

PENGARUH PASIR PARANGTRITIS DENGAN BIOCHAR SEKAM PADI TERHADAP STABILITAS DAN DURABILITAS CAMPURAN AC-WC

Anggraini Dewi Kusumaningtyas^{1,*}, Agus Riyanto¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A. Yani, Mendungan, Pabelan, Kec. Kartasura, Kabupaten Sukoharjo, Jawa Tengah 57169

*Corresponding authors: tyas.adk@gmail.com

Abstract: This study aims to analyze the effect of using Parangtritis beach sand as fine aggregate and rice husk biochar as an additive on the stability and durability of Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) mixtures. The Optimum Asphalt Content (OAC) was determined using the Arrow Range method with asphalt variations of 4%, 5%, 6%, 7%, and 8%, while beach sand variations of 15%, 30%, and 45% were used to obtain the Optimum Beach Sand Content (OBSC). Marshall Stability tests were conducted with immersion durations of 0, 24, 72, 168, and 336 hours to evaluate stability and durability through the Retained Strength Index (RSI). The results indicate that the mixture meets the 2018 Bina Marga specifications, with an OAC of 6% and an OBSC of 24.25%. The addition of 4% biochar produced the best performance, achieving a stability value of 1,492.59 kg and RSI values of 91.2% (24 hours) and 64.3% (336 hours), indicating an improvement in the stability and durability of the mixture.

Keywords: parangtritis sand, AC WC, rice husk biochar, stability, durability

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan pasir pantai Parangtritis sebagai agregat halus dan biochar sekam padi sebagai bahan aditif terhadap stabilitas dan durabilitas campuran *Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)*. Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) dilakukan dengan metode Arrow Range pada variasi kadar aspal 4%, 5%, 6%, 7%, dan 8%, sedangkan variasi pasir pantai sebesar 15%, 30%, dan 45% digunakan untuk memperoleh Kadar Pasir Pantai Optimum (KPPO). Pengujian Marshall Stability dilakukan dengan variasi perendaman 0, 24, 72, 168, dan 336 jam untuk mengevaluasi stabilitas dan durabilitas melalui parameter Indeks Kekuatan Sisa (IKS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 dengan KAO sebesar 6% dan KPPO sebesar 24,25%. Penambahan biochar sebesar 4% menghasilkan kinerja terbaik dengan stabilitas sebesar 1.492,59 kg serta nilai IKS sebesar 91,2% (24 jam) dan 64,3% (336 jam), yang menunjukkan peningkatan stabilitas dan durabilitas campuran.

Kata kunci : pasir parangtritis, AC WC, biochar sekam padi, stabilitas, durabilitas

1. PENDAHULUAN

Perkerasan jalan dengan campuran beraspal panas (*hotmix*) merupakan salah satu konstruksi yang paling banyak digunakan di Indonesia karena mampu memberikan lapisan permukaan yang kuat dan tahan terhadap beban lalu lintas (Riyanto and Prasetya, 2020). Seiring meningkatnya jumlah kendaraan dan intensitas lalu lintas, lapisan perkerasan aspal, terutama lapis permukaan (*Wearing Course*), sering mengalami penurunan kinerja akibat beban berlebih, variasi cuaca, serta mutu material yang digunakan. Kondisi ini mendorong perlunya inovasi material lokal yang mampu meningkatkan stabilitas dan durabilitas perkerasan jalan tanpa mengorbankan aspek keberlanjutan lingkungan.

Salah satu alternatif inovatif adalah pemanfaatan pasir pantai sebagai agregat halus pengganti sebagian pasir sungai, yang ketersediaannya semakin terbatas. Indonesia, sebagai negara kepulauan, memiliki potensi pasir pantai yang sangat besar dan sebagian besar belum dimanfaatkan secara optimal (Rafianto et al., 2022). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pasir silika pantai dapat digunakan sebagai bahan pengganti agregat halus pada campuran *Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC)*, dengan hasil yang memenuhi spesifikasi Marshall dan menghasilkan nilai Indeks Kekuatan Sisa (IKS) mencapai 93,94% terhadap standar Bina Marga (Nofrianto and Astika, 2023). Salah satu sumber pasir potensial adalah pasir Pantai Parangtritis di Yogyakarta, yang

memiliki kuantitas melimpah dan karakteristik fisik yang memungkinkan untuk digunakan dalam campuran aspal, terutama jika diambil dari lokasi yang tidak langsung terkena abrasi laut.

