ANALISIS PENGARUH LIMBAH KARET BAN DAN LIMBAH PLASTIK *POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (*PET) DENGAN METODE *WET PROCESS* PADA LAPISAN ASPAL BETON

(ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF WASTE TIRE RUBBER AND POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) PLASTIC WASTE USING THE WET PROCESS METHOD ON ASPHALT CONCRETE)

Keyla Aptaning Batari[1], Imam Hagni Puspito[1], Nuryani Tinumbia[1]
[1]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Indonesia
E-mail: keylabatari123@gmail.com

Diterima 15 September 2025, Disetujui 25 November 2025

ABSTRAK

Pemanfaatan limbah sebagai bahan modifikasi campuran aspal merupakan pendekatan inovatif untuk mendukung pembangunan infrastruktur berkelanjutan. Penelitian ini menganalisis pengaruh penambahan 5% serbuk karet ban dan 2% plastik *Polyethylene Terephthalate* (PET) terhadap kinerja campuran aspal beton lapis aus (AC-WC) dengan metode *wet process*. Pengujian dilakukan pada agregat halus, agregat kasar, dan aspal untuk memastikan kesesuaian dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, serta uji Marshall pada kadar aspal 4,5%–6,5%. Seluruh material memenuhi kriteria teknis, kecuali kadar lumpur pada agregat kasar yang melebihi batas maksimum sehingga memerlukan pencucian. Hasil menunjukkan campuran modifikasi memiliki stabilitas dan *Marshall Quotient* (MQ) lebih tinggi dibanding campuran konvensional. Pada kadar aspal 6%, campuran modifikasi mencapai stabilitas 2.692,08 kg dan MQ 1.209,25 kg/mm, sedangkan campuran konvensional 2.301,32 kg dan MQ 932,01 kg/mm. Kadar aspal optimum campuran konvensional adalah 6%, sementara campuran modifikasi optimum pada 5,75%. Penurunan kebutuhan aspal pada campuran modifikasi disebabkan sifat elastis dan termoplastik PET serta serbuk karet ban yang mampu mengisi rongga agregat lebih efektif dan menyatu homogen dengan aspal melalui pemanasan, menghasilkan campuran lebih padat dan kohesif. Interaksi ini meningkatkan daya ikat antar komponen serta mengurangi kebutuhan aspal tanpa mengorbankan kinerja mekanis, sehingga berpotensi menjadi solusi ramah lingkungan untuk peningkatan mutu perkerasan jalan.

Kata kunci: Modifikasi; Stabilitas; Perkerasan Lentur; Efisiensi Material; *Marshall*; AC-WC

ABSTRACT

The utilization of waste materials as asphalt mixture modifiers offers an innovative approach to supporting sustainable infrastructure development. This study analyzes the effect of incorporating 5% crumb rubber and 2% Polyethylene Terephthalate (PET) plastic waste on the performance of Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC) mixtures using the wet process method. Laboratory tests were conducted on fine aggregates, coarse aggregates, and bitumen to ensure compliance with the 2018 Bina Marga General Specifications (Revision 2), along with Marshall tests at asphalt contents ranging from 4.5% to 6.5%. All materials met the technical criteria, except for the dust content in coarse aggregates, which exceeded the maximum limit and required pre-washing. Results showed that the modified mixture achieved higher stability and Marshall Quotient (MQ) values compared to the conventional mixture. At 6% asphalt content, the modified mix reached a stability of 2,692.08 kg and an MQ of 1,209.25 kg/mm, whereas the conventional mix reached 2,301.32 kg and 932.01 kg/mm, respectively. The optimum asphalt content was 6% for the conventional mix and 5.75% for the modified mix. The reduced binder demand in the modified mixture is attributed to the elastic and thermoplastic properties of PET and crumb rubber, which effectively fill aggregate voids and blend homogeneously with bitumen during heating, producing a denser and more cohesive structure. This interaction enhances the interparticle bond while minimizing binder usage without compromising mechanical performance, making it a promising environmentally friendly solution for improving pavement quality.

Keywords: *Modification; Stability; Flexible Pavement; Material Efficiency; Marshall;* AC-WC

PENDAHULUAN

Indonesia menghadapi permasalahan serius terkait produksi limbah plastik dan ban bekas. Data KLHK menunjukkan total timbulan sampah nasional mencapai 31,9 juta ton per tahun, dengan 35,67% belum terkelola. BRIN juga melaporkan lebih dari 8 juta ton sampah plastik memasuki laut setiap tahun. Di sisi lain, limbah ban terus meningkat dan dapat mencapai 1,2 miliar unit secara global pada tahun 2030 apabila tidak dikelola melalui sistem daur ulang.[1]

Upaya pemanfaatan kembali limbah, khususnya plastik PET dan karet ban, menjadi alternatif yang dapat meningkatkan kinerja campuran beraspal. PET dapat meningkatkan kekakuan dan stabilitas, sementara serbuk karet ban meningkatkan elastisitas, adhesi, dan ketahanan retak. Metode *wet process* dinilai lebih unggul karena memungkinkan proses pencampuran yang lebih homogen serta meningkatkan viskositas dan stabilitas campuran.

