

Evaluasi Performa Lapisan AC-BC Akibat Eksposur tanpa Penutupan AC-WC

**Muhammad Reza Hasrul ^{1*}, Rizki Ayu Saraswati ², Mohammad Junaedy Rahman ¹,
Furqan Ali Yusuf ¹ Ahmad Wahidiyat Haedar ³, Iriandy ³, Ali Fauzi Mahmuda ⁴**

1) Program Studi Teknik Sipil Bangunan Gedung, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Makassar, Makassar

2) Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia, Makassar

3) Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Makassar, Makassar

4) Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat, Majene

*mrezahassrul@unm.ac.id

Diajukan : 11 Januari 2025, Revisi : 18 Februari 2025, Diterima : 22 Februari 2025

Abstract

This study evaluates the impact of exposure on the Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC) layer without the Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC) overlay over two years on its mechanical properties and density. Exposure to traffic loads and environmental conditions, such as UV radiation, rainfall, and temperature fluctuations, potentially causes significant degradation. Samples were tested using the Marshall method to analyze stability, flow, air voids, VMA, VFB, and Marshall Quotient, with field data compared to initial laboratory data before. The results indicate a reduction in relative density from 98% to 92–94%, as well as changes in aggregate gradation, particularly in the medium and coarse fractions. Stability was recorded at 3709.99 kg, significantly exceeding the minimum specification of 800 kg, but the flow of 5.77 mm exceeded the 2–4 mm specification range, suggesting a higher tendency for plastic deformation. This study emphasizes the importance of promptly covering the AC-BC with AC-WC to prevent further degradation. Recommendations include the application of a seal coat as a temporary mitigation measure. These findings offer strategic insights for more efficient and durable road infrastructure planning.

Keywords: AC-BC layer exposure, mechanical performance, AC-WC overlay, Marshall testing

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi dampak eksposur lapisan AC-BC (Asphalt Concrete – Binder Course) tanpa penutupan AC-WC (Asphalt Concrete – Wearing Course) selama dua tahun terhadap karakteristik mekanis dan kepadatan material. Eksposur terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan, seperti sinar UV, hujan, dan fluktuasi suhu, berpotensi menyebabkan degradasi signifikan. Sampel diuji menggunakan metode Marshall untuk menganalisis stabilitas, flow, air void, VMA, VFB, dan Marshall Quotient, dengan pengambilan data lapangan yang dibandingkan terhadap data awal. Hasil menunjukkan penurunan kepadatan relatif dari 98% menjadi 92–94%, serta perubahan distribusi gradasi agregat, khususnya pada fraksi menengah dan kasar. Stabilitas lapisan tercatat sebesar 3709,99 kg, jauh di atas spesifikasi minimum 800 kg, tetapi flow sebesar 5,77 mm melebihi rentang spesifikasi 2–4 mm, menandakan deformasi plastis yang lebih tinggi. Penelitian ini menegaskan pentingnya penutupan AC-BC dengan AC-WC segera setelah pengerjaan untuk mencegah degradasi lebih lanjut. Rekomendasi juga mencakup pengaplikasian seal coat sebagai mitigasi sementara. Hasil ini memberikan wawasan strategis dalam perencanaan infrastruktur jalan yang lebih efisien dan tahan lama.

Kata Kunci: Eksposur lapisan AC-BC, performa mekanis, penutupan AC-WC, pengujian Marshall

1. PENDAHULUAN

Lapisan perkerasan jalan memiliki peran strategis dalam mendukung keberlanjutan transportasi, efisiensi mobilitas, dan keselamatan pengguna jalan. Salah satu komponen penting dalam struktur perkerasan jalan adalah lapisan AC-BC (Asphalt Concrete – Binder Course), yang berfungsi sebagai pengikat antara lapisan pondasi bawah dan lapisan permukaan AC-WC (Asphalt Concrete – Wearing Course). Lapisan ini dirancang untuk menahan beban lalu lintas dan memberikan daya dukung struktural yang kuat. Namun, dalam praktik konstruksi, sering kali ditemukan bahwa lapisan AC-BC dibiarkan terbuka untuk open traffic sebelum dilapisi AC-WC. Kondisi ini biasanya terjadi akibat keterbatasan waktu penyelesaian proyek, kendala teknis, atau keputusan operasional lainnya (Baliello and Wang, 2024; Haoran et al., 2024; Liang et al., 2024; Lin et al., 2020; Milad et al., 2022; Siva Rama Krishna et al., 2024).

