

Evaluasi Pengaruh Sudut Putaran pada Pemadatan Campuran Beraspal Menggunakan *Superpave Gyratory Compactor* (SGC) Terhadap Kinerja *Fatigue* dan *Resilient Modulus* pada *Stone Matrix Asphalt* (SMA)

Eri Susanto Hariyadi^(*)

Program Studi Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung, 40132 E-mail: erisdi@yahoo.com

Ricky

Program Studi Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung, 40132 E-mail: rickyauri@gmail.com

Abstrak

The compaction of the asphalt mixture using the Superpave Gyratory Compactor according to AASHTO T312-14 requires compaction at gyration angle of $1.16^{\circ} \pm 0.02^{\circ}$. This study is intended to evaluate the gyration angle requirements by analyzing the performance of the Resilience Modulus and fatigue strength (fatigue) in the SMA mixture using variations in the rotation angle (0.82° , 1.16° , and 1.5°). The compaction of the asphalt mixture using Marshall compactor was also carried out as a comparison to the performance of the mixture with the variation of the angle of gyration. The compaction of the SMA mixture using the Marshall method has a smaller VIM and a larger VMA compared to the SGC method with a gyration angle of 1.16° and 1.5° . The VIM value range of the Marshall method is 3-5% while the SGC method is 4%. This affects the value of the optimum asphalt content in each method. With increasing angle of gyration will influence to Resilient Modulus of SMA at 25°C increase by 26% as well. The SMA compacted using the SGC method resulted in a higher MR value than the Marshall method. The results of the fatigue test using Four Point Loading showed that the SMA mixture compacted by the SGC method with a gyration angle of 0.82° is higher than that which was compacted using the Marshall method. Furthermore, it can be recommended compaction of SGC with a gyration angle of 1.00° , 100 gyration, a pressure of 600 kPa, and a speed of 30 rpm which results in better performance than Marshall compaction. SGC compaction is better in workability, density, and achieve volumetric targets than Marshall compaction.

Kata Kunci: SMA, superpave gyratory compactor (SGC), angle of gyration, resilient modulus, fatigue.

Abstract

Pemadatan campuran beraspal menggunakan Superpave Gyratory Compactor sesuai AASHTO T312-14 mempersyaratkan pemadatan pada sudut $1.16^{\circ} \pm 0.02^{\circ}$. Penelitian ini dimaksudkan untuk mengevaluasi persyaratan sudut putaran ini dengan menganalisis kinerja Modulus Resilien dan kuat lelah (fatigue) pada campuran SMA dengan menggunakan variasi sudut putaran (0.82° , 1.16° , dan 1.5°). Pemadatan campuran beraspal menggunakan pemadat Marshall juga dilakukan sebagai pembanding terhadap kinerja campuran dengan variasi sudut putaran tersebut. Pemadatan campuran SMA menggunakan metode Marshall memiliki nilai VIM yang lebih kecil dan VMA lebih besar dibandingkan dengan metode SGC sudut putaran 1.16° dan 1.5° . Rentang nilai VIM metode Marshall yaitu 3 – 5% sedangkan metode SGC sebesar 4%. Hal ini yang mempengaruhi nilai kadar aspal optimum (KAO) pada masing-masing metode. Nilai Modulus Resilien (suhu 25°C) pada campuran SMA menunjukkan bahwa semakin besar sudut putaran maka nilai MR akan semakin meningkat sebesar 26%. Campuran SMA yang dipadatkan dengan metode SGC Spesifikasi AASHTO menghasilkan nilai MR yang lebih tinggi dibandingkan metode Marshall Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018. Hasil pengujian fatigue dengan Four Point Loading menunjukkan bahwa campuran SMA yang dipadatkan dengan metode SGC sudut putaran 0.82° menghasilkan nilai umur kelelahan lebih tinggi dibandingkan dengan yang dipadatkan dengan metode Marshall Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018. Dengan variasi sudut putaran ini dapat direkomendasikan pemadatan SGC dengan sudut putaran 1.00° , sebanyak 100 putaran, tekanan 600 kPa, dan kecepatan 30 rpm yang menghasilkan kinerja yang lebih baik dari pemadatan Marshall. Pemadatan SGC lebih mudah dalam workability, keseragaman kepadatan, serta pencapaian target volumetrik dibandingkan pemadatan Marshall.

Keywords: SMA, superpave gyratory compactor, sudut putaran, resilient modulus, fatigue.

* Penulis Korespondensi

1. Pendahuluan

Pemadatan campuran merupakan bagian penting dalam proses konstruksi jalan. Selama pemadatan, agregat disatukan menciptakan kerangka yang memberikan ketahanan terhadap deformasi dan pada saat yang sama membatasi permeabilitas dengan mengurangi rongga udara yang memperpanjang umur perkerasan (Polaczyk dkk, 2018). Salah satu proses penting dalam mendesain campuran beraspal yaitu pemadatan di laboratorium. Pemadatan dengan metode *Marshall* sudah sering digunakan di berbagai negara karena praktis dan ekonomis, namun tidak dapat secara efektif mensimulasikan situasi pemadatan yang sebenarnya di lapangan (Wang dkk, 2019). Tumbukan dalam pemadatan *Marshall* sangat mempengaruhi gradasi agregat dan agregat mudah hancur selama pemadatan sehingga mengurangi korelasi antara sifat mekanis dan inti perkerasan (Jiang dkk, 2020).

Berdasarkan pengalaman keteknikan, spesimen yang dibuat oleh pemadatan metode *Superpave Gyratory Compactor* (SGC) dapat lebih baik merepresentasikan pemadatan campuran di lapangan (Jiang dkk, 2019). Pemadatan dengan metode SGC dapat mengurangi perpecahan agregat kasar, dapat memberikan dampak jangka panjang yang nyata dari simulasi lalu lintas, serta memiliki korelasi yang baik dengan pemadatan di lapangan (Weiping dkk, 2014). Parameter utama dalam pengaturan pemadatan SGC yaitu tekanan vertikal, kecepatan putaran, jumlah putaran, serta sudut putaran (Asphalt Institute, 2014). Sudut putaran merupakan parameter yang memiliki pengaruh terbesar pada pemadatan specimen, apabila sudut meningkat maka upaya pemadatan meningkat. Beberapa penelitian sudah dilakukan untuk mengevaluasi sudut putaran ini (Al Khateeb, dkk. 2002; Prowell, dkk., 2003; Romero, dkk., 2005) telah menghasilkan sifat (*properties*) volumetrik yang lebih baik dari sampel yang dipadatkan dengan perubahan sudut putaran. Oleh karena itu perlu dievaluasi kinerja struktural dari variasi sudut putaran ini untuk mengevaluasi berapa nilai sudut putaran yang memberikan kinerja struktur yang baik.

Stone Matrix Asphalt (SMA) merupakan campuran beraspal dengan gradasi senjang (*gap-graded*) yang komponen kerangka penyusunnya terdiri atas agregat kasar dan komponen mastik aspal. SMA dapat memberikan sifat daya tahan yang lebih baik (khususnya ketahanan *rutting* yang tinggi).