Lapisan AC-WC berperan penting menopang beban lalu lintas dan tahan cuaca ekstrem. Meningkatnya pembangunan jalan di Indonesia menuntut material perkerasan yang berkualitas dan ramah lingkungan. [2]

Penelitian berjudul *"Analisis Pengaruh Limbah Karet Ban dan Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate (PET)* dengan *Metode Wet Process* pada Lapisan Aspal Beton" diharapkan menjadi solusi inovatif pengurangan limbah sekaligus peningkatan kualitas perkerasan jalan. Urgensi penelitian ini terletak pada potensi pengurangan limbah sekaligus peningkatan kualitas perkerasan jalan melalui pemanfaatan limbah karet ban dan plastik PET dalam campuran AC-WC.

TINJAUAN PUSTAKA

Perkersan Jalan

Perkerasan jalan merupakan struktur yang menyalurkan beban lalu lintas ke tanah dasar. Berdasarkan bahan pengikatnya, perkerasan terbagi atas perkerasan lentur (menggunakan aspal), perkerasan kaku (menggunakan beton), dan perkerasan komposit (kombinasi keduanya). AC-WC termasuk dalam perkerasan lentur dengan peran utama sebagai lapisan aus.[3]

Aspal

Aspal adalah material termoplastis hasil destilasi minyak bumi atau alami, berfungsi sebagai pengikat dan pelindung agregat. Sifat penting aspal meliputi durabilitas, adhesi, kohesi, dan sensitivitas terhadap suhu.[4] Aspal memiliki beberapa kemampuan yaitu:

a. *Durabilility*, ketahanan aspal terhadap cuaca.
b. Adhesi, daya lekat aspal pada agregat.
c. Kohesi, kekuatan ikatan antar agregat.
d. Kepekaan temperatur, keras saat dingin dan lunak saat panas.
e. Kekerasan, sifat pengerasan aspal saat dicampur dan diinginkan yang mempengaruhi resiko kerapuhan (*brittleness*) setelah digunakan.[3]

Jenis aspal berdasarkan jenisnya:

a. Aspal keras
   Aspal padat pada suhu ruang dengan tingkat kekerasan yang ditentukan oleh nilai penetrasi dan digunakan setelah dipanaskan hingga mencair.
b. Aspal Cair
   Merupakan hasil pelarutan aspal keras dengan pelarut hidrokarbon (12-40%) yang terbagi menjadi *rapid curing* (RC), *medium curing* (MC), *slow curing* (SC).
c. Aspal Emulsi
   Aspal emulsi adalah campuran aspal keras dan air dengan bahan pengemulsi kimia (0,2-3%) yang membuat butiran aspal halus tersebar dalam air.[5]

Lapisan Aspal Beton (*Asphalt Concrete*)

LASTON merupakan campuran aspal keras dan agregat yang dihampar serta dipadatkan dalam kondisi panas. Terdiri atas tiga lapisan utama: AC-WC (lapisan aus), AC-BC (lapisan antara), dan AC-Base (lapisan fondasi). Karakteristik penting campuran meliputi stabilitas, durabilitas, fleksibilitas, ketahanan lelah, kekesatan, dan impermeabilitas, yang sangat menentukan kinerja perkerasan jalan. [6] Adapun spesifikasi terhadap parameter marshall untuk lapisan aspal beton:

Tabel 1. Ketentuan sifat campuran Lapisan Aspal Beton [7]

Sifat-sifat Campuran		Laston		
		Lapis Aus	Lapis Antara	Fondasi
Jumlah partikel perbidang		75		112
Rasio partikel lolos ayakan 0,075 mm dengan kadar aspal efektif	Min	0,6		
	Max	1,2		
Rongga dalam campuran (VIM) (%)	Min	3		
	Max	5		
Rongga dalam agregat (VMA) (%)	Min	15	14	13
Rongga terisi aspal (VFA) (%)	Min	65	65	65
Stabilitas Marshall (Kg)	Min	800		1800
Pelelehan (mm)	Min	2		3
	Max	4		6
Stabilitas *Marshall* sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60°C	Min	90		
Marshall Quotient (Kg/mm)	Min	250		300

Serbuk Karet Ban

Serbuk karet (*crumb rubber*) merupakan hasil sampingan dari proses pemotongan serta penggilingan ban bekas dengan menggunakan metode pemotongan secara ambient process atau pengolahan ban bekas dengan temperatur ruang maupun menggunakan cryogenic process atau menambahkan cairan nitrogen pada ban bekas untuk membekukan ban sehinnga menjadi getas pada.[8]

