

Optimalisasi Campuran Aspal Porus Melalui Substitusi Limbah Ban Kendaraan Terhadap Parameter Marshall

Kumita¹, Idayani², Deni Iqbal*³, Muhammad Ikhsan⁴

^{1,2}Jurusan Teknik Sipil, Universitas Almuslim, Bireuen, Aceh, Indonesia

³ Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Lhokseumawe, Lhokseumawe, Indonesia

⁴ Jurusan Teknik Sipil, Universitas Teuku Umar, Meulaboh, Aceh, Indonesia

Corresponding Email : iqbal_ptg@pnl.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

07 December 2025

Received in revised form

12 December 2025

Accepted 03 January 2026

Available online 15

January 2026

Kata Kunci:

Ban Dalam Bekas, Aspal Porus, Parameter Marshall, Aspal Panas.

Keywords:

Wasted Inner Tube, Porous Asphalt, Marshall Parameters, Hot Asphalt

DOI

<https://doi.org/10.61579/mikhayla.v3i1.837>

ABSTRAK

Perkerasan jalan merupakan infrastruktur penting yang berfungsi mendukung mobilitas dan aktivitas transportasi. Salah satu jenis perkerasan lentur yang banyak digunakan adalah **aspal porus**, karena memiliki rongga udara tinggi yang mampu menyerap air dan mengurangi genangan di permukaan jalan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh substitusi ban dalam bekas sepeda motor terhadap karakteristik Marshall pada campuran aspal porus serta menentukan kadar substitusi yang paling optimum sesuai spesifikasi AAPA (2004). Pemilihan campuran aspal porus didasari oleh sifatnya yang memiliki rongga udara tinggi (void) sehingga mampu menyerap air dan mengurangi genangan di permukaan jalan, namun kelemahannya terletak pada stabilitas yang relatif rendah terhadap beban lalu lintas berat. Oleh karena itu, dilakukan inovasi dengan menambahkan ban dalam bekas sebagai aspal panas untuk meningkatkan stabilitas sekaligus memanfaatkan limbah karet yang sulit terurai di lingkungan. Penelitian ini dilakukan pada tahun 2025 di Laboratorium Perkerasan Jalan Universitas Almuslim menggunakan metode uji Marshall dengan variasi kadar substitusi ban dalam bekas sebesar 0%, 1%, 2%, 3%, dan 4%. Hasil penelitian menunjukkan adanya tren peningkatan nilai stabilitas seiring bertambahnya kadar substitusi, dengan nilai tertinggi sebesar 1178 kg pada kadar 4%. Nilai flow meningkat dari 2,2 mm menjadi 3,0 mm, VIM sedikit menurun dari 19% menjadi 16%, dan MQ meningkat dari 383

kg/mm menjadi 398 kg/mm. Seluruh parameter tersebut masih memenuhi spesifikasi AAPA (2004). Berdasarkan hasil tersebut, kadar substitusi 4% adalah nilai paling optimum karena menghasilkan keseimbangan terbaik antara stabilitas, kelelahan (flow), dan rongga udara (VIM). Penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah ban dalam bekas berpotensi meningkatkan performa aspal porus sekaligus mendukung penerapan teknologi perkerasan jalan yang ramah lingkungan.

ABSTRACT

Pavement is an essential infrastructure that supports mobility and transportation activities. One type of flexible pavement widely used is porous asphalt, which has high air void content, enabling it to absorb water and reduce surface ponding. This study aimed to investigate the effect of substituting wasted inner tubes from motorcycle tires on the Marshall characteristics of porous asphalt mixtures and to determine the most optimum substitution content in accordance with AAPA (2004) specifications. The use of porous asphalt was based on its high air voids, which allow effective water absorption and reduce surface water accumulation. However, the main disadvantage of this asphalt was having relatively low stability under heavy traffic loads. Therefore, an innovation was introduced by adding waste inner tubes to hot-mix asphalt to enhance stability while simultaneously utilizing non-biodegradable rubber waste. This research was conducted in 2025 at the Highway Pavement Laboratory, Universitas Almuslim, using the Marshall test method with substitution variations of 0%, 1%, 2%, 3%, and 4%. The results of this research indicated an increasing trend in stability values with increasing substitution levels, reaching a maximum of 1178 kg at 4% substitution. The flow value increased from 2.2 mm to 3.0 mm, VIM slightly decreased from 19% to 16%, and MQ increased from 383 kg/mm to 398 kg/mm. All parameters remained within the limits of the AAPA (2004) specifications.



1. INTRODUCTION

Perkerasan jalan merupakan elemen penting dalam sistem transportasi yang menunjang kelancaran mobilitas masyarakat dan aktivitas ekonomi. Di Indonesia, jenis perkerasan yang umum digunakan adalah perkerasan lentur karena memiliki kemampuan menyesuaikan diri terhadap beban lalu lintas dan kondisi tanah dasar (Sukirman, 2019). Salah satu inovasi dalam bidang perkerasan adalah penggunaan campuran aspal porus, yaitu campuran beraspal dengan rongga udara tinggi yang mampu menyerap air dan mengurangi genangan di permukaan jalan (Haryanto, 2020). Karakteristik ini sangat sesuai dengan kondisi iklim tropis Indonesia yang memiliki intensitas curah hujan tinggi.

