

KAJIAN EKSPERIMENTAL VARIASI GRADASI AGREGAT TERHADAP KARAKTERISTIK MARSHALL CAMPURAN ASPAL AC-WC TERMODIFIKASI PLASTIK PP

Didik S.S.Mabui^{1*}, Irianto¹, Ratna Gunanto²

¹ Magister Rekayasa Sipil Universitas Yapis Papua, Jayapura, Indonesia

² Magister Rekayasa Sipil Universitas Yapis Papua, Jayapura, Indonesia

³ Magister Rekayasa Sipil Universitas Yapis Papua, Jayapura, Indonesia

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi gradasi agregat terhadap karakteristik volumetrik dan Marshall pada campuran aspal AC-WC dengan penambahan limbah plastik polypropylene (PP). Dua jenis gradasi agregat digunakan, yaitu gradasi halus dan gradasi kasar, dengan variasi kadar plastik PP sebesar 0%, 1%, 2%, 3%, dan 4% dari berat total campuran. Pengujian dilakukan untuk mengetahui parameter volumetrik yang meliputi Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), dan Void Filled with Bitumen (VFB), serta parameter Marshall seperti stabilitas, flow, dan Marshall Quotient (MQ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan plastik PP dapat meningkatkan stabilitas dan MQ campuran hingga kadar optimum sekitar 3%, setelah itu cenderung stabil atau sedikit menurun. Gradasi halus memberikan performa lebih baik dibanding gradasi kasar, ditunjukkan dengan nilai VIM yang lebih rendah, VFB yang lebih tinggi, serta flow yang lebih kecil sehingga campuran lebih padat dan tahan deformasi. Nilai VMA pada gradasi halus tetap berada dalam rentang yang direkomendasikan spesifikasi Bina Marga, mendukung kepadatan dan distribusi aspal yang optimal. Campuran AC-WC dengan gradasi halus dan kadar plastik PP 2–3% direkomendasikan karena memenuhi kriteria volumetrik dan Marshall sesuai standar Bina Marga untuk lalu lintas berat. Penelitian ini menyarankan dilakukan pengujian lanjutan, termasuk uji durabilitas jangka panjang serta analisis ekonomi dan lingkungan untuk mendukung penerapan penggunaan limbah plastik PP pada konstruksi perkerasan jalan secara berkelanjutan.

Kata Kunci: AC-WC, plastik polypropylene, gradasi agregat, Marshall, volumetrik, jalan

1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri jalan raya seiring dengan pesatnya pembangunan infrastruktur di berbagai wilayah telah meningkatkan kebutuhan akan material konstruksi yang berkualitas. Aspal merupakan salah satu material utama yang digunakan dalam pembangunan jalan, terutama dalam pembuatan lapisan perkerasan jalan. Jenis aspal yang sering digunakan adalah campuran aspal dengan agregat, yang memiliki dua komponen utama, yakni agregat dan aspal. Di antara berbagai jenis campuran aspal, campuran aspal AC-WC (Aspal Concrete Wearing Course) adalah jenis yang paling sering diterapkan untuk lapisan permukaan jalan karena memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap beban lalu lintas dan kondisi cuaca yang ekstrem. Namun, meskipun aspal AC-WC banyak digunakan dalam pembangunan jalan, kualitas dan daya tahan lapisan perkerasan ini sangat bergantung pada dua faktor utama, yaitu karakteristik agregat dan komposisi campuran. Salah satu aspek yang sangat penting adalah gradasi agregat, yang mempengaruhi kepadatan, stabilitas, dan ketahanan campuran terhadap deformasi. Gradasi agregat yang tidak sesuai atau tidak optimal dapat menyebabkan ketidakseimbangan dalam campuran aspal, yang pada akhirnya dapat menurunkan kualitas dan umur pakai lapisan perkerasan jalan tersebut.

Aspal merupakan bahan utama dalam perkerasan jalan. Campuran beraspal adalah gabungan yang terdiri dari dua bahan dasar yaitu aspal yang berfungsi sebagai pengikat antar partikel dan agregat yang menjadi satu kesatuan padat dan kuat. Sifat mekanis aspal dalam campuran diperoleh dari fraksi dan kohesi dari bahan pembentuknya. Fraksi merupakan ikatan antar butir agregat yang kekuatannya tergantung pada gradasi, tekstur permukaan, bentuk butiran dan ukuran agregat maksimum yang digunakan. Sedangkan kohesinya merupakan sifat-sifat aspal yang digunakan. Oleh sebab itu campuran beraspal sangat dipengaruhi oleh sifat agregat dan aspal serta sifat-sifat campuran padat yang terbentuk dari kedua bahan tersesbut. Agregat pada campuran beraspal berperan penting dalam lapis perkerasan. Agregat pada campuran terdiri dari agregat kasar, agregat halus, bahan pengisi (filler) dan aspal. Setiap jenis campuran aspal untuk lapisan perkerasan jalan mempunyai gradasi agregat tertentu. Gradasi agregat dinyatakan dalam persentase lolos dan persentase tertahan yang dihitung berdasarkan berat agregat dengan menggunakan set saringan agregat. (Sukirman, 1999).

