

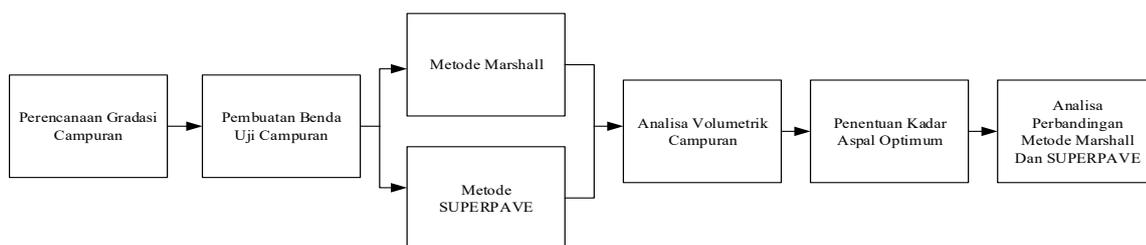
Perbedaan yang signifikan antara metode marshall dan superpave adalah dari proses pemadatan benda uji serta parameter dalam menentukan kadar aspal optimum (KAO). Pada pemadatan marshall, benda uji ditumbuk sebanyak 75 tumbukan sedangkan pada pemadatan dengan alat SGC, benda uji akan berputar dengan laju 30 putaran/menit dengan tekanan vertikal sebesar 600±18 kPa dan sudut putar sebesar 1,16° (Asphalt Institute, 2009). Jumlah putaran pada pemadatan SGC bergantung pada tingkat lalu lintas yang direncanakan. Selain pada proses pemadatan, perbedaan yang mendasar pada kedua metode ini terdapat pada penentuan nilai KAO campuran. Pada metode marshall, nilai kadar aspal optimum didapatkan berdasarkan parameter stabilitas, flow dan parameter volumetric pada campuran. Sedangkan, pada pendekatan superpave penentuan nilai KAO berdasarkan parameter volumetrik seperti rongga dalam campuran sebesar 4% dan beberapa parameter volumetric lainnya berdasarkan jenis campuran yang direncanakan.

Tabel 2. Karakteristik dasar aspal pen 60/70.

Pengujian	Satuan	Hasil Uji	Spesifikasi
Penetrasi (25°C)	0,1 mm	63,7	60 – 70
Viskositas Kinematis (135°C)	cSt	392,4	Min 300
Titik Lembek	°C	50,5	Min 48
Daktalitas (25°C)	cm	>100	Min 100
Kehilangan berat (TFOT)	%berat	0,149	Min 0,8
Penetrasi setelah TFOT	0,1 mm	58,8	Min 54

Tabel 3. Karakteristik agregat

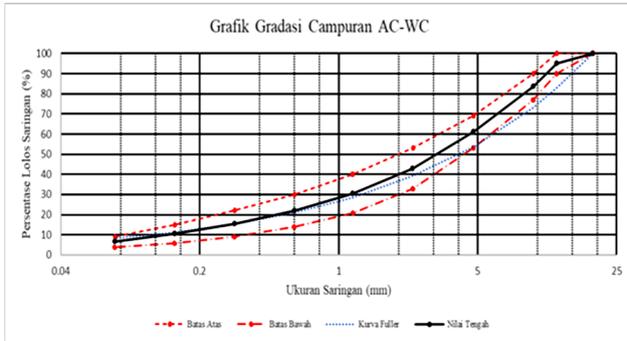
Pengujian	Hasil Uji	Spesifikasi
Berat jenis agregat gabungan	2,575	Min 2,5
Abrasi (500 putaran)	21,17%	Maks 30%
Penyerapan agregat kasar	1,548%	Maks 3%
Penyerapan agregat halus	2,243%	Maks 3%