Meskipun demikian, penggunaan pasir pantai memiliki kelemahan berupa tekstur halus dan kandungan garam yang dapat mempengaruhi ikatan antarpartikel agregat dan aspal. Oleh karena itu, diperlukan bahan tambahan (aditif) yang mampu meningkatkan stabilitas serta ketahanan campuran terhadap pengaruh air dan suhu. Salah satu bahan aditif potensial adalah biochar sekam padi, yaitu karbon padat hasil pirolisis limbah pertanian yang memiliki porositas tinggi, kandungan silika besar, serta kestabilan kimia yang baik (Nurida et al., 2017). Biochar telah terbukti meningkatkan titik lembek, viskositas, dan ketahanan terhadap deformasi permanen pada aspal termodifikasi (Yi et al., 2023), serta memberikan sifat pozzolan yang memperbaiki ikatan antara aspal dan agregat. Kombinasi pasir pantai dan biochar sekam padi dalam campuran AC-WC berpotensi menciptakan material perkerasan yang lebih stabil dan tahan lama terhadap kondisi lingkungan ekstrem. Demikian pula, literatur global mengenai modifikasi aspal dengan biochar menunjukkan bahwa biochar dapat meningkatkan viskositas, modulus kompleks, dan resistensi deformasi permanen, terutama pada iklim tropis (Rondón-Quintana et al., 2022).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan biochar terhadap stabilitas campuran AC-WC dengan menggunakan pasir Parangtritis, perubahan karakteristik campuran akibat kombinasi pasir pantai dan biochar sekam padi, ketahanan atau durabilitas campuran terhadap lama perendaman 0, 24, 72, 168, dan 336 jam; serta menentukan nilai batas atau kondisi kritis durabilitas campuran tersebut. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik tentang potensi penggunaan bahan lokal dan limbah pertanian sebagai material alternatif, sekaligus menjadi referensi bagi pengembangan teknologi perkerasan jalan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan di Indonesia.

Namun, penelitian mengenai kombinasi penggunaan pasir pantai Parangtritis dengan biochar sekam padi pada campuran AC-WC, khususnya dalam mengevaluasi stabilitas dan

durabilitas terhadap perendaman air hujan, masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menganalisis pengaruh kombinasi kedua material tersebut terhadap kinerja campuran.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium yang dimulai dari pengambilan material di lapangan hingga analisis statistik untuk mengevaluasi pengaruh substitusi agregat halus oleh pasir Pantai Parangtritis dan penambahan biochar sekam padi pada campuran AC-WC. Sampel pasir pantai diambil secara representatif dari beberapa titik di Pantai Parangtritis, Bantul, DIY, lalu ditransportasikan ke laboratorium untuk pengujian karakteristik fisiknya (penyerapan, berat jenis) sesuai persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga; langkah ini penting karena karakteristik butir pasir pantai menentukan perilaku campuran hot-mix. Studi terkait penggunaan *beach sand* sebagai pengganti agregat halus dalam campuran aspal mendukung prosedur karakterisasi dan evaluasi awal ini (Pratama and Najihan, 2020).

Sifat dasar binder yang digunakan adalah aspal PEN 60/70, parameter yang diukur meliputi penetrasi, titik lembek, dan berat jenis menurut SNI terkait sebelum dilakukan modifikasi dengan biochar. Biochar sekam padi disiapkan dengan proses penghalusan dan penyaringan hingga partikel $\leq 0,075$ mm (No.200") sesuai protokol ukuran partikel yang dilaporkan berpengaruh terhadap perilaku binder; fraksi biochar yang lolos ayakan kemudian dicampurkan ke binder pada suhu 130-150 °C selama ± 30 menit pada variasi kadar 0 %, 2 %, 4 %, dan 8 % (berdasarkan berat binder) (U et al., 2022). Penggunaan biochar sebagai modifier/*binder additive* telah terbukti mengubah sifat viskoelastis dan meningkatkan ketahanan terhadap deformasi (*rutting*) serta penuaan (Yi et al., 2023). Biochar memiliki struktur unik berpori dan luas permukaan yang tinggi, sehingga dapat meningkatkan daya rekat antara pengikat aspal dan agregat, yang mengarah pada peningkatan sifat mekanik dan daya tahan dari campuran aspal (Zhou, 2023).

Desain eksperimental untuk campuran AC-WC dibuat berurut: (1) penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) pada kadar aspal 4–8 % (langkah *narrow range* dengan 3 replikasi per

kadar menggunakan *Marshall compaction*); (2) penentuan Kadar Pasir Pantai Optimum (KPPO) dengan substitusi agregat halus sebesar 15 %, 30 %, dan 45 % (3 sampel per variasi) diuji dengan metode Marshall; (3) pembuatan rangkaian campuran akhir menggunakan kombinasi KAO + KPPO yang dipilih, lalu menambahkan biochar pada kadar 0, 2, 4, 8 %; untuk setiap kombinasi dibuat 3 sampel. Total sampel uji stabilitas/durabilitas disusun sesuai variasi sehingga memungkinkan analisis statistik. Prosedur pencetakan sampel, kondisioning, dan pengujian stabilitas mengikuti prosedur standar Marshall yang umum dipakai dalam studi bahan modifikasi (Attamimi et al., 2022).

