



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 1 (2026) pp: 5225-5232

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Pengaruh Penggunaan Glass Powder dan *Crab Shell Waste* pada Campuran Aspal Wearing Course (AC-WC) untuk Perkerasan Jalan

Isna Zahrotul Nihaya, Sinta Mutmainatun Nurjanah, Juny Andry Sulistyio
Teknik Sipil, Teknik, Universitas Islam Sultan Agung Semarang
sintanurjan@gmail.com*

Abstrak

Meningkatnya produksi limbah akibat aktivitas manusia menjadi salah satu permasalahan lingkungan yang signifikan karena dapat menyebabkan pencemaran tanah, air, dan udara serta berdampak negatif terhadap keberlanjutan ekosistem dan kualitas hidup manusia. Oleh karena itu, diperlukan inovasi pemanfaatan limbah sebagai bahan alternatif dalam bidang teknik sipil, khususnya pada konstruksi perkerasan jalan, guna mengurangi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya alam. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pemanfaatan limbah glass powder dan crab shell waste sebagai bahan tambahan dalam campuran aspal panas serta pengaruhnya terhadap karakteristik Marshall. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen dengan variasi penambahan glass powder sebesar 0%, 2%, 4%, dan 8%, serta crab shell waste sebesar 0%, 1%, 3%, dan 5%. Seluruh proses pengujian dilaksanakan di Laboratorium Perkerasan Jalan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang menggunakan metode Marshall Test untuk mengevaluasi parameter stabilitas, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Bitumen (VFB), flow, dan Marshall Quotient (MQ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai VIM, VMA, stabilitas, dan flow tertinggi diperoleh pada campuran dengan variasi glass powder 8% dan crab shell waste 3%, yaitu masing-masing sebesar 4,82%; 21%; 1055,52 kg; dan 3,70 mm. Sementara itu, nilai VFB tertinggi sebesar 80,20% diperoleh pada campuran glass powder 0% dan crab shell waste 3%. Hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah glass powder dan crab shell waste berpotensi meningkatkan kinerja campuran aspal sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Kata kunci: AC-WC, Glass Powder, Crab Shell Waste, Marshall Test

1. Latar Belakang

Infrastruktur jalan merupakan elemen vital dalam menggerakkan perekonomian dan mendukung mobilitas masyarakat. Seiring pertumbuhan ekonomi dan populasi, panjang jalan di Indonesia terus bertambah untuk memenuhi kebutuhan transportasi yang semakin meningkat [1]. Namun, pembangunan infrastruktur jalan yang berkelanjutan menghadapi tantangan dalam hal ketersediaan material dan dampak lingkungan dari limbah yang dihasilkan [2].

Aspal beton merupakan material utama untuk lapisan permukaan jalan yang berfungsi sebagai pengikat agregat. Kualitas aspal sangat ditentukan oleh daya cengkeram, kelembutan, dan kelenturannya. Penambahan aditif merupakan alternatif yang dapat digunakan untuk mempertahankan atau meningkatkan performa aspal [3]. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa modifikasi aspal dengan berbagai bahan tambah dapat meningkatkan stabilitas dan durabilitas perkerasan jalan [4].

Lapisan Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) merupakan lapisan permukaan dengan struktur paling halus yang berhubungan langsung dengan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan. [5] Lapisan ini harus memiliki sifat kedap air dan kekesatan tinggi dengan ketebalan minimum 4 cm [3]. Karakteristik utama yang diperlukan meliputi stabilitas tinggi, durabilitas, dan ketahanan terhadap deformasi [6]. Sementara itu, lapisan AC-BC yang terletak di bawahnya berfungsi mengurangi tegangan akibat beban lalu lintas yang diteruskan ke lapisan pondasi [7].

