

# ANALISIS PENGARUH KOMPOSISI OKSIDA ABU SEKAM PADI DAN SERBUK BAN TERHADAP KARAKTERISTIK MARSHALL CAMPURAN *ASPHALT CONCRETE-WEARING COURSE* (AC-WC)

Deby Ansyory<sup>1\*</sup>, Hendrik Jimmyanto<sup>2</sup>, Ramadhani<sup>3</sup>, Desmarita<sup>1</sup>, Siti Anisah<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Institut Teknologi dan Sains Nahdlatul Ulama Sriwijaya

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tridinanti

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas IBA

## Abstract

*The utilization of waste materials as alternative components in pavement construction is continuously being developed to support sustainable development. This study examines the use of Rice Husk Ash (RHA) and Crumb Rubber (CR) as substitute materials in Hot Mix Asphalt (HMA) specifically for Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC). The research investigates the chemical characteristics of these materials through X-Ray Fluorescence (XRF) testing and evaluates their impact on mixture performance based on Marshall parameters. The methodology involved material characterization, the design of Marshall samples with asphalt content variations ranging from 5% to 7%, and Marshall testing on both control samples and modified samples containing a 50% RHA and 50% CR filler substitution. XRF analysis revealed that RHA is predominantly composed of Silica (SiO<sub>2</sub>) at 91.5%, while CR contains 51% Zinc Oxide (ZnO) and 17% Sulfur (SO<sub>3</sub>). Marshall test results indicate that the high silica content in RHA contributes significantly to increasing mixture stability beyond 1400 kg, though it also leads to higher Voids in Mix (VIM). Conversely, the inclusion of CR enhances flexibility and flow values but reduces overall stability due to the elastic properties of sulfur and zinc oxide, which limit the internal bonding of the mixture. This study concludes that the mechanical characteristics of asphalt mixtures are heavily influenced by the chemical interactions of their constituent oxides, where RHA serves as a structural stiffener and CR acts as an elasticity modifier.*

**Keywords :** Oxide Composition, Rice Husk Ash, Crumb Rubber, Marshall Characteristics, XRF Analysis

## 1. PENDAHULUAN

Perkerasan aspal merupakan jenis perkerasan lentur yang paling dominan digunakan, dengan komposisi utama terdiri dari campuran agregat dan bahan pengikat aspal yang diproses pada suhu tinggi, atau lebih dikenal sebagai *Hot Mix Asphalt* (HMA). Namun, kinerja perkerasan HMA sering kali mengalami penurunan akibat berbagai faktor, seperti peningkatan volume lalu lintas yang signifikan, kondisi iklim dan lingkungan yang ekstrem, serta penggunaan material yang kurang tepat (Özel *et al.*, 2023; Ramadhani *et al.*, 2025). Faktor-faktor tersebut memicu kerusakan dini pada jalan, terutama retak leleh dan alur roda. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk meningkatkan karakteristik dari material penyusunnya (Viscione *et al.*, 2022; Jimmyanto *et al.*, 2024).

Dalam upaya meningkatkan efisiensi energi dan mendorong proses penanganan limbah yang lebih ramah lingkungan, sektor konstruksi jalan modern dituntut untuk meminimalkan konsumsi energi serta penghematan material alam (Prathibha *et al.*, 2022). Terbatasnya ketersediaan sumber daya alam non-terbarukan semakin mendorong optimalisasi efisiensi sumber daya melalui pemanfaatan produk sampingan dan material limbah. Salah satu solusi strategis untuk mengatasi tantangan tersebut adalah melalui penggunaan limbah sebagai material alternatif perkerasan guna mendukung peningkatan infrastruktur jalan (Xu *et al.*, 2026; Pujito *et al.*, 2026). Sebagai contoh yaitu akumulasi ban bekas yang dibuang setiap tahun dalam jumlah besar telah menyebabkan penumpukan sampah padat yang signifikan di tempat

pembuangan akhir maupun lahan terbuka. Fenomena ini tidak hanya menimbulkan risiko pencemaran lingkungan yang serius, tetapi juga potensi bahaya kebakaran. Oleh karena itu, berbagai pemerintah di seluruh dunia telah melakukan beragam studi mendalam untuk menemukan metode pembuangan dan pemanfaatan ban bekas yang lebih tepat guna (Wu *et al.*, 2022). Selain sektor industri, penumpukan limbah juga terjadi pada sektor pertanian, salah satunya berupa sekam padi hasil penggilingan beras. Sejauh ini, pemanfaatan sekam padi masih terbatas pada proses pembakaran terbuka, padahal metode tersebut berpotensi mencemari lingkungan dan sumber air di sekitarnya (Abdelmagid *et al.*, 2019). Melihat dari sumber limbah yang dihasilkan, ban bekas walaupun tidak mudah diuraikan dapat dibuat digunakan kembali dalam bentuk ukuran kecil serbuk yang sampai saat ini masih digunakan sebagai alternatif agregat pada campuran beraspal (Bakheit *et al.*, 2019). Sedangkan untuk sekam padi dapat digunakan kembali dengan cara dibakar dengan suhu tertentu sampai diperolehnya abu yang diyakini banyak mengandung silika dan biasanya telah dimanfaatkan dalam campuran beton (Mistry *et al.*, 2019; Utama *et al.*, 2025).