Durabilitas dievaluasi melalui uji perendaman untuk mensimulasikan pengaruh kelembapan/air pada lapisan permukaan; durasi perendaman yang digunakan adalah 0, 24, 72, 168, dan 336 jam dengan menggunakan air hujan. Setelah tiap periode kondisioning, sampel diuji stabilitasnya menggunakan alat Marshall dan dihitung parameter turunan seperti Indeks Kekuatan Sisa (IKS) dan indeks-indeks durabilitas lain yang relevan (IDP, IDK). Metode kondisioning kelembapan dan analisis retensi kekuatan mengikuti pendekatan yang sering dipakai untuk menilai sensitivitas terhadap air pada campuran aspal yang termodifikasi (Yi et al., 2023).

Analisis data meliputi perhitungan statistik deskriptif untuk semua parameter uji, lalu penerapan analisis regresi linier/multivariat dan uji korelasi untuk mengidentifikasi hubungan kuantitatif antara (a) persentase substitusi pasir pantai, (b) kadar biochar, dan (c) durasi perendaman dengan variabel respons (stabilitas Marshall, IKS, IDP, IDK). Selain itu dibangun

model prediktif sederhana untuk memperkirakan stabilitas dan retensi kekuatan berdasarkan komposisi bahan. Pilihan metode regresi ini sesuai praktik penelitian material perkerasan untuk mengkuantifikasi pengaruh proporsi bahan terhadap performa campuran (Zhou et al., 2024).

Terakhir, seluruh prosedur eksperimen, analisis, dan interpretasi hasil direferensikan pada studi-studi mutakhir tentang modifikasi aspal dengan biochar dan penggunaan pasir pantai/laut sebagai agregat halus sehingga temuan dapat ditempatkan dalam konteks literatur nasional dan internasional. Rekomendasi teknik pengambilan sampel, persiapan biochar, dan parameter pengujian disesuaikan dengan temuan-temuan tersebut agar hasil dapat dibandingkan dan direplikasi oleh peneliti lain.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemeriksaan bahan

Pemeriksaan agregat menunjukkan bahwa seluruh fraksi agregat kasar, sedang, dan halus yang digunakan telah memenuhi persyaratan dalam Spesifikasi Bina Marga 2018. Nilai keausan agregat kasar sebesar 27,44% berada jauh di bawah batas maksimum 40%, menunjukkan agregat memiliki ketahanan aus yang baik dan dapat memperkuat kepadatan campuran. Nilai *sand equivalent* agregat halus sebesar 91,43% menunjukkan kebersihan agregat yang sangat tinggi, sehingga mampu memperkuat ikatan dengan aspal. Temuan ini sejalan dengan (Avelia et al., 2025), yang menyatakan bahwa agregat dengan nilai kebersihan tinggi menghasilkan stabilitas campuran *AC-WC* yang lebih optimal. Hasil Pengujian Agregat dengan jenis pengujian tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Agregat

No.	Jenis Pengujian	Agregat Kasar (F1)	Agregat Medium (F2)	Agregat Halus (F3)	Pasir Pantai	Syarat	Keterangan
1	Penyerapan air (<i>Absorbtion</i>)	1,69%	1,42%	2,63%	0,52%	maks. 3%	Memenuhi
2	Berat Jenis	1,909	1,957	2,519	2,945	-	-
3	Keausan agregat kasar	27,44%	-	-	-	maks. 40%	Memenuhi
4	<i>Agregate Impact Value</i>	10,20%	-	-	-	maks. 30%	Memenuhi
5	Pelapukan Agregat	-	9,49%	-	-	maks. 12%	Memenuhi
6	Nilai setara pasir/ <i>Sand equivalent</i>	-	-	91,43%	-	min. 50%	Memenuhi

Aspal penetrasi 60/70 yang digunakan juga memenuhi seluruh persyaratan fisik, dengan nilai penetrasi 66,2 mm dan titik lembek 52°C. Pada aspal yang dicampur biochar (2%, 4%, dan 8%), terjadi peningkatan titik lembek (hingga 56,5°C). Hal ini mengindikasikan bahwa bahan ini mampu meningkatkan titik lembek, viskositas, modulus geser kompleks, dan faktor *rutting* pada aspal yang dimodifikasi komposit dibandingkan aspal modifikasi konvensional, yang berarti potensi peningkatan durabilitas campuran aspal terhadap suhu tinggi dan deformasi permanen (Zhang et al., 2022). Hasil pengujian aspal tanpa penambahan biochar dan dengan penambahan biochar sekam padi tertera pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Pengujian Aspal