Konstruksi lapis keras aspal yang banyak dipergunakan di Indonesia pada saat ini adalah beton aspal. Beton aspal berkualitas tinggi, yang digunakan untuk lapis permukaan jalan berlalu lintas padat, sangat ditentukan salah satunya adalah dari pemilihan gradasi agregatnya; yakni agregat bergradasi baik. Agregat memberikan dukungan yang besar bagi beton aspal karena agregat memiliki proporsi terbesar yaitu 90-95% dari berat campuran. Stabilitas beton aspal bergantung pada baik gesekan internal maupun kohesi. Gesekan internal bergantung pada gradasi agregat, tekstur permukaan agregat, bentuk partikel, kerapatan campuran dan kuantitas aspal. Stabilitas meningkat seiring dengan peningkatan kerapatan (densitas), partikel-partikel tertahan yang dicapai melalui gradasi rapat dan pemadatan cukup.

Dengan mengetahui pengaruh grading terhadap perilaku campuran beton aspal diharapkan akan didapatkan satu campuran lapis keras yang mempunyai stabilitas dan durabilitas terbaik. Selain itu, peningkatan kesadaran terhadap keberlanjutan lingkungan memunculkan keprihatinan terkait dengan limbah plastik, yang semakin menumpuk dan sulit untuk terurai. Salah satu jenis plastik yang banyak dijumpai adalah PP (Polypropylene), yang biasa digunakan dalam pembuatan botol plastik dan kemasan lainnya. Limbah plastik PP menjadi masalah serius bagi lingkungan karena sifatnya yang sulit terdegradasi. Oleh karena itu, inovasi dalam pengelolaan limbah plastik menjadi sangat penting, salah satunya adalah pemanfaatannya dalam industri konstruksi. Pemanfaatan limbah plastik PP dalam campuran aspal sebagai bahan tambah atau modifier mulai mendapatkan perhatian. Plastik PP dapat dicacah menjadi serpihan kecil dan dicampurkan dengan aspal untuk menghasilkan campuran aspal yang lebih tahan terhadap kerusakan, seperti kerusakan akibat air (stripping) dan deformasi plastis. Penambahan limbah plastik PP ini diharapkan dapat meningkatkan sifat fisik dan mekanik campuran aspal, seperti ketahanan terhadap suhu tinggi, ketahanan terhadap air, serta daya rekat aspal terhadap agregat.

Namun, pemanfaatan plastik PP dalam campuran aspal perlu dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa faktor penting, salah satunya adalah gradasi agregat. Gradasi agregat yang bervariasi dapat mempengaruhi kemampuan plastik PP untuk berinteraksi dengan agregat dan aspal, yang pada akhirnya akan memengaruhi kinerja campuran aspal tersebut. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh variasi gradasi agregat terhadap campuran aspal AC-WC dengan bahan tambah limbah plastik PP untuk mengetahui kombinasi yang paling optimal.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi penggunaan gradasi agregat terhadap sifat-sifat campuran aspal AC-WC yang menggunakan bahan tambah limbah plastik PP. Variasi gradasi agregat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi gradasi halus, sedang, dan kasar, yang masing-masing memiliki karakteristik fisik yang berbeda. Dengan mengamati pengaruh variasi gradasi agregat terhadap sifat fisik dan mekanik campuran aspal, diharapkan dapat ditemukan kombinasi terbaik antara gradasi agregat dan plastik PP yang dapat menghasilkan campuran aspal yang lebih kuat, lebih tahan lama, dan lebih ramah lingkungan. Penggunaan limbah plastik PP dalam campuran aspal tidak hanya akan mengurangi volume limbah plastik yang mencemari lingkungan, tetapi juga berpotensi meningkatkan kualitas dan daya tahan lapisan perkerasan jalan. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi dan material baru dalam dunia konstruksi jalan yang lebih berkelanjutan. Dengan demikian, hasil penelitian ini memiliki potensi untuk mendukung pengembangan infrastruktur jalan yang lebih ramah lingkungan, serta meningkatkan efisiensi dan daya tahan jalan raya yang digunakan oleh masyarakat.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Gradasi dan Rancangan *Mix Design*

Agregat yang digunakan dalam campuran beraspal terdiri dari agregat kasar, agregat halus dan mineral pengisi. Semua agregat yang digunakan harus dalam keadaan yang bersih dan memenuhi persyaratan spesifikasi yang dipersyaratkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI). Kekuatan mekanik dari campuran ini diperoleh dari gesekan dalam, sifat penguncian antar agregat serta kohesi antar butir agregat yang telah terselimuti aspal. Gradasi agregat gabungan laston tersaji pada Tabel 2.3. Gradasi agregat gabungan untuk campuran aspal, ditunjukkan dalam persen terhadap berat agregat dan bahan pengisi, harus memenuhi batas-batas yang diberikan.