Eksposur langsung lapisan AC-BC terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan dapat menimbulkan dampak yang signifikan pada performa materialnya. Efek dari open traffic, termasuk beban kendaraan berat, penetrasi air, dan fluktuasi suhu, dapat menyebabkan perubahan kepadatan dan sifat mekanis lapisan aspal. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa tanpa perlindungan lapisan AC-WC, AC-BC lebih rentan terhadap deformasi plastis, pengikisan, dan retak akibat tegangan berulang (Al Bacha et al., 2023; Brondani et al., 2023; Crawford et al., 2023; Mączka and Mackiewicz, 2022; Tlegenov et al., 2024; Yu et al., 2023). Retensi sifat-sifat mekanis seperti stabilitas dan flow, yang diukur menggunakan metode Marshall, menjadi indikator utama untuk mengevaluasi dampak eksposur ini.

Pengujian Marshall telah lama digunakan sebagai metode standar untuk menilai performa perkerasan aspal, meliputi parameter seperti stabilitas, flow, kepadatan, dan voids (Azarhoosh and Pouresmaeil, 2020; Pucca et al., 2022; Sun et al., 2023; Uglia and Ismael, 2023). Stabilitas mengukur kemampuan lapisan aspal untuk menahan deformasi di bawah beban, sementara flow menggambarkan fleksibilitas material. Pada lapisan yang terpapar open traffic tanpa AC-WC, penelitian menunjukkan penurunan stabilitas dan peningkatan flow, yang mencerminkan penurunan kekakuan dan ketahanan terhadap beban lalu lintas (Abu Abdo et al., 2010; Aljassar et al., 2004; Irianto et al., 2024; Partl, 2020). Selain itu, degradasi pada lapisan AC-BC juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti air, garam, dan siklus pembekuan-pencairan. Penelitian menunjukkan bahwa interaksi air dan garam dapat mempercepat proses kerusakan, termasuk pelemahan adhesi antara aspal dan agregat (Mączka & Mackiewicz, 2022). Kerusakan ini dapat memengaruhi modulus kekakuan dan daya tahan keseluruhan perkerasan (Hou et al., 2022; Lin et al., 2020).

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan kontribusi penting dalam menunjukkan urgensi perencanaan perkerasan jalan yang lebih baik. Melalui hasil penelitian, akan ditekankan pentingnya mencegah praktik yang membiarkan lapisan AC-BC terbuka tanpa perlindungan lapisan AC-WC. Dengan perencanaan yang tepat, risiko kerusakan dini dapat diminimalkan, sehingga meningkatkan umur layanan perkerasan dan efisiensi anggaran perawatan jalan (Partl, 2020; Rúa et al., 2022). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan kepadatan dan sifat-sifat Marshall pada lapisan AC-BC sebelum dan sesudah open traffic tanpa penutupan AC-WC. Dengan menganalisis perubahan stabilitas, flow, dan kepadatan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi strategis untuk perencanaan dan pengelolaan infrastruktur jalan yang lebih efektif.

2. MATERIAL DAN METODE

A. Material

Penelitian ini menggunakan material utama berupa campuran aspal panas dengan formulasi AC-BC (Asphalt Concrete – Binder Course) yang sesuai dengan spesifikasi teknis nasional.

Material yang digunakan meliputi agregat kasar, agregat halus, filler, dan aspal penetrasi 60/70 sebagai pengikat. Semua material diuji terlebih dahulu untuk memastikan memenuhi standar spesifikasi, seperti gradasi agregat, berat jenis, dan karakteristik viskositas aspal. Sampel material diambil dari lokasi untuk memastikan kesesuaian dengan kondisi lapangan.

B. Metode

Penelitian ini dilakukan melalui serangkaian langkah sistematis untuk mengevaluasi dampak eksposur lapisan AC-BC tanpa penutupan AC-WC. Langkah pertama adalah pengambilan sampel menggunakan alat core drill langsung dari lokasi penelitian. Sampel ini kemudian diuji di laboratorium untuk mengukur parameter-parameter penting, seperti stabilitas, flow, kepadatan, dan voids, serta density lapisan. Pengujian laboratorium dilakukan sesuai dengan standar SNI 2489:2018 guna memastikan validitas dan akurasi hasil pengukuran. Tahap berikutnya melibatkan perbandingan antara data hasil pengujian dengan data awal lapisan AC-BC yang diperoleh sebelum open traffic dengan titik pengambilan yang sama baik jarak dan posisi titik. Data awal ini diambil dari catatan resmi yang disediakan oleh dinas setempat dan digunakan sebagai acuan untuk menilai perubahan performa lapisan. Dengan membandingkan parameter-parameter seperti gradasi, density dan sifat-sifat marshall sebelum dan setelah eksposur, penelitian ini mampu mengevaluasi secara komprehensif dampak eksposur terhadap performa lapisan AC-BC tanpa penutupan AC-WC.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

