

## Pemanfaatan Pasir Besi dan Pasir Pantai sebagai Agregat Halus Pada Campuran Asphalt Concrete – Binder Course

\*Adryan Fitrayudha<sup>1</sup>, Maolida Uci Handayani<sup>2</sup>, Anwar Efendy<sup>3</sup>, Ahmad Zarkasi<sup>4</sup>, Aulia Muttaqin<sup>5</sup>, Isfanari<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Mataram, Kota Mataram

<sup>\*</sup>[adryan@ummah.ac.id](mailto:adryan@ummah.ac.id)

### Abstract

This study aims to evaluate the utilization of iron sand and beach sand as partial substitutes for fine aggregates in Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC) mixtures and to identify the optimum proportion capable of meeting the Indonesian Bina Marga 2018 Revision 2 performance requirements. Laboratory tests were conducted using iron sand from Kerakat Beach and beach sand from Malimbu Beach, while coarse aggregates and stone dust were obtained from a local asphalt mixing plant. The Marshall method was applied using an optimum asphalt content of 5.15%, and the performance parameters assessed included stability, flow, Marshall Quotient, Void in Mineral Aggregate (VMA), Void in Mix (VIM), and Void Filled with Bitumen (VFB). The findings indicate that although several mixtures failed to satisfy VIM and VFB criteria, two combinations 5% iron sand + 5% beach sand and 7.5% iron sand + 2.5% beach sand demonstrated balanced aggregate interaction, adequate particle interlock, and improved internal structure, allowing them to meet all required specifications. Scientifically, the improved performance is attributed to the complementary characteristics of iron sand, which increases structural density, and beach sand, which enhances workability and prevents over compaction. Conversely, mixtures containing excessive beach sand produced high air voids, while mixtures dominated by iron sand became overly dense, both leading to specification failures. Overall, the study confirms that controlled proportions of these local materials can be used effectively as fine aggregate substitutes in AC-BC mixtures.

**Keywords:** Iron Sand, Beach Sand, AC-BC, Marshall Characteristics, Fine Aggregate Substitution.

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pemanfaatan pasir besi dan pasir pantai sebagai substansi sebagai agregat halus pada campuran *Asphalt Concrete – Binder Course* (AC-BC) serta menentukan proporsi optimum yang mampu memenuhi persyaratan kinerja menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Pengujian laboratorium dilakukan menggunakan pasir besi dari Pantai Kerakat dan pasir pantai dari Pantai Malimbu, sedangkan agregat kasar dan abu batu diperoleh dari AMP setempat. Pengujian Marshall dilakukan dengan kadar aspal optimum sebesar 5,15% dengan parameter yang dianalisis meliputi stabilitas, kelelahan, *Marshall Quotient*, *Void in Mineral Aggregate* (VMA), *Void in Mix* (VIM), dan *Void Filled with Bitumen* (VFB). Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun beberapa campuran tidak memenuhi kriteria VIM dan VFB, dua variasi 5% pasir besi + 5% pasir pantai dan 7,5% pasir besi + 2,5% pasir pantai menunjukkan keseimbangan interaksi antarbutir, *interlock* agregat yang baik, dan struktur internal yang stabil sehingga memenuhi seluruh spesifikasi yang dipersyaratkan. Secara ilmiah, pencapaian kinerja tersebut disebabkan oleh karakteristik pasir besi yang meningkatkan kerapatan struktur dan pasir pantai yang memperbaiki kemampuan kerja sehingga *mencegah over compaction*. Sebaliknya, campuran dengan dominasi pasir pantai menghasilkan rongga udara tinggi, sedangkan campuran dengan dominasi pasir besi menjadi terlalu rapat, keduanya menyebabkan ketidaksesuaian spesifikasi. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa proporsi terkontrol dari kedua material lokal ini dapat dimanfaatkan secara efektif sebagai substansi agregat halus dalam campuran AC-BC.

**Kata Kunci:** Pasir Besi, Pasir Pantai, AC-BC, Karakteristik Marshall, Substitusi Agregat Halus.

## PENDAHULUAN

Jalan merupakan prasarana transportasi darat yang memegang peranan penting dalam mendukung mobilitas manusia, distribusi barang, serta pertumbuhan ekonomi regional. Peningkatan jumlah penduduk dan aktivitas ekonomi menyebabkan intensitas lalu lintas bertambah sehingga kebutuhan akan konstruksi jalan yang berkualitas dan berkelanjutan semakin mendesak (Shafira et al., 2022).

Beberapa wilayah Indonesia, termasuk Mataram dan daerah pesisir lainnya, kerusakan jalan menjadi isu yang sering muncul akibat beban lalu lintas berlebih, perubahan iklim ekstrem, serta kualitas konstruksi yang kurang optimal (Suryani et al., 2021; Darmawan & Fikri, 2020). Kondisi ini diperparah oleh keterbatasan anggaran pemeliharaan yang membuat proses rehabilitasi dan penguatan struktur perkerasan tidak dapat dilakukan secara rutin, sehingga diperlukan inovasi material untuk meningkatkan ketahanan perkerasan jalan.