Studi literatur menunjukkan bahwa mayoritas penelitian sebelumnya telah memanfaatkan material limbah sebagai bahan alternatif dalam campuran aspal. Namun, analisis yang dilakukan umumnya masih terbatas pada parameter karakteristik mekanis dan performa fisik saja (Widwiyantoro *et al.*, 2020; Rashif *et al.*, 2025). Sejauh ini, kajian yang mengaitkan sifat kimiawi material dengan kinerja campuran aspal yang dihasilkan masih sangat terbatas, padahal performa akhir campuran tidak hanya ditentukan oleh karakteristik fisik butiran, tetapi juga dipengaruhi secara signifikan oleh interaksi kimiawi antar material penyusunnya (Hasan *et al.*, 2025). Penelitian ini mengusulkan pemanfaatan limbah abu sekam padi (RHA) dan serbuk ban bekas sebagai material alternatif dalam campuran aspal. Fokus utama kajian ini adalah menganalisis hubungan antara persentase kandungan kimia oksida hasil uji XRF dengan parameter karakteristik Marshall secara komprehensif, guna memahami pengaruh interaksi mikro material terhadap performa makro campuran.

## 2. METODOLOGI

Metodologi penelitian yang diusulkan menggunakan metode eksperimen di laboratorium. Penelitian ini menggunakan jenis campuran aspal panas untuk lapis permukaan Aspal Beton (*Asphalt Concrete-Wearing Course/AC-WC*) dengan menggunakan kadar aspal rencana antara 5% sampai 7% dengan rentang 0,5% berdasarkan formula yang diberikan oleh pedoman Asphalt Institute MS-2 Edisi ke-7 untuk campuran AC-WC. Sedangkan untuk komposisi agregat pada campuran mengacu pada peneliti terdahulu (Ramadhani *et al.*, 2024) yaitu batu pecah 32,24%, *screen* 26,62%, pasir 10,37%, abu batu 25,56%, dan *filler* 5,21%.

Sebelum dilakukan pembuatan campuran aspal, terlebih dahulu dilakukan pengujian karakteristik material untuk menjamin kesesuaian dengan standar spesifikasi yang berlaku. Adapun karakteristik material yang dilakukan yaitu berupa berat jenis dan penyerapan batu pecah dan *screen* yang mengacu pada SNI 1969:2016 sedangkan untuk karakteristik pasir dan abu batu mengacu pada SNI 1970:2016. Untuk pengujian karakteristik RHA dan CR yaitu berat jenis mengacu pada SNI 1964:2008.

Karakteristik aspal dievaluasi melalui serangkaian pengujian yang meliputi nilai penetrasi, berat jenis, titik lembek, dan kelarutan aspal. Sementara itu, karakteristik agregat diuji berdasarkan nilai berat jenis serta tingkat penyerapan air. Selanjutnya, untuk mengevaluasi karakteristik Marshall pada campuran aspal, dilakukan pembuatan benda uji dengan prosedur pemadatan sebanyak 2 x 75 tumbukan pada setiap sampel. Proses ini dilaksanakan sesuai dengan prosedur operasional standar SNI 2489:2018, guna mendapatkan representasi kepadatan yang sesuai untuk beban lalu lintas berat pada lapis permukaan. Material Abu Sekam Padi (RHA) dalam penelitian ini diperoleh melalui proses pembakaran sekam padi menggunakan tungku terkendali hingga mencapai warna abu-abu. Material hasil pembakaran tersebut kemudian disaring menggunakan saringan No. 200 untuk mendapatkan ukuran butiran *filler* yang seragam. Sementara itu, serbuk ban bekas (CR) melalui proses penyaringan terlebih dahulu guna memastikan material bersih dari kotoran dan partikel pengganggu lainnya.

RHA dalam campuran digunakan sebagai pengganti *filler* sebesar 50% dari berat *filler* sedangkan CR digunakan sebagai pengganti agregat halus sebesar 50% untuk saringan No. 50 dan 100. Tabel 1 menunjukkan nama dan jumlah sampel yang digunakan untuk dilakukannya pengujian Marshall.