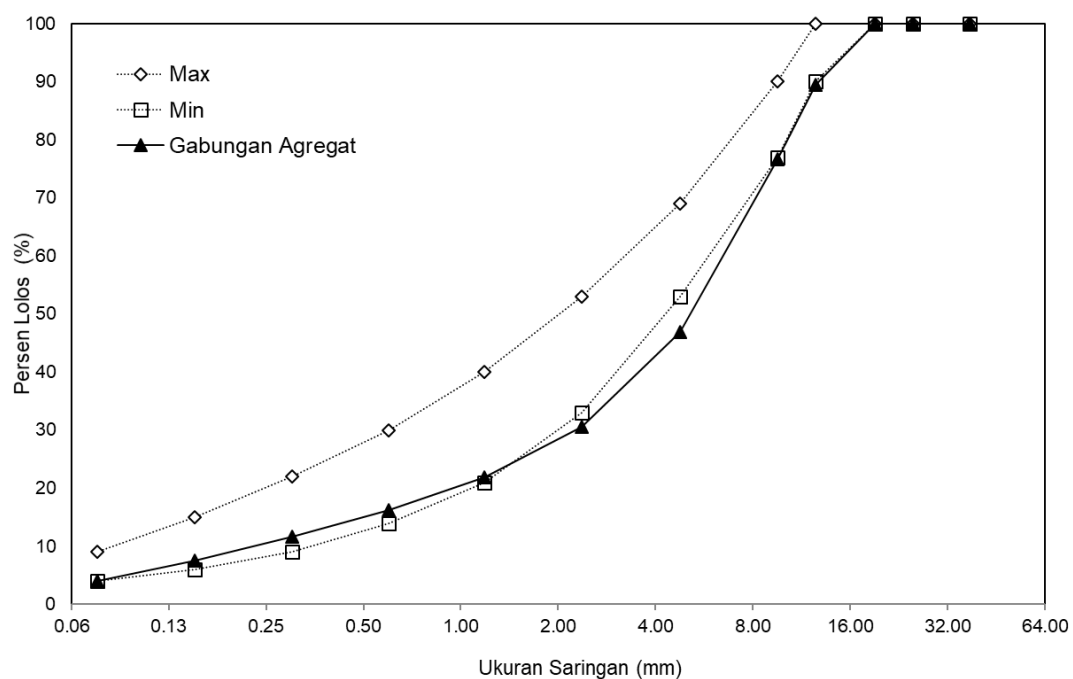
A. Gradasi

Hasil evaluasi perubahan gradasi agregat pada lapisan AC-BC setelah dua tahun eksposur tanpa penutupan AC-WC pada **Gambar 1** menunjukkan hasil analisis saringan gabungan agregat lapisan AC-BC setelah dua tahun eksposur tanpa penutupan AC-WC. Secara umum, hasil menunjukkan bahwa gradasi gabungan agregat masih berada dalam batas spesifikasi maksimum dan minimum yang ditentukan. Namun, terdapat beberapa ukuran agregat yang berada di luar batas minimum spesifikasi, khususnya pada ukuran saringan 1,18 mm dan 12,50 mm, di mana persentase lolos agregat lebih rendah daripada batas minimum. Hal ini mengindikasikan bahwa lapisan *binder course* mengalami degradasi, khususnya pada fraksi menengah dan kasar, yang berkontribusi pada pergeseran distribusi gradasi agregat ke arah yang tidak ideal.

Degradasi ini dapat dijelaskan oleh beberapa faktor utama yang berkaitan dengan eksposur langsung terhadap kondisi lingkungan dan beban lalu lintas. Dalam situasi tanpa penutupan AC-WC, lapisan AC-BC terpapar langsung pada hujan, sinar UV, fluktuasi suhu, dan *wet dry cycles*. Kondisi ini meningkatkan laju oksidasi aspal, melemahkan adhesi antara agregat dan aspal, dan menyebabkan pelepasan agregat, terutama pada fraksi menengah dan kasar. Penelitian oleh Maćzka and Mackiewicz (2022) mendukung temuan ini dengan menyebutkan bahwa eksposur langsung pada lapisan *binder course* mempercepat pengikisan agregat akibat penurunan kohesi antar-material. Selain itu, beban kendaraan berulang juga berkontribusi pada fragmentasi agregat kasar menjadi partikel yang lebih kecil, sehingga proporsi agregat pada ukuran saringan tertentu menurun secara signifikan. Penurunan ini konsisten dengan studi Partl (2020), yang menemukan bahwa lapisan *binder course* yang dibiarkan terbuka lebih dari enam bulan tanpa perlindungan lapisan permukaan cenderung kehilangan agregat kasar di permukaan, terutama di bawah beban lalu lintas berat. Studi ini menunjukkan bahwa pelepasan agregat kasar pada lapisan *binder* tidak hanya memengaruhi distribusi gradasi, tetapi juga menyebabkan penurunan performa

mekanis lapisan perkerasan secara keseluruhan, seperti penurunan stabilitas dan peningkatan risiko deformasi plastis seperti rutting. Sebaliknya, hasil penelitian oleh Lin et al. (2020) menunjukkan bahwa penggunaan lapisan pelindung AC-WC dapat mempertahankan gradasi gabungan agregat dalam batas spesifikasi lebih lama, dengan mengurangi fragmentasi agregat yang diakibatkan oleh beban berulang.