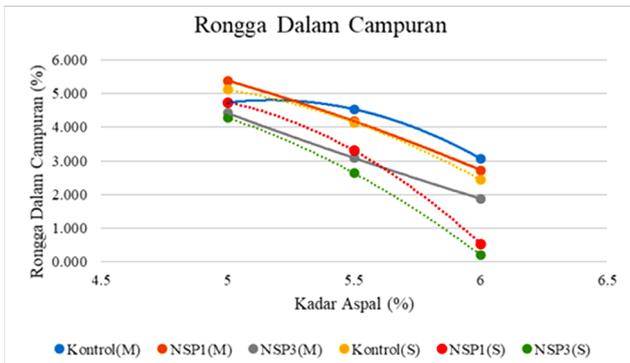
Gambar 4. Diagram alir penelitian

Tabel 4. Persentase penambahan silika pada variasi campuran

No	Variasi Campuran	Nano silika (%)
1.	Kontrol	0
2.	NSP1	1
3.	NSP3	3



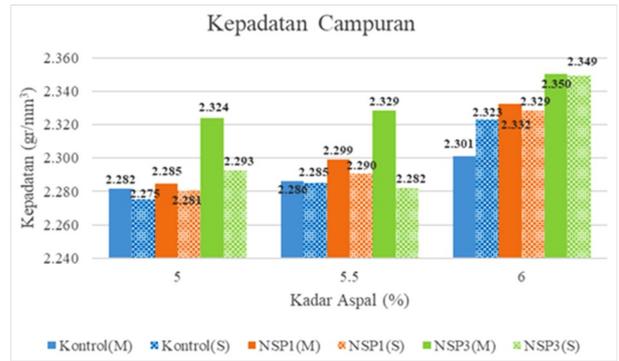
Gambar 5. Kurva gradasi yang digunakan pada campuran



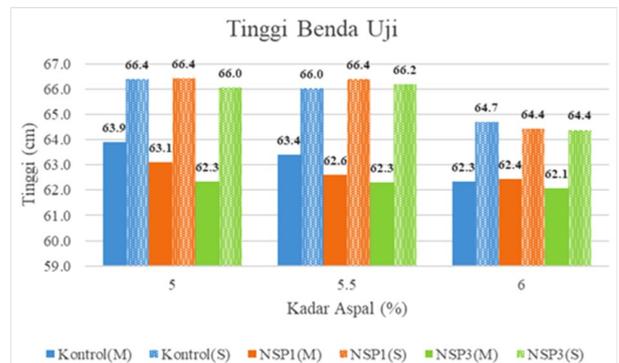
Gambar 6. Grafik perbandingan rongga dalam campuran antara pemadatan marshall dan SGC

Berdasarkan Gambar 6 terlihat bahwa terjadi perbedaan besarnya rongga yang terdapat dalam campuran dengan menggunakan dua jenis pemadatan yang berbeda. Dari nilai tersebut terlihat bahwa terjadi penurunan nilai rongga dalam campuran (VIM) ketika penggunaan kadar aspal ditingkatkan. Pada campuran kontrol menghasilkan nilai VIM yang lebih besar jika dibandingkan campuran dengan penambahan material nano silika. Hal tersebut mengindikasikan bahwa material nano silika yang ditambahkan mengisi rongga yang terdapat dalam campuran. Selain itu, ketika kadar nano silika ditambahkan hingga 3%, nilai VIM yang dihasilkan mengalami penurunan jika dibandingkan penggunaan nano silika sebanyak 1%.

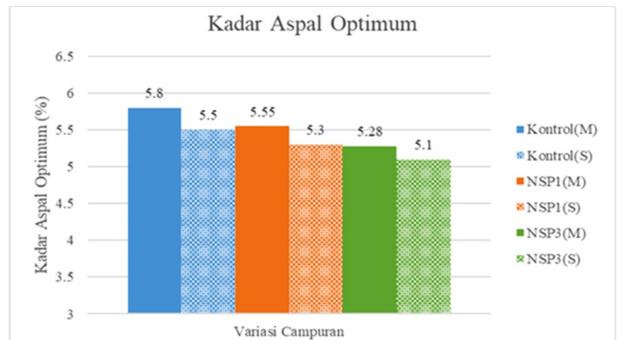
Rongga dalam campuran juga memiliki berhubungan dengan kepadatan pada campuran tersebut. Kepadatan campuran sendiri juga dipengaruhi oleh jenis pemadatan campuran yang dilakukan. Perbedaan nilai kepadatan yang dihasilkan dari dua jenis pemadatan dapat dilihat pada Gambar 7. Pemadatan dengan alat marshall menghasilkan nilai kepadatan lebih besar jika dibandingkan dengan pemadatan menggunakan alat SGC. Hal ini dipengaruhi oleh cara kerja alat dalam



Gambar 7. Grafik perbandingan kepadatan campuran antara pemadatan marshall dan SGC



Gambar 8. Grafik perbandingan tinggi campuran antara pemadatan marshall dan SGC



Gambar 9. Grafik perbandingan nilai KAO antara pemadatan marshall dan SGC

memadatkan benda uji. Seperti diketahui, alat marshall memadatkan dengan tumbukan dengan jumlah tertentu, sedangkan SGC melalui putaran dengan kecepatan dan tekanan vertikal yang telah ditentukan. Perbedaan cara kerja dalam memadatkan benda uji pada kedua alat tersebut mempengaruhi jumlah rongga dan kepadatan yang dihasilkan pada campuran. Sebagai contoh pada campuran kontrol dengan kadar 5%, pada pemadatan marshall dihasilkan kepadatan sebesar 2,282, sedangkan pada pemadatan dengan alat SGC dihasilkan kepadatan sebesar 2,275. Selain itu, semakin besar kadar aspal yang ditambahkan pada campuran, maka akan menghasilkan kepadatan yang lebih besar.