Tabel 1. Nama dan Jumlah Sampel Yang Diusulkan

Nama Sampel	Perlakuan	Kadar Aspal Rencana (%)					Total
		5	5,5	6	6,5	7	
Normal	Tidak ada	3	3	3	3	3	15
50%RHA	Substitusi <i>filler</i> 50%	3	3	3	3	3	15
50%CR	Substitusi pasir 50%	3	3	3	3	3	15

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Hasil Pengujian Karakteristik Material

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang disajikan pada Tabel 2, aspal yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi seluruh kriteria yang ditetapkan oleh Spesifikasi Umum Bina Marga. Hasil uji penetrasi menunjukkan nilai sebesar 62,1 mm, yang masuk dalam rentang spesifikasi aspal tipe Pen 60/70. Nilai ini mengindikasikan bahwa aspal memiliki tingkat kekerasan yang cukup untuk menahan beban lalu lintas pada iklim tropis seperti di Indonesia. Pengujian berat jenis menghasilkan nilai 1,038, melampaui standar minimum sebesar 1,00. Nilai berat jenis yang tinggi mencerminkan kemurnian aspal dan kandungan aspal yang padat. Dalam konteks campuran AC-WC, berat jenis aspal yang memenuhi standar akan memastikan volume aspal dalam campuran mampu menyelimuti agregat. Aspal yang diuji memiliki titik lembek sebesar 54°C, secara signifikan di atas batas minimum 48°C. Hal ini menunjukkan bahwa aspal memiliki ketahanan panas yang sangat baik dan tidak akan mudah melunak akibat paparan suhu matahari yang tinggi di permukaan jalan. Nilai kelarutan mencapai 99,67%, yang menunjukkan tingkat kemurnian bitumen yang sangat tinggi dan rendahnya kandungan bahan mineral atau kontaminan lain yang tidak larut. Kemurnian ini menjamin bahwa aspal akan berfungsi secara optimal sebagai bahan pengikat tanpa adanya gangguan dari zat pengotor. Di sisi lain, pengujian karakteristik agregat alam (Tabel 3) seperti batu pecah, *screen*, pasir, dan

abu batu juga menunjukkan hasil yang memenuhi dengan nilai berat jenis di atas 2,5 dan daya serap air yang rendah (di bawah 5%). Namun, hal yang paling menarik perhatian adalah karakteristik fisis dari material limbah yang digunakan. RHA memiliki berat jenis 1,91, sedangkan CR memiliki berat jenis yang sangat rendah, yaitu hanya 0,63. Perbedaan mencolok ini mengindikasikan bahwa penggunaan CR akan sangat memengaruhi volume campuran secara keseluruhan meskipun beratnya ringan. Karena CR jauh lebih ringan dibandingkan agregat halus konvensional, kehadirannya dalam campuran akan menciptakan struktur yang lebih berongga namun elastis, sementara RHA akan berperan sebagai pengisi yang lebih ringan namun tetap memberikan dukungan stabilitas melalui kandungan mineralnya.

Tabel 2. Hasil Pengujian Aspal

Pengujian	Metode	Spesifikasi	Hasil Uji
Uji Penetrasi aspal (25°C, 100g, 5 detik)	SNI 2456-2011	60-70	62,1
Berat Jenis (25°C)	SNI 2441-2011	Min. 1,00	1,038
Titik Lembek	SNI 2434-2011	Min. 48°C	54°C
Kelarutan Dalam <i>Trichloroethylene</i>	SNI 2438:2015	Min. 99	99,67

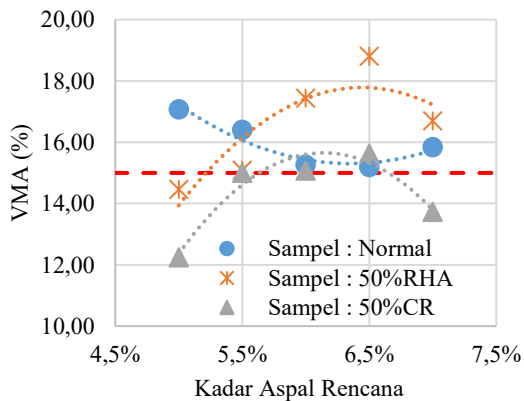
Tabel 3. Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

Jenis Pengujian	Batu Pecah	<i>Scree</i> n	Pasir	Abu Batu	RHA	CR	Spesifikasi
Berat jenis kering	2,64	2,76	2,51	2,49	1,91	0,63	
Berat jenis kering permukaan	2,68	2,77	2,56	2,58	1,91	0,63	Min 2,5
Berat jenis semu	2,73	2,82	2,69	2,74	1,91	0,63	
Penyerapan air (%)	1,15	0,91	2,51	3,80	-	-	Maks. 5

#### Hasil Pengujian Marshall

Gambar 1 menunjukkan perbandingan nilai VMA antara sampel aspal normal dengan sampel yang menggunakan substitusi 50% RHA dan 50% CR. Secara keseluruhan, terlihat bahwa penggunaan material limbah memberikan pengaruh yang cukup kontras terhadap ruang antar butir agregat dalam campuran. Pada sampel normal, nilai VMA