Polyethylene Terepthhalate (PET)

Polyethylene Terephthalate (PET) adalah polimer sintetis termoplastik yang banyak digunakan pada botol minuman karena sifatnya transparan, kuat, dan tahan terhadap benturan. [9]PET memiliki titik leleh relatif tinggi (150–260°C), modulus elastisitas 2800–3100 MPa, dan kuat tarik 55–75 MPa. Sebagai bahan tambah dalam campuran aspal, PET berpotensi meningkatkan stabilitas, kekakuan,

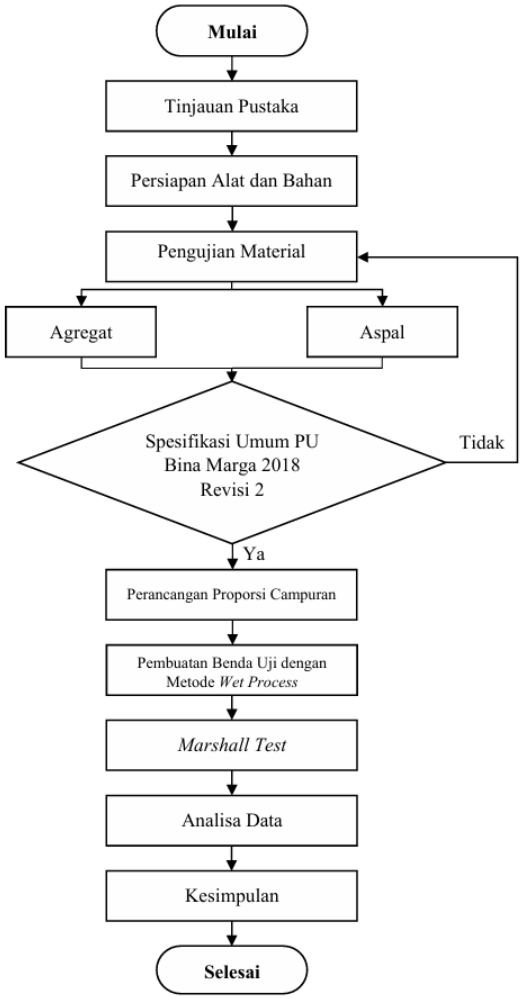
serta ketahanan terhadap deformasi permanen akibat beban lalu lintas dan suhu tinggi.[10]

Metode *Wet Process*

Metode *wet process* adalah pencampuran limbah ke dalam aspal panas sebelum ditambahkan agregat, sehingga campuran lebih homogen, daya rekat meningkat, dan sifat mekanis aspal menjadi lebih baik dibandingkan *dry process*.[11]

METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental, yaitu melakukan percobaan terhadap benda uji campuran beraspal AC-WC dengan bahan tambah plastik *Polyethylene Terepthalate* dan serbuk karet ban. Penelitian ini dilakukan pada Laboratorium Jurusan Teknik Sipil Universitas Pancasila. Adapun tahapan penelitiannya, yaitu:



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Identifikasi Data Penelitian

- Jenis data: berat jenis agregat, kadar lumpur, berat jenis aspal, titik lembek, penetrasi, densitas, stabilitas, flow.
- Sumber data: hasil uji laboratorium.

Identifikasi Data Penelitian

- Jenis data: berat jenis agregat, kadar lumpur, berat jenis aspal, titik lembek, penetrasi, densitas, stabilitas, *flow*.
- Sumber data: hasil uji laboratorium.

Metode Analisis Data

Analisis dilakukan berdasarkan rumus-rumus parameter Marshall dan dianalisis menggunakan perbandingan antara campuran konvensional dan modifikasi. Penelitian ini tidak memiliki responden manusa, seluruh objek penelitian berupa material perkerasan jalan aspal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebagaimana yang telah disampaikan pada Gambar 1 Diagram Alir Penelitian, pengujian material dilakukan dengan acuan Spesifikasi Bina Marga 2018.

Pengujian Material

Pengujian ini penting untuk memastikan agregat dan aspal memenuhi standar, sehingga hasil campuran yang diuji menghasilkan data Marshall yang akurat.

