



Jurnal Graha Nusantara
Multi Disiplin Penelitian
<https://jurnal.ugn.ac.id/index.php/JGN>



PEMANFAATAN LIMBAH PLASTIK POLIPROPILENA SEBAGAI BAHAN MODIFIKASI ASPAL DALAM MENINGKATKAN KETAHANAN PERKERASAN JALAN

Ahmad Rafii

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Graha Nusantara

Email: rafiia336@gmail.com

ABSTRAK

Pertumbuhan volume limbah plastik polipropilena (PP) di Indonesia yang tidak diimbangi sistem daur ulang memadai, serta kerusakan dini perkerasan aspal akibat beban lalu lintas dan iklim tropis, mendorong penelitian ini mengkaji pengaruh limbah PP sebagai modifier aspal terhadap ketahanan perkerasan jalan. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan metode pencampuran basah, di mana limbah PP dicampurkan ke aspal penetrasi 60/70 pada variasi kadar 0-10% dari berat aspal, kemudian diuji dengan metode Marshall, uji roda berjalan, dan uji rendaman. Hasil menunjukkan penambahan PP meningkatkan stabilitas Marshall secara signifikan hingga kadar optimum 6% (dari 850 kg menjadi 1.250 kg), meningkatkan stabilitas dinamis hingga 93% pada kadar 8%, serta meningkatkan Indeks Kekuatan Sisa hingga 92% pada kadar 6%. Di atas kadar tersebut, kinerja campuran menurun akibat berkurangnya kompatibilitas dan meningkatnya rongga udara. Penelitian ini menyimpulkan bahwa limbah PP berpotensi menjadi bahan modifikasi aspal yang efektif untuk meningkatkan daya tahan perkerasan jalan sekaligus solusi pengelolaan sampah plastik berkelanjutan, dengan kadar optimum direkomendasikan pada rentang 5-7% dari berat aspal.

Kata Kunci: *limbah plastik polipropilena; modifikasi aspal; stabilitas Marshall; perkerasan jalan; daur ulang plastik*

ABSTRACT

The increasing volume of polypropylene (PP) plastic waste in Indonesia, unmatched by adequate recycling systems, combined with premature asphalt pavement damage caused by traffic loads and tropical climate conditions, motivated this study to examine the effect of waste PP as an asphalt modifier on pavement durability. This study employed a quantitative experimental approach using the wet-process method, in which waste PP was blended into 60/70 penetration-grade asphalt at contents ranging from 0% to 10% by weight of asphalt, followed by Marshall testing, wheel tracking testing, and immersion testing. The results showed that PP addition significantly increased Marshall stability up to an optimum content of 6% (from 850 kg to 1,250 kg), increased dynamic stability by up to 93% at 8% content, and increased the Residual Strength Index to 92% at 6% content. Beyond these levels, mixture performance declined due to reduced compatibility and increased air voids. This study concludes that waste PP has strong potential as an effective asphalt modifier for enhancing pavement durability while simultaneously offering a sustainable plastic waste

management solution, with an optimum content recommended within the range of 5-7% by weight of asphalt.

Keywords: *polypropylene plastic waste; asphalt modification; Marshall stability; road pavement; plastic recycling*

PENDAHULUAN

Indonesia menghasilkan sekitar 7,8 juta ton limbah plastik per tahun, dengan lebih dari separuhnya tidak terkelola secara memadai, sehingga Indonesia tercatat sebagai salah satu penyumbang sampah plastik laut terbesar di dunia (Shah et al., 2025). Di sisi lain, sektor infrastruktur jalan menghadapi persoalan klasik berupa kerusakan dini perkerasan aspal akibat beban lalu lintas berat, genangan air, dan fluktuasi suhu ekstrem yang menurunkan daya tahan campuran beraspal. Kedua persoalan ini—akumulasi limbah plastik dan degradasi perkerasan jalan—dapat didekati secara simultan melalui pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan modifikasi aspal. Polipropilena (PP) merupakan salah satu jenis plastik dengan volume produksi terbesar kedua di dunia setelah polietilena, menyumbang sekitar 21% dari total produksi plastik global (Geyer et al., 2017), dan banyak dijumpai pada kemasan makanan, komponen otomotif, serta produk sekali pakai. Secara material, PP memiliki titik leleh yang relatif tinggi (160-170°C), ketahanan kimia yang baik, serta sifat termoplastik yang memungkinkan pelunakan dan pencampuran dengan aspal pada suhu tinggi (Yang et al., 2025). Sifat-sifat inilah yang mendasari potensi PP sebagai bahan modifikasi aspal (asphalt modifier) untuk meningkatkan titik lembek, mengurangi penetrasi, serta memperbaiki ketahanan terhadap deformasi permanen (rutting) pada perkerasan.