No.	Jenis Pemeriksaan	Spesifikasi	Hasil	Satuan	Keterangan
1	Penetrasi	60-70	66,2	mm	Memenuhi
2	Titik Lembek	≥ 48	52	°C	Memenuhi
3	Berat Jenis Aspal	≥ 1	1,05	-	Memenuhi
4	Kelekatan	≥ 95	98	%	Memenuhi

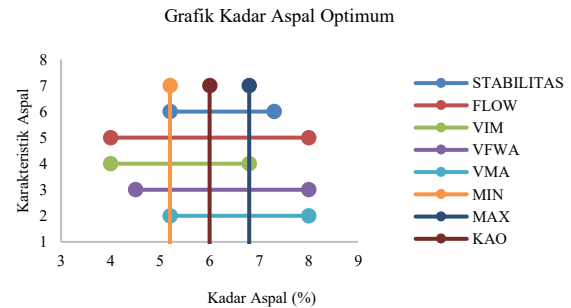
Tabel 3. Hasil Pengujian Aspal dengan Biochar

No.	Jenis Pengujian	Kadar Biochar			Syarat	Keterangan
		2%	4%	8%		
1	Berat Jenis	1,03	1,07	1,11	≥ 1	Memenuhi
2	Penetrasi	63,4	66,4	67	60-70 mm	Memenuhi
3	Titik Lembek	54	56,5	56,5	≥ 48°C	Memenuhi

Penentuan Kadar Aspal Optimum

Pengujian Marshall pada kadar aspal 4%–8% menunjukkan bahwa stabilitas meningkat hingga mencapai nilai optimum pada kadar 6%, sedangkan *flow* berada dalam rentang 2-4 mm. Nilai *VIM* menurun seiring bertambahnya kadar aspal, dan rentang spesifikasi 3–5% terpenuhi pada kadar 4–6,8%. Berdasarkan

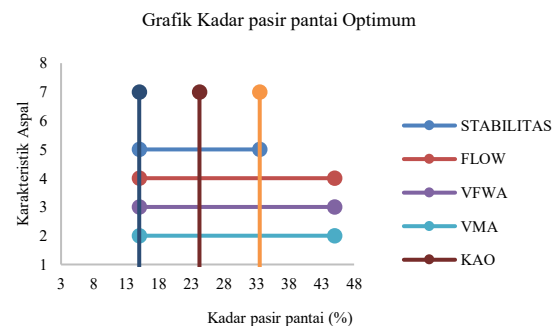
integrasi seluruh parameter (*stabilitas*, *flow*, *MQ*, *VIM*, *VMA*, *VFWA*), kadar aspal optimum ditentukan sebesar 6% yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik Kadar Aspal Optimum

Penentuan kadar pasir pantai optimum

Pasir pantai Parangtritis digunakan sebagai substitusi agregat halus sebesar 15%, 30%, dan 45%. Pengujian Marshall menunjukkan bahwa substitusi hingga 30% masih memenuhi spesifikasi stabilitas dan *flow*, sedangkan substitusi 45% menghasilkan penurunan stabilitas secara signifikan. Nilai optimum berada pada 24,25%, diperoleh dari nilai tengah rentang persyaratan stabilitas, *flow*, *VMA*, dan *VFWA* yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Kadar Pasir Pantai Optimum

Penambahan biochar terhadap stabilitas campuran

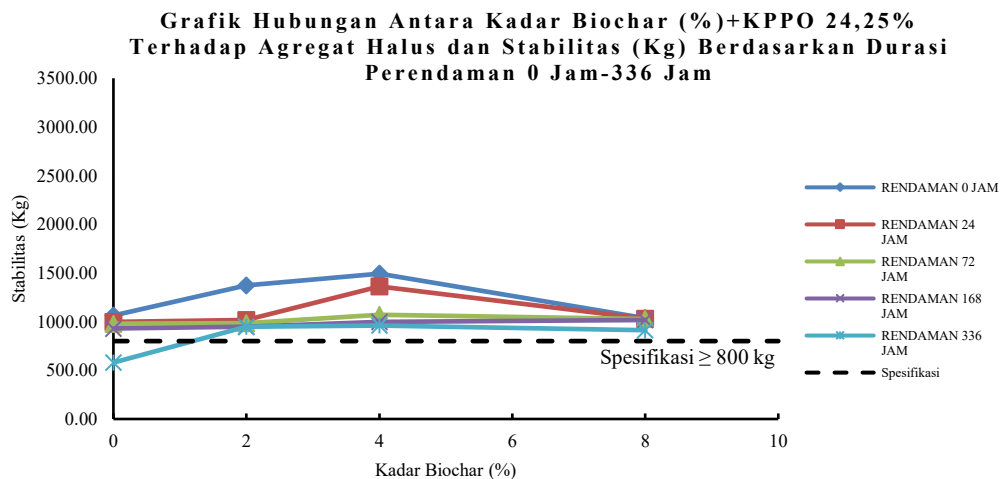
Penambahan biochar sebagai aditif pada aspal meningkatkan stabilitas campuran *AC-WC*, khususnya saat diuji dengan perendaman menggunakan air hujan. Air hujan mengandung ion terlarut dan zat asam ringan, yang dapat