Tabel 2. Hasil Pengujian Agregat Halus

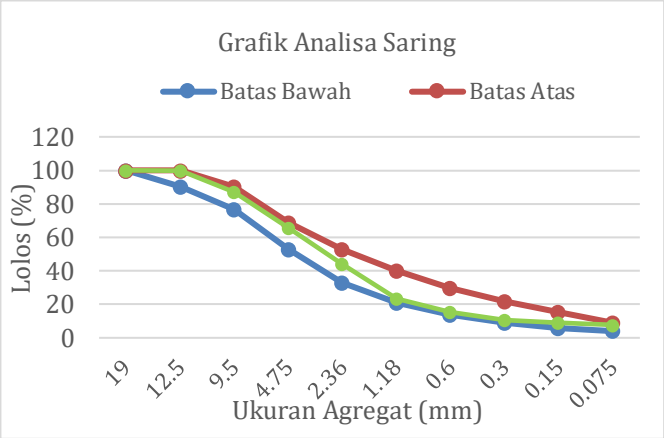
No	Pengujian	Batas	Hasil	Ket
	Agregat Halus			
1	Berat Jenis Curah	≥2,5	2,61	✓
2	Berat Jenis SSD	≥2,5	2,62	✓
3	Berat Jenis Semu	≥2,5	2,63	✓
4	Penyerapan Air	≤ 3%	0,40	✓
5	Kadar Lumpur	≤ 5%	1,33	✓
6	Kadar Air	≤ 3%	0,17	✓

Seluruh parameter spesifikasi pengujian material agregat halus seluruhnya memenuhi.

Tabel 3. Hasil Pengujian Agregat Kasar

No	Pengujian	Batas	Hasil	Ket
	Agregat Kasar			
1	Berat Jenis Curah	≥2,5	2,94	✓
2	Berat Jenis SSD	≥2,5	3,04	✓
3	Berat Jenis Semu	≥2,5	3,28	✓
4	Penyerapan Air	≤ 3%	0,03	✓
5	Kadar Lumpur	≤ 5%	7,25	X
6	Kadar Air	≤ 3%	0,04	✓

Pengujian material mengacu pada Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Agregat halus memenuhi syarat dengan berat jenis >2,5 gr/cm^3 dan penyerapan air 0,402% (<3%). Agregat kasar juga sesuai dengan berat jenis >2,5 gr/cm^3 dan penyerapan air 0,35%, namun kadar lumpurnya 7,25% (>5%) sehingga agregat yang akan digunakan harus melalui proses pencucian ulang untuk mengurangi kadar lumpur dalam agregat kasar.



Gambar 2. Hasil Analisa Saring Agregat

Grafik menunjukkan bahwa hasil analisa saring kombinasi dengan komposisi agregat kasar 37%, agregat halus 59%, dan *filler* 4% berada di antara batas atas dan batas bawah spesifikasi AC-WC. Hal ini menandakan bahwa gradasi agregat telah memenuhi persyaratan gradasi berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

Tabel 4. Hasil Uji Material Aspal

Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Pengujian	Syarat		Hasil	Satuan	Ket
	Min	Max			
Penetrasi	60	79	65	0,1 mm	✓
Titik lembek	48	58	50,5	°C	✓
Berat jenis	1	1,04	1,02	gr/ml	✓
Daktilitas	100	-	130	mm	✓
Titik nyala dan titik bakar	200	-	270	°C	✓

Kadar Aspal Rencana

Pb = 0,035 (%CA) + 0,045 (%FA) + 0,18 (%*Filler*) + K.....(1)

Pb = (0,035x37%) + (0,045x59%) + (0,18x4%) + 0,75

Pb = 5,415 ≈ 5,5%

Tabel 4. Proporsi Campuran

No.	Kadar Aspal	Jumlah Sampel (Buah)	
		Konvensional	Modifikasi
1	Pb – 1%	5	5
2	Pb – 0,5%	5	5
3	Pb	5	5
4	Pb + 0,5%	5	5
5	Pb + 1%	5	5
Total Sampel		25	25
Total Keseluruhan Sampel		50	

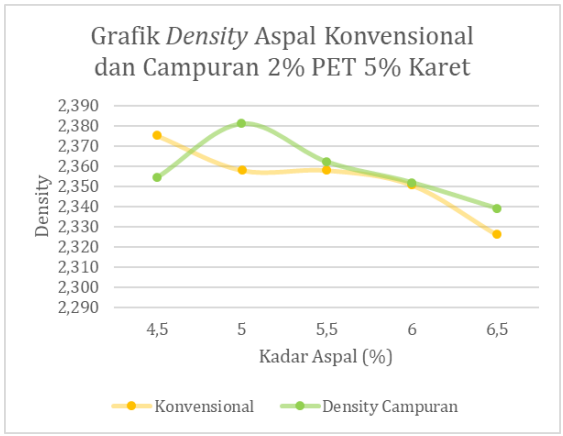
Parameter *Marshall*

Pengujian *Marshall* mengevaluasi campuran aspal melalui stabilitas (ketahanan beban) dan *flow* (deformasi plastis), di mana keduanya berbanding lurus; stabilitas tinggi menandakan daya tahan baik, sedangkan *flow* tinggi menunjukkan deformasi lebih besar.[12]

