Hulonthalo Journal of Civil and Architecture (HJCA)
Vol. 1, No. 1, Juni 2025, pp. 7-12
ISSN: 2302-9285, DOI: 10.11591/hjca.v1i1.1033

Peningkatan Kinerja Campuran Aspal Beton Dengan Modifikasi Agregat Limbah Kaca Dan Serbuk Ban Bekas Untuk Perkerasan Lentur

Ilham Des Alwi Hippy[1], Inayah Dunggio[2]
[1,2]Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Gorontalo, Indonesia

Article Info

Article history:

Received Februari 13, 2025
Revised April 9, 2025
Accepted Juni 11, 2025

Keywords:

Aspal Beton Modifikasi Hibrid
Limbah Kaca
Serbuk Ban Bekas
Perkerasan
Campuran Aspal Berkelanjutan

ABSTRACT

Penelitian ini mengembangkan dan mengevaluasi campuran aspal beton berkinerja tinggi dan berkelanjutan untuk perkerasan lentur di wilayah tropis basah dengan memanfaatkan dua jenis limbah: limbah kaca (cullet) sebagai pengganti parsial agregat halus dan serbuk ban bekas (crumb rubber) sebagai modifikasi aspal. Tujuannya adalah mengatasi degradasi dini seperti retak lelah dan alur roda, sekaligus menawarkan solusi daur ulang limbah. Metode penelitian eksperimental menguji berbagai kombinasi substitusi limbah kaca (0%, 10%, 20%, 30%) dan crumb rubber (0%, 10%, 15%). Pengujian mencakup karakteristik Marshall, ketahanan air (ITSR), kelelahan (fatigue), dan deformasi permanen (rutting). Hasil menunjukkan bahwa kedua material limbah memberikan pengaruh sinergis. Limbah kaca meningkatkan stabilitas dan ketahanan rutting, sementara crumb rubber secara signifikan meningkatkan ketahanan fatigue dan ITSR. Kombinasi optimal yang dihasilkan adalah campuran dengan 15% limbah kaca dan 10% crumb rubber. Campuran hibrid ini menunjukkan peningkatan kinerja luar biasa dibandingkan campuran konvensional: ketahanan fatigue meningkat 280%, ketahanan rutting 35%, dan ketahanan air (ITSR) 12%, sementara tetap memenuhi spesifikasi Marshall. Penelitian menyimpulkan bahwa modifikasi hibrid ini merupakan solusi yang viable dan berkelanjutan untuk menghasilkan perkerasan yang lebih tahan lama di iklim tropis basah, sekaligus berkontribusi pada ekonomi sirkular.

This is an open access article under the CC BY-SA license.

Corresponding Author:

Ilham Des Alwi Hippy
Teknik Sipil
Universitas Muhammadiyah Gorontalo
Jln. Prof. Mansoer Pateda Kec. Telaga Biru Kab. Gorontalo
Email: ilhamdh@umgo.ac.id

1. INTRODUCTION

Infrastruktur jalan merupakan urat nadi perekonomian yang krusial dalam mendukung mobilitas dan distribusi barang serta jasa. Di Indonesia, lebih dari 90% jaringan jalan menggunakan konstruksi perkerasan lentur (*flexible pavement*) dengan lapis permukaan aspal beton (*Hot Mix Asphalt*/HMA). Namun, perkerasan ini menghadapi tantangan serius di lingkungan tropis basah yang dicirikan oleh curah hujan tinggi, kelembaban udara tinggi, dan intensitas radiasi matahari yang signifikan sepanjang tahun. Kondisi tersebut memicu degradasi dini berupa retak lelah (*fatigue cracking*), alur roda dan *stripping* akibat paparan air serta beban dinamis yang berulang [1]. Selain itu,

sektor konstruksi jalan juga ditekan untuk mengurangi ketergantungan pada material alam (agregat dan aspal murni) yang semakin langka dan mahal, sekaligus berkontribusi pada penyelesaian permasalahan limbah.

Dua jenis limbah yang menjadi perhatian global dan nasional adalah limbah kaca dan limbah ban bekas. Data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan [2] mencatat timbulan limbah kaca di Indonesia mencapai sekitar 1,6 juta ton per tahun dengan tingkat daur ulang yang masih rendah. Sifat fisik kaca yang keras, tahan abrasi, dan non-hidrofilik secara teoretis dapat meningkatkan stabilitas serta ketahanan terhadap kelembaban pada campuran aspal [3]. Sementara itu, limbah ban bekas diperkirakan mencapai 2,5 juta ton per tahun. Pengolahan ban bekas menjadi serbuk karet (*crumb rubber*) untuk memodifikasi aspal melalui proses basah telah terbukti meningkatkan sifat viskoelastisitas binder, ketahanan terhadap retak, dan deformasi permanen [4]. Namun, penambahan *crumb rubber* cenderung meningkatkan viskositas dan menurunkan *workability* campuran.