mempercepat pelepasan ikatan aspal-agregat (*stripping*). Biochar, dengan struktur mikropori dan permukaannya yang relatif besar, dapat meningkatkan viskositas aspal, memperkuat adhesi antara aspal dan agregat, serta mengurangi segregasi fraksi ringan aspal saat terkena air. Hal ini terjadi karena biochar memiliki struktur pori yang tinggi yang mampu meningkatkan interaksi antara aspal dan agregat sehingga memperkuat ikatan adhesi. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa penambahan biochar dapat meningkatkan ketahanan terhadap air dan stabilitas campuran aspal (Yaro et al., 2023).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar biochar 4% memberikan stabilitas tertinggi setelah berbagai durasi perendaman (0–

336 jam). Meski terjadi penurunan stabilitas selama perendaman air hujan, nilai tetap berada di atas batas minimum spesifikasi (800 kg), yang menandakan bahwa biochar mampu menjaga integritas ikatan pengikat meskipun dihadapkan pada kondisi kelembapan agresif.

Mekanisme kerja biochar sebagai aditif di sini sejalan dengan penelitian (Rengarasu et al., 2022), yang menemukan bahwa biochar dan karbon terkarbonisasi dari sekam padi mampu mempertahankan lebih dari 80% stabilitas Marshall. Perubahan stabilitas pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.

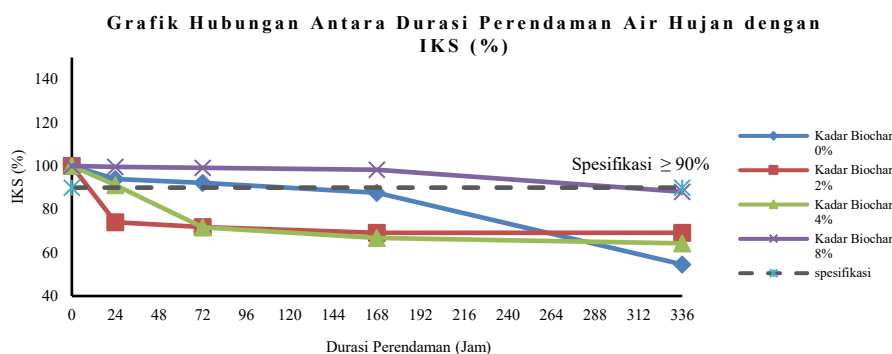


Gambar 3. Grafik Hubungan Antara Kadar Biochar (%) + KPPO 24,25% terhadap Agregat Halus dan Stabilitas (kg) berdasarkan Durasi Perendaman 0 Jam-336 Jam

Durabilitas campuran dengan perendaman air hujan

Analisis durabilitas dilakukan melalui uji perendaman campuran dengan air hujan hingga 336 jam. Adanya air hujan dapat mempercepat degradasi ikatan aspal-agregat melalui mekanisme *stripping* dan oksidasi. Hasil menunjukkan bahwa: Campuran tanpa biochar (0%) mengalami penurunan stabilitas drastis setelah 336 jam (menjadi sekitar 579,59 kg, menunjukkan kerentanan tinggi terhadap efek air hujan jangka panjang; Sementara campuran dengan biochar 2-8% mempertahankan stabilitas di atas

800 kg selama durasi perendaman, yang menandakan bahwa biochar memperlambat kerusakan yang disebabkan oleh air; Kadar biochar 4% tampaknya menawarkan keseimbangan optimal antara stabilitas awal dan ketahanan terhadap penurunan stabilitas akibat perendaman jangka panjang; Kadar biochar 8% menghasilkan Indeks Kekuatan Sisa (IKS) tertinggi, menunjukkan bahwa modifikasi biochar dalam jumlah ini paling efektif dalam mempertahankan sebagian besar kekuatan awal setelah perendaman lama. Hasil IKS pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Hubungan Antara Durasi Perendaman Air Hujan dengan IKS (%)