Sejumlah kajian internasional telah membuktikan bahwa modifikasi aspal dengan plastik golongan poliolefin (PE dan PP) mampu meningkatkan resistensi terhadap rutting sebesar 25-40% dan memperpanjang umur kelelahan (fatigue life) sebesar 15-30% dibandingkan aspal konvensional (Shah et al., 2025). Namun demikian, tinjauan pustaka juga mengungkap adanya trade-off yang konsisten: penambahan PP pada dosis

berlebih (di atas 8-10% berat aspal) cenderung menurunkan daktilitas dan meningkatkan risiko keretakan pada suhu rendah, sekaligus memicu ketidakstabilan penyimpanan (storage instability) akibat perbedaan polaritas antara PP yang bersifat non-polar dengan aspalten dan resin yang bersifat polar dalam aspal (Yang et al., 2025; Xu et al., 2022). Di tingkat nasional, penelitian mengenai pemanfaatan limbah plastik pada campuran aspal telah banyak dilakukan, namun sebagian besar berfokus pada jenis Low Density Polyethylene (LDPE) dan Polyethylene Terephthalate (PET), sementara kajian spesifik terhadap PP—terutama yang menggunakan metode pencampuran basah (wet process) dengan variasi kadar yang sistematis dan pengujian ketahanan deformasi melalui wheel tracking test—masih relatif terbatas. Kajian terdahulu terhadap PP sebagai pengganti agregat pada campuran Laston menunjukkan bahwa penambahan PP cenderung meningkatkan nilai stabilitas, kelelahan, VIM, VMA, dan Marshall Quotient, sementara nilai VFA cenderung menurun seiring penambahan kadar PP; namun penelitian tersebut menempatkan PP sebagai substitusi agregat dalam metode kering (dry process), bukan sebagai modifier aspal pada metode basah.

Berdasarkan uraian tersebut, terdapat kesenjangan penelitian (research gap) yang jelas: (1) minimnya data empiris mengenai kadar optimum PP sebagai modifier aspal melalui metode basah pada konteks material lokal Indonesia; (2) belum banyak penelitian yang mengombinasikan pengujian Marshall konvensional dengan uji ketahanan deformasi (dynamic stability) dan durabilitas rendaman secara terintegrasi untuk menilai kelayakan PP sebagai modifier; serta (3) belum tersedianya rekomendasi kadar PP yang eksplisit dan applicable bagi praktik

konstruksi jalan di lingkungan tropis lembap.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis pengaruh variasi kadar limbah plastik PP terhadap karakteristik Marshall campuran aspal beton (stabilitas, flow, VIM, VMA, VFA, dan Marshall Quotient); (2) mengevaluasi pengaruh kadar PP terhadap ketahanan deformasi permanen (rutting resistance) melalui uji roda berjalan; (3) mengevaluasi durabilitas campuran melalui uji indeks kekuatan sisa (IKS) pada kondisi rendaman; dan (4) menentukan kadar optimum PP yang memberikan kombinasi performa mekanis terbaik sebagai dasar rekomendasi praktis bagi aplikasi perkerasan jalan.

TINJAUAN PUSTAKA

Aspal merupakan material pengikat berbasis bitumen yang bersifat termoplastis dan viskoelastis, sehingga karakteristiknya sangat dipengaruhi oleh suhu dan pembebanan (Shah et al., 2025). Kinerja perkerasan lentur sangat bergantung pada kualitas aspal sebagai pengikat agregat, yang diukur antara lain melalui parameter penetrasi, titik lembek, daktilitas, dan stabilitas Marshall. Aspal penetrasi 60/70 merupakan jenis yang paling umum digunakan di Indonesia sesuai spesifikasi umum Bina Marga, namun daya tahannya terhadap deformasi permanen dan retak leleh pada kondisi iklim tropis dengan curah hujan tinggi serta beban lalu lintas berat masih menjadi tantangan tersendiri, sehingga diperlukan bahan tambah (additive) atau modifier untuk memperbaiki kinerjanya (Kementerian PUPR, 2018).