- **Densitas**

Densitas adalah ukuran berat per volume yang menunjukkan kepadatan campuran aspal, dipengaruhi oleh suhu pencampuran, jenis dan proporsi *filler*, energi pemadatan, serta kadar aspal, dan dihitung dari berat kering, SSD, dan berat dalam air. [13] Nilai densitas dapat dihitung dengan rumus:

$$Density = \frac{\text{Berat kering}}{\text{Berat SSD - Berat dalam air}} \quad \text{.....(2)}$$



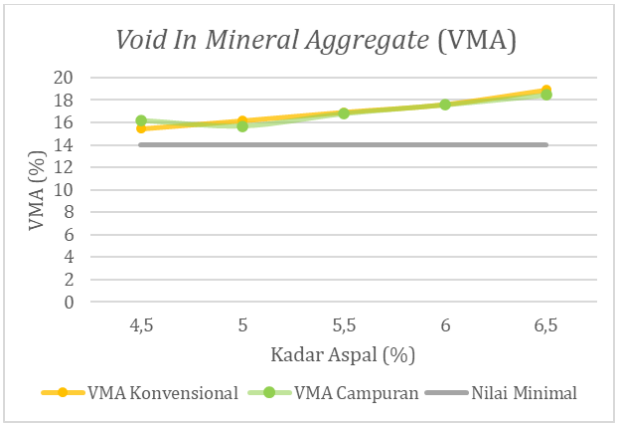
Gambar 3. *Density* Aspal Konvensional dan Modifikasi

Nilai densitas yang stabil untuk kedua campuran berada di kadar aspal 5,5% dan 6%.

- ***Void In Mineral Aggregate* (VMA)**

VMA merupakan volume rongga dalam susunan agregat yang menampung aspal dan memengaruhi daya tahan serta stabilitas campuran; nilai yang terlalu rendah menyebabkan campuran rapuh, sedangkan nilai yang terlalu tinggi menunjukkan kelebihan aspal atau rongga yang tidak terisi optimal. [14] Nilai VMA dapat dicari menggunakan rumus:

$$VMA = 100 - \left(\frac{(100 - Pb) \times Density}{Bj\ bulk\ Agregat}\right) \quad \text{.....(3)}$$



Gambar 4. VMA Aspal Konvensional dan Modifikasi

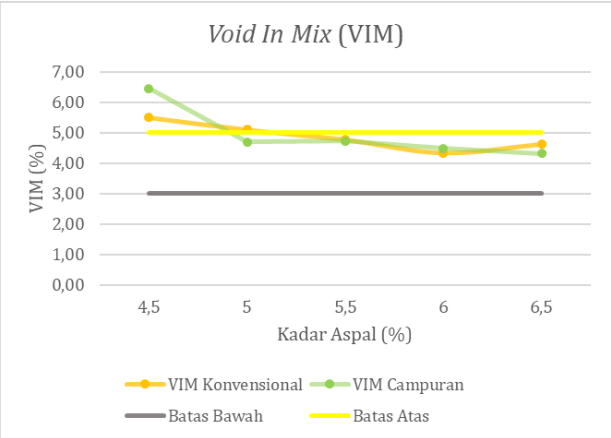
Grafik menunjukkan bahwa VMA pada campuran konvensional maupun campuran 2% PET dan 5% karet meningkat seiring bertambahnya kadar aspal, keduanya tetap di atas batas minimum 14%.

- ***Void In Mix* (VIM)**

Void in Mix (VIM) adalah persentase volume

rongga udara total di antara agregat dan aspal setelah pemadatan, yang dihitung terhadap volume bulk campuran dan dinyatakan dalam persen (%). [14] Nilai VIM didapat menggunakan rumus:

$$\textit{Void In Mix (VIM)} = \left(100 - \frac{Gmm \times Gmb}{Gmm}\right)\% \quad \text{.....(4)}$$



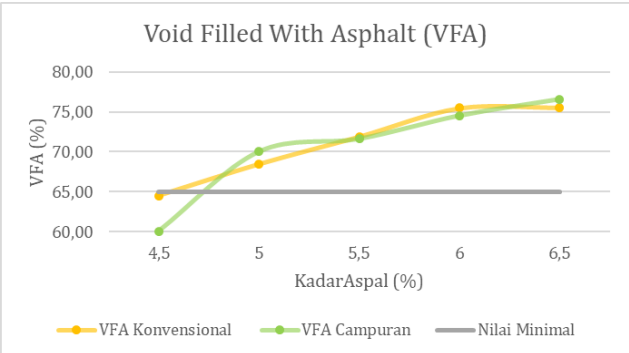
Gambar 5. VIM Aspal Konvensional dan Modifikasi