Meskipun memiliki keunggulan dalam hal drainase, **aspal porus** memiliki kelemahan berupa stabilitas yang relatif rendah dibandingkan campuran aspal padat konvensional. Oleh karena itu, diperlukan modifikasi material untuk meningkatkan kinerjanya tanpa mengurangi sifat porositas yang menjadi ciri khas aspal porus. Di sisi lain, peningkatan jumlah limbah ban dalam bekas kendaraan bermotor menimbulkan masalah lingkungan yang signifikan, karena bahan karet sintesis sulit terurai secara alami (Fauzi, dkk. 2022). Upaya pemanfaatan limbah ban dalam bekas sebagai bahan substitusi pada campuran aspal menjadi solusi potensial untuk mengurangi limbah sekaligus meningkatkan performa aspal.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan material daur ulang seperti plastik, abu batu bata, dan serbuk karet dapat meningkatkan sifat mekanis campuran beraspal (Idayani, dkk. 2022). Namun, penelitian terkait **pemanfaatan ban dalam bekas sepeda motor sebagai substitusi aspal panas pada campuran aspal porus** masih terbatas, khususnya dalam konteks parameter Marshall yang meliputi stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), dan Void in the Mix (VIM).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi substitusi ban dalam bekas sepeda motor terhadap karakteristik Marshall pada campuran aspal porus serta menentukan kadar substitusi optimum yang memenuhi spesifikasi *Australian Asphalt Pavement Association* (AAPA, 2004). Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi perkerasan jalan yang **berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan**, sekaligus mendukung upaya pengelolaan limbah karet secara produktif.

2. METHOD

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Perkerasan Jalan Fakultas Teknik Universitas Almuslim. Metode pengujian mengikuti prosedur pengujian marshall, AAPA 2004. Bahan material yang digunakan berupa agregat yang berasal dari PT. Takabeya Perkasa Group, serta aspal yang digunakan berupa aspal keras Shell Bitumen penetrasi 60/70 dengan tambahan potongan ban dalam bekas sepeda motor untuk pengujian karakteristik campuran aspal.

3. RESULT AND DISCUSSION

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah aspal keras Shell Bitumen penetrasi 60/70, serta agregat bergradasi baik dan potongan ban dalam bekas sepeda motor. Agregat yang digunakan berupa batu pecah yang diproduksi dari pabrik pemecahan batu PT. Takabeya. Proses pengambilan ban dalam sepeda motor diperoleh dari bengkel matanggumpung dua. Ban dalam bekas sepeda motor mempunyai kode ban dalam ukuran 70/90 -17.

Peralatan yang digunakan

Dalam penelitian ini diperlukan sejumlah peralatan yang berkaitan dengan pengujian yang meliputi: peralatan pembuatan benda uji dan peralatan uji parameter marshall, yaitu: saringan, mistar perata, mould, marshall compaction hammer, alat uji marshall, dan water bath.

Prosedur penelitian

Secara garis besar, prosedur penelitian ini terbagi atas delapan tahap, yaitu pengujian sifat-sifat fisis agregat, pengujian sifat-sifat fisis aspal, perencanaan benda uji, namun apabila aspal modifikasi ban dalam bekas sepeda motor tidak memenuhi spesifikasi, maka akan dicari kadar ban dalam bekas sepeda motor yang lain sehingga dapat memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan.

Perencanaan campuran aspal porus

Tahapan perencanaan campuran aspal porus yang pertama dilakukan adalah pemilihan gradasi agraret yang akan dilakukan dengan pengujian analisa saringan, pemeriksaan dilakukan dengan menggunakan satu set saringan sesuai dengan ukuran saringan yang dibutuhkan. Saringan disusun dengan ukuran saringan paling besar ditempatkan paling atas, kemudian set saringan tersebut diguncangkan dengan mesin pengguncang selama beberapa menit.

Penentuan kadar aspal optimum

Kadar aspal ditentukan berdasarkan pada kadar aspal perkiraan awal yang merupakan kadar aspal tengah atau kadar aspal ideal. Kadar aspal tengah yang diperoleh dari rumus tersebut dibulatkan mendekati angka 0,5% terdekat. Variasi kadar aspal yang digunakan adalah sebanyak 5 variasi, yang memiliki perbedaan masing-masing 0,5%. Variasi kadar aspal yang dipilih sedemikian rupa, sehingga dua kadar aspal kurang dari nilai kadar aspal tengah, dan dua kadar aspal lainnya lebih besar dari nilai kadar aspal tengah.