Permasalahan lingkungan akibat limbah padat menjadi isu global yang memerlukan solusi inovatif. Limbah kaca merupakan salah satu limbah yang sulit terurai secara alami dan berpotensi mencemari lingkungan [8]. Produksi kaca yang tinggi menghasilkan limbah dalam jumlah besar yang memerlukan penanganan khusus [7]. Pemanfaatan limbah kaca sebagai material konstruksi telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam beberapa penelitian

[9,10]. Kaca tersusun dari partikel yang saling berjauhan seperti zat cair namun berbentuk padat akibat pendinginan cepat tanpa proses kristalisasi [8].

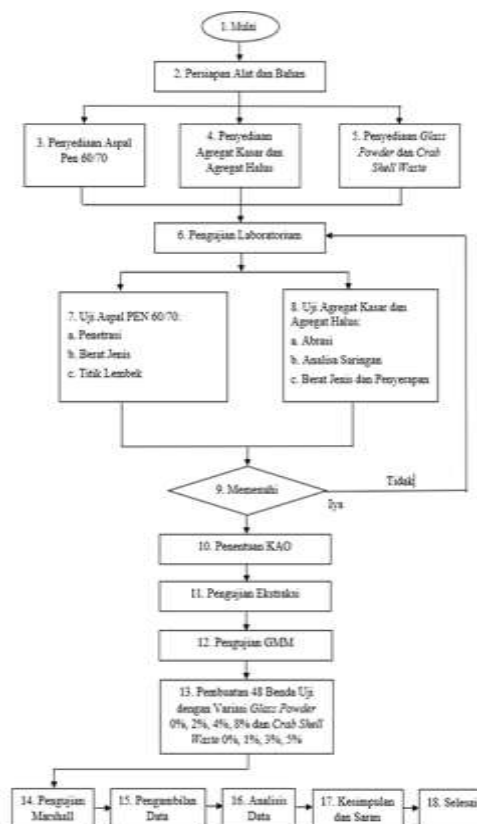
Limbah laut, khususnya cangkang kepiting, juga menjadi permasalahan lingkungan yang belum tertangani dengan optimal. Cangkang kepiting yang hanya dianggap sebagai limbah mengandung kitin hingga 70%, tertinggi di antara krustasea lainnya [11]. Penumpukan limbah cangkang kepiting tanpa penanganan yang tepat menimbulkan bau tidak sedap, menjadi sumber penyakit, dan merusak estetika lingkungan [12]. Kandungan kalsium karbonat (CaCO_3) yang tinggi dalam cangkang kepiting berpotensi sebagai filler dalam campuran aspal [14,15].

Meskipun beberapa penelitian telah mengeksplorasi pemanfaatan limbah dalam campuran aspal, namun masih terdapat kesenjangan penelitian mengenai kombinasi glass powder sebagai substitusi agregat halus dan crab shell waste sebagai aditif pada campuran AC-WC. [13]. Penelitian sebelumnya lebih banyak menggunakan limbah tunggal, sementara kombinasi kedua limbah ini belum dieksplorasi secara komprehensif. Pemanfaatan limbah sebagai material konstruksi jalan tidak hanya mengurangi biaya produksi tetapi juga berkontribusi pada pengelolaan limbah yang berkelanjutan .

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik Marshall pada campuran aspal wearing course (AC-WC) yang menggunakan glass powder sebagai bahan tambah agregat halus dan crab shell waste sebagai bahan aditif. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan material aspal yang ramah lingkungan dan berkelanjutan serta memberikan solusi alternatif dalam penanganan limbah kaca dan cangkang kepiting.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang dilakukan di Laboratorium Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Tujuan utama penelitian ini adalah menganalisis pengaruh penambahan variasi *glass powder* 0%, 2%, 4%, 8% dan *crab shell waste* 0%, 1%, 3%, 5% terhadap sifat mekanik dan sifat fisik dari *asphalt concrete-wearing course* serta membandingkan nilai parameter Marshall sesuai persyaratan Standar Nasional Indonesia dan Bina Marga 2025 [15]. Alur penelitian terdapat pada Gambar 1 berikut ini:



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

2.1 Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Agregat Kasar dan Agregat Halus
Material agregat kasar, halus, serta abu batu yang digunakan diperoleh dari AMP (*Asphalt Mixing Plant*) PT. Deltamarga Adyatama Batang, Jawa Tengah.
- 2) Aspal Penetrasi 60/70
- 3) Semen (*filler*)
- 4) *Glass Powder*
- 5) *Crab Shell Waste*

2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terbagi menjadi beberapa kategori berdasarkan fungsi dan tahapan pengujian. Peralatan untuk persiapan material meliputi oven yang digunakan untuk memanaskan dan mengeringkan agregat serta aspal pada suhu tertentu, kompor untuk memanaskan aspal hingga mencapai suhu pencampuran yang diinginkan, serta timbangan digital dengan ketelitian 0,01 gram untuk menimbang material secara akurat. Ember penguji berat jenis digunakan untuk mengukur berat jenis agregat kasar dan halus, sedangkan saringan bertingkat dengan berbagai ukuran mesh digunakan untuk analisis gradasi agregat sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan. Cawan dan ember berukuran berbagai kapasitas digunakan untuk wadah material selama proses persiapan dan pencampuran, serta untuk keperluan pengujian sifat fisik material penyusun campuran aspal. [16]

Peralatan untuk pembuatan dan pengujian benda uji meliputi mold benda uji berbentuk silinder dengan diameter 4 inci (101,6 mm) yang digunakan sebagai cetakan campuran aspal, alat pemadat (*compactor*) yang dilengkapi dengan dongkrak hidrolik untuk memadatkan benda uji dengan jumlah tumbukan yang telah ditentukan, serta jangka sorong untuk mengukur dimensi benda uji dengan ketelitian 0,1 mm. Alat water bath digunakan untuk merendam benda uji pada suhu konstan sebelum pengujian Marshall, sementara alat uji Marshall yang terdiri dari Marshall stability tester dan flow meter digunakan untuk mengukur nilai stabilitas dan flow benda uji. [17] Mesin Los Angeles digunakan untuk menguji ketahanan agregat terhadap abrasi dan benturan, alat specific gravity vacuum untuk mengukur berat jenis maksimum campuran (GMM), alat uji titik lembek untuk mengetahui suhu dimana aspal mulai melunak, alat uji penetrasi untuk mengukur tingkat kekerasan aspal, dan alat uji ekstraksi untuk menentukan kadar aspal aktual dalam campuran yang telah dibuat.

2.3 Prosedur Pelaksanaan

Tahapan awal penelitian dimulai dengan persiapan alat dan bahan yang meliputi pemeriksaan kelengkapan dan kalibrasi peralatan laboratorium, pengadaan agregat kasar, agregat halus, filler, aspal penetrasi 60/70, glass powder, dan crab shell waste dalam jumlah yang mencukupi untuk seluruh variasi pengujian. Selanjutnya dilakukan pengujian karakteristik agregat yang mencakup pengujian berat jenis dan penyerapan agregat kasar dan halus, analisis saringan untuk mengetahui gradasi agregat, pengujian abrasi dengan mesin Los Angeles untuk mengukur ketahanan agregat, serta pengujian kelekatan agregat terhadap aspal. Pengujian karakteristik aspal meliputi pengujian penetrasi pada suhu 25°C untuk mengetahui tingkat kekerasan aspal, pengujian titik lembek untuk menentukan suhu dimana aspal mulai melunak, pengujian daktilitas untuk mengukur sifat elastisitas aspal, dan pengujian berat jenis aspal. Hasil pengujian material ini kemudian dianalisis untuk memastikan bahwa seluruh material memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan sebelum dilanjutkan ke tahap pembuatan campuran aspal.