Grafik menunjukkan nilai VIM pada campuran konvensional dan campuran modifikasi 2% PET dan 5% karet menurun seiring peningkatan kadar aspal. Pada campuran modifikasi pada kadar aspal 4,5% melampui batas spesifikasi, untuk campran konvensional dengan kadar aspal 4,5% dan 5% menghasilkan VIM di atas batas maksimum 5% sesuai Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 6 sehingga tidak memenuhi parameter *Marshall.*

- ***Void In Filled With Asphalt* (VFA)**

Void Filled with Asphalt (VFA) merupakan persentase volume rongga di antara susunan agregat yang berhasil terisi oleh aspal dalam campuran. Nilai ini mencerminkan tingkat efektivitas aspal dalam mengisi ruang antar agregat. [14] Nilai VFA dicari menggunakan rumus:

$$VFA = \frac{VMA-VIM}{VMA} \times 100 \quad \text{.....(5)}$$

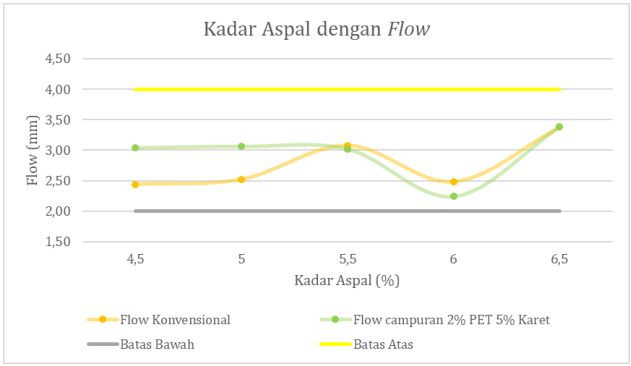


Gambar 6. VFA Aspal Konvensional dan Modifikasi

Grafik menunjukkan hubungan kadar aspal dengan VFA pada campuran konvensional dan modifikasi 2% PET serta 5% karet. Nilai VFA meningkat seiring bertambahnya kadar aspal, namun pada kadar 4,5% kedua campuran belum memenuhi batas minimal 65% sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 6, yang menandakan aspal belum cukup mengisi rongga antar agregat untuk mencapai kepadatan optimal.Mulai kadar aspal 5% hingga 6,5%, seluruh nilai VFA pada kedua campuran telah berada di atas batas minimal sehingga memenuhi spesifikasi. Pada rentang ini, VFA campuran modifikasi sedikit lebih tinggi dibanding campuran konvensional.

- ***Flow***

Flow adalah ukuran deformasi plastis yang terjadi pada benda uji campuran beraspal akibat pembebanan hingga mencapai titik keruntuhan maksimum, yang dinyatakan dalam satuan panjang (mm). [15]

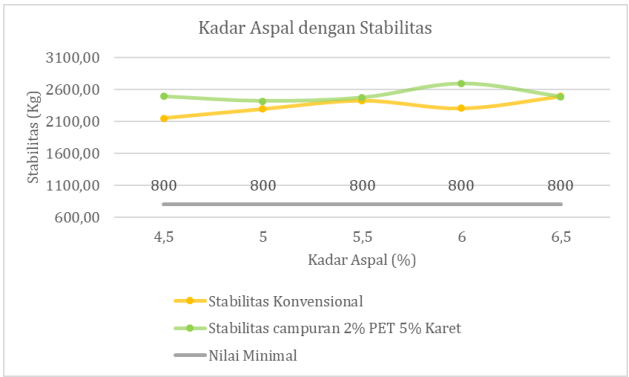


Gambar 7. *Flow* Aspal Konvensional dan Aspal Modifikasi

- **Stabilitas**

Stabilitas merupakan salah satu parameter utama dalam pengujian *marshall* yang menunjukkan kemampuan campuran aspal dalam menahan beban sebelum mengalami deformasi atau kerusakan. [16]

$$S = p \times q \times \text{Faktor Koreksi} \quad \text{.....(6)}$$



Gambar 8. Stabilitas Aspal Konvensional & Modifikasi

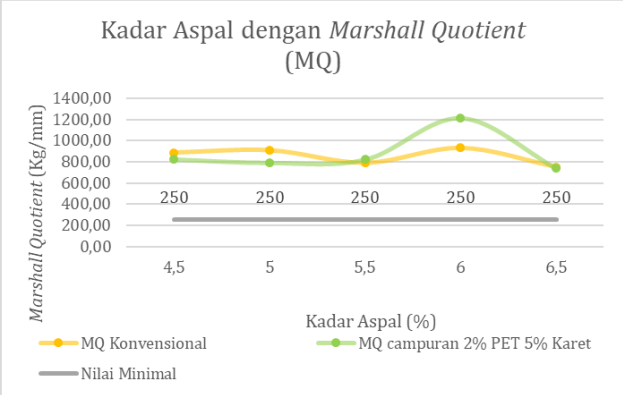
Grafik menunjukkan hubungan kadar aspal dengan stabilitas pada campuran konvensional dan modifikasi. Stabilitas campuran modifikasi lebih tinggi pada seluruh variasi kadar aspal, dengan nilai maksimum pada kadar 6%. Semua nilai stabilitas kedua campuran berada di atas batas minimum 800 kg sesuai spesifikasi.