Tahapan selanjutnya yang akan dilakukan adalah penentuan benda uji. Proses pembuatan benda uji bisa dilanjutkan ketika agregat, gradasi dan aspal polimer memenuhi spesifikasi. Setelah dilakukan beberapa pengujian sehingga diperoleh data data untuk mengetahui nilai-nilai dari karakteristik campuran aspal porus dengan substitusi ban dalam bekas kendaraan sebagai aspal panas.

Banyaknya benda uji yang dibuat untuk mengetahui sifat-sifat campuran dapat dilihat pada:

Tabel 1. Benda Uji Untuk Menentukan KAO Dengan Metode Marshall

Kadar Aspal	Kode Benda Uji	Jumlah
1 P1b - 1,0	B11,B12,B13	3 Buah
2 P1b - 0,5	B21,B22,B23	3 Buah
3 P1b	B31,B32,B33	3 Buah

4 P1b + 0.5	B41,B42,B43	3 Buah
5 P1b + 1,0	B51,B52,B53	3 Buah
Total		15 Buah

Setelah Kadar Aspal Optimum (KAO) diperoleh, maka akan dibuat benda uji pada Kadar Aspal Optimum (KAO) tanpa penambahan ban dalam bekas sepeda motor (0.0%), selanjutnya akan dilakukan pembuatan benda uji dengan variasi persentase penambahan ban dalam bekas sepeda motor yaitu 0%, 1%, 2%, 3% dan 4%. Ban dalam bekas sepeda motor ditambahkan ke dalam kadar aspal optimum, sehingga kadar aspal dalam campuran tetap, akan digunakan untuk semua variasi persentase penambahan ban dalam bekas sepeda motor dan lama perendaman 30 menit.

Jumlah benda uji dengan perendaman air dan variasi penambahan ban dalam bekas sepeda motor pada waktu perendaman 30 menit dapat dilihat seperti pada berikut ini.

Tabel 2. Benda Uji Dengan Penambahan Ban Dalam Bekas Sepeda Motor Pada Perendaman Selama 30 Menit

No	Kadar Dalam	Ban	Kadar Aspal Yang Substitusi Polimer (%)	Di Kode Benda Uji	Jumlah Benda Uji
1.		0%	30 menit	A1,A2,A3	3 Buah
2.		1%	30 menit	A4,A5,A6	3 Buah
3.		2%	30 menit	A7,A8,A9	3 Buah
4.		3%	30 menit	A10,A11,A12	3 Buah
5.		4%	30 menit	A13,A14,A15	3 Buah
Jumlah Benda Uji					15 Buah

Tabel 3. Rekapitulasi Rancangan Jumlah Benda Uji Keseluruhan Berdasarkan Persentase Substitusi Ban Dalam Bekas Sepeda Motor

No	Uraian	Jumlah
1.	Benda uji untuk penentuan kadar aspal optimum (KAO)	15 buah
2.	Benda uji yang disubstitusi kadar ban dalam bekas sepeda motor pada rendaman 30 menit	15 buah
Jumlah total		30 buah

Langkah awal pembuatan benda uji yaitu dengan menyiapkan peralatan yang digunakan berupa timbangan, kompor, wajan, sendok pengaduk, thermometer, mold, kertas untuk lapisan mold, spatula, alat penumbuk, dongkrak, dan bak perendaman benda uji.

Selanjutnya mempersiapkan agregat dengan berat sesuai dengan perencanaan campuran kemudian keringkan dalam oven. Kemudian aspal dipanaskan sampai mencapai suhu pencampuran, lalu aspal sebanyak yang dibutuhkan dituang ke dalam agregat yang sudah dipanaskan kemudian diaduk campuran tersebut sampai merata. Setelah mencapai suhu pencampuran, campuran dituang ke dalam mold yang sudah dipanaskan.