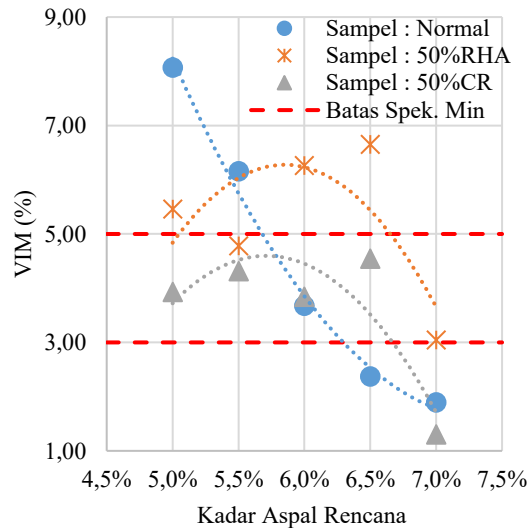
cenderung stabil dan seluruhnya berada di atas batas spesifikasi minimum. Nilai VMA tertinggi tercapai pada kadar aspal rendah kemudian mengalami penurunan dan stabil seiring bertambahnya kadar aspal. Tren yang sangat menarik terlihat pada penggunaan 50% RHA. Pada kadar aspal rendah, nilai VMA berada di bawah spesifikasi, namun melonjak drastis hingga mencapai puncaknya pada kadar aspal 6,5%. Kenaikan ini disebabkan oleh sifat fisik RHA yang memiliki tekstur permukaan kasar dan luas permukaan spesifik yang besar. RHA cenderung menyerap aspal lebih banyak, sehingga membuat jarak antar butir agregat yang lebih lebar. Hal ini menjelaskan mengapa sampel RHA memerlukan kadar aspal yang lebih tinggi untuk dapat memenuhi kriteria volumetrik yang ideal. Sebaliknya, penggunaan 50% CR menunjukkan nilai VMA yang cenderung paling rendah dibandingkan dua sampel lainnya. Pada kadar aspal 5% dan 7%, nilai VMA jatuh di bawah batas spesifikasi 15%. Fenomena ini berkaitan erat dengan sifat elastis dan berat jenis serbuk ban yang sangat rendah. Saat kadar aspal rendah CR menyerap terlebih dahulu aspal sehingga menutupi rongga antar mineral akibatnya menjadi lebih sempit. Pada kadar aspal tinggi, aspal dan serbuk ban yang melunak justru membuat campuran terlalu padat, sehingga ruang yang tersedia untuk aspal dan udara semakin berkurang.



Gambar 1. Nilai VMA Yang Diperoleh

Gambar 2 menyajikan persentase rongga udara dalam campuran atau VIM (*Voids in Mix*). Parameter ini sangat krusial karena menentukan durabilitas jalan. VIM yang terlalu tinggi membuat jalan mudah teroksidasi dan retak, sementara VIM yang terlalu rendah berisiko menyebabkan pelelehan aspal (*bleeding*). Pada sampel

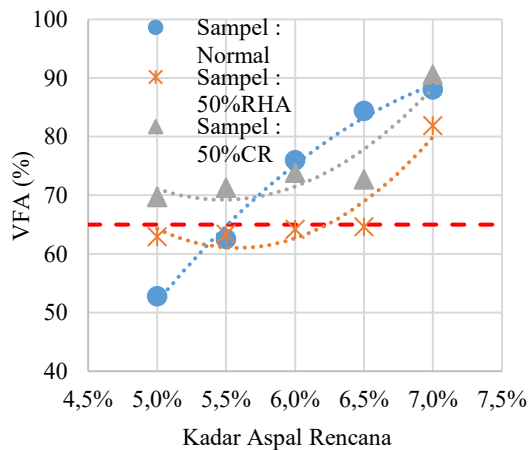
normal, nilai VIM menunjukkan tren penurunan yang sangat tajam seiring bertambahnya kadar aspal. Pada kadar aspal 5% hingga 5,5%, nilai VIM berada di atas batas spesifikasi maksimal. Namun, setelah melewati kadar aspal 6%, nilai VIM menurun drastis hingga di bawah batas minimal. Hal ini menunjukkan bahwa aspal normal sangat efektif mengisi rongga udara, namun memiliki rentang yang sempit untuk memenuhi spesifikasi ideal.



Gambar 2. Nilai VIM Yang Diperoleh

Tren yang berbeda ditunjukkan oleh sampel 50% RHA. Sebagian besar titik pengujian RHA berada di atas batas spesifikasi maksimal. RHA memiliki struktur partikel yang berpori dan luas permukaan yang besar membuat aspal terperangkap dan tidak dapat mengisi rongga udara sehingga nilai VIM besar. Setelah RHA terisi penuh, maka aspal mengisi rongga udara (nilai VIM rendah) hal ini ditunjukkan pada kadar aspal yang besar nilai VIM memenuhi spesifikasi. Sampel 50% CR menunjukkan nilai VIM yang paling konsisten berada di dalam atau di bawah rentang spesifikasi dibandingkan lainnya. Saat dipadatkan, butiran karet cenderung memampat dan mengisi ruang kosong di dalam campuran secara lebih merata. Pada kadar aspal yang semakin besar membuat partikel CR tidak mampu menyerap aspal lagi sehingga aspal mengisi rongga udara dan apabila dibesarkan kadar aspalnya maka membuat nilai VIM rendah yang artinya banyak aspal yang mengisi rongga kosong yang dapat memicu terjadinya kelebihan aspal.