Setelah material diuji dan memenuhi spesifikasi untuk campuran AC-WC (*Asphalt Concrete Wearing Course*), maka dibuat komposisi campuran untuk pembuatan benda uji yang bertujuan untuk menentukan proporsi agregat dan mencari variasi kadar asbuton modifikasi. Besar proporsi masing-masing agregat yaitu agregat kasar dan abu batu ditentukan menurut gradasi Laston Lapis Aus (AC-WC) Spesifikasi campuran beraspal Departemen Pekerjaan Umum 2010. Dari masing-masing agregat kemudian digabung dan dilakukan analisa saringan hingga didapatkan presentase gabungan yang sesuai dengan spesifikasi. Setelah pengujian material dan memenuhi spesifikasi untuk campuran aspal panas dan buton olahan, maka dibuat komposisi campuran untuk pembuatan benda uji.

Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji mengacu pada SNI Marshall (SNI-2489-1991) yang mengadopsi ASTM D 1074-02, diawali dengan penimbangan komponen penyusun campuran, yaitu agregat dan aspal modifikasi sesuai rancangan *mix design*. Pembuatan benda uji untuk penelitian ini melalui tahapan, yaitu :

- a. Tahap persiapan, dimana kita mempersiapkan bahan dan alat yang akan digunakan.
- b. Tahap pemeriksaan bahan, berupa menentukan jenis gradasi agregat, menentukan perkiraan kadar aspal.
- c. Menentukan berat aspal dan agregat yang akan dicampur berdasarkan variasi kadar aspal. Persentase kadar aspal ditentukan berdasarkan berat total campuran. Untuk Campuran Panas, campuran agregat yang telah ditimbang, dituang ke dalam wajan lalu dipanaskan di atas pemanas sampai suhu 170°C setelah agregat sudah mencapai suhu tersebut, dimasukan bahan tambah limbah plastik *Polietilena tereftalat* (PET) sesuai dengan kadar limbah plastik yang dipakai. Setelah itu Aspal dipanaskan sampai mencair, kemudian dituang ke dalam wajan yang berisi agregat dan limbah plastik yang diletakkan di atas timbangan, sampai berat total campuran tercapai, Kemudian campuran

ini diaduk hingga homogen dan didiamkan sampai mencapai suhu pemadatan 135°C, lalu campuran ini dimasukkan ke dalam mould untuk penumbukan.

- d. Selanjutnya, campuran dimasukkan ke *mould* silinder yang telah dilapisi kertas saring di kedua sisinya. Proses ini dilakukan dengan menuangkan campuran sebanyak 3 lapisan, dimana setiap lapisan ditusuk-tusuk sebanyak 25 kali (15 kali di bagian tepi dan 10 kali di bagian tengah). Kemudian proses pemadatan campuran pada suhu 110°C dilakukan dengan alat penumbuk (berat 4,5 kg dan tinggi jatuh 45,7 cm) dengan jumlah tumbukan 75 kali untuk setiap bidang. Setelah kondisi dingin, benda uji yang telah dipadatkan dikeluarkan dari *mould* dengan menggunakan *ejector*.

Rencana jumlah benda uji yang akan dibuat dalam penelitian ini yaitu sebanyak 15 buah, dengan rincian pada Tabel berikut:

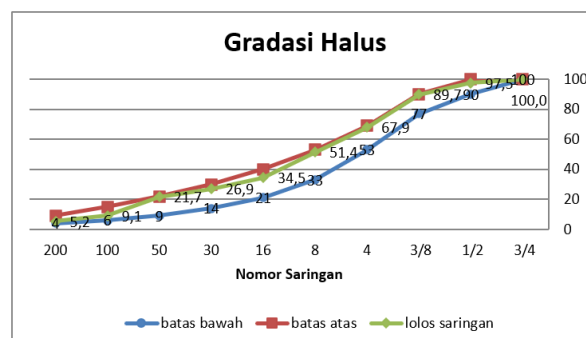
Tabel 1.Rencana Jumlah Benda Uji

Pengujian	Gradasi	Limbah Plastik PP	Benda Uji
Marshal Test	Halus	0%,1%,2%,3%,4%	15
	Kasar	0%,1%,2%,3%,4%	15

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

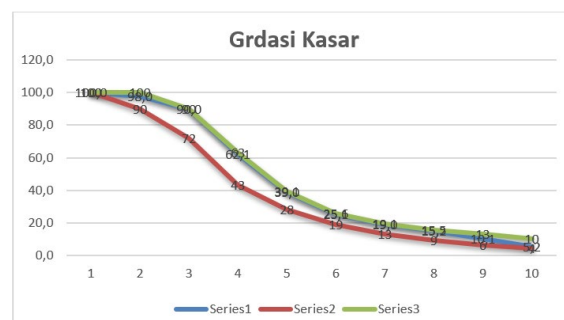
3.1. Penentuan Gradasi Campuran

Proporsi agregat gabungan didapatkan dari nilai perbandingan komposisi agregat rencana dikalikan dengan nilai persen lolos pada analisa saringan. Selanjutnya, proporsi agregat gabungan yang telah diperoleh tersebut disesuaikan dengan nilai interval spesifikasi. Setelah itu, agregat gabungan serta interval spesifikasi diplot ke dalam grafik, seperti yang ditunjukkan pada gambar.