Tahapan selanjutnya adalah penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) menggunakan metode Marshall dengan membuat benda uji pada variasi kadar aspal 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7% dari berat total campuran tanpa penambahan glass powder dan crab shell waste. Setelah KAO diperoleh, dilakukan pengujian ekstraksi dan Gravitasi Maksimum Maksimum (GMM) untuk memverifikasi kadar aspal dalam campuran. Pembuatan benda uji utama dilakukan dengan menggunakan KAO yang telah ditentukan dan divariasikan dengan penambahan glass

powder sebesar 0%, 2%, 4%, dan 8% sebagai substitusi agregat halus, serta crab shell waste sebesar 0%, 1%, 3%, dan 5% sebagai bahan aditif, sehingga total terdapat 16 kombinasi variasi yang masing-masing dibuat 3 sampel untuk keperluan pengujian. Setiap benda uji dipadatkan dengan 75 kali tumbukan per sisi menggunakan alat pemadat Marshall sesuai dengan spesifikasi untuk lalu lintas berat. Pengujian Marshall dilakukan setelah benda uji direndam dalam water bath pada suhu 60°C selama 30 menit, kemudian diuji untuk mendapatkan nilai stabilitas, flow, Marshall Quotient, VIM (Void in Mix), VMA (Void in Mineral Aggregate), dan VFB (Void Filled with Bitumen). Data hasil pengujian kemudian dianalisis secara statistik dan dibandingkan dengan spesifikasi standar untuk mengevaluasi pengaruh penambahan glass powder dan crab shell waste terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC, serta menentukan kombinasi optimum yang memberikan performa terbaik [18].

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Pengujian Sifat Fisik dan Mekanis Agregat

Dalam penelitian ini dilakukan empat jenis pengujian material yang merupakan tahapan fundamental untuk memastikan kualitas material penyusun campuran aspal memenuhi standar spesifikasi yang dipersyaratkan. Pengujiannya adalah pengujian abrasi menggunakan mesin Los Angeles yang dilakukan berdasarkan SNI 2417:2008 atau AASHTO T96. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui ketahanan agregat kasar terhadap keausan dan benturan yang terjadi akibat gesekan antar butir agregat selama proses pencampuran, pemadatan, maupun pembebanan lalu lintas. Prosedur pengujian dilakukan dengan memasukkan agregat kasar seberat 5000 gram yang telah dibagi dalam gradasi tertentu ke dalam drum mesin Los Angeles bersama dengan 12 buah bola baja, kemudian drum diputar sebanyak 500 putaran dengan kecepatan 30-33 rpm. Setelah proses pemutaran selesai, agregat dikeluarkan dan disaring menggunakan saringan No. 12 (1,70 mm), kemudian material yang lolos ditimbang untuk menghitung persentase keausan. Nilai abrasi yang dihasilkan tidak boleh melebihi 40% untuk campuran aspal beton, dimana semakin kecil nilai abrasi menunjukkan agregat memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap benturan dan gesekan, sehingga dapat menjamin durabilitas perkerasan jalan dalam jangka panjang.

Pengujian keempat adalah pengujian kelekatan agregat terhadap aspal penetrasi 60/70 yang dilakukan untuk mengetahui kemampuan aspal melekat pada permukaan agregat dan ketahanannya terhadap pengaruh air. Pengujian ini menggunakan metode perendaman (stripping test) berdasarkan SNI 03-2439-1991 atau AASHTO T182. Prosedur pengujian dimulai dengan memanaskan agregat dan aspal pada suhu pencampuran yang telah ditentukan, kemudian agregat dan aspal dicampur hingga seluruh permukaan agregat terselimuti aspal secara merata dengan persentase aspal sekitar 5,5% dari berat agregat. Campuran yang telah dibuat kemudian dibentuk menjadi gumpalan-gumpalan kecil dan direndam dalam air bersuhu 60°C selama 24 jam untuk mensimulasikan kondisi lapangan dimana campuran aspal akan terpapar air dan suhu tinggi. Setelah perendaman, permukaan agregat diamati secara visual untuk melihat persentase luas permukaan agregat yang masih terselimuti aspal, dimana penilaian dilakukan berdasarkan skala 0-100% dengan ketentuan minimum 95% permukaan agregat harus masih terselimuti aspal untuk dapat dinyatakan memiliki kelekatan yang baik. Pengujian kelekatan sangat penting karena ketahanan campuran aspal terhadap stripping (pelepasan ikatan antara aspal dan agregat akibat air) merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi durabilitas perkerasan jalan, terutama di daerah dengan curah hujan tinggi atau drainase yang kurang baik, dimana pengaruh air dapat menyebabkan kerusakan dini pada perkerasan seperti raveling, pothole, dan alur.