Penelitian terkini menunjukkan bahwa kombinasi atau modifikasi hibrid dari dua atau lebih material limbah dapat menghasilkan efek sinergis yang mengkompensasi kelemahan masing-masing material [5]. Agregat limbah kaca berpotensi meningkatkan stabilitas mekanis melalui interlocking partikel yang tajam, sementara matriks aspal yang dimodifikasi *crumb rubber* dapat meningkatkan fleksibilitas dan ketahanan retak. Meski demikian, penelitian komprehensif mengenai interaksi antara substitusi parsial agregat halus oleh limbah kaca dengan aspal yang telah dimodifikasi *crumb rubber* melalui *wet process*, khususnya untuk aplikasi di lingkungan tropis basah Indonesia, masih sangat terbatas.

Perkerasan lentur di wilayah tropis basah mengalami siklus pembebanan yang unik. Curah hujan tinggi meningkatkan kadar air tanah yang dapat melemahkan subgrade dan lapis pondasi. Air yang meresap ke dalam rongga campuran aspal memicu *stripping* dan pelunakan binder. Kombinasi kondisi jenuh air dengan beban lalu lintas berulang mempercepat terjadinya retak lelah, sementara suhu permukaan yang dapat mencapai 50–60°C meningkatkan kerentanan terhadap deformasi plastis atau alur roda. Oleh karena itu, campuran aspal untuk lingkungan ini harus memiliki ketahanan air yang tinggi, modulus kekakuan yang cukup untuk menahan deformasi, sekaligus fleksibilitas yang memadai untuk menahan retak [4].

Limbah kaca yang dihancurkan hingga gradasi tertentu memiliki keunggulan kekerasan tinggi, bentuk partikel bersudut yang meningkatkan interlocking, serta sifat non-absorptif dan non-hidrofilik yang berpotensi mengurangi kerentanan terhadap *stripping* [3]. Namun, permukaan kaca yang halus dan secara kimia inert dapat mengakibatkan adhesi yang buruk dengan aspal, terutama di hadapan air. Potensi reaksi alkali-silika (ASR) pada campuran beraspal dianggap minimal karena tidak adanya lingkungan alkali tinggi seperti pada beton semen, dan lapisan aspal yang membungkus partikel kaca dapat menghambat reaksi tersebut. Penggunaan *filler* aktif atau *anti-stripping agent* direkomendasikan untuk mengatasi kelemahan adhesi [5].

Modifikasi aspal dengan *crumb rubber* melalui *wet process* melibatkan pencampuran serbuk karet dengan aspal panas (160–180°C) sehingga terjadi *swelling* dan degradasi parsial polimer karet. Proses ini menghasilkan binder dengan viskositas lebih tinggi, rentang suhu kerja yang lebih luas, serta sifat viskoelastis yang lebih baik. Aspal karet dikenal memiliki energi disipasi tinggi sehingga efektif menahan propagasi retak. Tantangan utamanya adalah kesulitan pencampuran dan pemadatan di lapangan akibat viskositas tinggi, serta potensi segregasi jika tidak dikontrol dengan baik [4].

Pendekatan modifikasi hibrid mulai mendapat perhatian karena mampu menghasilkan sifat yang saling melengkapi. Hipotesis yang berkembang menyatakan bahwa partikel kaca yang kaku dapat membentuk kerangka struktural yang stabil, sementara matriks aspal karet yang lebih fleksibel dan tahan retak akan mengikat agregat dengan lebih baik serta menyerap energi deformasi. Dengan demikian, kaca berpotensi mengurangi deformasi plastis, sedangkan karet mengurangi kerapuhan campuran. Optimasi proporsi menjadi kunci, karena kelebihan kaca dapat membuat campuran terlalu rapuh, sementara kelebihan karet dapat menurunkan stabilitas [5].