Gambar 3 menunjukkan persentase rongga antar agregat (VMA) yang terisi oleh aspal, atau dikenal sebagai VFA. Parameter ini sangat penting karena merepresentasikan ketebalan film aspal yang menyelimuti agregat; jika VFA terlalu rendah, perkerasan akan kurang awet (mudah retak), namun jika terlalu tinggi, perkerasan berisiko mengalami bleeding.

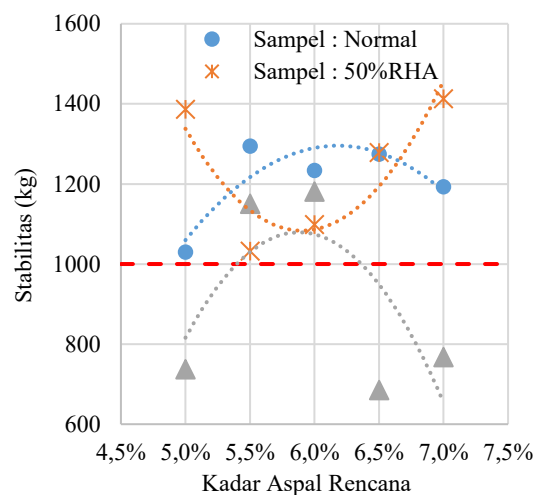


Gambar 3. Nilai VFA yang diperoleh

Pada sampel normal, nilai VFA menunjukkan kenaikan yang sangat linear dan signifikan seiring bertambahnya kadar aspal. Pada kadar aspal 5%, VFA masih berada di bawah batas spesifikasi. Namun, dimulai dari kadar aspal 5,8% hingga 7%, nilai VFA terus meningkat hingga mendekati 90%. Hal ini menandakan bahwa pada sampel normal, aspal dapat mengisi rongga dengan sangat lancar tanpa banyak hambatan dari material penyusunnya. Tren pada sampel 50% RHA terlihat sangat landai dan cenderung berada di bawah batas spesifikasi minimal. Fenomena ini mengonfirmasi hasil pengujian VMA dan VIM sebelumnya. Karena partikel RHA memiliki porositas yang tinggi, aspal cenderung terserap masuk ke dalam pori-pori RHA itu sendiri. Akibatnya, jumlah aspal yang seharusnya "mengisi" rongga antar agregat menjadi berkurang dan membutuhkan kadar aspal yang lebih tinggi untuk mencapai tingkat selimut aspal yang ideal. Untuk sampel 50% CR, nilai VFA menunjukkan tren yang unik di mana pada kadar aspal rendah (5%), nilai VFA-nya justru sudah lebih tinggi dibandingkan sampel lainnya. Hal ini disebabkan karena CR tidak terlalu banyak menyerap aspal dan memiliki sifat elastis sehingga aspal yang tersedia secara langsung mengisi rongga antar butir. Ditambah lagi

dengan berat jenis CR yang rendah, volume aspal yang sedikit saja sudah mampu mengisi persentase ruang yang besar dalam campuran. Inilah mengapa pada kadar aspal 7%, VFA sampel CR melonjak hingga mencapai titik tertinggi, yang mengindikasikan risiko bleeding yang cukup tinggi pada campuran ini.

Gambar 4 menyajikan kemampuan campuran aspal dalam menahan beban lalu lintas atau yang dikenal sebagai nilai Stabilitas. Sampel normal menunjukkan tren yaitu stabilitas naik seiring bertambahnya kadar aspal hingga mencapai puncak di sekitar kadar 5,5%–6,0%, kemudian menurun. Hal ini terjadi karena aspal yang terlalu banyak justru akan bertindak sebagai pelumas yang membuat agregat mudah bergeser, sehingga kekuatannya menurun. Seluruh titik pada sampel normal berada di atas batas 1000 kg. Tren pada sampel 50% RHA menunjukkan hasil yang sangat baik.