Agregat kasar yang berada di bawah batas minimum menyebabkan menurunnya efektivitas interlocking antar-agregat, yang merupakan salah satu mekanisme utama dalam menjaga stabilitas struktural perkerasan. Penurunan interlocking ini meningkatkan risiko deformasi permanen pada lapisan perkerasan, terutama di lokasi dengan beban lalu lintas tinggi. Selain itu, gradasi agregat yang kurang optimal juga dapat memengaruhi air void pada campuran, meningkatkan risiko penetrasi air yang dapat menyebabkan stripping, yaitu pelepasan adhesi agregat dengan aspal. Hasil ini menegaskan bahwa meskipun distribusi gradasi gabungan agregat sebagian besar masih berada dalam spesifikasi, degradasi yang terjadi pada beberapa fraksi agregat perlu mendapat perhatian khusus. Untuk mengurangi risiko lebih lanjut, sangat penting untuk menutup lapisan AC-BC dengan AC-WC segera setelah pengerjaan selesai. Penambahan perlindungan sementara seperti seal coat juga dapat dipertimbangkan untuk mengurangi efek eksposur lingkungan dan beban lalu lintas. Penelitian ini memberikan bukti bahwa tanpa perlindungan yang memadai, distribusi gradasi material dapat berubah secara signifikan, yang pada akhirnya menurunkan performa perkerasan jalan dalam jangka panjang. Hal ini menggarisbawahi pentingnya perencanaan konstruksi jalan yang lebih baik untuk menjaga kualitas dan durabilitas lapisan binder course.



Gambar 1 Grafik Analisis Saringan Gabungan Agregat Lapisan AC-BC Tahun 2024 Tanpa Penutupan AC-WC

B. Density

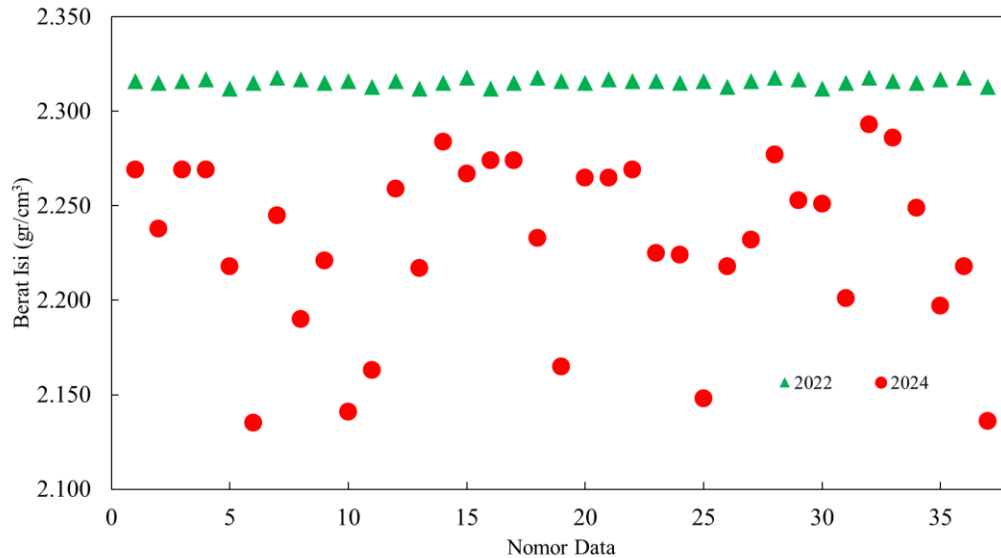
Hasil evaluasi perubahan kepadatan lapisan AC-BC selama dua tahun setelah pengerjaan tanpa penutupan AC-WC. Perubahan ini diamati melalui analisis berat isi dan persentase kepadatan relatif terhadap nilai referensi laboratorium. **Gambar 2** dan **Gambar 3** memberikan representasi visual tentang perubahan karakteristik material lapisan AC-BC setelah dua tahun eksposur tanpa penutupan AC-WC, yaitu pada tahun 2022 dibandingkan dengan tahun 2024. **Gambar 2** menunjukkan perbandingan berat isi (*density*) lapisan AC-BC dalam satuan gr/cm^3 , sementara **Gambar 3** menggambarkan persentase kepadatan relatif (*density %*) terhadap nilai referensi laboratorium. Hasil dari kedua grafik ini memberikan gambaran penting mengenai degradasi material yang terjadi selama dua tahun masa eksposur tanpa pelindung.