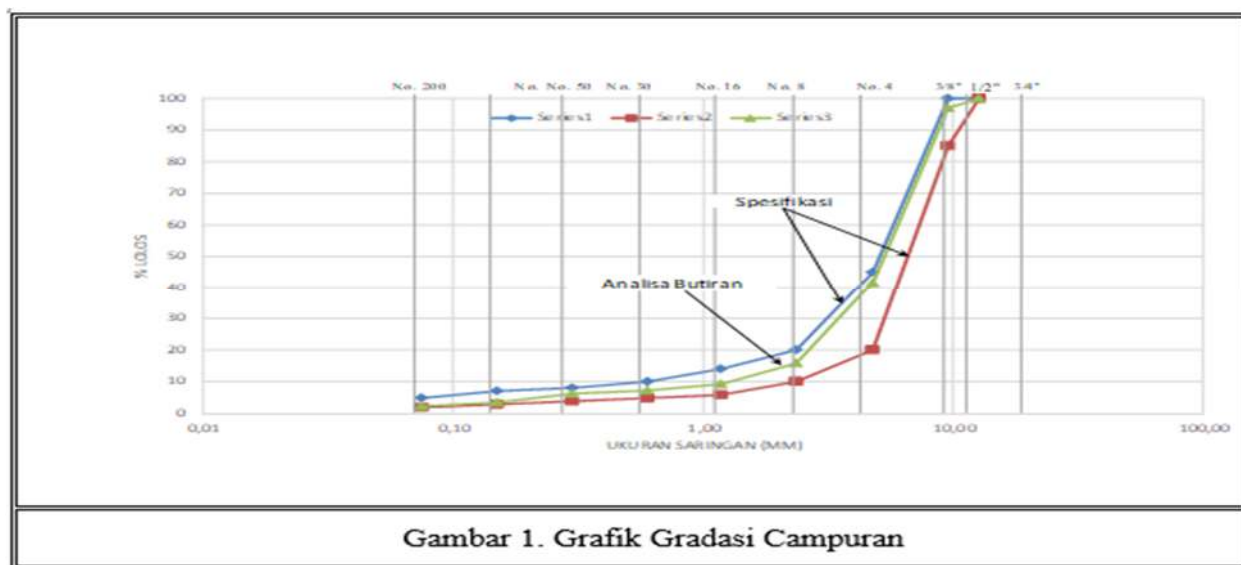
Setelah mencapai suhu pemadatan, benda uji ditumbuk dengan menggunakan alat penumbuk masing-masing sebanyak 50 tumbukan untuk permukaan bagian atas dan bagian bawah mold. Jumlah tumbukan ini mengacu kepada AAPA 2004 bahwa aspal porus menggunakan 2 x 50 tumbukan. Kemudian benda uji dikeluarkan dari cetakan mold dan didiamkan selama 24 jam. Setelah direndam akan dilakukan penimbangan berat benda uji didalam air, lalu benda uji dilap agar tercapat kering permukaan kemudian ditimbang.

Langkah selanjutnya akan dilakukan perendaman benda uji dalam waterbath, benda uji direndam dalam bak perendaman selama 30 menit pada suhu 60°C. kemudian benda uji dikeluarkan dan diletakkan pada alat Marshall, selanjutnya alat flow meter dan jarum diam penekan diatur kedudukannya pada angka nol. Kemudian pembebanan siap diberikan dengan kecepatan tetap 50 mm/menit sampai mencapai pembebanan maksimum dari benda uji.

Hasil penelitian ini meliputi pemeriksaan agregat kasar dan halus, persiapan sampel dan pengujian benda uji untuk mendapatkan nilai kadar Aspal Optimum (KAO). Hasil pengujian marshall campuran ban dalam bekas sepeda motor aspal porus.

Hasil pemeriksaan gradasi

Pemeriksaan gradasi agregat dilakukan dengan menggunakan analisa saringan. Dari hasil pemeriksaan yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa agregat tersebut tidak dapat digunakan langsung dalam campuran karena tidak memenuhi spesifikasi gradasi yang disyaratkan. Oleh karena itu, harus dilakukan penyesuaian gradasi terlebih dahulu sehingga agregat tersebut memenuhi syarat spesifikasi yang telah ditetapkan. Gradasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah Gradasi Terbuka berdasarkan nilai tengah dari spesifikasi APPA 2004 untuk campuran aspal porous. Selanjutnya dari gradasi rencana tersebut dihitung komposisi campuran dan proporsi kadar aspal pen. 60/70.



Gambar 1. Grafik Gradasi Campuran

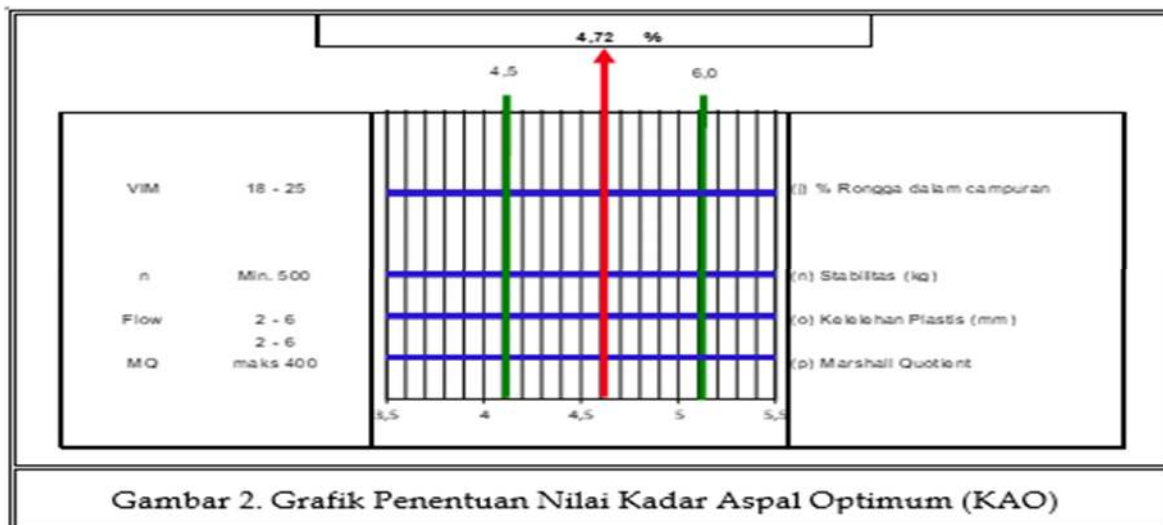
Hasil pengujian marshall untuk penentuan KAO