Dewasa ini banyak campuran SMA yang dirancang dengan pemadatan SGC, dimana specimen yang dipadatkan membuat agregat dapat lebih mudah bergerak satu sama lain sehingga rongga di dalam campuran dapat terisi dengan cepat hingga ke dinding cetakan (Weiping dkk, 2014). Kadar rongga udara menjadi suatu kriteria yang penting dalam pembuatan campuran beraspal dan harus memenuhi syarat yang ditentukan karena distribusinya secara signifikan dapat mempengaruhi sifat-sifat mekanis dan respon campuran beraspal.

2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh sudut putaran pada pemadatan campuran beraspal menggunakan *Superpave Gyratory Compactor* (SGC) terhadap kinerja *Fatigue* dan *Resilient Modulus* pada *Stone Matrix Asphalt* (SMA).

Standar pengujian campuran SMA pematat *Marshall* menggunakan spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 dan pematat SGC menggunakan spesifikasi AASHTO M325. Aspal yang digunakan yaitu Shell Cariphalte® PG 76. pengujian *Resilient Modulus* menggunakan UMATTA dan *Fatigue* menggunakan *Four Point Loading Apparatus*.

3. Kinerja Campuran Stone Matrix Asphalt

3.1 Campuran stone matrix asphalt

Stone Matrix Asphalt (SMA) merupakan campuran yang stabil, awet, dan tahan terhadap beban tinggi. SMA mengandalkan kekuatan dari rangka (*skeleton*) agregat kasar, dan rongga diantara agregat diisi dengan mastik dengan kadar aspal yang tinggi untuk memberikan durabilitas yang baik. Pada umumnya campuran SMA terdiri dari 70% - 80% agregat kasar, 8% - 12% *filler*, serta 6% - 7% bahan pengikat terhadap berat campuran. SMA mengandalkan kekuatan dari rangka (*skeleton*) agregat kasar, dan rongga diantara agregat diisi dengan mastik dengan kadar aspal yang tinggi untuk memberikan durabilitas yang baik. Akibat kadar aspal yang tinggi tersebut ada kecenderungan aspal akan mengalir (*draindown*) atau terpisah sebagian pada saat penyimpanan silo (jika ada) dan pengangkutan. Pada saat ini dikenal dua cara mengurangi pengaliran aspal yaitu, binder absorbers dan viscosity boosters. Suatu campuran beraspal sebagai lapis perkerasan harus memiliki karakteristik seperti, stabilitas, *durability*, *fatigue resistance*, *workability*, *skid resistance* dan *impermeability*.

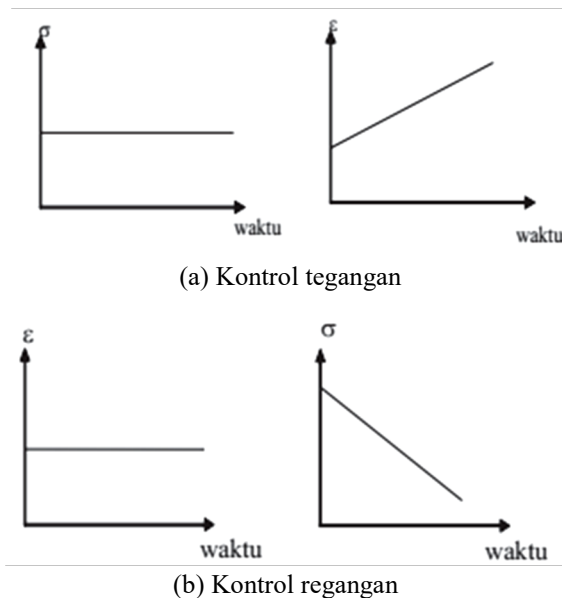
3.2 Modulus resilien

Modulus kekakuan atau *Resilient Modulus* adalah salah satu parameter mekanistik terkait dengan sifat material yang digunakan untuk perencanaan maupun mengevaluasi kinerja campuran beraspal. Karena campuran beraspal merupakan material yang tidak bersifat elastis sempurna, maka dari itu terminologi Modulus Elastisitas (E) tidak cocok digunakan dan sebagai gantinya digunakan istilah *Modulus of Resilient* (M_R), yaitu modulus elastisitas berdasarkan deformasi balik (*recoverable strain*) akibat beban berulang. *Modulus of resilient* merupakan tingkat elastisitas dan kekakuan material (*stiffness*) yang secara teoritis didapat dari hubungan antara tegangan dan regangan suatu material. *Modulus of resilient* dapat digunakan antara lain sebagai penilaian untuk memprediksi *stress*, *strain* dan *displacement*, serta sebagai pendekatan perencanaan perkerasan maupun mengevaluasi kinerja perkerasan.

3.3 Kelelahan (*fatigue*)

Kelelahan merupakan suatu fenomena timbulnya retak akibat beban berulang yang terjadi karena pengulangan tegangan atau regangan yang batasnya masih dibawah batas kekuatan material (Yoder dkk,1975). Besarnya tegangan atau regangan tergantung pada beban roda, kekakuan dan sifat dasar perkerasan secara keseluruhan. Metoda-metoda pengujian laboratorium yang cukup baik dan memungkinkan untuk digunakan dalam hal pengukuran sifat-sifat campuran yang mempengaruhi kinerja kelelahan adalah :

1. *Direct axial tensile* (tarikan langsung)
2. *Indirect tensile* (tarikan tidak langsung)
3. *Flexure fatigue test* (uji kelelahan lentur) ; dengan 2 titik, 3 titik dan 4 titik lentur.
4. *Rotating bending* (momen putar)

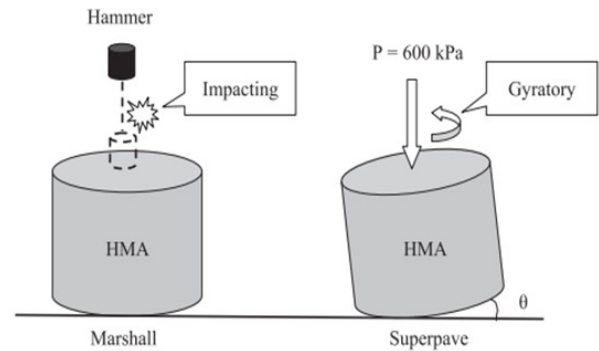


Gambar 1. Ilustrasi cara pembebanan uji kelelahan
(Sumber: Huang; 2004)

Pengujian kelelahan di laboratorium dapat dilakukan dengan kontrol tegangan atau kontrol regangan. Ilustrasi pembebanan pada kontrol tegangan dan kontrol regangan dapat dilihat pada **Gambar 1**.