Pada **Gambar 2**, berat isi pada tahun 2022 cenderung stabil dengan rata-rata mendekati $2,300 \text{ gr/cm}^3$. Kondisi ini menunjukkan bahwa lapisan AC-BC setelah proses pemadatan awal memiliki kualitas yang optimal dan memenuhi spesifikasi teknis. Namun, pada tahun 2024, berat isi material menunjukkan fluktuasi yang signifikan, dengan sebagian besar nilai berada di bawah $2,250 \text{ gr/cm}^3$. Beberapa data bahkan mendekati batas bawah $2,150 \text{ gr/cm}^3$. Fluktuasi ini mengindikasikan terjadinya degradasi material secara signifikan selama masa eksposur dua tahun, di mana pelepasan material pengikat (aspal) dan agregat menjadi salah satu faktor utama penyebab penurunan berat isi. Penelitian oleh Mączka and Mackiewicz (2022) menunjukkan bahwa degradasi aspal binder akibat paparan sinar UV, hujan, dan suhu ekstrem menyebabkan penurunan densitas lapisan binder.

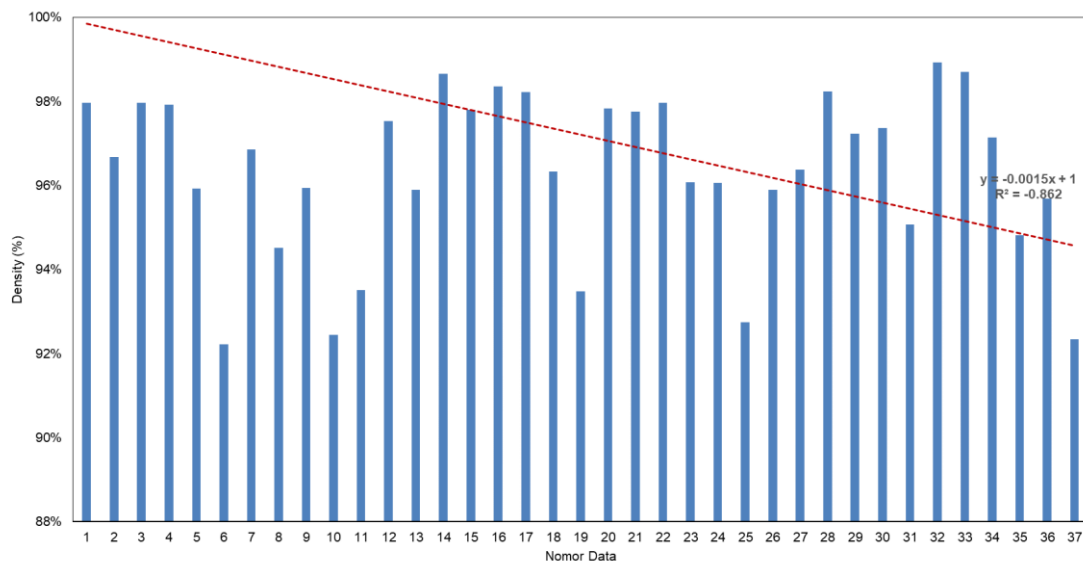
Gambar 3 mendukung analisis ini dengan menunjukkan persentase kepadatan relatif (*density %*) terhadap nilai referensi laboratorium. Pada tahun 2022, hampir semua data menunjukkan kepadatan di atas 98%, yang berarti bahwa lapisan AC-BC memiliki tingkat pemadatan yang baik sesuai dengan nilai standar. Namun, pada tahun 2024, rata-rata kepadatan turun menjadi 92–94%, dengan tren penurunan yang signifikan terlihat dari garis regresi linear ($y = -0.015x + 1$, $R^2 = 0.862$). Penurunan ini menunjukkan bahwa degradasi material terjadi secara konsisten di seluruh lapisan jalan. Penurunan *density* ini berimplikasi pada pengurangan interlocking antar-agregat, yang merupakan mekanisme utama dalam mempertahankan stabilitas struktural. Studi oleh Lin et al. (2020) menjelaskan bahwa *wet dry cycles* dan beban kendaraan berulang mempercepat pelepasan agregat halus, sehingga kepadatan lapisan binder secara keseluruhan menurun lebih cepat jika tidak dilindungi oleh lapisan permukaan seperti AC-WC. Penurunan berat isi dan kepadatan ini memiliki dampak langsung pada performa lapisan AC-BC. Ketika kepadatan material menurun, interlocking antar-agregat menjadi kurang efektif, yang meningkatkan risiko deformasi permanen seperti rutting. Selain itu, peningkatan air void akibat penurunan kepadatan dapat menyebabkan penurunan stabilitas campuran karena kelembapan lebih mudah meresap ke dalam lapisan, yang berujung pada stripping atau pelepasan adhesi antara aspal dan agregat. Penelitian oleh Partl (2020) mendukung hal ini dengan menyebutkan bahwa penurunan *density* secara signifikan dapat mempercepat kerusakan akibat kelelahan material pada lapisan binder course, terutama di bawah beban kendaraan berat.