Tabel 1. Hasil Penelitian sifat fisik dan mekanis agregat

No	Jenis Pemeriksaan	Metode	Persyaratan	Hasil	Keterangan
A Agregat Kasar					
1	Abrasi dengan mesin Los Angeles	SNI-03-2417-2008	Maks. 8%	5,68%	Memenuhi
2	Kelekatan Agregat terhadap Aspal Penetrasi 60/70	SNI-03-2439-2011	Min.	98%	Memenuhi
3	Material lolos saringan no. 200	ASTM C117:2012	Maks. 1%	0,8%	Memenuhi
4	Penyerapan air oleh agregat a. Agregat Kasar ¾ b. Agregat Kasar ½	SNI-03-1969-1990	Maks. 3%	2,048% 2,233%	Memenuhi
5	Berat Jenis (Bulk Specific Gravity) a. Agregat Kasar ¾ b. Agregat Kasar ½	SNI-03-1969-1990	Min. 2,5%	2,801% 2,081%	Memenuhi
B Agregat Halus					
1	Material lolos saringan no. 200	SNI-03-1969-1990	Maks. 15%	10,56%	Memenuhi
2	Penyerapan air oleh agregat a. Agregat Halus (Pasir) b. Agregat Halus (Abu Batu)	SNI-03-1969-1990	Maks. 3%	2,628% 2,60%	Memenuhi
3	Berat Jenis (Bulk Specific Gravity) a. Agregat Halus (Pasir) b. Agregat Halus (Abu Batu)	SNI-03-1969-1990	Min. 2,5%	2,434% 2,559%	Memenuhi

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

3.2 Pengujian Aspal PEN 60/70

Aspal yang digunakan dalam penelitian ini adalah Aspal PEN 60/70. Terdapat tiga parameter yang diuji, yaitu titik lembek, berat jenis aspal, dan penetrasi. Hasil pengujian dibandingkan dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025.

Tabel 2. Hasil Pemeriksaan sifat fisik dan mekanis aspal PEN 60/70

Pengujian	Spesifikasi	Hasil
Pengujian Sifat Fisik Aspal		
Penetrasi	SNI 2456:2011	66,3
Titik Lembek	SNI 2434:2011	60
Berat Jenis	SNI 2441:2011	1,035

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

3.3 Pengujian Marshall

Metode pengujian Marshall digunakan untuk mengukur sifat-sifat campuran aspal panas. Karakteristiknya termasuk stabilitas dan flow yang ditentukan melalui bacaan dengan menggunakan alat pengujian Marshall. Parameter lainnya seperti nilai VIM, VMA, VFB, dan *Marshall Quotient* didapatkan dengan melakukan analisa perhitungan.

Tabel 3. Hasil Uji *Marshall Test*

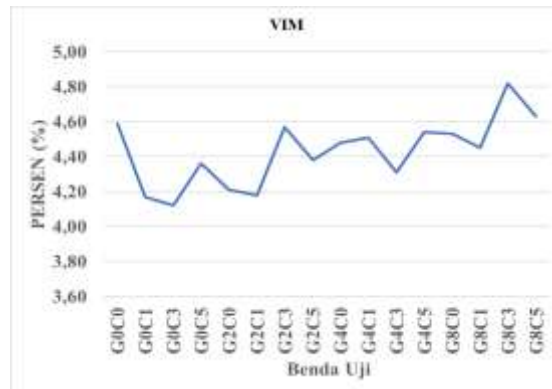
Karakteristik Marshall Campuran Beraspal	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)	Stabilitas (Kg)	Flow (mm)	MQ (Kg/mm)
Spesifikasi	Min	3	15	65	800	250
	Maks	5	-	-	4	-
G0C0	4,59	20,33	77,43	840,99	3,43	244,95
G0C1	4,17	20,34	79,49	897,54	3,47	258,90
G0C3	4,12	20,79	80,20	841,91	3,52	239,40
G0C5	4,36	20,37	78,62	816,77	3,23	252,61
G2C0	4,21	20,93	79,89	867,17	3,33	260,15
G2C1	4,18	20,57	79,67	998,45	3,35	298,05
G2C3	4,57	20,89	78,15	955,00	3,45	276,81
G2C5	4,38	20,51	78,65	818,21	3,45	237,16
G4C0	4,48	20,61	78,28	865,99	3,57	242,80
G4C1	4,51	20,62	78,14	901,86	3,47	260,15
G4C3	4,31	20,31	78,77	869,00	3,33	260,70