4. Superpave Gyratory Compactor

Pemadatan *SGC* adalah metode lain yang digunakan untuk memadatkan sampel di laboratorium. Metode pemadatan sampel ini dikembangkan pada akhir 1930-an dan awal 1940-an. Membuat sampel dengan penggunaan pemadatan *SGC* dijelaskan dalam EN 12697-31, ASTM D4013-09, dan ASTM D3387-83 (2003). Pemadatan dengan *SGC* di Amerika digunakan 75 dan 100 putaran. Berdasarkan spesifikasi AASHTO M325, pemadatan dilaksanakan dengan 100 putaran jika abrasi loss angles lebih kecil dari 30% dan dengan 75 putaran apabila nilai abrasi lebih besar dari 30%. AASHTO T312 mempersyaratkan pemadatan campuran beraspal ini



Gambar 2. Comparison of marshall impacting compaction and superpave gyratory compaction (Zhang, dkk., 2019)

dilakukan pada sudut $1,16^{\circ} \pm 0,02^{\circ}$. Prinsip pemadatan metode ini dapat dilihat pada Gambar 2. Tingkat lalu lintas yang dirancang *single axel* (ESAL) dari AASHTO R35-04. Secara umum hubungan antara tingkat pemadatan dan angka pemadatan dapat dibagi menjadi dua fase. Fase (N_{ini}) \rightarrow N_{des} digunakan untuk menganalisis karakteristik pemadatan selama masa konstruksi, dan fase $N_{des} \rightarrow N_{max}$ digunakan untuk menganalisis karakteristik pemadatan selama masa layan (Wang, et. al 2019).

5. Spesifikasi Campuran SMA

Campuran Stone Matrix Asphalt dalam penelitian ini menggunakan Aspal Modifikasi Shell Cariphalte® sebagai bahan pengikatnya. Karakteristik metode pemadatan Marshall terdiri dari nilai stabilitas, flow, VIM dan VMA dengan jumlah tumbukan pemadatan

Tabel 1. Campuran SMA spesifikasi AASHTO M325

Properti	Kebutuhan
Rongga udara, %	4.0%
VMA, %	Min. 17.0%
VCA _{mix} , %	Kurang dari VCA _{DRC}
Tensile Strength Ratio, AASHTO T 283	Min. 0.80
Draindown, %	Maksimal 0.3
Kadar Aspal, %	Min. 6.0

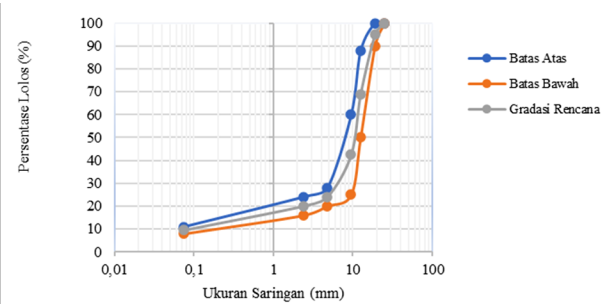
Tabel 2. Campuran SMA spesifikasi umum Bina Marga 2018

Sifat-sifat Campuran	Nilai
Tumbukan	50
VIM	Min. 3,0
Rongga dalam agregat (VMA) (%)	Maks. 5,0
VCA _{MIX} /VCA _{drc}	Min. 17
Draindown	< 1
Stabilitas (kg)	Maks. 0,3
Pelelehan (mm)	Min. 600
Stabilitas Sisa (%)	Min. 2
DS (lntasan/mm)	Maks. 4,5
	Min. 90
	Min. 2500

dilakukan sebanyak 50 kali perbidang. Campuran SMA spesifikasi AASHTO dan Bina Marga dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

Metode pemadatan SGC mengacu pada Spesifikasi AASHTO M325. Campuran SMA menggunakan SGC tidak memperhitungkan nilai stabilitas dan *flow*, kekuatan campuran dilihat dari nilai volumetrik campuran. Spesifikasi SMA spesifikasi AASHTO M325 dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Gradasi agregat menunjukkan persentase masing-masing ukuran dalam campuran. Hal ini biasanya dinyatakan sebagai persentase agregat gabungan yang lolos ayakan. Distribusi ukuran partikel agregat sangat berhubungan dengan kinerja dari lapis perkerasan



Gambar 3. Gradasi campuran stone matrix asphalt

beraspal. Kombinasi gradasi agregat campuran yang digunakan adalah *Stone Matrix Asphalt* (SMA) yang harus memenuhi batas-batas gradasi agregat seperti pada **Gambar 3**.

6. Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengujian empiris dan mekanistik di laboratorium. Penelitian terbagi menjadi tiga tahapan yaitu penelitian terhadap properti material, penelitian terhadap karakteristik campuran, dan penelitian terhadap kinerja campuran. Langkah penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 4**.

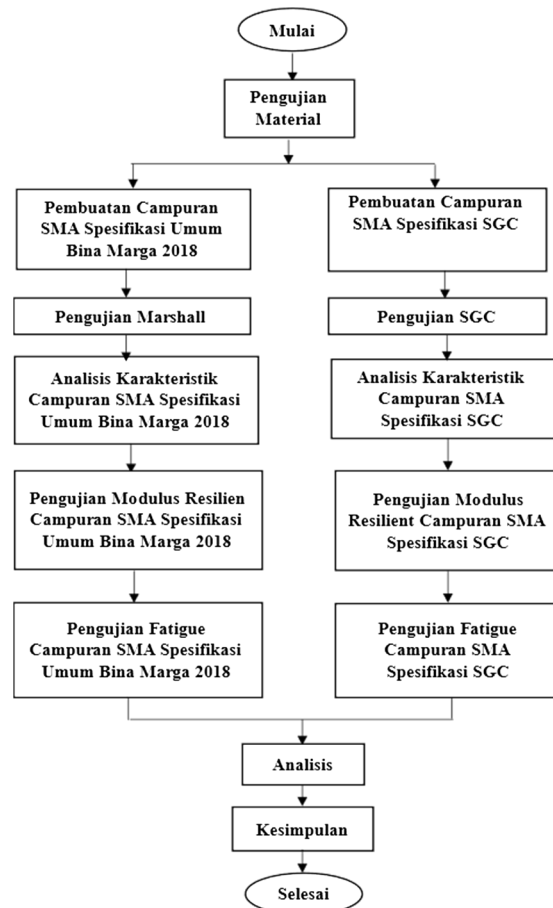
7. Hasil dan Pembahasan

7.1 Hasil pengujian *marshall* dan SGC

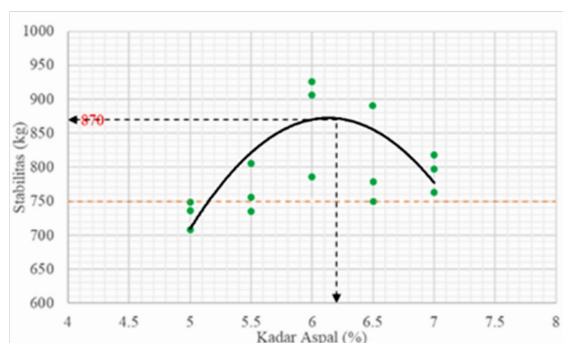
Campuran SMA menggunakan spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, karakteristik *Marshall* terdiri dari *Void in Mixture* (VIM), *Void in Mineral Aggregate* (VMA), Stabilitas, *Flow*, dan kepadatan (*density*). Metode pemadatan SGC mengacu pada Spesifikasi AASHTO M325. Karakteristik metode pemadatan SGC terdiri dari *Void in Mixture* (VIM), *Void in Mineral Aggregate* (VMA), dan kepadatan (*density*).

7.1.1 Stabilitas *marshall*

Stabilitas merupakan salah satu parameter yang penting dalam mengukur kekuatan dari suatu lapis perkerasan. Secara umum stabilitas dapat diartikan sebagai kemampuan dari suatu perkerasan untuk menahan deformasi permanen akibat pengaruh beban lalu lintas yang berulang. Perbandingan nilai stabilitas dan kadar aspal dapat dilihat pada **Gambar 5**.