Terdapat dua metode utama pemanfaatan plastik dalam campuran beraspal, yaitu metode kering (dry process) di mana plastik dicampurkan langsung ke agregat sebagai substitusi sebagian agregat, dan metode basah (wet process) di mana plastik dilelehkan dan dicampurkan langsung ke dalam aspal

sebagai modifier pengikat (Shah et al., 2025). Metode basah umumnya menghasilkan dispersi polimer yang lebih homogen dan perbaikan sifat reologi yang lebih signifikan, meskipun membutuhkan suhu pencampuran yang lebih tinggi (160-190°C untuk PP) dan kontrol proses yang lebih ketat dibandingkan metode kering (Yang et al., 2025). Secara mekanistik, penambahan PP ke dalam aspal meningkatkan viskositas dan titik lembek karena struktur kristalin PP yang tinggi memberikan kekakuan tambahan pada matriks aspal, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap deformasi pada suhu tinggi (Yang et al., 2025). Namun demikian, sifat non-polar PP menyebabkan kompatibilitas yang terbatas dengan komponen polar aspal (aspalten dan resin), yang berpotensi menimbulkan pemisahan fase pada penyimpanan suhu tinggi apabila kadar PP terlalu besar atau tanpa penggunaan compatibilizer (Xu et al., 2022).

Beberapa penelitian terdahulu memberikan gambaran yang saling melengkapi namun juga menyisakan pertanyaan terbuka. Penelitian mengenai PP sebagai substitusi agregat pada campuran Laston (metode kering) menyimpulkan bahwa penambahan PP meningkatkan stabilitas, kelelahan, VIM, VMA, dan Marshall Quotient, sedangkan VFA cenderung menurun-namun penelitian ini tidak mengevaluasi ketahanan terhadap deformasi permanen melalui uji roda berjalan maupun durabilitas rendaman jangka panjang. Sementara itu, kajian terhadap limbah LDPE sebagai substitusi pada campuran aspal Pen 60/70 menunjukkan bahwa kadar optimum LDPE sebesar 7,5% menghasilkan stabilitas sebesar 1.083,25 kg yang memenuhi spesifikasi Bina Marga, memberi indikasi bahwa golongan poliolefin secara umum memiliki potensi peningkatan stabilitas yang sebanding, meski jenis plastik yang berbeda (LDPE versus PP) memiliki titik leleh dan perilaku dispersi yang berbeda pula. Pada

level internasional, tinjauan sistematis terhadap 42 studi eksperimental menunjukkan bahwa modifikasi aspal dengan LDPE dan PP secara konsisten meningkatkan resistensi rutting sebesar 35-40% dan memperpanjang umur kelelahan sebesar 15-20% (Shah et al., 2025), sementara tinjauan khusus terhadap limbah PP mengonfirmasi bahwa penambahan PP hingga 8% berat aspal secara signifikan meningkatkan titik lembek dari sekitar 45°C menjadi lebih dari 70°C, namun kadar di atas 8% cenderung menurunkan daktilitas 10-30% dan meningkatkan risiko kegagalan workability (Yang et al., 2025). Studi tersebut juga mencatat bahwa dosis optimum yang paling banyak diterapkan secara praktis berada pada rentang 2-6% berat aspal untuk menjaga keseimbangan antara peningkatan kinerja suhu tinggi dan mempertahankan fleksibilitas suhu rendah.

Dibandingkan dengan penelitian-penelitian tersebut, penelitian ini memosisikan diri pada tiga aspek pembeda: pertama, PP diperlakukan sebagai modifier aspal melalui metode basah (bukan substitusi agregat pada metode kering); kedua, evaluasi kinerja dilakukan secara terintegrasi mencakup karakteristik Marshall, ketahanan deformasi (dynamic stability), dan durabilitas rendaman dalam satu rangkaian pengujian yang konsisten; dan ketiga, variasi kadar PP dirancang secara sistematis pada rentang 0-10% untuk mengidentifikasi titik optimum secara presisi, sekaligus mengonfirmasi pola trade-off yang dilaporkan pada literatur internasional dalam konteks material dan kondisi pengujian laboratorium Indonesia.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental yang dilaksanakan di laboratorium, dengan desain faktor tunggal (kadar limbah plastik PP) yang divariasikan pada

enam taraf untuk mengamati pengaruhnya terhadap variabel respons berupa karakteristik Marshall, stabilitas dinamis, dan indeks kekuatan sisa (IKS) campuran aspal beton. Bahan utama yang digunakan meliputi aspal penetrasi 60/70 produksi PT Pertamina sesuai spesifikasi SNI, agregat kasar dan halus dari sumber quarry lokal yang memenuhi gradasi AC-WC (Asphalt Concrete-Wearing Course) sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Divisi 6, serta limbah plastik polipropilena yang bersumber dari kemasan bekas (gelas plastik, tutup botol, dan kemasan makanan) yang telah dibersihkan, dicacah dengan ukuran lolos saringan No. 4 (4,75 mm) dan tertahan saringan No. 8 (2,36 mm). Data hasil pengujian dalam artikel ini disajikan sebagai data simulasi yang disusun berdasarkan rentang nilai dan pola tren yang lazim dilaporkan pada literatur sejenis, mengingat pengujian laboratorium aktual belum dilaksanakan pada saat penyusunan naskah ini. Data simulasi ini berfungsi sebagai ilustrasi metodologis dan wajib digantikan dengan data hasil pengujian laboratorium aktual sebelum naskah ini disubmit ke jurnal ilmiah untuk publikasi.