DOI: <https://doi.org/10.31004/riggs.v5i1.6492>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

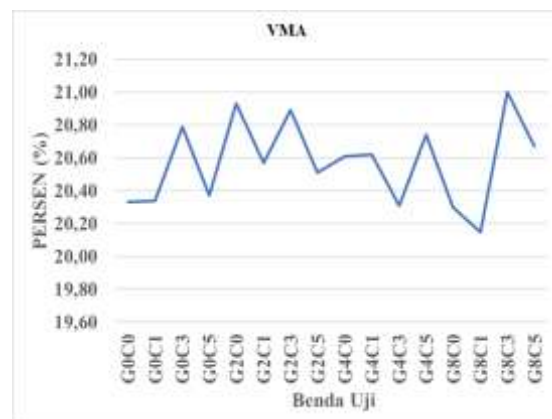
G4C5	4,54	20,74	78,13	889,16	3,52	252,84
G8C0	4,53	20,3	77,68	901,59	3,66	246,45
G8C1	4,45	20,15	77,94	876,46	3,13	279,72
G8C3	4,82	21,00	78,06	1055,52	3,70	285,28
G8C5	4,63	20,67	77,59	1014,03	3,23	313,89

Sumber: Hasil Penelitian, 2025



Grafik 3.1 Nilai VIM

Berdasarkan Grafik 3.1 hasil pengujian *Void in Mix* (VIM) yang diperoleh telah berada dalam batas yang dipersyaratkan oleh Spesifikasi Umum Bina Marga, yaitu 3-5%, sehingga campuran dinyatakan memenuhi ketentuan.



Grafik 3.2 Nilai VMA

Grafik 3.2 menunjukkan bahwa hasil analisis *Void in Mineral Aggregate* (VMA) memperlihatkan bahwa semua nilai VMA memenuhi kriteria yang dipersyaratkan, yaitu minimum 15% berdasarkan Spesifikasi Bina Marga.



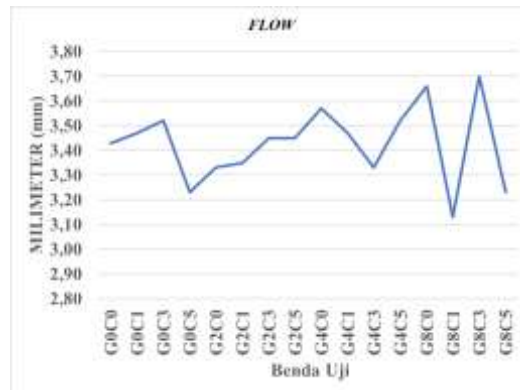
Grafik 3.3 Nilai VFB

Berdasarkan Grafik 3.3 hasil pengujian *Void Filled with Bitumen* (VFB) menunjukkan bahwa seluruh nilai VFB yang diperoleh berada di atas batas minimum yang dipersyaratkan, yaitu 65%, sehingga memenuhi ketentuan yang berlaku.