Gambar 1. Grafik Gradasi Halus

Pada gambar tersebut memperlihatkan rancangan agregat gabungan dengan menggunakan gradasi halus yang dibuat berada dalam interval spesifikasi Bina Marga untuk bahan jalan sehingga dapat diperoleh campuran yang optimal.



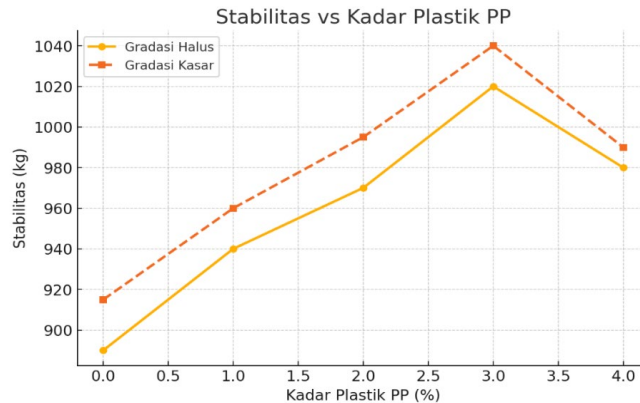
Gambar 2. Grafik Gradasi Kasar

Gambar diatas memperlihatkan bahwa rancangan agregat gabungan dengan menggunakan gradasi kasar yang dibuat berada dalam interval spesifikasi Bina Marga untuk bahan jalan sehingga dapat diperoleh campuran yang optimal.

3.2. Nilai Marshall Test

3.2.1. Nilai Stabilitas

Berdasarkan data hasil pengujian laboratorium yang dilakukan di peroleh hasil Stabilitas sebagai berikut :

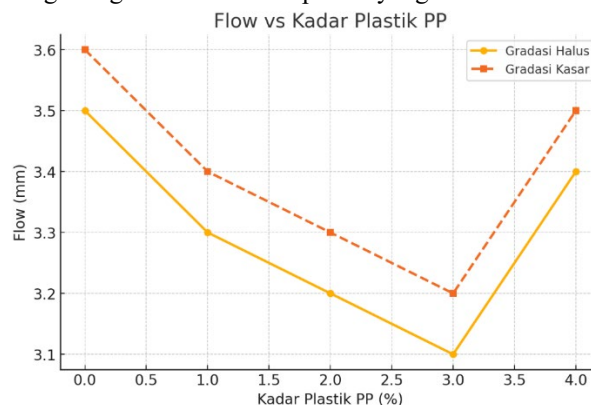


Gambar 3. Grafik nilai satbilitas

Kenaikan stabilitas paling signifikan terjadi pada kadar PP 3%, mencapai nilai tertinggi sebesar 1020 kg. Peningkatan ini menunjukkan bahwa pada kadar tersebut distribusi plastik di dalam matriks campuran membantu meningkatkan ikatan antar agregat sehingga campuran lebih mampu menahan beban. Namun setelah melewati kadar 3%, yaitu pada 4%, nilai stabilitas justru turun menjadi 980 kg, menunjukkan bahwa kelebihan plastik dapat menyebabkan distribusi yang tidak homogen dan mengurangi kekuatan struktural campuran. Untuk gradasi kasar, pola peningkatan stabilitas serupa juga terjadi. Stabilitas awal pada kadar PP 0% adalah 915 kg. Nilai ini terus meningkat hingga mencapai optimum pada kadar PP 3%, dengan stabilitas tertinggi 1040 kg. Setelah itu, pada kadar PP 4%, stabilitas kembali turun ke 990 kg, menunjukkan bahwa penambahan plastik melebihi kadar optimum tidak lagi efektif meningkatkan kekuatan campuran bahkan cenderung menurunkannya.

3.2.2. Flow

Pada campuran dengan gradasi halus, nilai flow awal tanpa penambahan plastik (0% PP) adalah 3.5 mm. Dengan meningkatnya kadar plastik PP hingga 3%, flow secara bertahap menurun menjadi 3.1 mm. Penurunan flow ini menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih kaku atau rigid, yang berarti deformasi plastis saat menerima beban maksimum menjadi lebih kecil. Namun pada kadar PP 4%, nilai flow kembali naik menjadi 3.4 mm. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan plastik yang terlalu banyak justru menyebabkan distribusi plastik tidak merata, sehingga mengurangi kekompakan campuran dan mengakibatkan deformasi plastis yang lebih besar saat dibebani. Pada campuran dengan gradasi kasar, pola yang serupa juga diamati. Flow awal pada kadar PP 0% adalah 3.6 mm, menurun hingga 3.2 mm pada kadar PP 3%, yang juga merupakan kadar optimum berdasarkan stabilitas. Pada kadar PP 4%, flow meningkat lagi menjadi 3.5 mm, mengindikasikan bahwa kelebihan plastik mulai melemahkan sifat kaku campuran, membuatnya cenderung mengalami deformasi plastis yang lebih besar.