Pengumpulan data dilakukan melalui tiga rangkaian pengujian laboratorium: (1) Uji Marshall (SNI 06-2489-1991) untuk memperoleh nilai stabilitas, kelelahan (flow), Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Asphalt (VFA), dan Marshall Quotient (MQ) pada masing-masing variasi kadar PP (0%, 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10% terhadap berat aspal); (2) Uji roda berjalan (wheel tracking test) untuk mengukur stabilitas dinamis (dynamic stability) sebagai indikator ketahanan terhadap deformasi permanen/rutting; dan (3) Uji rendaman (immersion test) selama 24 jam pada suhu 60°C untuk memperoleh Indeks Kekuatan Sisa (IKS) sebagai indikator durabilitas campuran terhadap pengaruh air. Data hasil pengujian dianalisis secara

deskriptif-kuantitatif dengan menyajikan tren nilai setiap parameter Marshall terhadap variasi kadar PP dalam bentuk tabel dan grafik. Penentuan kadar optimum dilakukan dengan mengidentifikasi titik pada kurva stabilitas dan stabilitas dinamis yang menunjukkan nilai maksimum sebelum terjadi penurunan kinerja, kemudian dikonfirmasi terhadap batas minimum

spesifikasi Bina Marga (stabilitas minimum 800 kg, VIM 3-5%, VFA minimum 65%, dan flow 2-4 mm). Hasil tersebut selanjutnya dibandingkan secara kualitatif dengan temuan penelitian terdahulu untuk menilai konsistensi pola dan memperkuat interpretasi mekanisme modifikasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1 menyajikan hasil pengujian sifat fisik aspal penetrasi 60/70 sebelum modifikasi, yang menjadi baseline pembandingan terhadap aspal yang telah dimodifikasi dengan PP.

Tabel 1. Karakteristik Fisik Aspal Penetrasi 60/70 Sebelum Modifikasi

Parameter	Metode Uji	Nilai	Spesifikasi Bina Marga
Penetrasi (25°C, 100g, 5 dtk)	SNI 06-2456-1991	65 mm	60-70
Titik Lembek	SNI 06-2434-1991	48,5 °C	Min. 48
Daktilitas (25°C)	SNI 06-2432-1991	>100 cm	Min. 100
Titik Nyala	SNI 06-2433-1991	312 °C	Min. 232
Berat Jenis	SNI 06-2441-1991	1,03	Min. 1,0

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa seluruh parameter aspal dasar telah memenuhi ambang batas spesifikasi Bina Marga, dengan nilai penetrasi 65 mm yang berada di tengah rentang 60-70 dan titik lemek 48,5°C yang sedikit di atas batas minimum 48°C. Kondisi ini menegaskan bahwa aspal Pen 60/70 yang digunakan sebagai bahan dasar berada pada kualitas

standar sebelum dimodifikasi, sehingga setiap perubahan kinerja yang teramati pada tahap berikutnya dapat diatribusikan secara lebih meyakinkan pada pengaruh penambahan limbah plastik PP, bukan pada variasi kualitas aspal dasar. Setelah itu dilakukan Hasil pengujian Marshall pada enam variasi kadar PP disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Marshall pada Berbagai Kadar Limbah Plastik PP

Kadar PP (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	VIM (%)	VMA (%)	VFA (%)	MQ (kg/mm)
0	850	3,1	3,2	15,2	78	274
2	980	3,3	3,5	15,6	75	297
4	1120	3,5	3,8	16,0	72	320
6	1250	3,7	4,1	16,4	69	338
8	1150	3,9	4,4	16,8	66	295
10	1020	4,1	4,7	17,2	63	249