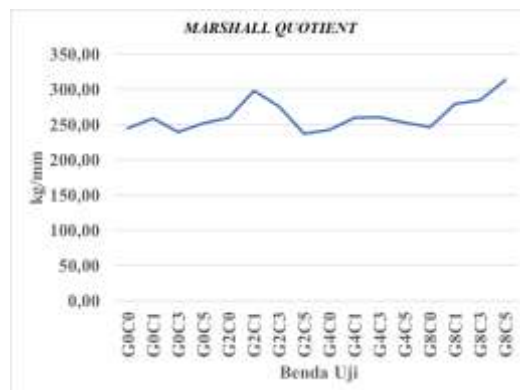
Grafik 3.4 Nilai Stabilitas

Berdasarkan Grafik 3.4 hasil pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa nilai stabilitas yang diperoleh secara keseluruhan **telah memenuhi kriteria** yang ditetapkan, yaitu **minimum 800 kg**.



Grafik 3.5 Nilai Flow

Berdasarkan Grafik 3.5 Seluruh nilai flow hasil pengujian **memenuhi persyaratan**, yang menunjukkan karakteristik deformasi campuran masih dalam batas yang diizinkan yaitu minimal 2 mm dan maksimal 4 mm.



Grafik 3.6 Nilai Marshall Quotient

Berdasarkan hasil evaluasi pengujian *Marshall Quotient* (MQ), sebagian besar nilai yang diperoleh telah melampaui batas minimum yang ditetapkan dalam Spesifikasi Bina Marga, yaitu 250 kg/mm kecuali variasi G0C0

(*glass powder* 0% dan *crab shell waste* 0%), G0C3 (*glass powder* 0% dan *crab shell waste* 3%), G2C5 (*glass powder* 2% dan *crab shell waste* 5%), G4C0 (*glass powder* 4% dan *crab shell waste* 0%), dan G8C0 (*glass powder* 8% dan *crab shell waste* 0%) tidak memenuhi spesifikasi.

4. Kesimpulan

Pada campuran Laston AC-WC dengan bahan tambah *glass powder* dan *crab shell waste* memperoleh hasil penelitian dan analisis data. Berdasarkan tujuan penelitian, kami menarik kesimpulan sebagai berikut: 1). Persentase optimum penggunaan *glass powder* dan *crab shell waste* diperoleh pada variasi campuran 8% *glass powder* dan 3% *crab shell waste*. Seluruh hasil pengujian yang dilakukan telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Bina Marga Tahun 2025, dengan nilai stabilitas yang diperoleh lebih besar dari 800 kg. Dengan demikian, komposisi campuran tersebut dinyatakan layak untuk diterapkan pada perkerasan jalan aspal *Wearing Course* (AC-WC), 2). Hasil pengujian stabilitas *marshall* menunjukkan bahwa seluruh campuran memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025, dengan nilai stabilitas lebih besar dari 800 kg. Nilai stabilitas tertinggi pada campuran *Asphalt Concrete Wearing Course* (AC-WC) diperoleh pada variasi *glass powder* 8% dan *crab shell waste* 3% yaitu sebesar 1055,52 kg. Sebaliknya, nilai stabilitas terendah terjadi pada variasi campuran *glass powder* 0% dan *crab shell waste* 5% sebesar 816,77 kg. Berdasarkan penelitian ini, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat pada penelitian selanjutnya: 1). Pengendalian suhu pada proses pencampuran aspal harus dilakukan pada suhu 180° C secara konsisten untuk menjaga kualitas benda uji. 2). Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan pengujian selain *Marshall Test* seperti pengujian permeabilitas, uji ketahanan friksi campuran serta melakukan uji perendaman. 3). Proses pemadatan benda uji harus dilakukan sesuai dengan standar yang berlaku yaitu 75 tumbukan pada setiap sisi benda uji. Sehingga tingkat kepadatan benda uji dapat tercapai secara merata dan optimal. 4). Pencatatan data hasil pengujian harus dilakukan secara sistematis untuk memudahkan analisis dan evaluasi hasil penelitian.