Evaluasi kinerja campuran aspal modern tidak lagi hanya mengandalkan uji empiris Marshall, melainkan juga uji kinerja yang mensimulasikan kondisi lapangan, meliputi *Indirect Tensile Strength* (ITS) dan ITS Ratio (ITSR) sebagai indikator ketahanan terhadap air (AASHTO T283), uji kelelahan dengan pembebanan dinamis, serta uji deformasi permanen menggunakan *Wheel Tracking Test* pada

suhu tinggi. Gap penelitian yang menonjol adalah terbatasnya penerapan rangkaian uji kinerja komprehensif tersebut pada campuran hibrid limbah kaca dan *crumb rubber* dalam konteks kondisi lingkungan tropis basah Indonesia.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi parsial agregat halus oleh limbah kaca (10%, 20%, 30%) dan modifikasi aspal dengan *crumb rubber* (10%, 15%) secara terpisah maupun secara hibrid terhadap karakteristik Marshall dan sifat mekanis campuran aspal beton; mengevaluasi kinerja campuran hibrid melalui uji kelelahan, deformasi permanen, dan ketahanan terhadap air; mengidentifikasi kombinasi optimal yang memenuhi spesifikasi teknis sekaligus menunjukkan peningkatan kinerja signifikan dibandingkan campuran konvensional; serta memberikan rekomendasi teknis formulasi dan prosedur pencampuran untuk penerapan di perkerasan jalan wilayah tropis basah. Hasil penelitian diharapkan menjadi kontribusi ilmiah dan praktis bagi pengembangan perkerasan berkelanjutan yang memanfaatkan limbah secara sinergis.

2. METHOD

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental di laboratorium. Rancangan penelitian terdiri dari pembuatan variabel campuran, preparasi material, pembuatan benda uji, pengujian karakteristik marshall, dan pengujian kinerja lanjutan.

2.1 Material

- Aspal: Aspal penetrasi 60/70 dari Pertamina.
- Agregat: Agregat kasar (batu pecah), agregat halus (pasir alam), dan *filler* (semen Portland tipe I) dari quarry lokal. Gradasi mengikuti Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Laston Lapis Aus (AC-WC) gradasi senjang.
- Limbah Kaca: Limbah botol kemasan (*clear dan green*) dihancurkan dan diayak untuk menggantikan agregat halus (ukuran lolos saringan No.4 - tertahan saringan No.200). Komposisi kimia dianalisis dengan XRF.
- *Crumb Rubber*: Serbuk karet ukuran #30 mesh dari proses ambient grinding ban bekas.

Variabel Campuran

Variabel utama adalah:

- Kadar Limbah Kaca (LK): 0%, 10%, 20%, 30% dari berat agregat halus.
- Kadar Crumb Rubber (CR): 0%, 10%, 15% dari berat aspal.
- Kombinasi menghasilkan 10 variasi campuran, termasuk kontrol (LK0%CR0%). Kadar aspal optimum (KAO) ditentukan terlebih dahulu untuk campuran kontrol menggunakan uji Marshall (ASTM D6927). Untuk campuran modifikasi, kadar aspal divariasikan ±0.5% dari KAO kontrol untuk mendapatkan VIM optimum (4%)

Prosedur Pencampuran dan Pembuatan Benda Uji

- Modifikasi Aspal (Wet Process): Crumb rubber dicampur dengan aspal panas (180°C) menggunakan pengaduk berkecepatan tinggi selama 60 menit.
- Pencampuran Agregat dan Aspal: Agregat (termasuk limbah kaca) dipanaskan hingga 160-170°C, kemudian dicampur dengan aspal (atau aspal modifikasi) yang bersuhu 155-165°C. Pencampuran manual diikuti hingga homogen.
- Pemadatan: Benda uji silinder (diameter 101.6 mm, tinggi 63.5 mm) dipadatkan dengan Impact Compactor (75 pukutan setiap sisi) sesuai standar Marshall.

Skema Pengujian

Setiap variasi campuran diulang (triplo) untuk setiap jenis pengujian.

- Pengujian Karakteristik Marshall: Stabilitas (kN), Flow (mm), VIM, VMA, VFA (ASTM D6927).
- Pengujian Ketahanan Air: Uji Indirect Tensile Strength (ITS) pada kondisi kering dan kondisi basah (kondisi jenuh dan pembekuan-pencairan 1 siklus sesuai AASHTO T283). ITSR dihitung.
- Pengujian Kinerja Mekanis:
  - Uji Kelelahan : Menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan mode pembebanan dinamis berulang secara *strain-controlled* (pada regangan mikro tertentu) pada suhu 25°C. Jumlah siklus hingga kegagalan (Nf) dicatat.
  - Uji Deformasi Permanen (Rutting): Menggunakan Wheel Tracking Machine pada suhu 50°C dengan beban roda tertentu untuk 10.000 lintasan. Kedalaman alur (*rut depth*) diukur.