Berdasarkan hasil pengujian marshall yaitu stabilitas, flow, VIM, dan Marshall quotient. Hasil marshall dengan variasi kadar aspal 3,5%, 4%, 4,5%, 5%, dan 5,5% selanjutnya di analisa untuk memperoleh nilai kadar aspal optimum (KAO) yang diperoleh adalah sebesar 4,72% yang memenuhi persyaratan parameter marshall untuk campuran aspal porous. Nilai KAO 4,72% digunakan untuk membuat benda uji dengan variasi persentase substitusi ban dalam bekas sepeda motor. Untuk rekapitulasi hasil pengujian marshall untuk variasi kadar aspal disajikan pada tabel 4 di berikut ini:

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Pengujian Marshall Dengan Variasi Kadar Aspal Penetrasi 60/70

No	Karakteristik Campuran	Kadar Aspal					Spesifikasi AAPA 2004
		3,5	4	4,5	5	5,5	
1.	Stabilitas (kg)	749	856	776	713	834	Min. 500
2.	Flow (mm)	2,31	2,32	3,28	3,50	2,08	2-6
3.	VIM (%)	17,7	16,6	17,2	17,6	17,9	18-25
4.	MQ (KG/mm)	324,52	368,59	297,59	204,16	405,52	Maks. 400

Berdasarkan hasil pengujian Marshall dengan variasi kadar aspal tersebut kemudian diplot pada sumbu salib dengan koordinat kadar aspal (Sumbu X) dan salah satu parameter Marshall (Sumbu Y). Untuk mempermudah perhitungan analisa regresi tersebut dilakukan dengan menggunakan software microsoft excel.

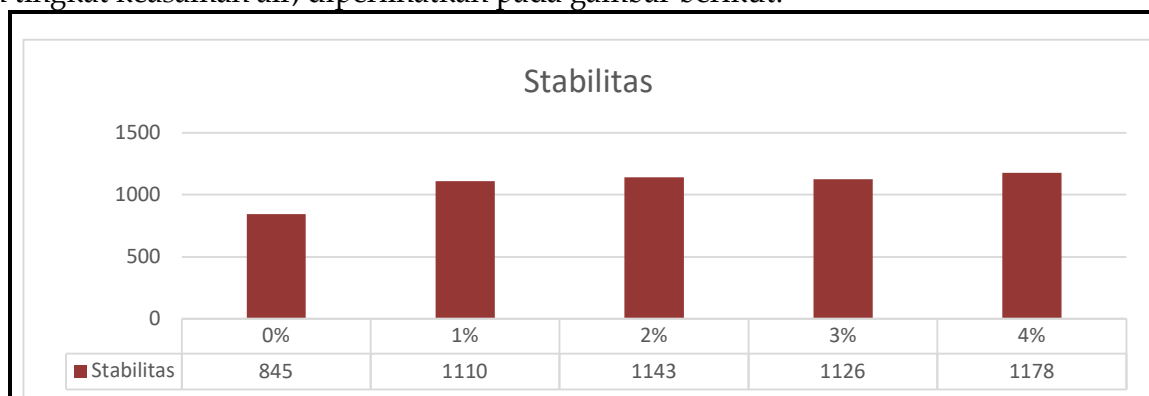


Selanjutnya, Hasil Pengujian Marshall Pada Kadar Aspal Optimum Tanpa Dan Dengan Substitusi Ban Dalam Bekas Sepeda Motor Pada Rendaman 30 Menit pada tabel berikut:

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Pengujian Marshall Tanpa Dan Dengan Substitusi Ban Dalam Bekas Sepeda Motor Pada Rendaman 30 Menit

No	Karakteristik Campuran	Kadar substitusi persen ban dalam bekas sepeda motor pada KAO					Spesifikasi AAPA 2004
		0%	1%	2%	3%	4%	
1.	Stabilitas (kg)	845	1110	1143	1126	1178	Min. 500
2.	Flow (mm)	2,2	2,8	2,9	2,8	3,0	2-6
3.	VIM (%)	19	18	16	15	16	18-25
4.	MQ (KG/mm)	383	399	398	396	398	Maks. 400

Nilai stabilitas campuran aspal porus menggunakan aspal pen. 60/70 dengan variasi substitusi kadar ban dalam bekas sepeda motor pada KAO 4,72% mengidentifikasi bahwa terjadi peningkatan nilai stabilitas seiring bertambahnya nilai persentase ban dalam bekas sepeda motor. Hal ini dipengaruhi oleh sifat-sifat fisis aspal, suhu, lama waktu perendaman air, dan tingkat keasaman air, diperlihatkan pada gambar berikut:



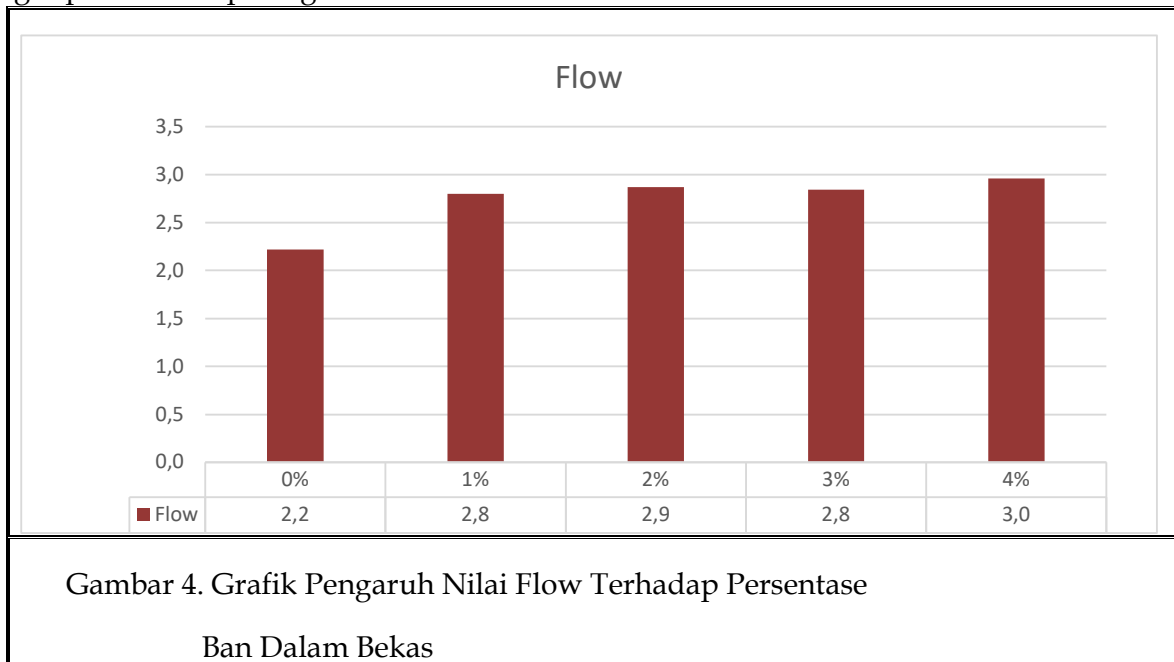
Gambar 3. Grafik Pengaruh Nilai Stabilitas Terhadap Persentase Ban Dalam Bekas

Nilai stabilitas campuran dengan variasi substitusi ban dalam bekas tersebut masih memenuhi persyaratan spesifikasi AAPA yaitu ≥ 1000 kg, baik pada kondisi perendaman dengan menggunakan polimer maupun tanpa polimer. Semakin lama campuran aspal porus terendam air, kerapatannya cenderung menurun. Hal ini berdampak pada menurunnya daya adhesi dan kohesi campuran, yang disebabkan oleh tekanan air yang masuk ke dalam pori-pori campuran aspal porus.

Tinjauan terhadap nilai kelelahan plastis (*flow*)

Nilai *flow* campuran aspal porus menggunakan variasi persentase ban dalam bekas sepeda motor sebagai substitusi aspal. Nilai *flow* menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada lapis perkerasan akibat menahan beban yang diterimanya. Nilai *flow* yang rendah akan mengakibatkan campuran menjadi kaku sehingga lapis perkerasan menjadi mudah retak, sedangkan dengan nilai *flow* tinggi akan menghasilkan lapis perkerasan yang plastis sehingga