- ***Marshall Quotient* (MQ)**

Marshall Quotient (MQ) merupakan parameter yang diperoleh dari hasil perbandingan antara nilai stabilitas terhadap nilai *flow* pada campuran aspal.

Nilai MQ digunakan untuk menunjukkan kekakuan campuran aspal terhadap deformasi plastis akibat beban lalu lintas.

$$MQ = \frac{S}{F} \quad \text{.....(7)}$$

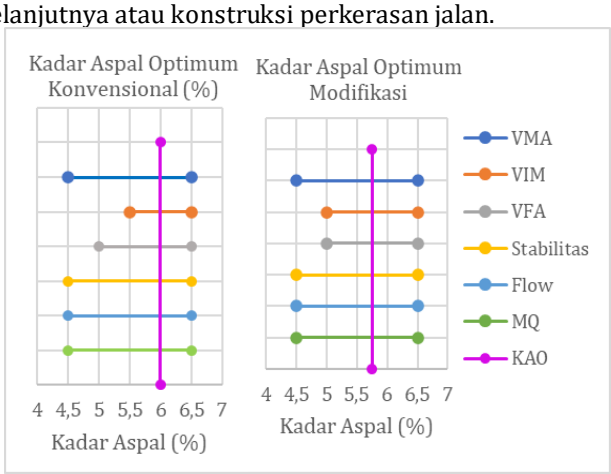


Gambar 9. *MQ* Aspal Konvensional & Modifikasi

Grafik menunjukkan di mana seluruh nilai MQ berada di atas batas minimal 250 kg/mm sehingga memenuhi spesifikasi. Nilai MQ pada kedua campuran sempat menurun pada kadar 5–5,5% akibat lapisan aspal yang lebih tebal sehingga mengurangi ikatan antar agregat dan membuat campuran lebih plastis, namun meningkat kembali pada kadar 6% karena distribusi aspal lebih merata serta pengisian rongga agregat lebih optimal.

Kadar Aspal Optimum

Kadar Aspal Optimum (KAO) merupakan kadar aspal terbaik yang diperoleh dari hasil analisis parameter *Marshall*. Penentuan KAO bertujuan untuk mendapatkan kadar aspal yang mampu menghasilkan nilai stabilitas, *flow*, VIM, VMA, dan VFA yang berada dalam rentang spesifikasi yang disyaratkan. Nilai KAO yang diperoleh menjadi acuan dalam menentukan proporsi campuran aspal yang optimal untuk digunakan dalam peneliti selanjutnya atau konstruksi perkerasan jalan.



Gambar 10. Kadar Aspal Optimum

Berdasarkan hasil analisis seluruh parameter *Marshall*, campuran konvensional memiliki KAO sebesar 6% dengan karakteristik yang seimbang, ditunjukkan oleh stabilitas yang baik, nilai VIM sesuai standar, serta VFA dan VMA yang memenuhi persyaratan. Sementara itu, campuran modifikasi memiliki KAO 5,75% dengan stabilitas dan kekakuan lebih tinggi dibandingkan campuran konvensional pada kadar optimum tersebut, serta tetap memenuhi seluruh parameter *Marshall*. Nilai KAO yang lebih rendah ini menunjukkan bahwa campuran modifikasi mampu mencapai kondisi ideal dengan penggunaan aspal yang lebih efisien.

KESIMPULAN

Material penyusun campuran aspal pada penelitian ini telah memenuhi spesifikasi, kecuali agregat kasar yang membutuhkan pencucian karena kadar lumpur melebihi batas. Campuran modifikasi dengan penambahan 5% serbuk karet dan 2% plastik PET menunjukkan peningkatan signifikan pada stabilitas dan nilai MQ dibandingkan campuran konvensional. Semua parameter *Marshall* lainnya seperti densitas, VMA, VIM, VFA, dan *flow* tetap berada dalam batas spesifikasi. KAO campuran modifikasi sebesar 5,75% menunjukkan efisiensi penggunaan aspal yang lebih baik dibanding campuran konvensional (6%). Dengan demikian, campuran aspal modifikasi berpotensi diterapkan dalam konstruksi perkerasan AC-WC sebagai solusi yang kuat, ekonomis, dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] K. Formela, “Advanced Industrial and Engineering Polymer Research Sustainable development of waste tires recycling technologies e recent advances , challenges and future trends,” *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, vol. 4, no. 3, pp. 209–222, 2021, doi: 10.1016/j.aiepr.2021.06.004.