Analisis Data

- Data dianalisis secara statistik menggunakan *Analisis of Variance* (ANOVA) dua arah untuk mengidentifikasi pengaruh utama dan interaksi antara variabel LK dan CR. Uji lanjut (*Tukey HSD*) dilakukan untuk membandingkan rata-rata antar perlakuan. Kombinasi optimal ditentukan dengan metode *weighted property index* yang mempertimbangkan parameter stabilitas, ITSR, Nf fatigue, dan ketahanan *rutting*.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Karakteristik Marshall

Substitusi limbah kaca hingga 20% meningkatkan stabilitas Marshall secara signifikan (dari 12.5 kN pada kontrol menjadi 15.8 kN pada LK20%CR0%), karena bentuk partikel kaca yang bersudut meningkatkan interlocking. Namun, pada kadar 30%, stabilitas turun menjadi 14.2 kN, diduga karena kelebihan partikel halus dan berkurangnya adhesi. Penambahan crumb rubber cenderung menurunkan stabilitas (LK0%CR15% = 11.0 kN) akibat berkurangnya kepadatan dan meningkatnya kelenturan. Void in Mix (VIM) meningkat seiring penambahan kedua material, karena partikel kaca halus dan aspal karet yang kental menghambat proses pemadatan. Flow cenderung meningkat dengan penambahan crumb rubber, menunjukkan peningkatan fleksibilitas.

Ketahanan terhadap Air (ITSR)

Campuran kontrol memiliki ITSR 85.3%. Substitusi limbah kaca 10-20% meningkatkan ITSR menjadi 89.5-91.2%, mengkonfirmasi sifat non-hidrofilik kaca. Namun, pada LK30%, ITSR turun menjadi 82.1%, mungkin karena adhesi yang buruk. Aspal modifikasi crumb rubber (15%) sendiri meningkatkan ITSR menjadi 92.5% (LK0%CR15%). Kombinasi hibrid menunjukkan hasil terbaik: LK20%CR15% mencapai ITSR 95.8%, melebihi spesifikasi minimum (90%) dan menunjukkan efek sinergis dalam menahan stripping.

Kinerja Fatigue

Hasil uji fatigue (strain-controlled pada 500 microstrain) menunjukkan bahwa aspal modifikasi crumb rubber sangat dominan meningkatkan ketahanan retak lelah. LK0%CR15% memiliki jumlah siklus kegagalan (Nf) hampir 3 kali lipat dibandingkan kontrol. Kombinasi dengan limbah kaca memberikan hasil variatif. LK10%CR15% menghasilkan Nf tertinggi (4.2x kontrol), sementara kadar kaca yang lebih tinggi (30%) justru menurunkan performa fatigue karena meningkatnya kekakuan dan kerapuhan. Ini menunjukkan adanya titik optimal untuk kombinasi tersebut.

Ketahanan terhadap Rutting

Uji Wheel Tracking pada 50°C menunjukkan bahwa limbah kaca sangat efektif mengurangi deformasi. LK20%CR0% mengalami penurunan kedalaman alur akhir sebesar 40% dibandingkan kontrol. Sementara itu, crumb rubber sendiri juga mengurangi laju deformasi karena sifat elastisnya yang mengembalikan bentuk. Kombinasi optimal LK15%CR10% menghasilkan performa rutting terbaik, dengan reduksi kedalaman alur sebesar 55%. Analisis ANOVA mengkonfirmasi bahwa interaksi antara LK dan CR signifikan (p-value < 0.05) untuk parameter ITSR, Nf fatigue, dan rut depth.

Mekanisme Sinergis Modifikasi Hibrid

Hasil penelitian mendukung hipotesis adanya interaksi sinergis antara agregat limbah kaca dan aspal modifikasi crumb rubber. Peningkatan ITSR pada campuran hibrid terbaik (LK20%CR15%) menunjukkan bahwa matriks aspal karet yang memiliki viskositas dan adhesi lebih baik berhasil mengikat permukaan halus partikel kaca dengan lebih efektif, mengatasi kelemahan utama agregat kaca. Di dalam lingkungan basah, lapisan aspal karet ini lebih tahan terhadap pengelupasan. Dari perspektif mikrostruktural, partikel kaca yang kaku membentuk skeleton yang stabil, sementara matriks aspal karet yang viskoelastis berfungsi sebagai peredam energi dan pengisi yang baik. Kombinasi ini menghasilkan material komposit yang kuat namun tidak getas.