Material lokal seperti pasir besi dan pasir pantai menjadi alternatif yang prospektif untuk digunakan sebagai agregat halus dalam campuran aspal panas. Pasir pantai memiliki karakteristik khusus seperti butiran halus, kadar garam tinggi, dan mineral tertentu yang memengaruhi interaksi dengan aspal (Rahmawati et al., 2020; Junaidi et al., 2019; Permatasari et al., 2021). Sementara itu, pasir besi yang kaya mineral magnetit dan hematit berpotensi meningkatkan kekuatan mekanis campuran beraspal jika diolah dengan tepat.

Berbagai penelitian telah mengkaji pemanfaatan material alternatif dalam campuran *Asphalt Concrete* (AC), termasuk limbah industri, material lokal, dan mineralisasi alami untuk meningkatkan stabilitas dan durabilitas perkerasan (Hidayat et al., 2020; Lestari & Sunarmasto, 2021; Nugraha et al., 2023). Studi mengenai pasir besi menunjukkan pengaruh positif terhadap stabilitas Marshall dan ketahanan deformasi, sementara penelitian tentang pasir pantai menyoroti tantangan kandungan garam yang memerlukan perlakuan awal sebelum digunakan.

Meskipun penelitian terkait pemanfaatan pasir besi dan pasir pantai telah dilakukan, kajian mengenai kombinasi kedua material tersebut sebagai substitusi agregat halus pada campuran AC-BC masih terbatas (Salim et al., 2019; Kurniawan et al., 2022; Hapsari & Dewi, 2021). Belum banyak penelitian yang menilai kinerja mekanis campuran secara komprehensif, terutama terhadap stabilitas, flow, voids, dan parameter Marshall lainnya dalam skenario lalu lintas tinggi. Cela penelitian ini membuka peluang untuk menghasilkan temuan baru yang berkontribusi pada pengembangan material perkerasan berbasis sumber daya lokal.

Lapisan *Asphalt Concrete – Binder Course* (AC-BC) memiliki peran penting dalam mendistribusikan beban kendaraan dan menjaga integritas struktural perkerasan jalan. Kinerja AC-BC sangat dipengaruhi oleh kualitas agregat dan interaksinya dengan aspal sebagai pengikat (Sukirman, 2003; Hardiyatmo, 2018; Puspita et al., 2020; Harahap & Yuliana, 2022). Oleh karena itu, evaluasi pemanfaatan pasir besi dan pasir pantai sebagai alternatif agregat halus menjadi penting untuk memastikan bahwa campuran yang dihasilkan tetap memenuhi standar teknis yang berlaku.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pemanfaatan pasir besi dan pasir pantai sebagai agregat halus terhadap karakteristik Marshall campuran *Asphalt Concrete – Binder Course* (AC-BC). Evaluasi dilakukan untuk menentukan kelayakan material tersebut sebagai substitusi agregat halus standar serta untuk mengidentifikasi komposisi yang memberikan kinerja optimal bagi perkerasan jalan.

## METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Balai Pengujian Material, Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang (PUPR) Provinsi Nusa Tenggara Barat. Seluruh proses pengujian material dan pengujian karakteristik campuran aspal dilakukan di laboratorium tersebut untuk memastikan konsistensi kondisi pengujian dan kontrol mutu.

### Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas :

1. Pasir Besi  
Material pasir besi diperoleh dari Pantai Kerakat, Desa Pohgading, Kecamatan Pringgabaya, Kabupaten Lombok Timur, NTB. Pasir besi ini digunakan sebagai substitusi agregat halus sebagian pada campuran AC-BC. Karakteristik awal yang diuji meliputi gradasi (SNI ASTM C136:2012), kadar lumpur (SNI ASTM C117:2012), berat jenis dan penyerapan air (SNI ASTM C128:2012).
2. Pasir Pantai  
Pasir pantai dikumpulkan dari Pantai Malimbu, Desa Malaka, Kecamatan Pemenang, Kabupaten Lombok Utara, NTB. Material ini juga digunakan sebagai bahan substitusi agregat halus setelah dilakukan pemeriksaan sifat fisik seperti gradasi (SNI ASTM C136:2012), kandungan organik (SNI 03-2816-1992

atau ASTM C40) dan kadar garam (SNI 03-6861.1-2002 atau ASTM D512).

### Agregat Kasar dan Abu Batu

Agregat kasar serta abu batu diperoleh dari AMP PT Sinar Bali Binakarya yang berlokasi di Jalan Raya Praya-Mujur, Batunyala, Kecamatan Praya Timur, Kabupaten Lombok Tengah, NTB. Uji karakteristik agregat meliputi gradasi (SNI ASTM C136:2012), keausan Los Angeles (SNI ASTM C131:2012 / C535), berat jenis (SNI ASTM C127:2012) dan angularitas (ASTM D5821, ASTM C1252).