Mekanisme perlindungan durabilitas ini dapat dijelaskan secara kimia dan mikrostruktur: biochar meningkatkan daya lekat (*adhesi*) aspal ke agregat, mengurangi laju penetrasi air, dan menyediakan kerangka mikropori yang memperlambat infiltrasi air. Selain itu, penelitian oleh (Chaves-Pabón et al., 2024) dengan biochar dari serat mesokarp sawit menunjukkan bahwa biochar dapat meningkatkan resistensi kelembapan (*moisture damage*) dan retak, tanpa menaikkan kadar aspal optimum.

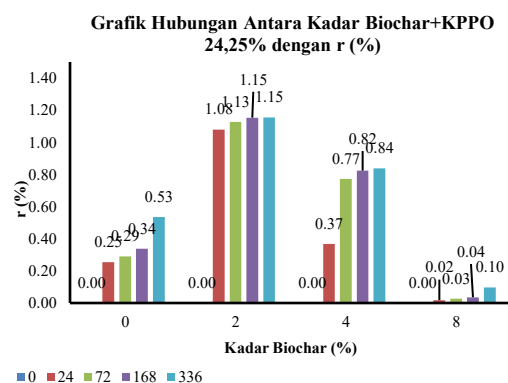
Setelah melihat kecenderungan Indeks Kekuatan Sisa (IKS), evaluasi durabilitas diperkuat melalui analisis Indeks Durabilitas Pertama (IDP) atau nilai r , yang menggambarkan besarnya kehilangan kekuatan relatif terhadap waktu perendaman. Hasil menunjukkan bahwa seluruh variasi kadar biochar memiliki nilai r positif, yang berarti bahwa stabilitas campuran secara umum menurun selama proses perendaman. Hal ini sesuai dengan konsep bahwa air hujan mempercepat pelemahan ikatan adhesi dan kohesi aspal-agregat melalui mekanisme *stripping* (Chaves-Pabón et al., 2024).

Pada campuran tanpa biochar (0%), nilai r dan R meningkat paling tajam, mencerminkan sensitivitas tinggi terhadap air serta ketahanan durabilitas yang rendah. Sebaliknya, kadar biochar 2% dan 4% menunjukkan nilai r yang lebih stabil, dengan penurunan R yang lebih moderat, menandakan bahwa biochar pada kadar ini mampu memperlambat laju degradasi binder, memperkuat ikatan aspal-agregat, dan menjaga stabilitas selama proses perendaman

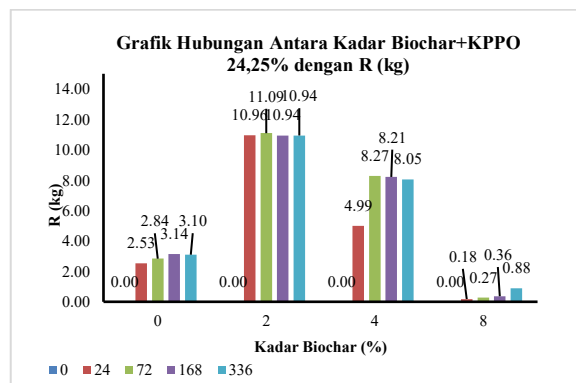
Kadar 8% menghasilkan nilai r dan R yang paling kecil, menunjukkan bahwa kehilangan kekuatan selama perendaman adalah yang paling rendah. Biochar pada kadar tinggi mampu membentuk struktur mikro yang lebih

rapat dan meningkatkan hambatan terhadap infiltrasi air.

Secara keseluruhan, tren penurunan nilai r dan R seiring meningkatnya kadar biochar menegaskan bahwa biochar berperan signifikan dalam meningkatkan durabilitas campuran terhadap air hujan. Kombinasi ini mendukung bahwa biochar merupakan aditif efektif untuk mengontrol kerusakan akibat kelembapan dan memperpanjang umur layanan lapisan aus pada kondisi lingkungan basah. Grafik r dan R dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Grafik Hubungan Antara Kadar Biochar+KPPO 24,25% dengan r (%)