Hasil dari **Gambar 2** dan **Gambar 3** juga menunjukkan bahwa tren degradasi pada material lapisan AC-BC selama dua tahun eksposur tanpa penutupan lebih signifikan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya pada lapisan binder yang dilindungi AC-WC. Studi oleh Perucca et al. (2022) menunjukkan bahwa perlindungan tambahan pada lapisan binder dengan AC-WC mampu mempertahankan densitas dan kepadatan relatif material hingga lebih dari 95% selama periode yang sama. Hasil ini menggarisbawahi pentingnya penutupan lapisan AC-BC dengan AC-WC untuk mempertahankan densitas dan kepadatan material yang optimal. Tanpa perlindungan yang memadai, lapisan AC-BC mengalami degradasi yang signifikan dalam waktu dua tahun, yang mengurangi stabilitas struktural dan

mempercepat kerusakan perkerasan jalan. Rekomendasi untuk pengaplikasian lapisan pelindung, baik AC-WC atau *seal coat* sementara, menjadi sangat penting untuk memastikan umur layanan lapisan binder dapat mencapai estimasi desain. Hal ini mendukung pentingnya perencanaan konstruksi jalan yang lebih baik guna mengurangi dampak lingkungan dan lalu lintas pada material jalan.



Gambar 2 Perbandingan Berat Isi Lapisan AC-BC antara Tahun 2022 dan 2024.



Gambar 3 Perubahan Kepadatan Relatif (%) Lapisan AC-BC terhadap Nilai Referensi Laboratorium (2022–2024).

C. Sifat Marshall

Hasil evaluasi performa mekanis lapisan AC-BC yang diuji berdasarkan parameter Marshall, termasuk stabilitas, *air void*, VMA, VFB, flow, dan *Marshall Quotient*. Evaluasi ini dilakukan untuk memastikan kesesuaian hasil dengan spesifikasi yang telah ditetapkan.

Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian Marshall yang dibandingkan dengan spesifikasi standar untuk lapisan AC-BC. Hasil pengujian pada **Tabel 1** menunjukkan performa mekanis campuran AC-BC yang diuji berdasarkan parameter stabilitas, *air void*, VMA, VFB, flow, dan *Marshall Quotient*. Stabilitas yang diperoleh sebesar 3709,99 kg, jauh di atas spesifikasi minimum 800 kg, menunjukkan bahwa campuran memiliki ketahanan yang cukup terhadap deformasi akibat beban lalu lintas. Hasil ini mengindikasikan kualitas campuran yang baik dalam mendistribusikan beban tanpa menyebabkan kerusakan struktural signifikan. Air void terukur sebesar 3,39%, berada dalam rentang spesifikasi 3,0–5,0%, menunjukkan jumlah rongga udara yang cukup untuk mencegah kerusakan akibat ekspansi termal dan penetrasi air. Nilai VMA (*Voids in Mineral Aggregate*) sebesar 15,6%, yang melampaui spesifikasi minimum 14%, menunjukkan bahwa volume rongga antar-agregat cukup untuk mengakomodasi *binder* aspal dengan optimal. VFB (*Voids Filled with Bitumen*) juga mencatat nilai 77,82%, jauh di atas spesifikasi minimum 65%, mengindikasikan hampir seluruh rongga telah terisi aspal, sehingga meningkatkan daya tahan campuran terhadap retak dan deformasi akibat pembebanan berulang. Penelitian oleh Perucca et al. (2022) mendukung bahwa VMA dan VFB yang tinggi meningkatkan ketahanan jangka panjang terhadap retakan dan keausan campuran. Namun, nilai flow yang diperoleh sebesar 5,77 mm sedikit melebihi rentang spesifikasi 2–4 mm, mengindikasikan adanya kecenderungan deformasi plastis yang lebih tinggi dari spesifikasi. Flow yang tinggi dapat memengaruhi ketahanan terhadap *rutting*, terutama di area dengan beban lalu lintas berat. Penelitian oleh Partl (2020) menjelaskan bahwa kontrol flow yang baik selama proses pencampuran dan pemadatan sangat penting untuk mengurangi deformasi permanen dan mempertahankan umur desain perkerasan. *Marshall Quotient* (MQ), yang mencerminkan rasio stabilitas terhadap flow, mencatat nilai 3709,99 kg/mm, jauh di atas spesifikasi minimum 250 kg/mm. Nilai MQ yang tinggi menunjukkan bahwa meskipun flow sedikit melebihi spesifikasi, kekuatan struktural material tetap memadai. Lin et al. (2020) menegaskan bahwa MQ yang tinggi mencerminkan performa optimal material dalam menahan beban dinamis maupun statis tanpa menyebabkan kerusakan signifikan.