### 4. Filler

Bahan pengisi yang digunakan adalah semen Portland tipe I. Penggunaan filler difungsikan untuk meningkatkan *workability* dan stabilitas campuran.

### 5. Aspal Penetrasi 60/70

Aspal keras penetrasi 60/70 digunakan sebagai pengikat utama. Pengujian sifat aspal meliputi penetrasi, titik lembek, daktilitas, berat jenis, dan viskositas sesuai SNI yang berlaku.

### Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Saringan Gradasi ASTM/SNI  
Digunakan untuk analisis gradasi agregat halus dan kasar. Tersedia dalam ukuran lengkap sesuai standar (0,075 mm sampai 19 mm).
2. Timbangan Digital Akurasi 0,01 g  
Digunakan untuk penimbangan material dengan presisi tinggi.
3. Water Bath  
Berpengaruh menjaga suhu rendaman benda uji Marshall pada  $60 \pm 1^\circ\text{C}$  sebelum pengujian.
4. Compactor Marshall  
Alat pematat Marshall dengan kemampuan memberikan 75 tumbukan per sisi sampel, sesuai standar SNI untuk AC-BC.
5. Marshall Stability and Flow Tester  
Alat untuk mengukur stabilitas (kg) dan flow (mm) pada benda uji Marshall. Alat dilengkapi proving ring dan dial gauge dengan ketelitian tinggi.
6. Oven Laboratorium  
Digunakan untuk mengeringkan material agregat dan menjaga suhu pemanasan agregat serta aspal sesuai rentang suhu pencampuran AC-BC.
7. Termometer Digital  
Untuk mengukur suhu agregat, aspal, dan campuran selama proses produksi di laboratorium.

### Metode penelitian dan analisis pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Persiapan Material  
Semua material agregat dibersihkan, dikeringkan, dan diuji sifat fisiknya sesuai standar SNI yang berlaku. Pasir pantai dan pasir besi dilakukan analisis tambahan berupa kandungan organik dan kadar lumpur untuk memastikan kesesuaian sebagai agregat halus.
2. Desain Campuran AC-BC  
Desain campuran dilakukan berdasarkan pedoman SNI 06-2489-1991 dan Spesifikasi Umum Bina

Marga 2018 Revisi 2. Variasi substitusi agregat halus berupa pasir besi dan pasir pantai ditentukan dalam beberapa prosentase tertentu (variasi perbandingan pasir besi dan pasir pantai yaitu 0% pb : 10% pp, 2,5% pb : 7,5% pp, 5%pb : 5% pp, 7,5% pb : 2,5% pp dan 10% pb : 0% pp).

3. Pembuatan Benda Uji Marshall

Campuran diproduksi dengan suhu pencampuran dan pemanasan yang sesuai standar untuk AC-BC. Benda uji Marshall dibuat menggunakan cetakan standar (diameter 101,6 mm dan tinggi  $\pm$  63,5 mm) dengan total benda uji yaitu 15 buah, masing-masing variasi terdiri dari 3 buah benda uji.

4. Pengujian Marshall

Benda uji direndam pada suhu 60°C selama 30–40 menit, kemudian diuji menggunakan *Marshall Stability and Flow Tester*. Parameter yang diperoleh meliputi:

- Stabilitas Marshall
- Flow
- Density
- *Voids in the Mix* (VIM)
- *Voids in Mineral Aggregate* (VMA)
- *Voids Filled with Bitumen* (VFB)

5. Analisis Data

Hasil pengujian dianalisis untuk menentukan pengaruh penggunaan pasir besi dan pasir pantai terhadap kinerja campuran AC-BC. Analisis mencakup:

- Evaluasi perubahan nilai stabilitas dan flow
- Penilaian karakteristik volumetrik
- Penentuan komposisi optimum
- Perbandingan kinerja antar variasi substitusi

Analisis dilakukan secara kuantitatif menggunakan pendekatan statistik deskriptif atau metode komparatif sesuai kebutuhan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Perlu dilakukan pengujian bahan dan material sebelum dilakukan pencampuran aspal terlebih dahulu terhadap bahan yang akan digunakan. Adapun bahan-bahan yang diuji yaitu agregat kasar, agregat halus (termasuk pasir besi dan pasir pantai) dan filler. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui karakteristik sifat fisik dan mekanis dari bahan material tersebut serta dipastikan bahwa bahan dan material yang digunakan pada penelitian ini telah memenuhi persyaratan teknis berdasarkan standar yang berlaku.

Setelah memastikan bahan yang digunakan memenuhi persyaratan teknis berdasarkan standar yang berlaku, selanjutnya menentukan kadar aspal optimum (KAO) pada campuran AC-BC. Berikut hasil pengujian Marshall Test untuk menentukan KAO campuran AC-BC tersedia pada Tabel 1.