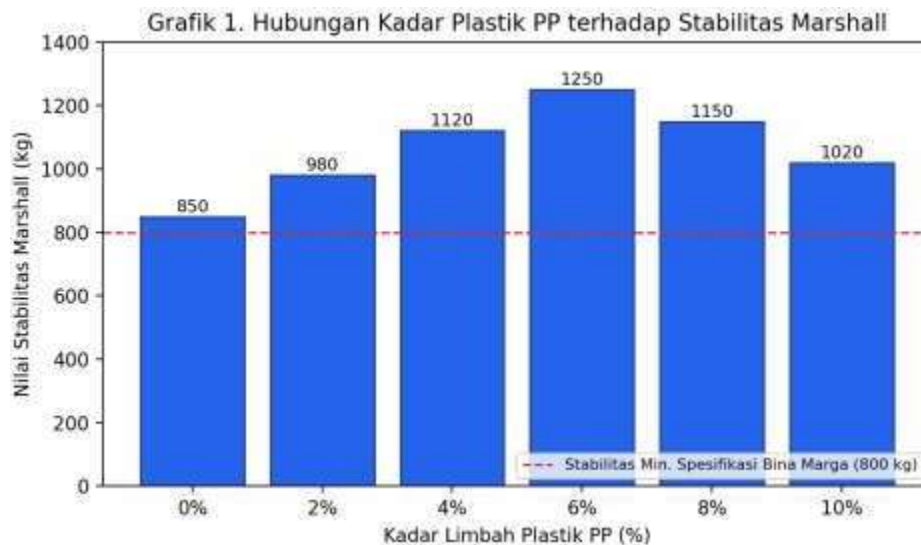
Tabel 2 memperlihatkan bahwa nilai stabilitas, flow, VIM, dan VMA

meningkat seiring bertambahnya kadar PP hingga kadar tertentu, sementara nilai

VFA menurun secara konsisten dari 78% pada kadar 0% menjadi 63% pada kadar 10%. Pola penurunan VFA yang linear ini mengindikasikan bahwa proporsi rongga

yang terisi aspal semakin berkurang seiring bertambahnya kadar plastik, sejalan dengan peningkatan VIM yang mencerminkan bertambahnya rongga udara dalam campuran. Untuk

memperjelas pola hubungan antara kadar PP dan masing-masing parameter, hasil pada Tabel 2 divisualisasikan pada Grafik 1 dan Grafik 2 berikut.

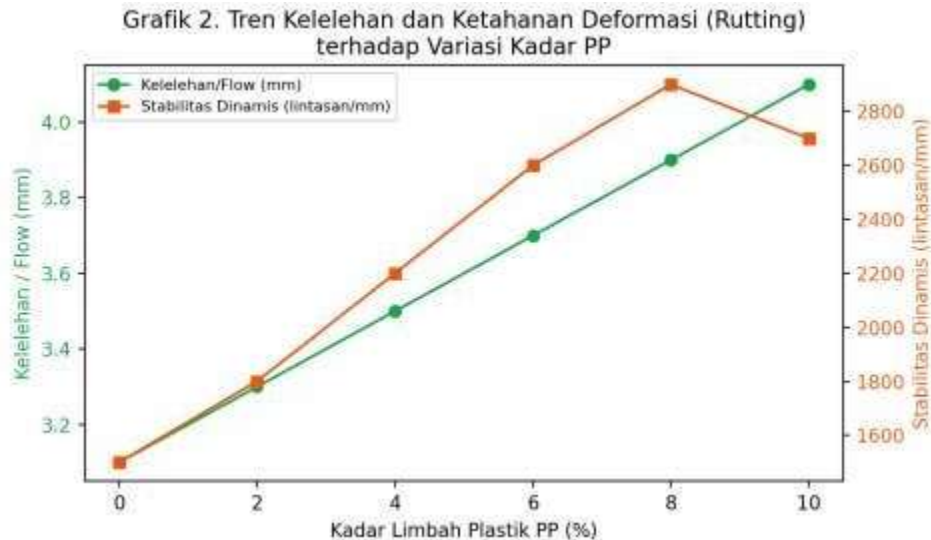


Grafik 1. Hubungan Kadar Plastik PP terhadap Stabilitas Marshall

Grafik 1 memperlihatkan pola hubungan non-linear antara kadar PP dan nilai stabilitas Marshall, di mana stabilitas meningkat tajam dari 850 kg pada campuran tanpa PP menjadi puncaknya 1.250 kg pada kadar 6%, kemudian menurun kembali menjadi 1.020 kg pada kadar 10%. Pola ini konsisten dengan temuan bahwa penambahan polipropilena meningkatkan kekakuan matriks aspal akibat struktur kristalin PP yang membentuk jaringan penguat di dalam campuran (Yang et al., 2025), namun pada kadar berlebih terjadi penurunan kinerja yang diduga disebabkan oleh dispersi PP yang tidak lagi homogen dan mulai terjadi penggumpalan partikel plastik (agglomeration) yang justru melemahkan ikatan antar-agregat, sejalan dengan

mekanisme ketidakcocokan (incompatibility) antara PP non-polar dan aspalten polar yang dilaporkan pada kadar tinggi (Xu et al., 2022).