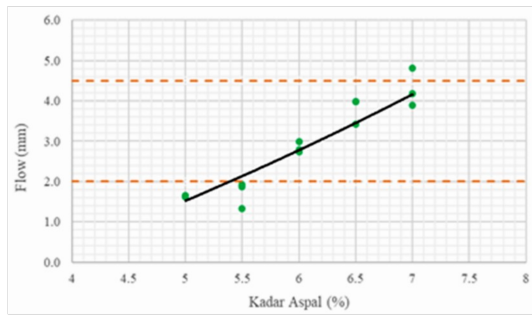


Gambar 4. Diagram alir pengujian



Gambar 5. Perbandingan stabilitas dan kadar aspal

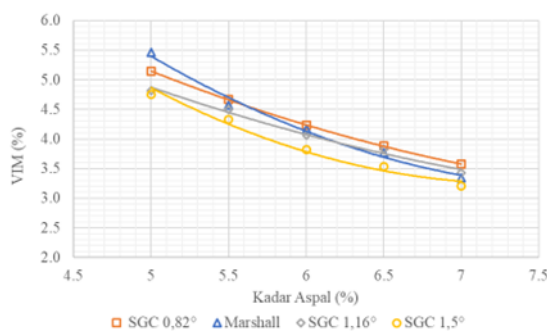
Dari **Gambar 5** terlihat bahwa stabilitas campuran SMA akan meningkat seiring bertambahnya kadar aspal dan menurun kembali setelah mencapai nilai optimum. Setelah melewati titik maksimum stabilitas menurun karena aspal tidak mengisi rongga tetapi menambah ruang yang berisi ikatan antar aspal. Terdapat 2 titik berwarna merah yang artinya perbedaan nilai kedua titik ini terhadap nilai yang lain sangat signifikan, namun tetap diperhitungkan dalam penentuan KAO. Nilai stabilitas minimum yang diisyaratkan pada Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2 yaitu sebesar 750 kg. Dimulai pada kadar aspal 5,2%, nilai stabilitas campuran telah melewati batas minimum persyaratan.



Gambar 6. Perbandingan nilai flow dan kadar aspal

7.1.2 Flow marshall

Kelelahan merupakan parameter empiris yang menjadi indikator terhadap kelenturan atau perubahan bentuk plastis campuran beraspal yang diakibatkan oleh beban. campuran yang memiliki nilai kelelahan relatif rendah pada kadar aspal optimum biasanya memiliki daya tahan deformasi yang lebih baik. Perbandingan nilai *flow* dan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 7. Perbandingan nilai VIM terhadap kadar aspal

Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa nilai kelelahan akan meningkat seiring bertambahnya kadar aspal. Hal ini disebabkan kadar aspal yang semakin bertambah menyebabkan campuran menjadi semakin lentur dan lebih fleksibel. Rentang nilai *flow* yang diisyaratkan pada Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2 yaitu sebesar 2 - 4.5 mm. Dimulai pada kadar aspal 5,4%, campuran SMA telah masuk dalam rentang nilai yang diisyaratkan.

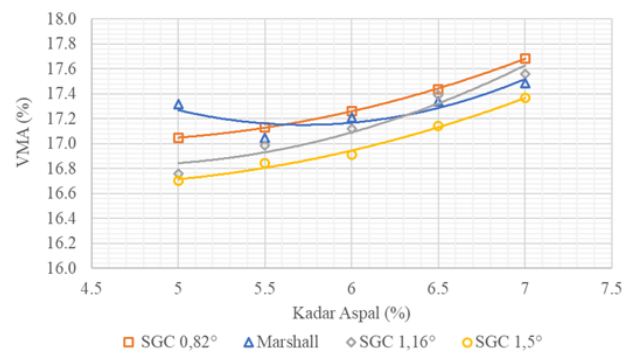
7.1.3 Hasil VIM pemadatan marshall dan SGC

Nilai suatu persentase dari VIM sangat diperlukan campuran untuk memberikan cukup ruang untuk pemadatan akibat beban lalu lintas dan juga pengaruh peningkatan temperatur. VIM harus dibatasi mengingat masalah yang sering timbul apabila terlalu sedikit rongga dalam campuran yang mengakibatkan *bleeding* dan campuran rentan terhadap alur plastis (*rutting*).

Gambar 7 memperlihatkan bahwa pada semakin besar kadar aspal yang digunakan maka akan nilai VIM campuran SMA akan mengalami penurunan baik pada metode pemadatan *Marshall* maupun SGC. Pada rentang kadar aspal 5,0 sampai 5,6%, nilai VIM metode pemadatan *Marshall* lebih tinggi dibandingkan dengan

metode pemadatan SGC. Artinya bahwa pada rentang kadar aspal tersebut, terdapat rongga yang lebih banyak jika menggunakan metode pemadatan *Marshall* untuk campuran SMA. sudut putaran 0,82° memberikan nilai VIM yang terbesar dan sudut putaran 1,5° memberikan nilai VIM yang terkecil. kadar aspal 5,6 sampai 6,2%, nilai VIM metode pemadatan *Marshall* menurun hingga posisinya berada diantara metode pemadatan SGC variasi 0,82° dan 1,16°.

Dari Gambar 7 juga dapat dilihat bahwa peningkatan sudut putaran dapat menurunkan nilai VIM campuran. Hal ini terjadi akibat dengan bertambahnya besar sudut putaran, posisi kemiringan mold dalam alat SGC semakin besar yang menyebabkan upaya pemadatan yang dilakukan oleh alat SGC semakin meningkat, agregat dan aspal dalam campuran akan bergerak dinamis dan lebih mudah mengisi rongga sehingga berdampak pada menurunnya nilai VIM.



Gambar 8. Perbandingan nilai VMA terhadap kadar aspal

7.1.4 Hasil VMA metode pemadatan marshall dan SGC

VMA merupakan volume rongga antar butiran yang terletak diantara partikel agregat dari suatu campuran perkerasan yang dipadatkan, termasuk didalamnya rongga udara dan kadar aspal efektif. Nilai kepadatan campuran yang besar menyebabkan VMA yang kecil, akibatnya aspal yang dapat menyelimuti agregat terbatas dan menghasilkan tebal aspal yang tipis.

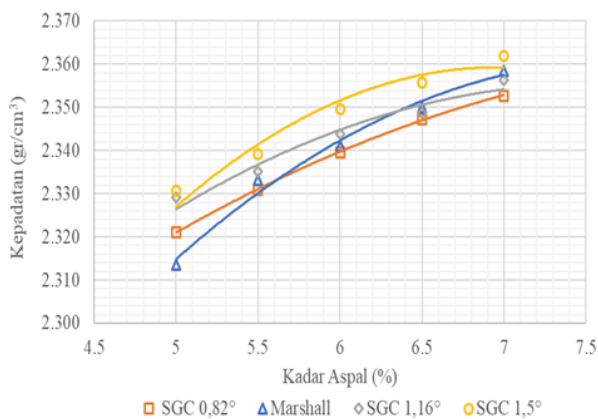
Gambar 8 memperlihatkan bahwa dengan peningkatan kadar aspal maka VMA pada metode pemadatan *Marshall* mengalami penurunan sampai VMA mencapai titik minimum dan akan naik. Pada rentang kadar aspal 5,0 sampai 5,6%, nilai VMA metode pemadatan *Marshall* lebih tinggi dibandingkan dengan metode pemadatan SGC. Artinya bahwa pada rentang kadar aspal tersebut, terdapat rongga dalam mineral agregat masih banyak dan aspal yang terserap masih sedikit jika menggunakan metode pemadatan *Marshall* untuk campuran SMA. Metode pemadatan SGC, sudut putaran 0,82° memberikan VMA yang terbesar dan sudut putaran 1,5° memberikan VMA yang terkecil. Pada rentang kadar aspal 5,6 sampai 6,2%, VMA metode pemadatan *Marshall* menurun hingga posisinya berada diantara metode pemadatan SGC variasi 0,82° dan 1,16°.