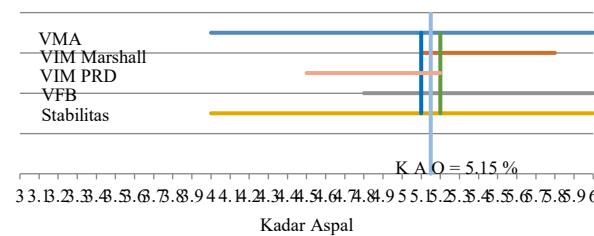
Berdasarkan hasil grafik hubungan antar parameter Marshall pada Gambar 1 berikut diperoleh KAO sebesar 5,15% yang digunakan sebagai dasar pengujian

campuran AC-BC dengan substitusi agregat halus (pasir besi dan pasir pantai).

Tabel 1. Hasil Pengujian Marshall Campuran AC-BC

Kadar Aspal (%)	4	4.5	5	5.5	6	Spesifikasi
Unit Weight	2.303	2.355	2.347	2.384	2.393	
Stability (kg)	1161	1348	1207	1252	1125	Min. 800
Flow (mm)	3.65	3.27	3.33	2.97	3.33	2.0 - 4.0
Marshall Quotient (kg/mm)	318	413	362	422	338	Min. 250
VIM (%)	9.05	6.31	5.93	3.73	2.68	3.0 - 5.0
VIM PRD (%)		3.89	2.51	1.47		Min. 2.0
VMA (%)	18.31	16.92	17.63	16.76	16.91	Min. 14
VFB (%)	50.59	62.69	66.35	77.73	84.12	Min. 65

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2025)



Gambar 1. Penentuan KAO campuran AC-BC

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2025)

Pada pengujian Marshall dilakukan analisis pengujian stabilitas, flow, marshall quotient, VIM, VMA dan VFB. Rekapan dari rincian hasil perhitungan variasi pasir besi dan pasir pantai dari hasil uji Marshall dengan substitusi agregat halus (pasir besi dan pasir pantai) dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Marshall Campuran AC-BC dengan Variasi Agregat Halus (Pasir Besi : Pasir Pantai)

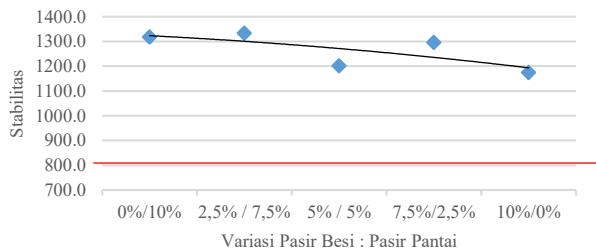
Kadar Aspal (%)	0%/10%	2,5% / 7,5%	5% / 5%	7,5%/2,5%	10%/0%	Spk.
Unit Weight	2.290	2.340	2.382	2.407	2.442	
Stability (kg)	1318.7	1333.5	1201.3	1296.6	1174.9	Min. 800
Flow (mm)	3.17	3.27	3.33	2.97	3.33	2.0 - 4.0
Marshall Quotient (kg/mm)	416.4	408.2	360.4	437.1	352.5	Min. 250
VIM (%)	8.02	6.00	4.31	3.31	1.90	3.0 - 5.0
VMA (%)	19.76	18.00	16.52	15.65	14.42	Min. 14
VFB (%)	59.41	66.65	73.93	78.86	86.40	Min. 65

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2025)

1. Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas merupakan kemampuan campuran untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan tetap, seperti gelombang dan alur. Nilai stabilitas yang terlalu tinggi menyebabkan campuran menjadi terlalu kaku, yang menyebabkan perkerasan retak saat menerima beban. Sebaliknya, nilai stabilitas yang terlalu rendah menyebabkan campuran aspal mudah mengalami rutting oleh

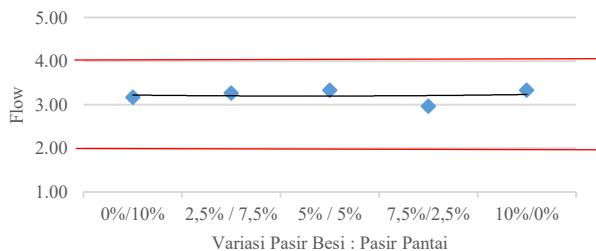
beban lalu lintas. Dari hasil pengujian Marshall diperoleh nilai stabilitas untuk variasi 0%/10% sebesar 1318,7 kg, variasi 2,5%/7,5 sebesar 1333,5 kg, variasi 5%/5% sebesar 1201,3 kg, variasi 2,5%/7,5% 1296,6 kg dan variasi 10%/0% sebesar 1174,9 kg. Pada pencampuran tersebut menghasilkan nilai stabilitas yang baik dan memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2, Hal tersebut disebabkan karena kadar pasir besi dan pasir pantai sebagai agregat halus serta aspal yang digunakan cukup baik sehingga dapat menyelimuti agregat dengan baik. Berikut grafik nilai stabilitas dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Hubungan Stabilitas dengan Variasi Pasir Besi dan Pasir Pantai  
Sumber: Hasil Pengolahan Data (2025)