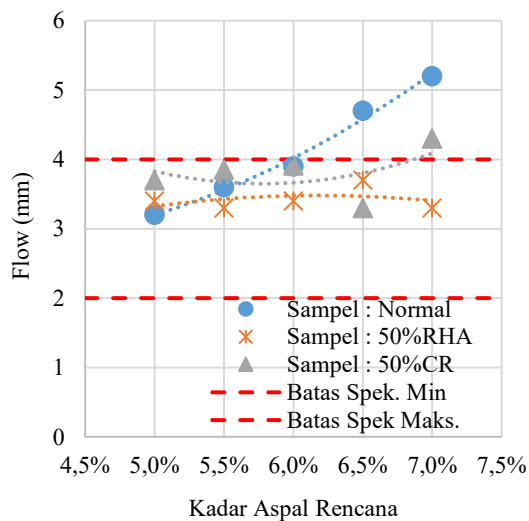


Gambar 4. Nilai Stabilitas Yang Diperoleh

Meskipun sempat turun di tengah, nilai stabilitasnya melonjak drastis pada kadar aspal 7% hingga melampaui 1400 kg. Saat RHA menyerap aspal, ia membentuk ikatan *filler*-aspal yang sangat kaku. Kenaikan tajam di akhir menunjukkan bahwa dengan kadar aspal yang cukup, RHA mampu menciptakan kerangka mortar yang jauh lebih kuat dibandingkan aspal normal. Sebaliknya, sampel 50% CR menunjukkan performa yang paling rendah. Sebagian besar titik berada di bawah ambang batas 1000 kg, bahkan menurun drastis pada kadar aspal tinggi. Hal ini disebabkan oleh sifat elastisitas serbuk ban. Karet cenderung membal dan kurang memiliki gaya ikat (*adhesi*) yang kuat dengan aspal jika

dibandingkan dengan mineral agregat. Selain itu, berat jenisnya yang rendah membuat campuran menjadi kurang padat secara struktural.

Gambar 5 menunjukkan nilai Flow atau besarnya deformasi yang terjadi pada campuran aspal saat menerima beban puncak. Nilai *flow* merupakan indikator fleksibilitas; jika terlalu rendah, jalan akan menjadi kaku dan mudah retak (getas). Sampel normal menunjukkan tren yang meningkat tajam seiring bertambahnya kadar aspal.



Gambar 5. Nilai Flow Yang Diperoleh

Pada kadar aspal di atas 6,0%, nilai *flow* melampaui batas maksimal 4 mm. Hal ini sangat logis, karena semakin banyak aspal, semakin tebal selimut yang melapisi agregat, sehingga campuran menjadi lebih licin dan mudah berdeformasi saat ditekan. Tren yang sangat menarik ditunjukkan oleh sampel 50% RHA. Meskipun kadar aspal ditambah hingga 7%, nilai *flow* tetap stabil dan konsisten berada di dalam rentang spesifikasi. Sampel 50% CR juga menunjukkan nilai yang relatif stabil diambang batas atas spesifikasi. Nilai *flow* yang tinggi pada kadar aspal 7% (di atas 4 mm) mengonfirmasi sifat elastis dari karet ban. Karet cenderung membal saat menerima beban. Namun, dikombinasikan dengan data stabilitasnya yang rendah sebelumnya, nilai *flow* yang tinggi menandakan bahwa campuran dengan 50% CR cenderung bersifat plastis atau kurang stabil untuk menahan beban berat dalam waktu lama.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan 50% Rice Husk Ash (RHA)

dalam campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) lebih unggul dibandingkan dengan penggunaan 50% Crumb Rubber (CR) maupun sampel normal. Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu oleh Pujito *et al.*, (2026) dan Belia *et al.*, (2026), yang juga memanfaatkan RHA sebagai material aditif dalam campuran AC-WC. Kedua penelitian tersebut menunjukkan tren yang sama, yaitu peningkatan nilai stabilitas dan penurunan nilai flow. Hal ini dikarenakan RHA memiliki kandungan senyawa pozzolanik yang mampu mengisi rongga mikro pada campuran beraspal, sehingga meningkatkan ikatan antar-material. Kendati demikian, karakteristik ini memberikan dampak negatif berupa meningkatnya kebutuhan kadar aspal yang lebih besar dibanding kondisi normal.

Sementara itu, penurunan kinerja pada penggunaan CR juga sejalan dengan temuan Karyawan *et al.*, (2025). Penggunaan CR dapat menurunkan stabilitas campuran beraspal karena karakteristik fisiknya yang berbeda dengan agregat halus, sehingga mereduksi kekakuan dan kekuatan ikatan dalam campuran. Meskipun demikian, pada kadar tertentu, penggunaan CR masih ada yang memenuhi spesifikasi teknis, sekaligus memberikan dampak positif bagi lingkungan dalam hal reduksi limbah padat.

### Analisis Hubungan Karakteristik Kimia Oksida dengan Karakteristik Marshall

Berdasarkan hasil uji *X-Ray Fluorescence* (XRF) pada Tabel 4, terlihat perbedaan dominasi unsur kimia yang sangat kontras antara RHA dan CR. Perbedaan komposisi oksida ini menjadi kunci utama dalam menjelaskan karakteristik Marshall campuran aspal yang telah diuji sebelumnya. Hasil XRF menunjukkan bahwa RHA mengandung Silika (SiO<sub>2</sub>) sebesar 91,5%. Kandungan silika yang sangat dominan ini mengklasifikasikan RHA sebagai material pozzolanik yang sangat kuat. Tingginya kadar silika inilah yang menjawab mengapa stabilitas sampel 50% RHA mampu melonjak hingga di atas 1400 kg. Secara kimiawi, silika memiliki tingkat kekerasan yang tinggi dan sifat permukaan yang mampu berikatan kuat dengan aspal. Silika bertindak sebagai pengaku dalam struktur aspal, sehingga meskipun kadar aspal ditingkatkan, campuran tetap memiliki kerangka yang kokoh.