[2] I. A. Erita, G. Guswandi, and L. Lizar, “Pengaruh Pencampuran Limbah Plastik Pet (Polyethylene Terephtalate) Terhadap Nilai Marshall Aspal Pori,” *J. TeKLA*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2019, doi: 10.35314/tekla.v1i1.1224.

[3] Wahidmurni, *Perancangan Perkerasan Jalan*. Medan: Yayasan Kita Menulis, 2017. [Online]. Available: kitamenulis.id

[4] Bina Marga, “Rsni M- 01-2003,” *Metod. Penguji. Campuran Beraspal Panas dengan Alat Marshall*, pp. 1–18, 2003.

[5] C. N. Azka and U. M. Aceh, *Perkerasan Jalan*, no. January. 2023.

[6] S. Alwi, A. Sudibyo, and Herni, “The Effect Of Using Polyethylene Terephthalate In Asphalt Mixture AC-WC For Marshall Charateristic,” *J. Inersia*, vol. 12, no. 1, pp. 16–24, 2020.

[7] Diretorate General of Highways, “Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2),” *Minist. Public Work. Hous.*, no. Oktober, p. 1036, 2020.

[8] K. H. Putra, T. M. CA, and J. V. Missel, “Desain Perkerasan Kaku Pada Jalan Kandangan–Sememi, Surabaya Dengan Metode Manual Desain Perkerasan Jalan 2017,” *TAPAK (Teknologi Apl. Konstr. J. Progr. Stud. Tek. Sipil*, vol. 12, no. 1, p. 14, 2022, doi: 10.24127/tp.v12i1.2318.

[9] B. . Almahdi, A. G. F. Ahmeda, I. Adwan, and M. A.

Ladin, "Feasibility of Utilizing Waste Polyethylene Terephthalate as Replacement in Asphalt binder Mixture," *Knowledge-Based Eng. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 47–57, 2021, doi: 10.51526/kbes.2021.2.1.47-57.

[10] J. E. Simangunsong, M. J. Alkas, and A. Wati, "Pemanfaatan Limbah Plastik Pet Sebagai Bahan Tambah Aspal Pada Campuran Asphalt Concrete Wearing Course (Ac-Wc)," *J. Teknol. Sipil*, vol. 5, no. November, pp. 26–33, 2021.

[11] R. Maghfiroh and E. Ahyudanari, "Peningkatan Performasi Aspal Penetrasi 60/70 dengan Penambahan Serbuk Limbah UPVC," *J. Apl. Tek. Sipil*, vol. 21, no. 1, p. 107, 2023, doi: 10.12962/j2579-891x.v21i1.15994.

[12] P. Aspal, S. Dan, A. Elastobond, E. Komala, and E. Tri, "Melalui Sistem Pengujian Marshall Pada Campuran Laston Ac-Wc (Asphalt Concrete-Wearing Course)," *Tek. Sipil Fak. Tek. Univ. Tanjungpura Pontianak*, pp. 1–13, 2018.

[13] H. Nofrianto, W. Wahab, N. Syofian, and S. Wardi, "Kajian Bahan Pengisi (Filler) Pada Campuran Panas Aspal Agregat (Ac-Bc) Dengan Pengujian Marshall Study of Filler in Hot Mixture Asphalt Aggregate (Ac-Bc) With," *Lppm Umsb*, vol. XV, no. 01, pp. 56–66, 2021.

[14] Weimintoro, R. N. A. Sari, O. H. Hermawan, and T. H. Santoso, "Pengaruh Lama Perendaman Benda Uji AC-WC Terhadap Nilai Stabilitas dan Nilai Kelelehan (Flow) dengan Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018," *SIGMA J. Tek. Sipil*, vol. 1, no. 2, pp. 17–28, 2021, [Online]. Available: https://journal.ummat.ac.id/index.php/sigma/article/view/5231

[15] D. I. Program, S. D.- Teknik, M. Politeknik, and N. Ambon, "Jurnal simetrik vol 12, no. 2, desember 2022," vol. 12, no. 2, pp. 597–605, 2022.

[16] Weimintoro, R. K. Ahmad, A. Farid, and N. S. Salsabila, "Pengaruh Penambahan Limbah Karet Ban Sebagai Substitusi Sebagian Kadar Aspal Terhadap Stabilitas AC-BC Dengan Metode Marshall Test," *Rekayasa J. Tek. Sipil*, vol. 7, no. 1, pp. 25–30, 2022, [Online]. Available: http://ejournal.unira.ac.id/index.php/jurnal_rekayasa_teknik_sipil/article/view/1558