## 2. Kelelahan (Flow)

Flow adalah besar deformasi vertikal yang terjadi pada awal pembebangan ketika kestabilan perkerasan menurun dan menahan beban yang diterima, dikenal sebagai aliran. Kelenturan atau perubahan bentuk plastis campuran beraspal yang disebabkan oleh beban ditunjukkan oleh tingkat kelenturan. Kelelahan merupakan indikator utama terhadap kelenturan atau perubahan bentuk plastis campuran beraspal yang diakibatkan oleh beban. Dari hasil pengujian Marshall diperoleh nilai flow pada setiap variasi yaitu pada variasi 0%/10% sebesar 3,17 mm, variasi 2,5%/7,5 sebesar 3,27 mm, variasi 5%/5% sebesar 3,33 mm, variasi 2,5%/7,5% sebesar 2,97 mm dan variasi 10%/0% sebesar 3,33 mm. Pada pencampuran tersebut menghasilkan nilai flow yang baik dan memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2. Berikut grafik nilai flow dapat dilihat pada Gambar 3.

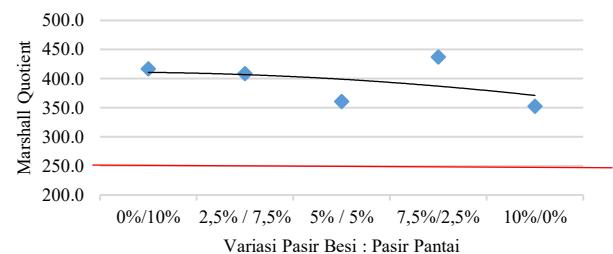


Gambar 3. Grafik Hubungan Flow dengan Variasi Pasir Besi dan Pasir Pantai  
Sumber: Hasil Pengolahan Data (2025)

## 3.

### Marshall Quotient (MQ)

Marshall Quotient adalah hasil bagi antara nilai aliran dan stabilitas. Nilai MQ diperoleh dari hasil bagi stabilitas dengan kelelahan; semakin tinggi nilai MQ, semakin kaku campuran aspal dan semakin rentan terhadap keretakan di jalan beraspal. Nilai MQ menunjukkan tingkat kelenturan yang mungkin terjadi keretakan pada campuran aspal. Nilai MQ merupakan indikator tingkat kelenturan yang potensial terjadinya keretakan pada suatu campuran beraspal. Hasil pengujian marshall diperoleh dari nilai MQ pada setiap variasi, pada variasi 0%/10% sebesar 416,4 kg/mm, pada variasi 2,5%/7,5 sebesar 408,2 kg/mm, pada variasi 5%/5% sebesar 360,6 kg/mm, pada variasi 2,5%/7,5% sebesar 437,1 kg/mm dan pada variasi 10%/0% sebesar 352,5 kg/mm, semua nilai variasi memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2 dapat dilihat pada Gambar 4.

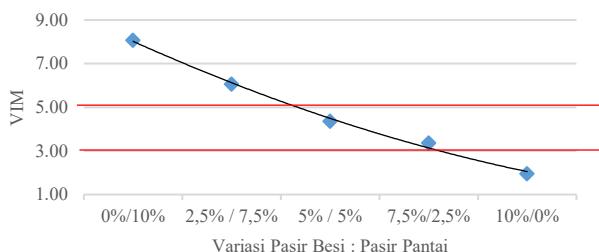


Gambar 4. Grafik Hubungan MQ dengan Variasi Pasir Besi dan Pasir Pantai  
Sumber: Hasil Pengolahan Data (2025)

## 4.

### Voids In Mix (VIM)

*Voids In Mix* merupakan porsentase rongga dalam campuran, yang sangat dipengaruhi oleh campuran aspal agregat, sangat besar. Nilai VIM yang lebih tinggi menghasilkan rongga yang lebih besar dalam campuran, yang membuatnya lebih porous. Akibatnya, udara dapat masuk ke rongga-rongga dalam campuran, yang membuatnya lebih mudah teroksidasi dan mengurangi. Hasil pengujian marshall diperoleh dari nilai VIM pada setiap variasi, pada variasi 0%/10% sebesar 8,02 %, pada variasi 2,5%/7,5 sebesar 6,00 %, pada variasi 5%/5% sebesar 4,31 %, pada variasi 2,5%/7,5% sebesar 3,31 % dan pada variasi 10%/0% sebesar 1,90 %. Pada 5 variasi tersebut ada 2 variasi yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2 yaitu variasi 5%/5% dan 7,5%/2,5%. Berikut grafik nilai VIM dapat dilihat pada Gambar 5.