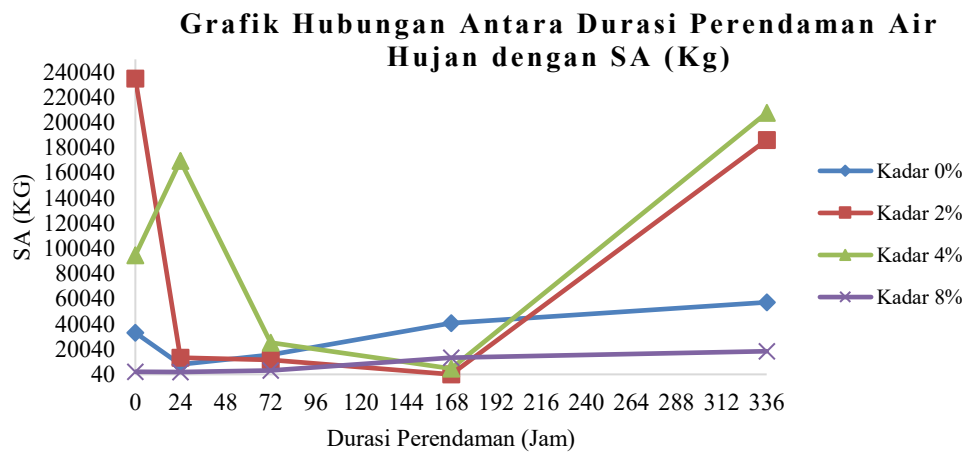
Gambar 6. Grafik Hubungan Antara Kadar Biochar+KPPO 24,25% dengan R (kg)

Analisis IDK menunjukkan kehilangan kekuatan kumulatif selama perendaman air hujan 336 jam. Campuran tanpa biochar (0%) memiliki nilai a (%) tertinggi dan SA yang terus meningkat, menandakan kehilangan kekuatan terbesar akibat stripping dan infiltrasi air. Pada kadar 2%, nilai a (%) tinggi pada awal perendaman namun stabil di durasi berikutnya, menunjukkan peningkatan durabilitas jangka panjang meskipun ketahanan awal belum optimal (Rengarasu et al., 2022).

Kadar 4% menunjukkan fluktuasi nilai IDK, sehingga durabilitas kumulatifnya kurang konsisten meskipun stabilitas awal cukup baik. Sementara itu, kadar 8% memberikan performa terbaik dengan nilai a (%) paling kecil dan SA

yang meningkat secara sangat perlahan, menandakan kehilangan kekuatan paling rendah dan ketahanan air terbaik. Hasil penelitian ini sejalan dengan (Chaves-Pabón et al., 2024) yang mengatakan bahwa biochar berpori tinggi mampu meningkatkan retensi ikatan dan menghambat infiltrasi air.

Secara keseluruhan, peningkatan kadar biochar terbukti mengurangi kehilangan kekuatan kumulatif, dan biochar 8% menjadi kadar paling efektif dalam meningkatkan durabilitas campuran terhadap perendaman air hujan. Untuk memperjelas pola kehilangan kekuatan kumulatif, Gambar 7 akan menyajikan grafik hubungan antara durasi perendaman dan nilai SA pada berbagai kadar biochar



Gambar 7. Grafik Hubungan Antara Durasi Perendaman Air Hujan dengan SA (kg)

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan pasir Pantai Parangtritis dan biochar sekam padi sebagai aditif aspal dapat meningkatkan kinerja campuran AC-WC. Seluruh material memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018, dengan KAO sebesar 6% dan KPPO sebesar 24,25%. Penambahan biochar terbukti meningkatkan stabilitas dan ketahanan campuran, di mana kadar 4% menghasilkan stabilitas tertinggi (1.492,59 kg). Campuran tanpa biochar mengalami penurunan drastis saat perendaman air hujan jangka panjang, sedangkan campuran dengan biochar mempertahankan stabilitas di atas batas minimum. Durabilitas terbaik ditunjukkan oleh biochar 8% dengan IKS tertinggi pada 336 jam, namun biochar 4% memberikan performa paling optimal secara keseluruhan. Dengan demikian, kombinasi pasir pantai optimum dan biochar sebagai aditif memberikan peningkatan stabilitas dan durabilitas yang signifikan, sehingga berpotensi diterapkan sebagai alternatif material perkerasan berkelanjutan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Kepala Laboratorium Transportasi dan Bahan Perkerasan Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta atas fasilitas dan dukungan teknis yang diberikan selama proses pengujian material dan pembuatan sampel. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Dosen Pembimbing, rekan-rekan laboratorium, serta seluruh pihak yang telah memberikan bantuan, masukan, dan arahan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Tidak lupa, apresiasi diberikan kepada pihak-pihak yang menyediakan data pendukung dan literatur ilmiah yang berkontribusi pada penyusunan artikel ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

Attamimi, A., Imran, Djail, I.S. La, Labika, A., 2022. *Analisa Nilai KAO dengan Metode Narrow Range pada Campuran Asphalt concrete-Wearing Course menggunakan Pasir Laut*. Jurnal riset Rumpun Teknik 1, 1–6.