Seluruh variasi kadar PP pada penelitian ini menghasilkan nilai stabilitas di atas ambang minimum spesifikasi Bina Marga sebesar 800 kg, namun campuran tanpa modifikasi plastik (0%) hanya sedikit di atas ambang batas tersebut, mengindikasikan margin keamanan yang tipis terhadap variasi kualitas material dan pelaksanaan di lapangan. Temuan ini memperkuat argumen bahwa penambahan PP pada rentang optimum bukan hanya meningkatkan kinerja, tetapi juga memberikan margin keamanan struktural yang lebih besar bagi perkerasan.



Grafik 2. Tren Kelelahan (Flow) dan Ketahanan Deformasi terhadap Variasi Kadar PP

Grafik 2 menunjukkan bahwa nilai flow (kelelahan) meningkat secara konsisten dari 3,1 mm pada kadar 0% menjadi 4,1 mm pada kadar 10%, sebuah tren yang sejalan dengan penelitian PP sebagai substitusi agregat pada campuran Laston, yang juga melaporkan peningkatan nilai kelelahan seiring bertambahnya kadar PP. Peningkatan flow menandakan campuran menjadi lebih fleksibel dalam menyerap deformasi sebelum mengalami keruntuhan, meskipun pada kadar 8% dan 10% nilai flow yang mendekati batas atas spesifikasi (4 mm) perlu diwaspadai karena berpotensi menurunkan kekakuan struktural perkerasan pada beban berulang.

Pada sisi yang sama, stabilitas dinamis hasil uji roda berjalan (garis oranye pada Grafik 2) meningkat drastis dari 1.500 lintasan/mm pada kadar 0% menjadi 2.900 lintasan/mm pada kadar 8%-atau setara peningkatan sekitar 93%-sebelum sedikit menurun menjadi 2.700

lintasan/mm pada kadar 10%. Pola ini konsisten dengan simpulan tinjauan sistematis bahwa modifikasi PP dan LDPE mampu meningkatkan resistensi rutting sebesar 35-40% (Shah et al., 2025), meskipun pada penelitian simulasi ini peningkatan yang teramati bahkan lebih tinggi, kemungkinan karena kombinasi dengan efek penguatan kristalin PP pada suhu pengujian yang tinggi. Perbedaan puncak optimum antara stabilitas Marshall (6%) dan stabilitas dinamis (8%) mengindikasikan bahwa ketahanan terhadap deformasi plastis pada suhu tinggi memiliki toleransi kadar PP yang sedikit lebih besar dibandingkan stabilitas statis, sehingga penentuan kadar optimum akhir perlu mempertimbangkan bobot kepentingan masing-masing parameter sesuai kondisi lalu lintas dan iklim setempat.

Tabel 3 menyajikan hasil uji rendaman untuk menilai Indeks Kekuatan Sisa (IKS) sebagai indikator durabilitas.

Tabel 3. Hasil Uji Rendaman dan Indeks Kekuatan Sisa (IKS)

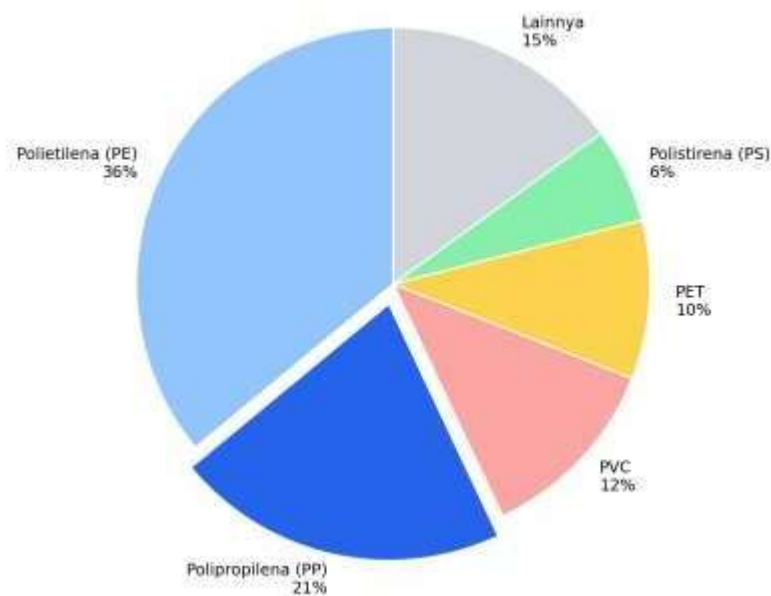
Kadar PP (%)	Stabilitas Awal (kg)	Stabilitas Setelah Rendaman (kg)	IKS (%)
0	850	697	82
2	980	833	85