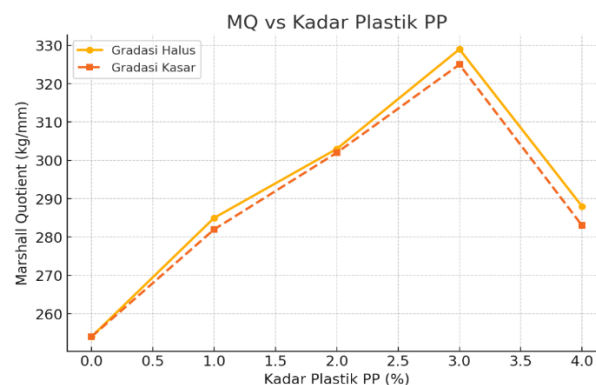
Gambar 4. Grafik Nilai Flow

3.2.3. Marshall Quotient (MQ)

Pada campuran aspal AC-WC dengan gradasi halus, nilai Marshall Quotient (MQ) pada kadar plastik PP 0% tercatat sebesar 254 kg/mm, menunjukkan kekuatan relatif campuran terhadap deformasi awal. Seiring dengan penambahan kadar plastik PP hingga 3%, nilai MQ meningkat signifikan, mencapai nilai maksimum 329 kg/mm. Peningkatan ini menandakan bahwa campuran tidak hanya memiliki stabilitas yang tinggi tetapi juga mampu mempertahankan bentuknya terhadap deformasi plastis. Ini berarti campuran pada kadar 3% PP memiliki keseimbangan optimal antara kekuatan menahan beban (stabilitas) dan kemampuan menahan perubahan bentuk (flow). Namun, pada kadar plastik PP 4%, nilai MQ turun kembali menjadi 288 kg/mm, menunjukkan bahwa

kelebihan plastik mulai mempengaruhi keseimbangan struktural campuran, menjadikannya lebih mudah terdeformasi saat menahan beban.

Pada campuran dengan gradasi kasar, pola yang hampir serupa juga terlihat. Nilai MQ awal sebesar 254 kg/mm pada kadar PP 0% naik secara bertahap hingga mencapai 325 kg/mm pada kadar PP 3%, yang sekaligus menjadi kadar optimum berdasarkan indikator MQ. Setelah kadar ini dilampaui, yaitu pada PP 4%, MQ menurun lagi menjadi 283 kg/mm, memperlihatkan gejala overfilling di mana plastik berlebih justru menurunkan kemampuan campuran dalam mempertahankan bentuknya. Marshall Quotient merupakan indikator penting yang menggambarkan keseimbangan antara kekuatan (stabilitas) dan deformasi plastis (flow). Nilai MQ yang tinggi pada kadar PP 3% menunjukkan campuran paling rigid, paling tahan terhadap deformasi plastis sekaligus kuat dalam menopang beban lalu lintas. Penurunan nilai MQ pada kadar PP 4% baik pada gradasi halus maupun kasar menegaskan kembali bahwa kadar plastik yang berlebihan dapat mengganggu distribusi campuran aspal, menurunkan kohesi antar agregat, dan pada akhirnya mengurangi ketahanan campuran terhadap deformasi.



Gambar 5. Grafik Marshall Quotient (MQ)

3.3. Volumetrik Campuran

Untuk melengkapi evaluasi kinerja campuran aspal AC-WC dengan variasi kadar limbah plastik polypropylene (PP), dilakukan analisis karakteristik volumetrik campuran yang meliputi Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), dan Void Filled with Bitumen (VFB). Parameter-parameter ini digunakan untuk menilai sejauh mana campuran dapat memenuhi spesifikasi teknis dalam hal kepadatan, rongga antar agregat, dan kemampuan aspal mengisi rongga tersebut.

Tabel 3. Hasil Pengujian Volumetrik Campuran Gradasi Halus

Kadar PP (%)	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)
0	4.0	15.0	73.3
1	3.8	14.8	74.3
2	3.7	14.7	74.8
3	3.5	14.5	75.9
4	3.9	14.6	73.3

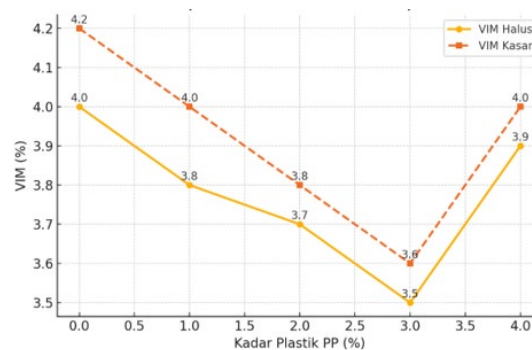
- VIM menurun hingga kadar PP 3%, menunjukkan rongga udara dalam campuran semakin sedikit sehingga campuran lebih padat. Pada kadar 4% PP naik lagi karena plastik berlebih menurunkan kepadatan.
- VMA cenderung stabil sedikit menurun, menunjukkan ruang antar agregat sedikit berkurang saat PP mengisi rongga.
- VFB meningkat hingga 3% PP (artinya rongga dalam agregat makin banyak terisi aspal), lalu menurun pada 4% PP karena distribusi plastik yang tidak homogen menurunkan efisiensi pengisian aspal.