VMA meningkat seiring dengan peningkatan kadar aspal. Dari Gambar 8 juga dapat dilihat bahwa dengan

adanya peningkatan sudut putaran dalam metode pemadatan SGC maka dapat menurunkan VMA campuran. Hal ini terjadi akibat dengan bertambahnya besar sudut putaran, posisi kemiringan mold dalam alat SGC semakin besar yang menyebabkan upaya pemadatan yang dilakukan oleh alat SGC meningkat, agregat dan aspal dalam campuran bergerak dinamis dan lebih mudah mengisi rongga sehingga berdampak pada menurunnya VMA.

7.1.5 Hasil kepadatan (*density*) metode pemadatan *marshall* dan SGC

Kepadatan adalah berat campuran dalam kondisi kering yang diukur tiap satuan volume dari campuran yang telah dipadatkan. Kepadatan campuran beraspal akan meningkat seiring bertambahnya kadar aspal, hingga mencapai nilai maksimum dan setelahnya akan menurun, tetapi itu tergantung pada variasi aspal karena memberikan perilaku yang berbeda.



Gambar 9. Perbandingan nilai kepadatan terhadap kadar aspal

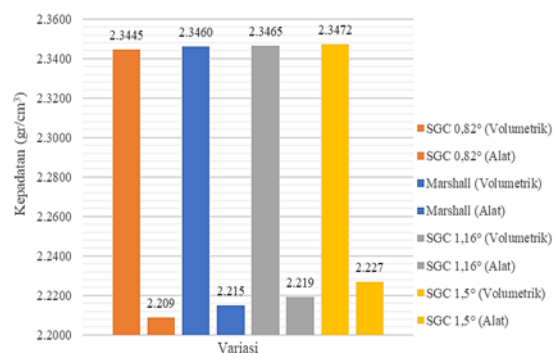
Gambar 9 menunjukkan kepadatan tertinggi diperoleh dari variasi 1,5°, kepadatan terendah diperoleh dari 2 variasi, yaitu pada rentang 5,0 sampai 5,6% bahwa variasi *Marshall* yang terendah kemudian rentang kadar aspal diatas 5,6% bahwa variasi 0,82° yang terendah.

Pada rentang kadar aspal 5,6 sampai 6,3%, kepadatan metode *Marshall* meningkat hingga posisinya berada diantara metode pemadatan SGC variasi 0,82° dan 1,16°. Dalam kasus ini maka variasi 0,82° memiliki kepadatan terendah dan variasi 1,5° tetap memiliki kepadatan tertinggi. Kemudian pada kadar aspal diatas 6,3%, kepadatan metode *Marshall* akan terus meningkat dan berada diantara metode pemadatan SGC variasi 1,16° dan 1,5°. Kepadatan pada kadar aspal diatas 5,6% yang diperoleh dari *Marshall* berangsur lebih tinggi dari SGC 0,82° dan 1,16° tidak lepas dari waktu dan suhu pemadatan. Waktu yang dibutuhkan variasi *Marshall* lebih singkat sehingga suhu pemadatan masih terjaga menyebabkan campuran lebih mudah dipadatkan.

Peningkatan sudut putaran dalam metode pemadatan SGC dapat meningkatkan kepadatan campuran. Hal ini

terjadi akibat dengan bertambahnya besar sudut putaran maka posisi kemiringan mold dalam alat SGC semakin besar yang menyebabkan upaya pemadatan yang dilakukan oleh alat SGC semakin meningkat serta berdampak pada meningkatnya kepadatan dari campuran tersebut.

Gambar 10 menunjukkan perbandingan hasil kepadatan volumetrik dengan kepadatan alat pada semua variasi. Nilai kepadatan akan semakin meningkat seiring meningkatnya sudut putaran yang digunakan. Bertambahnya sudut putaran akan menyebabkan campuran semakin padat dan kaku, hal ini yang menyebabkan nilai kepadatan volumetrik campuran meningkat. Kepadatan volumetric pada kondisi KAO yang diperoleh dari metode *Marshall* berada diantara variasi 0,82° dan 1,16°.



Gambar 10. Perbandingan kepadatan volumetrik dan kepadatan alat

Terdapat perbedaan dari kedua nilai kepadatan tersebut. Perbedaan disebabkan oleh berat isi benda uji dimana untuk kepadatan volumetrik menggunakan berat air, sedangkan kepadatan dari alat SGC memperhitungkan volume isi di udara. Sehingga berat isi volume benda uji yang direndam lebih kecil dibandingkan dengan berat isi benda uji ketika sampel dipadatkan menggunakan alat SGC.

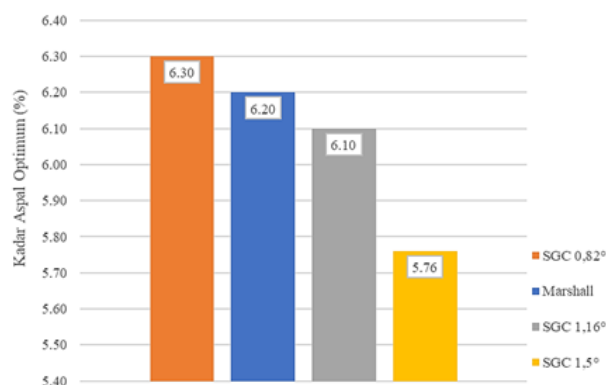
Nilai kepadatan volumetrik pemadatan SGC variasi *Marshall* sebesar 2,3460 gr/cm³ sedangkan nilai kepadatan alatnya sebesar 2,215 gr/cm³. Terdapat perbedaan sebesar 5,58%. Kepadatan *Marshall* berada diantara variasi 0,82° dan 1,16°. Nilai kepadatan volumetrik pemadatan SGC 0,82° sebesar 2,3445 gr/cm³ sedangkan nilai kepadatan alat sebesar 2,209 gr/cm³, terdapat perbedaan sebesar 5,78% dan rasio perbandingan kepadatan volumetrik terhadap alat sebesar 1,062. Pemadatan SGC 1,16° memiliki nilai kepadatan volumetrik sebesar 2,3465 gr/cm³ dan nilai kepadatan alat SGC sebesar 2,219 gr/cm³, terdapat perbedaan sebesar 5,43% dengan rasio perbandingan sebesar 1,059. Pemadatan SGC variasi 1,5° memiliki nilai kepadatan volumetrik sebesar 2,3472 gr/cm³ dan nilai kepadatan alat SGC sebesar 2,227 terjadi perbedaan sebesar 5,12% dengan rasio perbandingan 1,052. Berdasarkan analisis yang dilakukan, diperoleh bahwa semakin meningkatnya nilai sudut putaran maka nilai kepadatan baik volumetric maupun dari alat akan

meningkat dan rasio antara kepadatan volumetrik dan kepadatan alat SGC semakin menurun.