Referensi

- [1] Ali, M. F., & Ramadiani, K. (2023). Analisis Penunjang untuk Perancangan Jalan dengan Perkerasan Beraspal sebagai Infrastruktur Jalan yang Andal, Mandiri, dan Berkelanjutan. *Jurnal HPJI*, 9(1), 57–66. <https://doi.org/10.26593/jhpji.v9i1.6441.57-66>
- [2] Wibowo, A., & Susilowati, E. (2022). Sustainable Road Infrastructure Development: Challenges and Opportunities in Indonesia. *Journal of Infrastructure Development*, 14(2), 112-128.
- [3] Putra, M. T., Destania, H. R., & Febryandi, F. (2023). Analisis Karakteristik Marshall Campuran Aspal Modifikasi pada Asphalt Concrete – Wearing Course (AC – WC) dengan Penambahan Serbuk Ban Kendaraan. *Jurnal Teknik Sipil*, 19(2), 335–350. <https://doi.org/10.28932/jts.v19i2.5580>
- [4] Tapkın, S., Çevik, A., & Usar, U. (2010). Prediction of Marshall Test Results for Polypropylene Modified Dense Bituminous Mixtures Using Neural Networks. *Expert Systems with Applications*, 37(6), 4660-4670.
- [5] Ahmedzade, P., & Sengoz, B. (2009). Evaluation of Steel Slag Coarse Aggregate in Hot Mix Asphalt Concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3), 300-305.
- [6] Brasileiro, L., Moreno-Navarro, F., Tauste-Martínez, R., Matos, J., & Rubio-Gámez, M. C. (2019). Reclaimed Polymers as Asphalt Binder Modifiers for More Sustainable Roads: A Review. *Sustainability*, 11(3), 646.
- [7] Mallua', M. (2021). Studi Pemanfaatan Limbah Serbuk Kaca yang di Gunakan sebagai Substitusi Agregat Halus pada Campuran Aspal AC-WC.
- [8] Sucipto, S., & Sari, Y. A. (2021). Analisa Karakteristik Campuran Aspal Menggunakan Serbuk Kaca. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 2(1), 84–98. <https://doi.org/10.37253/jcep.v2i1.728>
- [9] Adawy, M. E., Mohamed, A. A., & Saleh, S. M. (2021). Utilizing Waste Glass Powder as a Partial Replacement of Fine Aggregate in Hot Mix Asphalt. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 89-96.
- [10] Jiang, W., Sha, A., Xiao, J., Li, Y., & Huang, Y. (2015). Experimental Study on Properties of Porous Asphalt Pavement Material Using Waste Glass. *Construction and Building Materials*, 93, 1041-1049.
- [11] Ratri, A. B. C. (2021). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kepiting sebagai Bahan Penambahan Pakan Ternak Berkalsium Tinggi dalam Tinjauan Moderasi Beragama, 2(1).
- [12] Luthfiyana, N., Nurjanah, S., & Hidayat, T. (2022). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kepiting sebagai Material Pengganti dalam Konstruksi. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, 6(2), 45-58.
- [13] Handayani, L., Zuhayani, R., Thalib, A., & Raihanum. (2019). Karakteristik Kimia Tepung Cangkang Kepiting. *Depik*, 8(3), 185–192. <https://doi.org/10.13170/depik.8.3.12090>
- [14] Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S. K., & Hussein, A. A. (2017). Geopolymer Mortars as Sustainable Repair Material: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 54-74.
- [15] Mohammed, B. S., Haruna, S., Wahab, M. M. A., & Liew, M. S. (2019). Optimization and Characterization of Cast In-situ Alkali-activated Pastes by Response Surface Methodology. *Construction and Building Materials*, 225, 776-787.
- [16] Diansari, S. (2016). Aspal Modifikasi dengan Penambahan Plastik Low Linear Density Poly Ethylene (LDPE) Ditinjau dari Karakteristik Marshall dan Uji Penetrasi pada Lapisan Aspal Beton (AC-BC).
- [17] Modarres, A., & Hamed, H. (2014). Effect of Waste Plastic Bottles on the Stiffness and Fatigue Properties of Modified Asphalt Mixes. *Materials & Design*, 61, 8-15.
- [18] Ziari, H., Oruc, S., Goli, H., & Sadeghpour Galooyak, S. (2014). Investigating the Effects of Amorphous Carbon Powder on the Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 66, 598-604.