Tabel 4.7. Data Volumetrik Campuran - Gradasi Kasar

Kadar PP (%)	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)
0	4.2	15.5	72.9
1	4.0	15.2	73.7
2	3.8	15.0	74.7
3	3.6	14.8	75.7
4	4.0	15.0	73.3

3.3.1. Nilai Void in Mix (VIM)

Berdasarkan hasil evaluasi volumetrik, terlihat bahwa nilai VIM (Void in Mix) pada campuran aspal AC-WC dengan penambahan limbah plastik PP menunjukkan pola yang konsisten untuk kedua jenis gradasi (halus dan kasar).



Gambar 6. Nilai VIM gradasi Halus dan Kasar

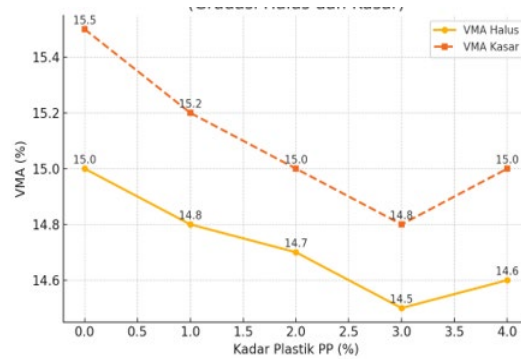
Pada gradasi halus, nilai VIM awal sebesar 4.0% pada kadar PP 0%, menurun secara bertahap seiring penambahan kadar plastik. Nilai terendah dicapai pada kadar PP 3%, yaitu 3.5%, sebelum kembali meningkat menjadi 3.9% pada kadar PP 4%. Tren ini menunjukkan bahwa penambahan plastik PP hingga kadar 3% membantu meningkatkan kepadatan campuran dengan mengisi rongga udara secara lebih efektif, sehingga mengurangi kadar void dalam campuran. Polanya juga serupa pada gradasi kasar, dengan nilai VIM awal 4.2% yang turun hingga 3.6% pada kadar PP 3%, lalu naik kembali menjadi 4.0% pada kadar PP 4%. Hal ini memperlihatkan bahwa plastik PP berperan sebagai filler yang membantu mengurangi rongga udara dalam campuran hingga kadar optimum tertentu. Namun pada kadar plastik yang berlebih (di atas 3%), distribusi plastik cenderung tidak merata dan dapat membentuk area kosong mikroskopis, menyebabkan nilai VIM meningkat lagi. Secara keseluruhan, nilai VIM yang berada dalam kisaran 3.5–4.2% ini masih memenuhi spesifikasi umum Bina Marga yang mengharuskan nilai VIM untuk campuran AC-WC berada antara 3% hingga 5%. Nilai VIM optimum terjadi pada kadar plastik PP 3%, yang konsisten dengan hasil uji stabilitas dan MQ tertinggi, menunjukkan bahwa pada kadar tersebut campuran mencapai tingkat kepadatan terbaik dengan rongga udara yang cukup untuk mengantisipasi ekspansi aspal maupun drainase mikroskopis.

3.3.2. Nilai Void in Mineral Aggregate (VMA)

Nilai VMA (Void in Mineral Aggregate) pada campuran aspal AC-WC dengan penambahan plastik PP menunjukkan pola yang relatif stabil dengan sedikit penurunan seiring meningkatnya kadar plastik hingga mencapai kadar optimum

Grafik hubungan antara *Voids in Mineral Aggregate* (VMA) dan kadar plastik polipropilena (PP) pada campuran beraspal menunjukkan pola penurunan nilai VMA pada kedua jenis gradasi, baik halus maupun kasar, seiring dengan penambahan kadar PP hingga titik tertentu. Pada gradasi halus, nilai VMA awal sebesar 15,0% pada kadar PP 0% menurun secara bertahap hingga mencapai titik terendah 14,5% pada kadar PP 3%, kemudian mengalami sedikit kenaikan menjadi 14,6% pada kadar PP 4%. Sementara itu, gradasi kasar memiliki nilai VMA awal yang lebih tinggi yaitu 15,5% pada kadar PP 0% dan menurun hingga 14,8% pada kadar PP 3%, lalu kembali meningkat menjadi 15,0% pada kadar PP 4%. Pola ini mengindikasikan bahwa pada kadar rendah hingga menengah, plastik PP berfungsi efektif sebagai pengisi rongga antar butiran agregat sehingga mengurangi volume rongga mineral. Namun, pada kadar tinggi, distribusi PP yang tidak merata atau penggumpalan partikel plastik dapat mengakibatkan bertambahnya kembali volume rongga. Nilai VMA yang lebih besar pada gradasi kasar dibanding gradasi halus di setiap kadar PP menunjukkan bahwa struktur butiran yang lebih terbuka pada gradasi kasar menyisakan lebih banyak ruang yang dapat terisi oleh PP. Selain itu, penurunan VMA akibat penambahan PP terlihat lebih signifikan pada gradasi kasar, menandakan bahwa peran PP sebagai pengisi rongga lebih dominan pada campuran bertekstur kasar.