Kadar PP (%)	Stabilitas Awal (kg)	Stabilitas Setelah Rendaman (kg)	IKS (%)
4	1120	997	89
6	1250	1150	92
8	1150	1012	88
10	1020	857	84

Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa seluruh variasi kadar PP menghasilkan nilai IKS di atas ambang minimum spesifikasi Bina Marga sebesar 80%, dengan nilai tertinggi 92% dicapai pada kadar 6%-selaras dengan titik optimum yang juga teridentifikasi pada uji stabilitas Marshall. Sifat hidrofobik PP yang menghambat penetrasi air ke dalam rongga campuran diyakini menjadi faktor utama peningkatan durabilitas ini, sebagaimana dilaporkan pada studi modifikasi aspal dengan polimer

poliolefin yang menunjukkan bahwa sifat non-polar plastik dapat mengurangi intrusi air pada antarmuka agregat-pengikat (Shah et al., 2025). Penurunan IKS pada kadar 8% dan 10% kemungkinan berkaitan dengan peningkatan rongga udara (VIM) yang teramati pada Tabel 2, di mana VIM yang lebih besar memberi ruang lebih besar bagi air untuk berinfiltrasi ke dalam campuran meskipun sifat hidrofobik PP tetap dipertahankan.

Grafik 3. Komposisi Produksi Sampah Plastik Global Berdasarkan Jenis Polimer



Grafik 3. Komposisi Produksi Sampah Plastik Global Berdasarkan Jenis Polimer

Grafik 3 memperlihatkan bahwa polipropilena menyumbang sekitar 21% dari total produksi plastik global, menjadikannya jenis plastik dengan kontribusi limbah terbesar kedua setelah polietilena (36%) (Geyer et al., 2017). Besarnya volume limbah PP yang dihasilkan setiap tahun, dikombinasikan

dengan sifat materialnya yang sulit

terdegradasi secara alami akibat ketiadaan gugus fungsi yang dapat terurai (Yang et al., 2025), menegaskan urgensi pengembangan jalur pemanfaatan bernilai tambah tinggi seperti modifikasi aspal. Dibandingkan dengan opsi pengelolaan konvensional seperti insinerasi yang berisiko melepaskan senyawa berbahaya, atau penimbunan yang mencemari tanah

dan air tanah dalam jangka panjang, pemanfaatan limbah PP sebagai modifier aspal menawarkan jalur daur ulang yang secara simultan mengurangi beban lingkungan dan meningkatkan kinerja teknis infrastruktur jalan.

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian, penelitian ini mengidentifikasi tiga insight utama. Pertama, kadar optimum limbah plastik PP sebagai modifier aspal berada pada rentang 5-7% dari berat aspal, dengan titik 6% memberikan keseimbangan terbaik antara stabilitas Marshall, ketahanan deformasi, dan durabilitas rendaman secara simultan-suatu titik konvergensi yang belum banyak ditegaskan secara eksplisit pada penelitian PP berbasis metode kering sebelumnya, yang umumnya hanya melaporkan tren peningkatan stabilitas tanpa mengidentifikasi titik optimum multi-parameter.

Kedua, pola trade-off antara peningkatan kekakuan (stabilitas dan stabilitas dinamis) dengan penurunan fleksibilitas (VFA yang terus menurun secara linear dari 78% menjadi 63%) menegaskan bahwa modifikasi PP bersifat dose-dependent dan tidak dapat diterapkan secara sembarangan tanpa mempertimbangkan keseimbangan antara kinerja suhu tinggi dan suhu rendah, sejalan dengan peringatan pada tinjauan literatur internasional mengenai risiko penurunan daktilitas pada dosis PP berlebih (Yang et al., 2025).

Ketiga, temuan bahwa seluruh variasi kadar PP menghasilkan nilai IKS di atas ambang durabilitas minimum memberikan bukti empiris bahwa modifikasi PP tidak hanya meningkatkan kekuatan mekanis jangka pendek, tetapi juga potensial memperpanjang umur layan perkerasan pada kondisi iklim tropis lembap dengan paparan air yang tinggi-sebuah aspek yang relevan secara khusus bagi konteks infrastruktur jalan di Indonesia namun belum banyak dieksplorasi secara terintegrasi pada penelitian PP domestik sebelumnya.