Selain kepadatan, tinggi benda uji yang dihasilkan antara pemadatan dengan alat marshall dan alat SGC

menghasilkan nilai yang berbeda. Perbandingan tinggi benda uji yang dihasilkan oleh kedua alat pemadat dapat dilihat pada **Gambar 8**. Dengan porsi penggunaan material agregat dan aspal yang sama, terlihat bahwa dengan alat pemadat yang berbeda dapat menghasilkan benda uji dengan tinggi yang berbeda. Benda uji yang dipadatkan dengan marshall menghasilkan benda uji dengan tinggi yang lebih kecil jika dibandingkan dengan pemadatan SGC. Hal ini dipengaruhi oleh cara kerja alat pemadat marshall yang berupa tumbukan dalam jumlah tertentu. Sebagai contoh pada campuran kontrol dengan kadar aspal 5,5% dihasilkan benda uji dengan tinggi sebesar 63,4 cm untuk alat pemadat marshall, sedangkan dengan alat SGC dihasilkan benda uji yang lebih tinggi yaitu sebesar 66 cm. Selain itu, semakin besar penggunaan kadar aspal pada campuran, maka semakin kecil tinggi benda uji yang telah dipadatkan.

Parameter lain yang membedakan antara metode pemadatan marshall dan SGC adalah nilai KAO yang dihasilkan. Perbandingan nilai KAO yang dihasilkan dapat dilihat pada **Gambar 9**. Berdasarkan hasil tersebut terlihat bahwa metode pemadatan dengan alat SGC menghasilkan campuran dengan nilai KAO yang lebih kecil jika dibandingkan dengan metode marshall. Hal ini juga dipengaruhi oleh parameter – parameter yang digunakan dalam menentukan nilai KAO. Untuk metode marshall sendiri dalam penentuan nilai KAO berdasarkan beberapa parameter diantaranya stabilitas, pelelehan, rongga dalam campuran, rongga dalam mineral agregat, rongga terisi aspal, dan beberapa parameter lainnya yang mengacu pada spesifikasi yang dikeluarkan oleh Bina Marga. Sedangkan metode SGC yang mengacu pada Superpave, parameter yang paling menentukan adalah rongga dalam campuran dengan batasan 4%, selanjutnya diikuti parameter rongga dalam mineral agregat, rongga terisi aspal dan persen berat jenis maksimum campuran. Selain parameter pendukung, cara kerja alat pemadat juga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai KAO yang dihasilkan. Yang mana cara kerja alat pemadat akan mempengaruhi kepadatan yang dihasilkan pada campuran, dan kepadatan akan mempengaruhi jumlah kadar aspal yang dibutuhkan oleh campuran pada kondisi optimum.

Setelah diketahui kadar aspal optimum (KAO) pada masing – masing variasi campuran aspal, maka dilakukan pembuatan benda uji campuran aspal dengan nilai KAO untuk pengujian modulus resilien dengan alat UMATTA dan pengujian deformasi permanen dengan alat hambur wheel tracking (HWT). Kedua pengujian ini dilakukan pada penelitian tahap berikutnya untuk mengetahui nilai modulus dan besarnya kedalaman alur yang dihasilkan pada masing – masing variasi campuran.

5. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian yang dilakukan adalah:

1. Semakin bertambah penggunaan kadar aspal pada campuran, maka semakin kecil pula rongga dalam campuran yang dihasilkan. Selain itu, ketika nano

silika ditambahkan sebagai substitusi filler pada campuran, menghasilkan rongga dalam campuran yang sedikit jika dibandingkan campuran kontrol.