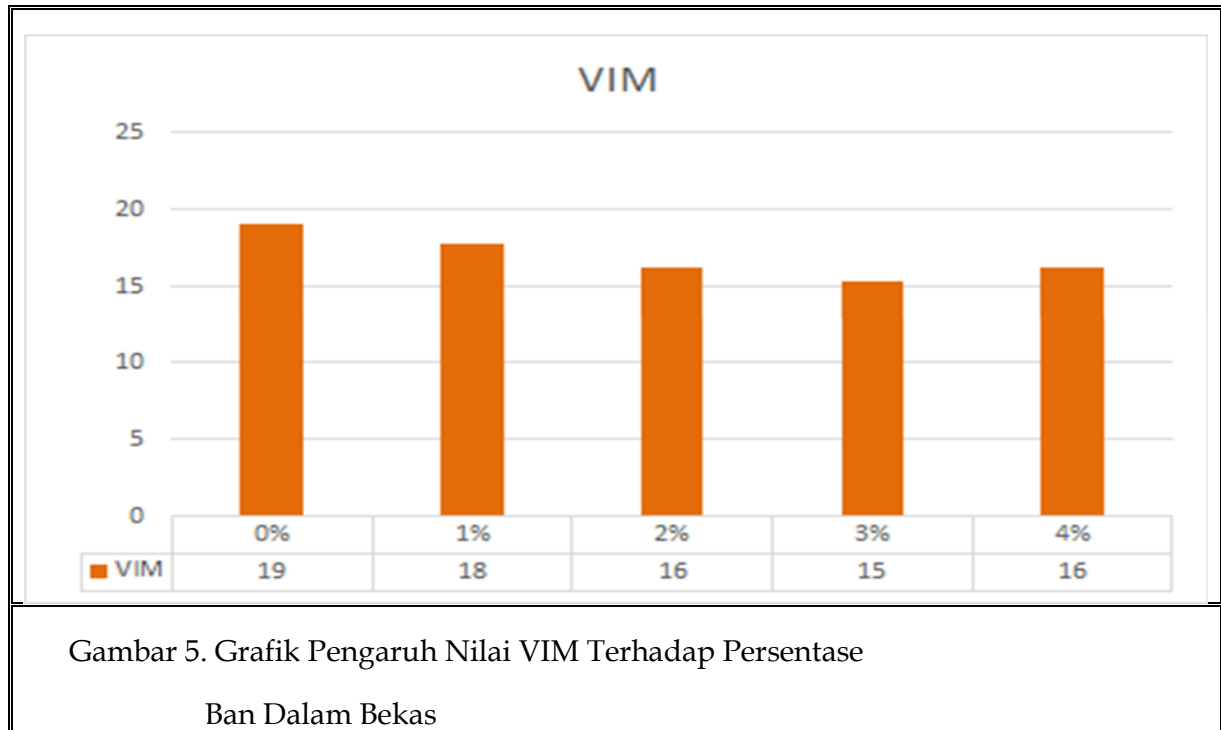
perkerasan akan mudah mengalami perubahan bentuk seperti gelombang dan alur. Seperti yang diperlihatkan pada gambar berikut:



Terlihat pada gambar diatas Secara keseluruhan, nilai flow berada pada rentang 2,2–3,0 mm yang masih sesuai dengan spesifikasi AAPA (2-6 mm). Peningkatan ini mengindikasikan bahwa substitusi ban dalam bekas sebagai aspal panas mampu meningkatkan plastisitas campuran, sehingga lebih lentur dalam menahan deformasi akibat beban lalu lintas. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan ban dalam tidak hanya memenuhi persyaratan teknis, tetapi juga berpotensi memberikan sifat mekanis yang lebih baik pada campuran aspal porus.

Tinjauan terhadap nilai VIM

Nilai VIM menunjukkan banyaknya persentase rongga dalam campuran, yang dinyatakan dalam persen. Nilai VIM semakin kecil tergantung kemampuan aspal dalam mengisi rongga dalam campuran. Nilai VIM pada campuran aspal porus tanpa dan dengan variasi persentase substitusi ban dalam bekas sepeda motor seperti yang diperlihatkan pada gambar berikut:

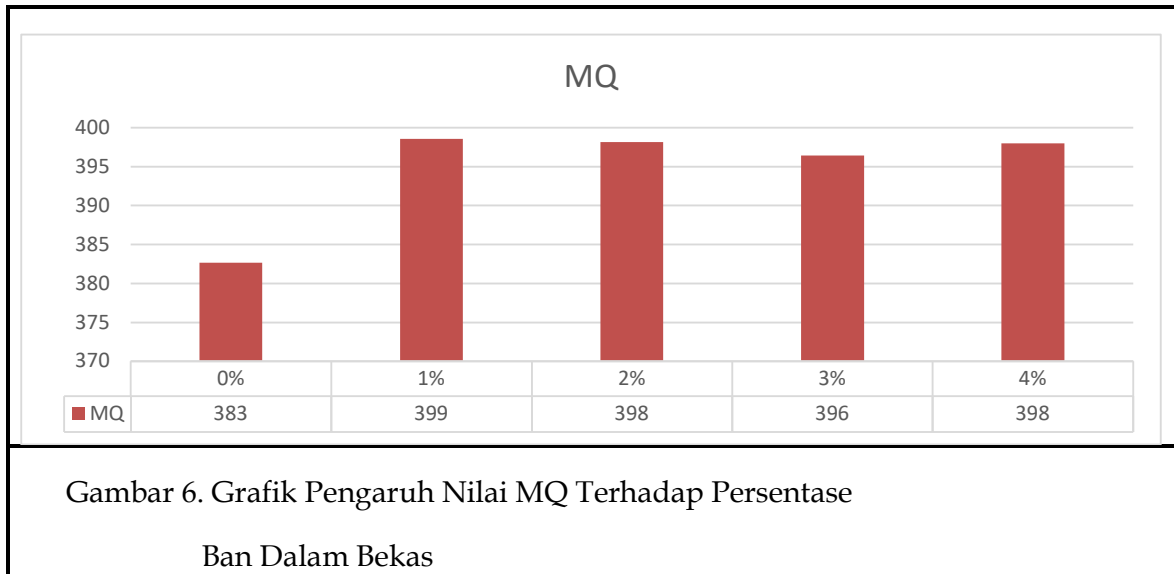


Gambar 5. Grafik Pengaruh Nilai VIM Terhadap Persentase Ban Dalam Bekas

Terlihat pada gambar diatas nilai Void in Mix (VIM) mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya kadar substitusi ban dalam bekas hingga kadar 3%, kemudian sedikit meningkat kembali pada kadar 4%. Nilai VIM tertinggi terdapat pada campuran tanpa substitusi (0%) sebesar 19%, sedangkan nilai terendah terdapat pada kadar 3% sebesar 15%. Penurunan nilai VIM ini menunjukkan bahwa rongga udara dalam campuran berkurang akibat meningkatnya kadar ban dalam. Ban dalam bekas yang dicairkan berfungsi sebagai aspal panas (hot asphalt substitute) yang memiliki sifat lebih elastis, kental, dan lengket (viskositas tinggi) dibandingkan aspal murni. Sifat tersebut menyebabkan partikel agregat lebih mudah terlapisi sempurna oleh aspal, sehingga mengurangi volume rongga udara (void) di dalam campuran. Dengan kata lain, aspal menjadi lebih rapat dan padat.

Tinjauan terhadap nilai Marshall Quotient

Nilai Marshall Quotient (MQ) dari campuran aspal porus dengan variasi substitusi ban dalam bekas sepeda motor dan tanpa substitusi. Marshall Quotient (MQ) merupakan perbandingan nilai stabilitas campuran dengan *flow*, semakin besar nilai Marshall Quotient (MQ) maka campuran yang dihasilkan akan semakin kaku sebaliknya bila semakin kecil nilainya maka campuran semakin lentur. Seperti yang diperlihatkan pada gambar 6 berikut:



Gambar 6. Grafik Pengaruh Nilai MQ Terhadap Persentase Ban Dalam Bekas

Nilai Marshall Quotient (MQ) ini dipengaruhi oleh nilai stabilitas dan nilai flow dari campuran nilai Marshall Quotient (MQ) rata-rata yang rendah disebabkan oleh nilai stabilitas rendah dan flow yang relatif tinggi. Semakin besar nilai Marshall Quotient (MQ) dari suatu campuran cenderung memiliki fleksibilitas rendah (kaku), karena nilai Marshall Quotient (MQ) merupakan pendekatan terhadap kekakuan dan kelenturan dari suatu campuran aspal

4. CONCLUSION

Berdasarkan hasil pengujian Marshall terhadap campuran aspal porus dengan variasi substitusi ban dalam bekas sepeda motor, dapat disimpulkan bahwa:

Substitusi ban dalam bekas sepeda motor sebagai aspal panas dengan variasi kadar 0%, 1%, 2%, 3%, dan 4% berpengaruh terhadap karakteristik Marshall campuran aspal porus. Nilai stabilitas meningkat seiring bertambahnya kadar substitusi, dengan nilai tertinggi sebesar 1178 kg pada kadar 4%, yang masih memenuhi spesifikasi AAPA (≥ 500 kg). Nilai flow juga mengalami peningkatan hingga mencapai 3,0 mm pada kadar 4%, berada dalam rentang standar 2–6 mm. Nilai VIM tertinggi sebesar 19% diperoleh pada kadar 0%, sedangkan pada kadar lain cenderung menurun namun masih dalam batas 1–25%. Nilai Marshall Quotient (MQ) tertinggi sebesar 399 kg/mm terdapat pada kadar 1%, yang masih sesuai dengan batas maksimum 400 kg/mm. Dengan demikian, seluruh variasi kadar substitusi masih menunjukkan karakteristik Marshall yang memenuhi standar AAPA (2004).

Berdasarkan hasil pengujian, kadar substitusi paling optimum terdapat pada kadar 4%, karena menghasilkan nilai stabilitas tertinggi (1178 kg) dan flow yang ideal (3,0 mm) tanpa melampaui batas spesifikasi. Campuran dengan kadar 4% dinilai memiliki keseimbangan antara stabilitas, kelelahan, dan rongga udara, sehingga memberikan performa terbaik untuk campuran aspal porus pada lalu lintas sedang.

5. REFERENCES

AAPA. Australian Asphalt Pavement Association. (2004). Open Graded Asphalt Design Guide, Australian.

- Fauzi, A., dkk. (2022). *Pemanfaatan Limbah Ban Bekas sebagai Bahan Campuran Aspal untuk Meningkatkan Kinerja Perkerasan Jalan*. *Jurnal Teknik Sipil Indonesia*, 9(2), 115–123.
- Haryanto, B. (2020). *Analisis Karakteristik Aspal Porus terhadap Daya Serap Air dan Ketahanan Lalu Lintas*. *Jurnal Rekayasa Transportasi*, 7(1), 45–53.
- Idayani, Idayani, and Mikram Syakir (2022). "Pengaruh Penggunaan Abu Bata Merah Sebagai Filler Pada Aspal Porus Terhadap Karakteristik Marshall.
- Sukirman, S. (2019). *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Bandung: Nova