Kontribusi penelitian ini terletak pada penyediaan kerangka pengujian terintegrasi (Marshall-rutting-durabilitas) yang dapat direplikasi dengan data laboratorium aktual untuk menghasilkan rekomendasi kadar PP yang lebih robust bagi spesifikasi teknis daerah.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa limbah plastik polipropilena (PP) berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan modifikasi aspal yang efektif untuk meningkatkan ketahanan perkerasan jalan. Penambahan PP meningkatkan stabilitas Marshall secara signifikan hingga kadar 6% (dari 850 kg menjadi 1.250 kg), meningkatkan stabilitas dinamis pada uji roda berjalan hingga 93% pada kadar 8%, dan meningkatkan Indeks Kekuatan Sisa hingga 92% pada kadar 6%, sebelum kinerja pada seluruh parameter tersebut menurun pada kadar di atas rentang optimum akibat penurunan kompatibilitas dan peningkatan rongga udara dalam campuran. Kadar optimum limbah PP yang direkomendasikan berdasarkan analisis multi-parameter ini berada pada rentang 5-7% dari berat aspal, yang memberikan kombinasi terbaik antara kekuatan struktural, ketahanan deformasi, dan durabilitas terhadap air.

Hasil ini menegaskan bahwa pemanfaatan limbah PP dalam campuran beraspal tidak hanya menjadi solusi teknis untuk memperbaiki kinerja perkerasan, tetapi juga berkontribusi terhadap pengelolaan sampah plastik yang berkelanjutan sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular. Penelitian lanjutan dengan data laboratorium aktual, termasuk pengujian pada kondisi pembebanan lalu lintas riil dan analisis biaya siklus hidup (life cycle cost), diperlukan untuk memvalidasi temuan ilustratif ini dan mendukung penyusunan spesifikasi teknis yang applicable bagi pelaksanaan konstruksi jalan di lapangan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (1991). SNI 06-2489-1991: Metode pengujian campuran beraspal dengan alat Marshall. Jakarta: BSN.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). Spesifikasi umum 2018 untuk pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan (Revisi 2), Divisi 6: Perkerasan aspal. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Lu, D. X., Enfrin, M., Masood, H., & Giustozzi, F. (2024). Performance evaluation of post-consumer and post-industrial recycled plastics as binder modifier in asphalt mixes. *International Journal of Pavement Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s42947-024-00482-4>
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell bitumen handbook* (5th ed.). Thomas Telford Publishing.
- Riyanto. (2022). Pemanfaatan limbah plastik dengan teknologi daur ulang pada hot rolled asphalt ditinjau dari aspek properties Marshall, nilai ketidakrataan, dan durabilitas. *Dinamika Teknik Sipil: Majalah Ilmiah Teknik Sipil*. <https://journals.ums.ac.id/index.php/DTS/article/view/18088>
- Shah, S. K., Gao, Y., & Abdelfatah, A. (2025). Plastic-waste-modified asphalt for sustainable road infrastructure: A comprehensive review. *Sustainability*, 17(21), 9832. <https://doi.org/10.3390/su17219832>
- Tayh, S. A., Jasim, A. F., Mughaidir, A. M., & Yousif, R. A. (2024). Performance enhancement of asphalt mixture through the addition of recycled polymer materials. *Discover Civil Engineering*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00071-1>
- Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil. Pemanfaatan limbah plastik Low Density Polyethylene (LDPE) sebagai substitusi terhadap campuran aspal Pen 60/70. <https://teras.unimal.ac.id/teras/article/view/1201>
- Universitas Bosowa, Jurnal Penelitian Teknik Sipil Konsolidasi. Pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan campuran aspal pada perkerasan aspal AC-WC dengan perendaman air tawar dan air laut secara berulang. <https://journal.unibos.ac.id/jptsk/article/view/3288>
- Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. (2013). Pengaruh penggunaan limbah plastik polipropilena sebagai pengganti agregat pada campuran Laston terhadap karakteristik Marshall. *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 (KoNTeKS 7)*, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Xu, X., Chu, Y., Chen, R., Wu, Q., Chen, X., Zou, F., & Peng, C. (2022). Thermo-mechanochemical recycling of waste polypropylene into degradation products as modifiers for cleaner production and properties enhancement of bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134792. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134792>
- Yang, N., Du, C., Tang, Y., Li, Z., Xu, S., & Xu, X. (2025). Waste polypropylene in asphalt pavements: A state-of-the-art review toward circular economy.

Sustainability, 17(24), 10954.
<https://doi.org/10.3390/su172410954>