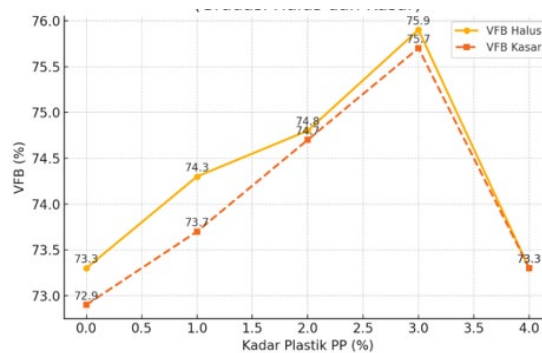
Hasil ini menegaskan bahwa kadar PP optimum untuk meminimalkan VMA berada di sekitar 3% pada kedua jenis gradasi, dengan gradasi kasar memiliki potensi penurunan VMA yang lebih besar dibanding gradasi halus.



Gambar 7. Nilai VMA gradasi Halus dan Kasar

3.3.3. Nilai Void Filled with Bitumen (VFB)

Nilai VFB (Void Filled with Bitumen) pada campuran aspal AC-WC menunjukkan respon yang sangat baik terhadap penambahan limbah plastik PP, dengan pola kenaikan yang jelas hingga kadar optimum, sebelum mengalami sedikit penurunan pada kadar plastik yang lebih tinggi.



Gambar 8. Nilai Grafik Void Filled with Bitumen (VFB)

Pada campuran dengan gradasi halus, nilai VFB tercatat sebesar 73.3% pada kadar plastik PP 0%, kemudian meningkat secara konsisten menjadi 75.9% pada kadar PP 3%, sebelum akhirnya menurun kembali ke 73.3% pada kadar PP 4%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan plastik PP dalam batas optimum mampu membantu memperbaiki distribusi aspal dalam campuran, sehingga persentase volume rongga agregat (VMA) yang terisi aspal menjadi lebih besar. Ini menandakan campuran memiliki ikatan internal yang lebih baik dan dapat meminimalkan terjadinya bleeding ataupun retak karena distribusi aspal yang lebih merata.

Pola yang serupa juga tampak pada campuran gradasi kasar, di mana nilai VFB naik dari 72.9% pada kadar PP 0% menjadi 75.7% pada kadar PP 3%, sebelum turun kembali ke 73.3% pada kadar PP 4%. Penurunan ini pada kadar plastik yang terlalu tinggi menunjukkan adanya titik jenuh, di mana plastik PP mulai mengganggu kontinuitas matriks aspal sehingga tidak lagi efektif mengisi rongga antar agregat. Secara keseluruhan, nilai VFB pada seluruh variasi kadar plastik masih berada pada rentang yang sesuai dengan spesifikasi Bina Marga yang mensyaratkan umumnya di kisaran 65% hingga 80%, tergantung jenis campuran. Nilai optimum yang tercapai pada kadar PP 3% menegaskan bahwa pada kadar ini distribusi aspal dalam mengisi rongga agregat berada pada kondisi paling ideal, sejalan dengan capaian stabilitas, flow, dan MQ yang juga menunjukkan performa terbaik pada kadar yang sama.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh variasi gradasi agregat dan penambahan limbah plastik polypropylene (PP) terhadap karakteristik volumetrik dan Marshall campuran AC-WC, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- Pengaruh gradasi agregat terhadap nilai volumetrik (VIM, VMA, VFB):
 - Campuran dengan gradasi halus cenderung menghasilkan nilai VIM (Void in Mix) yang lebih rendah dibanding gradasi kasar, menunjukkan rongga udara yang lebih sedikit.
 - Nilai VMA (Void in Mineral Aggregate) pada gradasi halus juga umumnya lebih rendah karena kepadatan susunan agregat lebih rapat, sedangkan pada gradasi kasar cenderung lebih tinggi.
 - Sementara itu, VFB (Void Filled with Bitumen) pada gradasi halus menunjukkan nilai yang lebih tinggi, menandakan ruang kosong antar agregat lebih banyak terisi aspal, yang meningkatkan kepadatan dan stabilitas campuran.
- Pengaruh gradasi agregat terhadap parameter Marshall (stabilitas dan flow):