7.1.6 Hasil KAO metode pemadatan *marshall* dan SGC

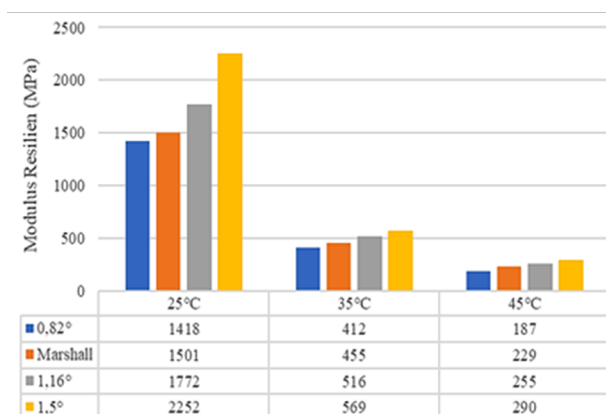
Kadar Aspal Optimum (KAO) merupakan nilai kadar aspal yang menghasilkan campuran yang memenuhi semua unsur dari parameter *Marshall* dan SGC. Berdasarkan persyaratan AASHTO M325, nilai KAO diperoleh pada campuran dengan nilai VIM sebesar 4%.

Berdasarkan **Gambar 11**, terlihat bahwa campuran SMA menggunakan SGC sudut $0,82^\circ$ memiliki KAO yang lebih tinggi dibandingkan yang lainnya yaitu sebesar 6,30%. Nilai KAO terendah diperoleh dari campuran SMA menggunakan SGC sudut $1,5^\circ$ sebesar 5,76%. Selisih nilai KAO variasi *Marshall* dengan variasi $0,82^\circ$ yaitu sebesar 1,59% dan dengan variasi $1,16^\circ$ sebesar 1,64%. Kenaikan besar sudut putaran dapat menurunkan nilai KAO campuran.



Gambar 11. Perbandingan nilai kadar aspal pada campuran

Besar penurunan nilai KAO terbesar yaitu diperoleh dari variasi $1,16^\circ$ dengan $1,5^\circ$ yaitu sebesar 5,57%, sedangkan penurunan nilai KAO variasi $0,82^\circ$ dengan variasi $1,16^\circ$ sebesar 3,17%. Semakin besar KAO suatu campuran, maka akan semakin berkurang jumlah agregat yang digunakan, dimana akan mempengaruhi karakteristik dari suatu campuran.



Gambar 12. Perbandingan nilai Modulus Resilien campuran SMA terhadap variasi temperatur

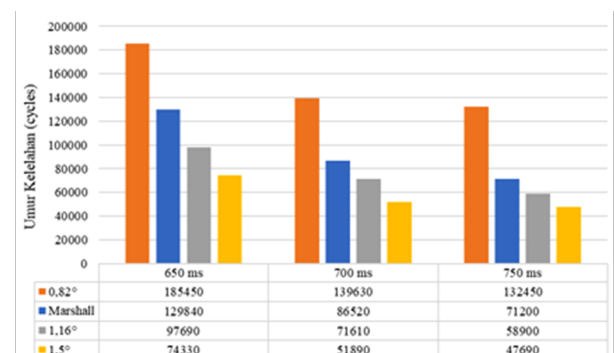
8. Hasil Pengujian Modulus Resilien

Modulus Resilien merupakan modulus elastisitas yang didasarkan pada deformasi balik (*recoverable strain*) (Huang, 2004). Sifat campuran beraspal yang *viscoelastic* menyebabkan nilai Modulus Resilien selalu berubah tergantung pada temperatur dan waktu pembebanan yang diterima, semakin tinggi temperatur, maka nilai Modulus Resilien akan semakin rendah. Pengujian Modulus Resilien pada penelitian ini dilakukan menggunakan alat UMATTA pada suhu pengujian 25°C , 35°C dan 45°C dan hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 12**.

Gambar 12 menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur pengujian yang digunakan maka nilai Modulus Resilien campuran akan semakin menurun. Fenomena ini terjadi pada semua variasi campuran. Rata-rata penurunan nilai Modulus Resilien dari temperatur 25°C ke 35°C untuk semua variasi yaitu sebesar 71,56%, sedangkan dari temperatur 35°C ke 45°C sebesar 63,92%.

Campuran SMA dengan sudut putaran $1,5^\circ$ memiliki nilai Modulus Resilien yang paling tinggi dibandingkan dengan campuran dengan sudut putaran $0,82^\circ$, $1,16^\circ$, dan *Marshall* pada semua temperature pengujian (25°C , 35°C , dan 45°C). Nilai MR variasi *Marshall* berada diantara variasi $0,82^\circ$ dan $1,16^\circ$. Tentunya kecenderungan dan posisi nilai MR setiap variasi sesuai dengan nilai kepadatannya. Selisih nilai MR *Marshall* dengan variasi $0,82^\circ$ pada temperature pengujian 25°C yaitu sebesar 5,85% sedangkan dengan variasi $1,16^\circ$ yaitu sebesar 18,05%.

Peningkatan nilai MR terjadi sebesar 25% dari variasi $0,82^\circ$ ke variasi $1,16^\circ$ pada temperature pengujian 25°C , dan sebesar 27% dari variasi $1,16^\circ$ ke variasi $1,5^\circ$. Faktor suhu, kepadatan, serta sudut putaran memberikan pengaruh terhadap nilai Modulus Resilien yang diperoleh. Dimana pada temperature 25°C , nilai Modulus Resilien pada masing – masing campuran variasi pemadatan menunjukkan nilai tertinggi, kemudian pada temperature 45°C menunjukkan nilai terendah dari setiap campuran. Hal ini terjadi karena pada suhu tinggi sifat aspal akan mengarah ke *viscous*, sehingga kekakuan campuran secara keseluruhan akan menurun.



Gambar 13. Perbandingan nilai umur kelelahan terhadap regangan menggunakan *four point loading*

9. Hasil Pengujian Kelelahan (*Fatigue*)

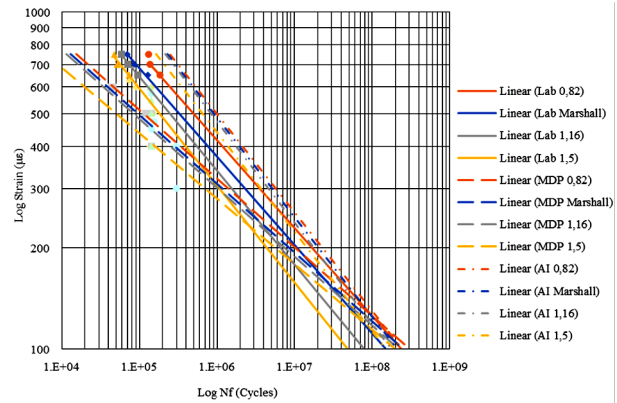
Pada pengujian kelelahan dengan control regangan, umumnya kerusakan (*failure*) yang terjadi sangat sulit untuk diidentifikasi layaknya pengujian kelelahan dengan kontrol tegangan. Regangan yang diberikan pada campuran yang diuji terdiri dari 3 (tiga) tingkat regangan yaitu 650 $\mu\epsilon$, 700 $\mu\epsilon$ dan 750 $\mu\epsilon$ dengan frekuensi sebesar 10 Hz serta pola pembebanan sinusoidal. Hubungan antara umur kelelahan dan regangan untuk keempat variasi dapat dilihat pada **Gambar 13**.