Secara keseluruhan, **Tabel 1** memberikan bukti kuat bahwa campuran AC-BC pada penelitian ini memiliki performa mekanis yang cukup untuk digunakan sebagai lapisan perkerasan jalan. Meskipun demikian, perhatian lebih perlu diberikan pada kontrol deformasi plastis untuk memastikan bahwa flow tetap berada dalam rentang spesifikasi, sehingga kinerja optimal dapat dipertahankan dalam jangka panjang. Temuan ini memperkuat pentingnya pengendalian kualitas selama proses pencampuran dan pemadatan material AC-BC dan dilanjutkan dengan pelapisan AC-WC.

Tabel 1 Hasil Pengujian Marshall pada Lapisan AC-BC dibandingkan dengan Spesifikasi

Deskripsi		Hasil	Spesifikasi
Stability	Kg	3709.99	>800
Air Void	%	3.39	3.0 - 5.0
VMA	%	15.6	min 14
VFB	%	77.82	min 65
Flow	mm	5.77	2 - 4
Marshall Quotient	Kg/mm	3709.99	min 250

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengevaluasi dampak eksposur dua tahun pada lapisan AC-BC tanpa penutupan AC-WC terhadap perubahan karakteristik material, termasuk gradasi agregat, kepadatan, dan sifat mekanis yang diuji melalui metode Marshall. Hasil penelitian menunjukkan bahwa degradasi material terjadi secara signifikan pada kondisi open traffic, yang ditandai dengan perubahan distribusi gradasi agregat, penurunan berat isi, dan kepadatan relatif, serta perubahan sifat-sifat mekanis lapisan.

Gradasi agregat menunjukkan adanya ukuran agregat tertentu yang berada di luar batas spesifikasi minimum, khususnya pada fraksi menengah dan kasar. Hal ini disebabkan oleh pelepasan agregat akibat eksposur lingkungan, termasuk siklus basah-kering, hujan, dan beban kendaraan berulang. Temuan ini mengindikasikan perlunya perlindungan segera untuk mencegah degradasi yang lebih parah, mengingat gradasi agregat yang tidak ideal berpotensi menurunkan efektivitas interlocking antar-agregat.

Penurunan kepadatan relatif hingga sekitar 92–94% pada tahun 2024 dibandingkan dengan 98% pada tahun 2022 menunjukkan pengaruh eksposur terhadap integritas struktural lapisan. Penurunan ini secara langsung memengaruhi kemampuan lapisan untuk mendukung beban lalu lintas, yang meningkatkan risiko deformasi permanen seperti rutting dan stripping. Penurunan densitas ini juga sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyebutkan bahwa degradasi binder course tanpa penutupan lebih cepat terjadi karena pengaruh kondisi lingkungan dan beban lalu lintas.

Hasil uji Marshall mengonfirmasi bahwa meskipun stabilitas dan *Marshall Quotient* (MQ) jauh melampaui spesifikasi minimum, flow yang sedikit melebihi batas menunjukkan potensi deformasi plastis yang lebih besar. Parameter seperti VMA dan VFB menunjukkan kepatuhan terhadap spesifikasi, yang mencerminkan bahwa campuran AC-BC tetap memiliki kualitas adhesi yang baik, meskipun eksposur jangka panjang mulai memengaruhi struktur material.

Kesimpulan dari penelitian ini menegaskan pentingnya menutup lapisan AC-BC dengan AC-WC segera setelah pengerjaan untuk mempertahankan kualitas material dan menghindari kerusakan dini. Pengaplikasian seal coat sebagai perlindungan sementara juga direkomendasikan sebagai langkah mitigasi untuk meminimalkan dampak lingkungan selama periode open traffic. Hasil ini memberikan kontribusi penting dalam menyusun strategi perencanaan dan pengelolaan infrastruktur jalan yang lebih efektif, guna meningkatkan durabilitas dan efisiensi operasional perkerasan jalan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abu Abdo, A. M., Bayomy, F., Nielsen, R., Weaver, T., Jung, S. J., & Santi, M. (2010). Development and evaluation of hot mix asphalt stability index. *International Journal of Pavement Engineering*, 11(6), 529–539. <https://doi.org/10.1080/10298436.2010.488728>
- Al Bacha, M., Horny, P., Nguyen, M.-L., Chupin, O., & Hammoum, F. (2023). Evaluation of the influence of interface bonding condition on mechanical responses of bituminous pavement surface layers. *Transportation Engineering*, 14, 100211. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100211>
- Aljassar, A. H., Metwali †, S., & Ali ‡, M. A. (2004). Effect of Filler Types on Marshall Stability and Retained Strength of Asphalt Concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, 5(1), 47–51. <https://doi.org/10.1080/10298430410001733491>