- Penambahan limbah plastik PP pada kedua jenis gradasi meningkatkan nilai stabilitas Marshall hingga mencapai kadar optimum (biasanya di sekitar 3%), setelah itu cenderung menurun atau stabil.
 - Campuran dengan gradasi halus memberikan nilai stabilitas yang lebih tinggi dan flow yang lebih rendah dibanding gradasi kasar, menunjukkan sifat campuran yang lebih kaku dan tahan deformasi.
 - Gradasi kasar menghasilkan flow lebih besar, mengindikasikan sifat campuran yang lebih lentur namun dengan stabilitas sedikit lebih rendah.
3. Gradasi optimum untuk memenuhi spesifikasi volumetrik dan Marshall Bina Marga:
- Berdasarkan hasil evaluasi, campuran AC-WC dengan gradasi halus pada kadar plastik PP sekitar 2–3% mampu memberikan nilai volumetrik (VIM, VMA, VFB) maupun parameter Marshall (stabilitas dan flow) yang paling sesuai dengan rentang spesifikasi Bina Marga untuk perkerasan jalan lalu lintas berat.
 - Dengan demikian, gradasi halus lebih direkomendasikan untuk aplikasi campuran AC-WC yang memanfaatkan limbah plastik PP, karena dapat menghasilkan campuran yang lebih stabil, padat, dan tahan deformasi, serta memenuhi standar teknis yang dipersyaratkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditama, A.T. (2017). Analisis gradasi agregat sebagai upaya perbaikan karakteristik campuran aspal beton geopolimer.
- Dairi, R.H. (2019). Pengaruh gradasi agregat terhadap karakteristik Marshall pada campuran Lawele Granular Asphalt (LGA). *Jurnal MEDIA INOVASI Teknik Sipil Unidayan*, 8(2).
- Debataraja, S.M.T., & Sihite, N. (2023). Pengaruh penambahan plastik bekas tipe Polyethylene Terephthalate (PET) terhadap daya lekat campuran laston lapis AC-WC. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 12(1), 1–15.
- Irianto, I., & Lapian, F.E. (2023). Volumetrik campuran aspal concrete wearing course (AC-WC) dengan bahan tambah limbah plastik polistyren (PS). *Jurnal Teknik AMATA*, 4(2), 25–29.
- Irianto, M.T., & Lapian, F.E.P. (2024). Asphalt mix compressive stress-strain behavior: An analytical and experimental study of variable influence. *Civil Engineering Journal*, 10(5), 1525–1542.
- Kusharto, H. (2007). Pengaruh gradasi agregat terhadap perilaku campuran beton aspal. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 9(1), 55–63.
- Nur, N.K., Mahyuddin, M., Bachtar, E., Tumpu, M., Mukrim, M.I., Irianto, I., ... & Syukriah, S. (2021). *Perancangan Perkerasan Jalan*.
- Radam, I.F. (2021). Pengaruh penambahan limbah plastik terhadap karakteristik campuran aspal AC-WC. *Jurnal Rivet*, 1(02), 80–90.
- Rombot, P., Kaseke, O.H., & Manoppo, M.R. (2015). Kajian kinerja campuran beraspal panas jenis lapis aspal beton sebagai lapis aus bergradasi kasar dan halus. *Jurnal Sipil Statik*, 3(3), 140521.
- Simangunsong, J.E., Alkas, M.J., & Wati, A. (2022). Pemanfaatan limbah plastik PET sebagai bahan tambah aspal pada campuran asphalt concrete wearing course (AC-WC). *Teknologi Sipil: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 5(2), 26–33.
- Sukirman, S. (1999). *Perkerasan Lentur Jalan Raya*.
- Sumiati, S., & Sukarman, S. (2014). Pengaruh gradasi agregat terhadap nilai karakteristik aspal beton (AC-BC). *PILAR*, 10(1).
- Susanto, I., & Suaryana, N. (2019). Evaluasi kinerja campuran beraspal lapis aus (AC-WC) dengan bahan tambah limbah plastik kresek. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 17(2), 27–36.
- Telford, T. (1838). *Life of Thomas Telford, Civil Engineer*. Payne and Foss.
- Tumpu, M., Mabui, D.S., Rochmawati, R., & Sila, A.A. (2023, June). Potential of pyrolyzing mixed polyethylene terephthalate and polypropylene plastic wastes for utilization in asphalt binders. *Annales de Chimie – Science des Matériaux*, 47(3), 133. International Information and Engineering Technology Association (IIETA).
- Dewobroto, W. (2005). *Aplikasi rekayasa konstruksi dengan Visual Basic 6.0 : analisis dan desain penampang beton bertulang sesuai SNI 03-2847-2002*. PT. Elex Media Komputindo, Jakarta
- Frans, R. dan Arfiadi, Y. (2015). “Judul Artikel Konferensi”. Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 9, Makassar, 7-8 Oktober 2016, 871-877
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press, Mass
- Sarraf, M. And Bruneau, M. (1998). “Ductile sismic retrofit of steel deck-truss bridges, II: Design applications.”. *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 124(11), 1263-1271
- Soong, T. T. and Dargush, G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- Sudjati, J. J., Tarigan, R. A., dan Tresna, I. B. M. (2015). Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 9, Makassar, 7-8 Oktober 2016, 887-892