Campuran variasi 0,82° memiliki umur kelelahan terpanjang pada semua kondisi regangan, sedangkan yang terpendek yaitu campuran variasi 1,5° pada kondisi regangan 750 me. Dengan meningkatnya variasi sudut putaran, maka semakin menurunkan umur kelelahan campuran beraspal. Hal ini sejalan dengan semakin meningkat sudut putaran, maka semakin besar nilai kepadatan serta meningkatnya nilai Modulus Resilien yang berdampak pada umur kelelahan campuran beraspal. Nilai Modulus Resilien yang tinggi mengindikasikan campuran yang lebih kaku sehingga umur kelelahannya semakin pendek.

Hasil pengujian *fatigue* untuk campuran variasi *Marshall* berada diantara campuran variasi 0,82° dan campuran variasi 1,16°. Perbedaan signifikan terjadi pada campuran variasi 0,82° dan campuran variasi *Marshall* pada regangan 700 me yaitu sebanyak 61.250 *cycles*. Umur kelelahan campuran variasi *Marshall* lebih mendekati campuran variasi 1,16°, dimana selisih terbesar dan terkecil nilai umur kelelahan antara kedua campuran ini sebesar 32.100 *cycles* dan 12.300 *cycles*.

Gambar 14 memperlihatkan bahwa baik hasil pengujian di laboratorium maupun secara teoritis memberikan kemiringan garis yang linier dengan pola yang sama pada grafik semi-log. Terdapat titik – titik di luar garis model, dimana titik tersebut tidak diperhitungkan karena pada saat pengujian benda uji belum mengalami kriteria kegagalan karena adanya keterbatasan alat dan waktu pengujian di laboratorium.

Hasil pengujian *fatigue* campuran SMA memperlihatkan bahwa metode Asphalt Institute (AI)



Gambar 14. *Fatigue line* hasil uji laboratorium terhadap model teoritis

berada di paling kanan, hasil alat di tengah, dan metode Manual Desain Perkerasan (MDP) 2017 berada di paling kiri. Pada semua kondisi regangan, variasi 0,82° memiliki umur kelelahan (*fatigue life*) yang terpanjang, sedangkan variasi 1,5° memiliki umur kelelahan yang terpendek. Umur kelelahan variasi *Marshall* berada diantara variasi 0,82° dan 1,16°. Posisi umur kelelahan dan kecenderungan yang sama diperoleh juga dari metode AI dan MDP 2017. Dari ketiga tingkat regangan pengujian yaitu sebesar 650 $\mu\epsilon$, 700 $\mu\epsilon$ dan 750 $\mu\epsilon$, dapat dilihat bahwa pada ketiga regangan tersebut bahwa metode AI menunjukkan hasil umur kelelahan yang terpanjang untuk semua variasi, kemudian metode MDP 2017 menghasilkan umur kelelahan terpendek dari semua variasi

Terdapat perbedaan hasil umur kelelahan antara uji laboratorium dan perhitungan menggunakan persamaan metode MDP 2017 dan AI, seperti terlihat pada **Gambar 14**. Hal ini disebabkan oleh beberapa

Tabel 4. Hasil evaluasi sudut putar SGC

Parameter	Nilai
Sudut Putaran	1,00°
Jumlah Putaran	100 putaran
Tekanan	600 kPa
Kecepatan	30 putaran/menit

Tabel 3. Rekapitulasi hasil pemadatan metode *marshall* dan SGC

Parameter	<i>Marshall</i>	SGC		
		0,82°	1,16°	1,5°
Tumbukan / Putaran	2 × 50 tumbukan	100 putaran	100 putaran	100 putaran
KAO, %	6,2	6,3	6,1	5,76
VIM, %	3,939	4	4	4
VMA, %	17,202	17,365	17,122	16,856
Stabilitas, kg	870	-	-	-
Flow, mm	3,05	-	-	-
Modulus Resilien, MPa				
25°C	1501	1418	1772	2252
35°C	455	412	516	569
45°C	229	187	255	290
Umur Kelelahan, <i>cycles</i>				
650 me	129840	185450	97690	74330
700 me	86520	139630	71610	51890
750 me	71200	132450	58900	47690

faktor seperti besar regangan yang terjadi, campuran tidak mengalami *rest periods* pada pengujian laboratorium, pengujian di laboratorium tidak memperhitungkan pergerakan lalu lintas (*traffic wandering*) dan dimensi benda uji. Idealnya perhitungan menggunakan persamaan menghasilkan umur kelelahan yang lebih panjang

10. Evaluasi Variasi Sudut Putaran SGC dibandingkan dengan hasil Metode Marshall

Dalam menganalisis campuran SMA menggunakan pematat *Marshall* digunakan spesifikasi Kementerian Umum Pekerjaan Umum 2018 sedangkan pematat SGC menggunakan spesifikasi AASHTO M325. Perbandingan kedua metode ini dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Karakteristik campuran SMA Spesifikasi Umum Bina Marga terdiri dari nilai *Void In Mixture* (VIM), *Void in Mineral Agregat* (VMA), Stabilitas, dan *Flow*.

Nilai VIM campuran SMA Spesifikasi Umum Bina Marga memiliki nilai yang sedikit lebih rendah dibandingkan VIM campuran SMA Spesifikasi AASHTO M325, nilai VMA Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 lebih besar dibandingkan dengan spesifikasi AASHTO M325, perbedaan sebesar 0,47%. Sedangkan jika Spesifikasi AASHTO M325 sudut putarannya ditambah menjadi 1,5° maka nilai VMA menjadi lebih kecil dibandingkan campuran SMA spesifikasi Umum Bina Marga 2018 yang menjadikan adanya perbedaan sebesar 2,01% serta tidak masuk persyaratan dimana VMA harus lebih besar dari 17%. Sebaliknya apabila jika Spesifikasi AASHTO M325 sudut putarannya diturunkan menjadi 0,82° maka nilai VMA menjadi lebih besar dibandingkan campuran SMA spesifikasi Umum Bina Marga 2018 yang menjadikan adanya perbedaan sebesar 0,95%.