- Azarhoosh, A., & Pouresmaeil, S. (2020). Prediction of Marshall Mix Design Parameters in Flexible Pavements Using Genetic Programming. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(10), 8427–8441. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04776-0>
- Baliello, A., & Wang, D. (2024). Advances in Road Engineering: Innovation in Road Pavements and Materials. *Buildings*, 14(7), 2250. <https://doi.org/10.3390/buildings14072250>
- Brondani, C., Faccin, C., Specht, L. P., Nummer, A. V., Da Silva Pereira, D., Vestena, P. M., & Baroni, M. (2023). Evaluation of Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures: Influence of Aggregates, Visual Analysis, and Mechanical Tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(2), 04022433. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004603](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004603)
- Crawford, A. C., Kriech, D. M., Smith, L. A., Osborn, L. V., & Kriech, A. J. (2023). Assessing the effects of sunlight and water on asphalt binder and pavement leachability related to the environment. *Journal of Environmental Management*, 345, 118638. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118638>
- Haoran, Z., Zidong, Z., Min, W., Xin, Y., Yongxin, W., Chen, C., & Jun, Q. (2024). Integrated design optimization method for pavement structure and materials based on further development of finite element and particle swarm optimization algorithm. *Construction and Building Materials*, 426, 136080. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136080>
- Hou, S., Deng, Y., Jin, R., Shi, X., & Luo, X. (2022). Relationships between Physical, Mechanical and Acoustic Properties of Asphalt Mixtures Using Ultrasonic Testing. *Buildings*, 12(3), 306. <https://doi.org/10.3390/buildings12030306>
- Irianto, ., Tumpu, M., & Lapian, F. E. P. (2024). Asphalt Mix Compressive Stress-Strain Behavior: An Analytical and Experimental Study of Variable Influence. *Civil Engineering Journal*, 10(5), 1525–1542. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-05-011>
- Liang, Y., Ma, S., & Zhang, Y. (2024). Interlayer Performance, Viscoelastic Performance, and Road Performance Based on High-Performance Asphalt Composite Structures. *Buildings*, 14(7), 1885. <https://doi.org/10.3390/buildings14071885>
- Lin, P., Huang, W., Liu, X., Apostolids, P., Wang, H., & Yan, C. (2020). Laboratory Evaluation of the Effects of Long-Term Aging on High-Content Polymer-Modified Asphalt Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(7), 04020157. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003208](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003208)
- Mączka, E., & Mackiewicz, P. (2022). Asphalt Mixtures and Flexible Pavement Construction Degradation Considering Different Environmental Factors. *Applied Sciences*, 12(23), 12068. <https://doi.org/10.3390/app122312068>
- Milad, A., Babalghaith, A. M., Al-Sabaei, A. M., Dulaimi, A., Ali, A., Reddy, S. S., Bilema, M., & Yusoff, N. I. M. (2022). A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), 14863. <https://doi.org/10.3390/ijerph192214863>
- Partl, M. N. (2020). Quest for improving service life of asphalt roads. *RILEM Technical Letters*, 4, 154–162. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.102>
- Perucca, M., Capuano, L., Magatti, G., Rosa, F., & Mantecca, P. (2022). Environmental Performance of Road Asphalts Modified with End-of-Life Hard Plastics and Graphene: Strategies for Improving Sustainability. *Processes*, 10(10), 2151. <https://doi.org/10.3390/pr10102151>

- Rúa, E., Comesaña-Cebral, L., Arias, P., & Martínez-Sánchez, J. (2022). A top-down approach for a multi-scale identification of risk areas in infrastructures: Particularization in a case study on road safety. *European Transport Research Review*, 14(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00563-0>
- Siva Rama Krishna, U., Badiger, M., Chaudhary, Y., Vijaya Gowri, T., & Jahnavi Devi, E. (2024). Optimizing roads for sustainability: Inverted pavement design with life cycle cost analysis and carbon footprint estimation. *International Journal of Transportation Science and Technology*, S2046043024000431. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2024.04.008>
- Sun, C., Li, P., Niu, B., Xu, Y., & Zhang, W. (2023). Structure stability and shear failure behaviors of asphalt mixtures from the perspective of aggregate particle migration. *Construction and Building Materials*, 408, 133653. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133653>
- Tlegenov, R., Konkanov, M., Jexembayeva, A., & Korniejenko, K. (2024). Application of micro and nano modifying additives in road construction materials. *Technobius*, 4(4), 0066. <https://doi.org/10.54355/tbus/4.4.2024.0066>
- Ugla, S. K., & Ismael, M. Q. (2023). Evaluating the Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures Containing RCA and Modified by Waste Alumina. *Civil Engineering Journal*, 9, 250–262. <https://doi.org/10.28991/CEJ-SP2023-09-019>
- Yu, M., Yang, Z., You, Z., Luo, Y., Li, J., & Yang, L. (2023). Laboratory investigation of traffic effect on the long-term skid resistance of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 401, 132642. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132642>