2. Penambahan kadar silika pada campuran menghasilkan nilai density yang lebih besar jika dibandingkan campuran kontrol pada penggunaan kadar aspal yang sama. Selain itu, penambahan kadar silika juga memberikan pengaruh terhadap jumlah rongga pada campuran. Dimana, ketika kadar silika ditambahkan maka rongga campuran yang dihasilkan semakin kecil.
3. Cara kerja alat pemadat mempengaruhi kepadatan campuran yang dihasilkan. Metode marshall dengan cara tumbukkan dengan jumlah tertentu menghasilkan kepadatan campuran yang lebih besar jika dibandingkan dengan pemadat SGC dengan cara kerja diputar pada girasi dan sudut putaran tertentu.
4. Tinggi benda uji yang dipadatkan oleh alat SGC lebih besar jika dibandingkan tinggi benda uji yang dipadatkan dengan alat marshall.
5. Pemadatan dengan alat SGC menghasilkan nilai KAO yang lebih kecil jika dibandingkan dengan benda uji yang dipadatkan dengan alat marshall.

Daftar Pustaka

- Arshad, A. K., Samsudin, M. S., Masri, K. A., Karim, M. R., & Halim, A. G. A. (2017). *Multiple Stress Creep and Recovery Nanosilica Modified Asphalt Binder*. MATEC Web of Conference, 09005.
- Asphalt Institute. (2009). *MS-2 7 th Edition Asphalt Mix Design Methods*. In *ASTM International: Vol. i (Issue 111)*.
- Buzea, C., Pacheco, I. I., & Robbie, K. (2007). *Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity*. *Biointerphases*, 2(4), MR17–MR71.
- 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.
- Cui, W., Chen, L., Yu, Z., & Qin, L. (2014). *Feasibility research on superpave gyratory compactor method design mix of stone mastic asphalt*. *Key Engineering Materials*, 599, 159–163.
- Ghanoon, S. A., & Tanzadeh, J. (2019). *Laboratory evaluation of nano-silica modification on rutting resistance of asphalt Binder*. *Construction and Building Materials*, 223, 1074–1082.
- Gong, X., Dong, Z., Wang, H., Ma, X., Yu, H., & Hu, K. (2019). *Rheological characterization of*

- asphalt fine aggregate matrix using dynamic shear rheometer*. *Polymers*, 11(8).
- 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.
- Iriansyah. (2011). *Kajian aplikasi pasir kuarsa sebagai campuran lapis pondasi pasir aspal emulsi*. Pusat Litbang Jalan Dan Jembatan, 28 No 2, 97–110.
- Jiang, Y., Zhang, Y., Xue, J., Deng, C., & Tian, T. (2020). *Performance of stone mastic asphalt mixtures fabricated by different compaction methods*. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(7).
- Leiva-villacorta, F., & Vargas-nordbeck, A. (2017). *Optimum content of nano-silica to ensure proper performance of an asphalt binder*. *Road Materials and Pavement Design*, 0629(October).
- Moeini, A. R., Badiei, A., & Rashidi, A. M. (2019). *Effect of nanosilica morphology on modification of asphalt binder*. *Road Materials and Pavement Design*, 0(0), 1–17.
- Nazari, H., Naderi, K., & Moghadas, F. (2018). *Improving aging resistance and fatigue performance of asphalt binders using inorganic nanoparticles*. *Construction and Building Materials*, 170, 591–602.
- Pradoto, R., Puri, E., Hadinata, T., & Rahman, Q. D. (2020). *Improving strength of porous asphalt: A nano material experimental approach*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 849(1).
- Saltan, M., Terzi, S., & Karahancer, S. (2017). *Examination of hot mix asphalt and binder performance modified with nano silica*. *Construction and Building Materials*, 156, 976–984.
- 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.
- Sihombing, A. V. R. (2020). *Bioaspal Sebagai Rejuvenator RAP dan Modifier Asbuton dalam Campuran Beraspal Panas*, Disertasi, Institut teknologi Bandung.
- 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(July), 124406.
- Taherkhani, H., & Tajdini, M. (2019). *Comparing the effects of nano-silica and hydrated lime on the properties of asphalt concrete*. *Construction and Building Materials*, 218, 308–315.
- Underwood, B. S., Asce, A. M., Kim, Y. R., & Asce, F. (2013). *Microstructural Association Model for Upscaling Prediction of Asphalt Concrete Dynamic Modulus*. 25(September), 1153–1161.
- 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.
- Yin, A., Yang, X., Yang, S., & Jiang, W. (2011). *Multiscale fracture simulation of three-point bending asphalt mixture beam considering material heterogeneity*. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(12), 2414–2428.
- You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J. M., Roy, S., Odegard, G. M., Dai, Q., & Goh, S. W. (2011). *Nanoclay-modified 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.