Perbedaan nilai MR Spesifikasi Umum Bina Marga dan AASHTO M325 sebesar 18,05%, 13,41%, dan 11,35% untuk masing-masing temperature pengujian. Jika Spesifikasi AASHTO M325 sudut putarannya ditambah menjadi 1,5°, nilai MR meningkat sebesar 50,03%, 25,05%, dan 26,64% untuk masing-masing temperature pengujian sehingga nilai MR 1,5° jauh lebih tinggi dibandingkan nilai MR Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Sebaliknya, apabila jika Spesifikasi AASHTO M325 sudut putarannya diturunkan menjadi 0,82° maka nilai MR akan lebih rendah dibandingkan campuran SMA spesifikasi Umum Bina Marga 2018 yang menjadikan adanya perbedaan sebesar 5,85%, 10,44%, dan 22,46% untuk masing-masing temperature pengujian. Perbedaan nilai umur kelelahan Spesifikasi Umum Bina Marga dan AASHTO M325 sebesar 32,91%, 20,82%, dan 20,88% untuk masing-masing tingkat regangan. Jika Spesifikasi AASHTO M325 sudut putarannya diturunkan menjadi 0,82° maka umur kelelahan akan lebih tinggi dibandingkan campuran SMA spesifikasi Umum Bina Marga 2018 yang menjadikan adanya perbedaan sebesar 42,83%, 61,38%, dan 86,03% untuk masing-masing tingkat regangan. Jika dilihat dari nilai modulus resilien, campuran SMA

menggunakan pematat SGC Spesifikasi AASHTO M325 lebih tahan terhadap deformasi permanen, sedangkan campuran SMA menggunakan pematat SGC Spesifikasi AASHTO M325 yang sudut putarannya diturunkan menjadi 0,82° memiliki umur kelelahan yang lebih panjang.

Adapun rekomendasi parameter pemadatan SGC untuk campuran SMA Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2 dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Berdasarkan nilai karakteristik volumetric dan kinerja campuran SMA Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2 jika menggunakan metode pemadatan SGC maka direkomendasikan untuk *input* parameternya adalah sudut putaran internal 1,00°, jumlah putaran sebanyak 100 putaran, tekanan sebesar 600 kPa serta kecepatan putaran sebesar 30 putaran/menit. Dengan parameter seperti diatas, khususnya besar nilai sudut putaran maka umur kelelahan campuran SMA dengan pemadatan SGC lebih panjang dan nilai Modulus Resilien lebih besar dibandingkan campuran SMA Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2.

11. Kesimpulan

Berdasarkan data yang diperoleh dan analisis data maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Penambahan besar sudut putaran pada metode SGC dapat meningkatkan nilai Resilient Modulus campuran. Variasi 1,5° memiliki nilai Resilient Modulus tertinggi pada seluruh temperatur pengujian, sedangkan variasi 0,82° memiliki nilai terendah pada seluruh temperatur pengujian. Hasil Resilient Modulus campuran SMA menggunakan metode pemadatan SGC terbukti menghasilkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang menggunakan metode pemadatan Marshall. Nilai Resilient Modulus pada kondisi MAPT 41°C variasi 1,16° sebesar 359,4 MPa dan variasi Marshall sebesar 319,4 MPa.
2. Peningkatan besar sudut putaran menyebabkan umur kelelahan campuran semakin menurun. Variasi 0,82° memiliki umur kelelahan terpanjang, sedangkan variasi 1,5° memiliki umur kelelahan yang terpendek. Umur kelelahan variasi Marshall berada diantara nilai variasi 0,82° dan variasi 1,16°. Umur kelelahan yang dihasilkan dari campuran SMA menggunakan metode pemadatan SGC variasi 0,82° lebih panjang dibandingkan dengan menggunakan metode pemadatan Marshall. Hal ini sejalan dengan nilai Modulus Resilien variasi 0,82° yang lebih rendah sehingga menghasilkan umur kelelahan yang lebih panjang dibandingkan variasi Marshall.
3. Dengan variasi sudut putaran ini dapat direkomendasikan pemadatan SGC dengan sudut putaran 1,00°, sebanyak 100 putaran, tekanan 600 kPa, dan kecepatan 30 rpm yang menghasilkan kinerja yang lebih baik dari pemadatan Marshall menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Pemadatan SGC lebih mudah dalam workability, keseragaman kepadatan, serta pencapaian target volumetrik dibandingkan pemadatan Marshall.

Daftar Pustaka

- AASHTO M325-08. (2012): *Standard Specification For Stone Matrix Asphalt (SMA)*, Washington D.C.
- AASHTO R46-08. (2012): *Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)*, Washington D.C.
- AASHTO T312-14. (2014): *Standard Method of Test for Preparing and Determining the Density of Asphalt Mixture Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor*, Washington D.C.
- AASHTO T321-07. (2010): *Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending*, Washington D.C.
- Al-Khateeb, G., Paugh, C., Stuart, K., Harman, T., D'Angelo, J., (2002) *Target And Tolerance Study For The Angle Of Gyration Used In The Superpave Gyratory Compactor (SGC)*, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*.
- Asphalt Institute. (2014): *Asphalt Mix Design Methods Manual Series No. 02 (MS-2) 7th Edition*.
- Georgiou, P., Sideris, L., Loizos, A. (2015): *Evaluation of the effects of gyratory and field compaction on asphalt mix internal structure*, *RILEM Materials and Structures*.
- Huang. (2004): *Pavement analysis and design*, Upper Saddle River: Pearson.
- Jiang, Y., Zhang, Y., Xue, J., Deng, C., Tian, T. (2020): *Performance of stone matrix asphalt mixtures fabricated by different compaction methods*, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) Applied Sciences*, 10, 2523.
- Jimenez, F.P., Martinez, A.H., Miro, R., Barrera, D.H., Zamorano, L.A. (2014): *Effect of compaction temperature and procedure on the design of asphalt mixtures using Marshall and gyratory compactors*, *Construction and Building Materials*, 65, 264 – 269.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2018): *Manual Desain Perkerasan Jalan No. 02/M/BM/2017*. Direktorat Jenderal Bina Marga. Jakarta.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2018): *Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dengan Jembatan No. 02/SE/Db/2018*. Direktorat Jenderal Bina Marga. Jakarta.
- Leandro, R.P., Vasconcelos, K.L., Bernucci, L.L.B. (2017): *Evaluation of the laboratory compaction method on the air voids and the mechanical behavior of hot mix asphalt*, *Construction and Building Materials*, 156, 424 – 434.
- Prowell, B.D., Brown, E.R., Huner, M. (2003). *Evaluation Of The Internal Angle Of Gyration Of Superpave Gyratory Compactors In Alabama*, NCAT Report 03-04 December 2003.
- Romero, P. M. M. Pradhan, M.M, Niederhauser, S., Biel, T. 2002, *Control of Superpave Gyratory Compactor's Internal Angle of Gyration Experience of the Utah Department of Transportation*, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1929, *Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, D.C., 2005, pp. 126–132.
- Shell Bitumen. (2015): *The Shell Bitumen Handbook Sixth Edition*, Shell Bitumen, U.K.
- Wang, W., Cheng, Y., Zhou, P., Tan, G., Wang, H., and Liu, H. (2019): *Performance evaluation of styrene-butadiene-styrene-modified stone matrix asphalt with basalt fiber using different compaction methods*, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) Polymers*, 11, 1006.
- Weiping, C., Lei, C., Zhixin, Y., Lijuan, Q. (2014): *Feasibility research of superpave gyratory compactor method design mix of stone matrix asphalt*, *Trans Tech Publication Key Engineering Materials*, Vol. 599, 159 – 163.
- Zhang, H., Yu, T., & Huang, Y. (2020). *CoMParative analysis of HMA aggregate variability based on impacting and SGC Compaction*. *Construction and Building Materials*, 242, 1180.