Avelia, G.C., Sulandari, E., Azwansyah, H., 2025. *Pengaruh Karakteristik Agregat Terhadap Kinerja Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC)*. Jurnal Serambi Engineering X.

Chaves-Pabón, S.B., Rondón-Quintana, H.A., Bastidas-Martínez, J.G., 2024. *Mechanical Performance of a Hot Mix Asphalt Modified with*

Biochar Obtained from Oil Palm Mesocarp Fiber. Infrastructures (Basel). 9. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9090156>

- Nofrianto, H., Astika, S.D., 2023. *Kajian Pasir Silika Sebagai Agregat Halus Pada Campuran Asphalt Concrete Wearing Course (Ac – Wc) Berdasarkan Uji Marshall*. Jurnal Teknologi dan Vokasi 1, 53–66. <https://doi.org/10.21063/jtv.2023.1.2.53-66>
- Nurida, L.N., Sutono, Muchtar, 2017. *Pemanfaatan Biochar Kulit Buah Kakao dan Sekam Padi Untuk Meningkatkan Produktivitas Padi Sawah Di Ultisol Lampung*. jurnal pengkajian dan pengembangan teknologi pertanian 20, 69–80.
- Pratama, G.N.I.P.P., Najihan, H.F., 2020. *The Effect of Beach Sands to Replacement of Fine Aggregate with Addition Filler of Ash Cane on the Asphalt Mixture on Marshall Characteristics*. J. Phys. Conf. Ser. 1625. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1625/1/012032>
- Rafianto, A., Yuono, T., Sumina, 2022. *Analisis Pemanfaatan Pasir Pantai Sadranan Sebagai Bahan Tambah Campuran (Ac-Bc) Terhadap Sifat Marshall*. Jurnal Teknik Sipil Dan Arsitektur 27.
- Rengarasu, T.M., Priyankara, S.A.D., Bandara, W.M.K.R.T.W., Jegatheesan, N., 2022. *Use of Carbonized Rice Husk and Bio-char as Binder Modifiers in Hot Mix Asphalt*. Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka 55, 61. <https://doi.org/10.4038/engineer.v55i4.7544>
- Riyanto, A., Prasetya, R.D., 2020. *Pengaruh Kadar Filler Fly Ash Dalam Campuran Ac-Wc Dengan Pasir Pantai Takisung Sebagai Agregat Halus Ditinjau Dari Aspek Ketidakrataan Dan Properties Marshall*. dinamika TEKNIK SIPIL 13, 37–47.
- Rondón-Quintana, H.A., Reyes-Lizcano, F.A., Chaves-Pabón, S.B., Bastidas-Martínez, J.G., Zafra-Mejía, C.A., 2022. *Use of Biochar in Asphalts: Review*. Sustainability (Switzerland). <https://doi.org/10.3390/su14084745>
- U, P.S., Marathe, A., Patil, R., Karanje, A., 2022. *Bio-Bitumen*. Jurnal Penelitian Internasional Teknik dan Teknologi 09.
- Yaro, N.S.A., Sutanto, M.H., Habib, N.Z., Usman, A., Tanjung, L.E., Aliyu, I., Jagaba, A.H., 2023. *Optimizing biochar-based geopolymer composites for enhanced water resistance in asphalt mixes: an experimental, microstructural, and multi-objective analysis*. Journal of Engineering and Applied Science 70. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00323-4>

- Yi, Y., Chen, Y., Shi, S., Zhao, Y., Wang, D., Lei, T., Duan, P., Cao, W., Wang, Q., Li, H., 2023. *Study on Properties and Micro-Mechanism of RHB-SBS Composite-Modified Asphalt*. *Polymers* (Basel). 15. <https://doi.org/10.3390/polym15071718>
- Zhang, R., Wang, Haoxiang, Ji, J., Wang, Hainian, 2022. *Viscoelastic Properties, Rutting Resistance, and Fatigue Resistance of Waste Wood-Based Biochar-Modified Asphalt*. *Coatings* 12. <https://doi.org/10.3390/coatings12010089>
- Zhou, L., 2023. *A Review of Biomass-Derived Biochar and Its Potential in Asphalt Pavement Engineering*. *Materials Science- Poland* 41, 94–109. <https://doi.org/10.2478/msp-2023-0011>
- Zhou, Xinxing, Zhang, Z., Wang, H., Chen, M., Wu, S., Xu, S., Zhou, Xinglin, Ran, M., Li, L., Lu, G., Ma, Z., 2024. *Review on the properties and mechanisms of asphalt modified with bio-oil and biochar*. *Journal of Road Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2024.06>