Tabel 4. Kandungan Unsur Kimia Oksida (%)

Unsur Kimia	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	ZnO	MoO <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
CR	5,70	17,00	0,48	7,88	1,07	0,20	51,00	15,00	0,71
RHA	91,5	-	3,64	3,70	0,502	0,032	0,046	-	0

Hal ini juga menjelaskan alasan nilai flow pada sampel RHA tetap stabil pada rentang 3,2–3,5 mm. Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu oleh Aziz *et al.*, (2026) yang menyatakan bahwa penggunaan RHA mampu meningkatkan ketahanan retak sehingga menjaga stabilitas struktural campuran beraspal.

Pada CR, kandungan kimia yang dominan adalah *Zinc Oxide* (ZnO) sebesar 51,00% dan Sulfur (SO<sub>3</sub>) sebesar 17,00%. Tingginya kadar ZnO dan SO<sub>3</sub> merupakan karakteristik residu dari proses vulkanisasi ban. Keberadaan sulfur secara kimiawi memberikan sifat elastisitas pada karet. Inilah alasan mengapa pada uji Marshall, sampel 50% CR memiliki nilai flow yang cenderung tinggi dan stabilitas yang lebih rendah dibandingkan RHA. Karet tidak membentuk ikatan mineral yang kaku seperti silika, melainkan menciptakan jembatan polimer yang lentur. Namun, rendahnya stabilitas pada sampel CR menunjukkan bahwa kadar oksida logam pada karet tidak mampu menggantikan peran struktural agregat mineral yang digantikannya. Komposisi kimia CR yang lebih kompleks dan rendahnya kandungan pozolanik membuat material ini berkurang sifat absorptifnya terhadap aspal. Akibatnya, aspal bebas mengalir mengisi rongga antar agregat, yang menjelaskan mengapa nilai VFA pada sampel CR jauh lebih cepat meningkat dibandingkan RHA. Hal ini juga sejalan dengan peneliti terdahulu yaitu Shams *et al.*, (2026) yang menyatakan permukaan partikel CR berbeda dengan agregat sehingga dapat mengurangi pengikatan antar agregat dan aspal.

Dapat dikatakan bahwa karakteristik Marshall campuran AC-WC dari hasil penelitian ini dipengaruhi oleh jenis oksida dominan pada material substitusinya. Dengan demikian, apabila terjadi penggabungan kedua limbah ini secara kimiawi berpotensi menciptakan material komposit yang berusaha menyeimbangkan sifat kaku dari silika dan sifat elastis dari polimer ban bekas.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Terdapat hubungan yang signifikan antara komposisi kimiawi material limbah dengan performa campuran aspal AC-WC. Tingginya kandungan Silika (SiO<sub>2</sub>) pada Abu Sekam Padi (RHA) terbukti secara ilmiah menjadi faktor kunci dalam meningkatkan stabilitas campuran hingga melampaui 1400 kg. Sebaliknya, dominasi *Zinc Oxide* (ZnO) dan Sulfur (SO<sub>3</sub>) pada Serbuk Ban Bekas (CR) memberikan sifat elastisitas yang meningkatkan nilai *flow*, namun menurunkan stabilitas struktural karena kurangnya ikatan mineral kaku seperti yang dimiliki oleh silika.
2. Pemanfaatan RHA dan CR sebagai substitusi material merupakan langkah inovatif dalam mendukung *green pavement* (perkerasan jalan ramah lingkungan). Melalui analisis XRF, penelitian ini membuktikan bahwa limbah biomassa dan karet ban tidak hanya berfungsi sebagai pengisi fisik, tetapi juga memberikan kontribusi kimiawi yang mengubah sifat reologi campuran aspal menjadi lebih superior pada parameter tertentu.