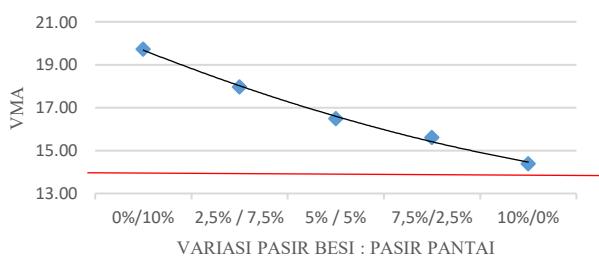


Gambar 5. Grafik Hubungan VIM dengan Variasi Pasir Besi dan Pasir Pantai

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2025)

5. *Voids In Mineral Aggregate (VMA)*

*Voids in mineral aggregate (VMA)* adalah rongga udara antar butir agregat aspal padat, termasuk rongga udara dan kadar aspal efektif, disebut rongga dalam agregat mineral (VMA). Beberapa faktor pemadatan, termasuk jumlah pemadatan dan suhunya, kadar aspal, dan gradasi agregat, memengaruhi nilai VMA. Jika nilai VMA campuran terlalu kecil, akan ada masalah dengan durabilitas, dan jika nilai VMA terlalu besar, akan ada masalah dengan stabilitas. Hasil pengujian marshall diperoleh dari nilai VMA pada setiap variasi, pada variasi 0%/10% sebesar 19,76 %, pada variasi 2,5%/7,5 sebesar 18,00%, pada variasi 5%/5% sebesar 16,52 %, pada variasi 2,5%/7,5% sebesar 15,65 % dan pada variasi 10%/0% sebesar 14,42 %. Semua variasi memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2 dapat dilihat pada Gambar 6.



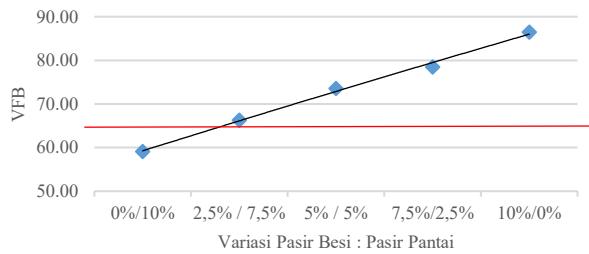
Gambar 6. Grafik Hubungan VMA dengan Variasi Pasir Besi dan Pasir Pantai

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2025)

6. *Voids Filled Bitumen (VFB)*

*Voids filled with bitumen (VFB)* adalah rongga yang terisi aspal (VFB) adalah persentase dari seluruh rongga di antara butiran agregat yang terisi aspal dalam campuran aspal panas. Hasil pengujian marshall diperoleh dari nilai VFB pada setiap variasi, pada variasi 0%/10% sebesar 59,41 %, pada variasi 2,5%/7,5 sebesar 66,65 %, pada variasi 5%/5% sebesar 73,93 %, pada variasi 2,5%/7,5% sebesar 78,86 % dan pada variasi 10%/0% sebesar 86,83 %. Pada variasi tersebut ada 4 variasi yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2 dan hanya 1 variasi yang tidak memenuhi spesifikasi yaitu variasi 0%/10% karena nilai VFB terlalu kecil menyebabkan jumlah aspal efektif yang mengisi

rongga antar agregat sedikit sehingga rongga udara menjadi besar yang akan mengurangi keawetan pada campuran. Berikut grafik nilai VFB dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Hubungan VFB dengan Variasi Pasir Besi dan Pasir Pantai

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2025)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi campuran pasir besi dan pasir pantai memberikan respons yang berbeda terhadap kinerja Marshall campuran AC-BC, terutama pada parameter rongga udara (VIM) dan rongga terisi aspal (VFB) yang menjadi indikator utama kualitas pergerakan dan penataan butiran agregat. Secara ilmiah, campuran terbaik terdapat pada variasi 5%/5% dan 7,5%/2,5%, karena kombinasi kedua agregat menghasilkan struktur butiran yang seimbang antara bentuk kubikal pasir besi dan bentuk lebih halus pasir pantai, sehingga menghasilkan gradasi efektif, distribusi rongga yang stabil, serta kemampuan pengikatan aspal yang optimal. Pada campuran dengan dominasi pasir pantai seperti variasi 0%/10% dan 2,5%/7,5%, peningkatan kadar butiran halus dan kandungan garam residu cenderung memperbesar rongga udara sehingga menurunkan kepadatan internal dan menyebabkan nilai VIM dan VFB tidak memenuhi spesifikasi. Sebaliknya, campuran dengan dominasi pasir besi seperti variasi 10%/0%, meskipun menghasilkan struktur yang sangat rapat akibat berat jenis tinggi pasir besi, menyebabkan penurunan kemampuan alir aspal dan berpotensi meningkatkankekakuan campuran secara berlebih, sehingga rongga udara menjadi terlalu kecil dan menyebabkan densifikasi berlebih yang tidak sesuai syarat Bina Marga. Pola kecenderungan ini menunjukkan bahwa keseimbangan sifat mineral, bentuk butiran, dan fraksi halus merupakan faktor dominan dalam menjaga stabilitas, kelelahan, rasiokekakuan (MQ), dan VMA dalam batas spesifikasi; sehingga ditemukan bahwa substitusi pasir besi dan pasir pantai pada rentang 5–10% secara proporsional mampu meningkatkan kinerja campuran tanpa mengganggu keseimbangan volumetrik campuran AC-BC.