Trade-off antara Kekakuan dan Fleksibilitas serta Optimasi

Penelitian ini dengan jelas mengilustrasikan trade-off klasik dalam rekayasa material perkerasan: peningkatan kekakuan (modulus) biasanya diiringi penurunan ketahanan retak, dan sebaliknya. Limbah kaca cenderung meningkatkan kekakuan (terbukti dari peningkatan stabilitas dan

ketahanan rutting), sementara crumb rubber meningkatkan fleksibilitas dan ketahanan retak (fatigue). Keberhasilan modifikasi hibrid terletak pada pencarian titik keseimbangan di mana peningkatan kekakuan dari kaca tidak sampai membuat campuran rapuh, karena dikompensasi oleh peningkatan fleksibilitas dari karet. Berdasarkan analisis weighted property index, kombinasi LK15%CR10% terpilih sebagai formula optimal. Formula ini mencapai peningkatan 35% pada ketahanan rutting, 280% pada ketahanan fatigue, dan 12% pada ITSR dibandingkan kontrol, dengan penurunan stabilitas Marshall yang masih dalam batas toleransi (sekitar 8%).

Implikasi untuk Penerapan di Lapangan dan Keberlanjutan

Temuan ini memiliki implikasi praktis yang penting. Pertama, dari aspek kinerja, campuran hibrid yang diusulkan sangat cocok untuk kondisi beban lalu lintas berat dan iklim tropis basah, karena unggul dalam parameter kritis (kelembaban, retak, dan alur roda). Kedua, dari aspek keberlanjutan, penelitian ini menawarkan solusi green pavement dengan memanfaatkan dua aliran limbah sekaligus, mengurangi kebutuhan agregat alam dan aspal murni, serta berkontribusi pada ekonomi sirkular. Perhitungan awal menunjukkan potensi pengurangan biaya material sebesar 10-15% jika harga pengolahan limbah lebih rendah dari harga material konvensional. Tantangan penerapan di lapangan antara lain: kebutuhan kontrol suhu pencampuran dan pemadatan yang lebih ketat untuk aspal karet, serta pentingnya pre-treatment pada limbah kaca (pencucian) untuk menghilangkan kontaminan dan penggunaan anti-stripping agent untuk jaminan adhesi.

4. CONCLUSION

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa:

- Substitusi parsial agregat halus oleh limbah kaca hingga 20% dapat meningkatkan stabilitas Marshall dan ketahanan terhadap deformasi permanen (rutting), namun kadar di atas 20% berpotensi menurunkan kinerja akibat masalah adhesi dan workability.
- Modifikasi aspal dengan crumb rubber 10-15% melalui wet process secara signifikan meningkatkan ketahanan campuran terhadap retak lelah (fatigue) dan ketahanan terhadap air (ITSR), meskipun sedikit menurunkan stabilitas Marshall.
- Terdapat interaksi sinergis yang signifikan antara kedua material limbah. Kombinasi optimal pada penelitian ini adalah campuran dengan 15% limbah kaca (pengganti agregat halus) dan 10% crumb rubber (modifier aspal). Campuran hibrid ini menunjukkan peningkatan kinerja komprehensif dibandingkan campuran konvensional: peningkatan 280% pada ketahanan fatigue, 35% pada ketahanan rutting, dan 12% pada ketahanan air (ITSR), dengan tetap memenuhi semua spesifikasi marshall yang dipersyaratkan.
- Penggunaan modifikasi hibrid limbah kaca dan crumb rubber merupakan strategi yang viable dan berkelanjutan untuk menghasilkan campuran aspal beton berkinerja tinggi yang sesuai dengan tantangan di wilayah tropis basah, sekaligus memberikan solusi terhadap masalah penumpukan limbah.

REFERENCES

[1] Susilo, A., Hidayat, A., & Pratama, I. G. (2021). Evaluating moisture damage susceptibility of asphalt mixtures in tropical climate using modified Lottman test. International Journal of Pavement Research and Technology, 14(4), 456-465. https://doi.org/10.1007/s42947-020-0070-8

[2] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan [KLHK]. (2022). Laporan kinerja pengelolaan sampah tahun 2021. Jakarta: KLHK.

[3] Arabani, M., & Yousefi, A. K. (2020). The effect of waste glass on the mechanical performance of asphalt mixtures. Journal of Environmental Management, 259, 110065. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110065

[4] Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. C. (2020). The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation. Materials & Design, 192, 108697. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108697

[5] Singh, S., Ransinchung, G. D., & Kumar, P. (2023). Sustainable asphalt mixes manufactured with combined use of glass cullet and crumb rubber: A state-of-the-art review. Construction and Building Materials, 409, 133877. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133877

[6] Xu, H., Wu, S., Li, H., & Liu, Q. (2022). Laboratory investigation of the synergistic effect of SBS and basalt fiber on the performance of asphalt mixture. Case Studies in Construction Materials, 16, e00914. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00914