#### REFERENSI

- Abdelmagid, A. A., & Pei Feng, C. (2019). Evaluating the effect of rice-husk ash and crumb-rubber powder on the high-temperature performance of asphalt binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(12), 04019296.
- Aziz, P. W., EL-Maaty, A. E. A., & Younes, M. A. (2026). Evaluating the performance of hot asphalt mixtures using natural materials waste. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 36, 101881.
- Bakheit, I., & Xiaoming, H. (2019). Modification of the dry method for

- mixing crumb rubber modifier with aggregate and asphalt based on the binder mix design. *Construction and Building Materials*, 220, 278-284.
- Belia, S., Ramadhani, R., Jimmyanto, H., & Aminuddin, K. M. (2025). INOVASI MATERIAL BERKELANJUTAN: PENGARUH SUBSTITUSI ABU SEKAM PADI SEBAGAI FILLER TERHADAP VARIASI KADAR ASPAL PADA CAMPURAN ASPAL BETON LAPIS AUS (AC-WC). *Applicable Innovation of Engineering and Science Research (AVoER)*, 17(1), 184-191.
- Hasan, N. H., Rahmansyah, A. R., Utina, T., & Alifuddin, A. (2025). Analisis Sifat Mikrostruktur Campuran Aspal Beton AC-WC Menggunakan Aspal Starbit E-55 dan Retona Blend E-55 dengan Abu Sekam Padi sebagai Filler. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Sipil*, 7(2), 286-297.
- Jimmyanto, H., Arliansyah, J., & Kadarsa, E. (2024). The impact of utilizing waste tire and solid natural rubber as asphalt binder substitutions on the asphalt concrete-wearing course mixtures. *Civil Engineering and Architecture*, 12(3), 1660-1677.
- Karyawan, I. D. M. A., Mahendra, M., Sideman, I. A. O. S., Yuniarti, R., & Fajrin, J. (2025). Durabilitas Campuran Aspal Emulsi Dingin dengan Substitusi Serbuk Karet Ban Bekas sebagai Agregat Halus. *Jurnal Kridatama Sains dan Teknologi*, 7(02), 785-796.
- Mistry, R., Karmakar, S., & Kumar Roy, T. (2019). Experimental evaluation of rice husk ash and fly ash as alternative fillers in hot-mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 20(4), 979-990.
- Özel, F., Deniz, M. T., & Yüce, M. İ. (2023). Evaluation of olive pomace and SBS modified bitumen to the performance characteristics. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02432.
- Prathibha, V. S., & Karthik, J. (2022). Evaluation of modified bituminous mix parameters by adding plastic waste and Crumb-rubber waste. *Materials Today: Proceedings*, 65, 1651-1655.
- Pujito, P., Azhim, Z. S., & Satrio, E. M. (2026). Analisis Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) dengan Penambahan Lateks dan Abu Sekam Padi pada Perkerasan Jalan. *Journal of Engineering and Applied Technology*, 2(1), 79-95.
- Ramadhani, R., Arliansyah, J., & Kadarsa, E. (2024). The effect of pre-vulcanized latex usage on Marshall characteristics and stiffness modulus in hot mix asphalt wearing course (AC-WC) mixtures. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 33(2), 185-204.
- Ramadhani, R., Arliansyah, J., Kadarsa, E., Rahman, H., Jimmyanto, H., Yusuf, A. A., & Ammarullah, M. I. (2025). Bio-Based Rice Husk Ash as an Eco-Friendly Filler in Pre-Vulcanized Latex Asphalt Concrete Wearing Course Mixtures. *Journal of Natural Fibers*, 22(1), 2517668.
- Rashif, M. F., Nisumanti, S., & Al Qubro, K. (2025). Analisis Pengaruh Penambahan Crumb Rubber dan Filler Abu Tempurung Kelapa Terhadap Nilai Karakteristik Marshall pada Campuran Aspal Lapis Aus (AC-WC). *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 11(3), 281.
- Shams, M. A., Shafiq, N., & Hisbani, N. (2026). Chemical and physical surface modification of waste rubber for cementitious composites: mechanisms of interfacial bonding and performance recovery. *Results in Surfaces and Interfaces*, 100808.
- Sutama, A., Septriasyah, V., & Irawan, T. (2025). Pengaruh penggunaan abu sekam padi sebagai material substitusi sebagian semen terhadap workabilitas, densitas, dan kekuatan tekan beton. *Jurnal Deformasi*, 10(1), 99-111. <https://doi.org/10.31851/deformasi.v10i1.18493>
- Viscione, N., Veropalumbo, R., Oreto, C., Biancardo, S. A., Abbondati, F., & Russo, F. (2022). Additional procedures for characterizing the performance of recycled polymer modified asphalt mixtures. *Measurement*, 187, 110238.

- Widwiyantoro, E., Sembiring, S., Syafriadi, S., & Suprihatin, S. (2020). Sintesis dan Karakteristik Struktur, Sifat Fisis, dan Sifat Mekanik Komposit Aspal Silika dengan Variasi Komposisi Aspal Silika (20%: 80% wt; 15%: 85% wt; 10%: 90% wt). *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*, 1(2), 47-52.
- Wu, W., Jiang, W., Xiao, J., Yuan, D., Wang, T., & Xing, C. (2022). Analysis of thermal susceptibility and rheological properties of asphalt binder modified with microwave activated crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134488.
- Xu, J., Zhang, S., Fan, Z., Chen, Z., Leng, Z., & Wang, D. (2026). Interfacial interaction behavior between asphalt and solid waste fillers: Atomic-scale debonding mechanism and experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 510, 145174.