**Analisis Mendalam Anomali Kekuatan, Kepadatan, dan Workability**

Dalam penelitian ini, terdapat kontradiksi signifikan antara hasil uji kuat tekan langsung pada silinder dan hasil konversi kuat lentur. Kontradiksi ini, bersama dengan nilai Faktor Air Semen (FAS) yang sangat rendah (0,232), meskipun didukung oleh penggunaan *superplasticizer* perlu dianalisis lebih lanjut karena berpotensi menyebabkan masalah *workability* dan pemadatan.

1. Dampak Kepadatan (*Density*) dan FAS Rendah: Kepadatan benda uji silinder campuran Pasir *Sandblasting* tercatat hanya  $2241 \text{ kg/m}^3$ , lebih rendah dibandingkan kontrol. FAS yang ekstrem rendah (0,232) berpotensi menyebabkan campuran menjadi kurang *workable*, yang pada gilirannya menghambat proses pemasatan. Anomali kuat tekan (uji silinder) sangat mungkin disebabkan oleh pemasatan yang kurang sempurna saat pengecoran, menghasilkan rongga udara yang terperangkap (porositas) lebih banyak dalam matriks beton. Porositas ini secara langsung menurunkan kepadatan dan kuat tekan yang diukur pada silinder. Sebaliknya, hasil kuat lentur yang relatif lebih baik (dan hasil kuat tekan konversi yang lebih tinggi) mengindikasikan bahwa kekuatan intrinsik material Pasir *Sandblasting* berpotensi lebih tinggi, namun gagal tercapai dalam uji tekan karena masalah *workability* dan pemasatan.
2. Modulus Kehalusan Agregat: Faktor lain yang berkontribusi adalah modulus kehalusan agregat kasar yang tidak memenuhi kriteria standar. Kombinasi antara gradasi yang tidak ideal dan *workability* yang rendah akibat FAS sangat memperburuk kesulitan pemasatan, sehingga mempengaruhi distribusi agregat dan mutu akhir beton

#### Karakterisasi Kimia Agregat dan Implikasi Lingkungan (Solidifikasi Limbah B3)

Pemanfaatan limbah agregat (seperti Pasir *Sandblasting* atau Pasir Besi/Pantai) memiliki manfaat signifikan dari perspektif konstruksi berkelanjutan (*green construction*)<sup>5</sup>. Namun, untuk memperkuat klaim ini dan memastikan limbah B3 dapat dikelola dengan aman, diperlukan analisis komposisi kimia.

#### Analisis Komposisi Kimia (XRF/EDS):

Diperlukan analisis XRF (*X-ray Fluorescence*) atau EDS (*Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*) pada Pasir *Sandblasting*<sup>6</sup>. Data ini berfungsi ganda:

1. Potensi Pozzolanik: Mengukur kandungan Silika ( $\text{SiO}_2$ ) dan Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dalam limbah. Jika Pasir *Sandblasting* memiliki sifat pozzolanik, ini dapat menjelaskan peningkatan kekuatan material di usia lanjut.
2. Solidifikasi Kontaminan: Membuktikan bahwa kontaminan logam berat dari proses *sandblasting* telah terikat (tersolidifikasi) secara efektif di dalam matriks beton. Solidifikasi adalah mekanisme utama untuk mengamankan limbah B3.

#### KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan pasir besi dan pasir pantai sebagai substitusi agregat halus pada campuran AC-BC dapat meningkatkan kinerja campuran apabila digunakan dalam proporsi yang seimbang. Kombinasi variasi 5% pasir besi dan 5% pasir pantai serta 7,5% pasir besi dan 2,5% pasir pantai terbukti mampu memenuhi seluruh parameter Marshall sesuai

Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, karena distribusi ukuran butir, densitas mineral, serta interaksi antarpartikel menghasilkan struktur campuran yang stabil, padat, dan memiliki keseimbangan rongga udara yang optimal. Sebaliknya, variasi dengan dominasi satu jenis pasir, seperti 0%/10%, 2,5%/7,5%, dan 10%/0%, tidak memenuhi sebagian parameter VIM dan VFB akibat ketidakseimbangan gradasi dan karakteristik fisik antar material yang menyebabkan campuran terlalu porous atau terlalu rapat. Dengan demikian, penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi material lokal pasir besi dan pasir pantai berpotensi sebagai agregat halus alternatif pada AC-BC, selama komposisinya mempertahankan kerapatan struktur dan stabilitas internal campuran sesuai persyaratan teknis.

Berdasarkan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa kuat lentur tertinggi ( $39,40 \text{ kg/cm}^2$ ) masih di bawah persyaratan perkerasan kaku ( $45 \text{ kg/cm}^2$ ), saran untuk penelitian di masa depan adalah sebagai berikut:

1. Optimasi Proporsi Agregat Kasar: Lakukan pengujian dengan meningkatkan porsi agregat Merak/Banjarmasin yang lebih kasar atau menggantinya dengan agregat yang memiliki modulus kehalusan yang memenuhi standar ASTM untuk meningkatkan kinerja struktural perkerasan.
2. Penyesuaian FAS dan *Workability*: Lakukan penyesuaian halus pada FAS dan dosis *superplasticizer* untuk meningkatkan *workability* campuran. Tujuannya adalah memastikan pemasatan sempurna dapat tercapai, sehingga menghindari rongga udara (porositas) yang menyebabkan anomali kuat tekan rendah.
3. Penggunaan Material Pozzolan Tambahan: Uji coba campuran dengan menambahkan bahan aditif pozzolan lain, seperti abu terbang (*fly ash*) atau *silica fume*. Material ini dikenal efektif dalam meningkatkan kuat tekan dan kuat lentur beton, serta membantu mencapai target mutu perkerasan kaku.
4. Uji Durabilitas: Lakukan uji kinerja jangka panjang, seperti Uji Keausan atau Uji Ketahanan Sulfat, untuk memvalidasi kinerja material *sandblasting* di lingkungan ekstrem

#### DAFTAR PUSTAKA

Budiman, R., Salim, A., & Hadi, F. (2019). "Evaluasi penggunaan agregat alternatif dalam campuran aspal panas". *Jurnal Infrastruktur Jalan*, Vol. 3, No. 1, Hal. 12–20, Balai Besar Infrastruktur Jalan, Bandung.

Darmawan, R., & Fikri, M. (2020). "Analisis kerusakan perkerasan jalan akibat peningkatan beban lalu lintas". *Jurnal Rekayasa Sipil*, Vol. 14, No. 2, Hal. 101–110, Fakultas Teknik Sipil UNS, Surakarta.

Ditjen Bina Marga. (2018). "Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2". Kementerian PUPR, Jakarta.

Hardiyatmo, H. C. (2018). *Perancangan Perkerasan Jalan Raya*. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.

Hapsari, D., & Dewi, K. (2021). "Evaluasi penggunaan agregat lokal terhadap stabilitas campuran AC-BC". *Jurnal Infrastruktur*, Vol. 7, No. 2, Hal. 88–97, Universitas Diponegoro, Semarang.

Hidayat, A., Prasetyo, B., & Lazuardi, M. (2020). "Studi pemanfaatan material alternatif dalam campuran aspal". *Jurnal Teknologi Bahan Konstruksi*, Vol. 12, No. 3, Hal. 123–132, Balai Bahan Konstruksi, Jakarta.

Junaidi, A., Rahman, F., & Subagyo, S. (2019). "Karakteristik pasir pantai sebagai agregat halus pada campuran aspal". *Jurnal Pantai dan Lingkungan*, Vol. 5, No. 1, Hal. 30–38, Pusat Kajian Lingkungan Pesisir, Makassar.

Kurniawan, A., Satria, D., & Nurhalimah, S. (2022). "Pemanfaatan pasir besi sebagai agregat halus terhadap kinerja Marshall". *Jurnal Material Jalan*, Vol. 4, No. 2, Hal. 76–85, Balai Material Transportasi Jalan, Bandung.

Lestari, A., & Sunarmasto, H. (2021). "Pengaruh substitusi material lokal pada campuran AC-WC". *Jurnal Perkerasan*, Vol. 11, No. 2, Hal. 112–121, Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta.

Nugraha, B., Putra, I. P., & Wibowo, R. (2023). "Material alternatif dalam campuran aspal: Tinjauan eksperimental". *Jurnal Sains Jalan Raya*, Vol. 9, No. 1, Hal. 54–66, Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, Bandung.

Permatasari, N., Supriyadi, E., & Latif, M. (2021). "Pengaruh sifat fisik pasir pantai terhadap ikatan aspal-agregat". *Jurnal Geoteknik & Transportasi*, Vol. 6, No. 3, Hal. 67–75, Universitas Hasanuddin, Makassar.

Puspita, A., Pramono, H., & Widodo, T. (2020). "Analisis kinerja lapisan AC-BC berdasarkan variasi komposisi agregat". *Jurnal Konstruksi Jalan*, Vol. 8, No. 1, Hal. 22–32, Balai Konstruksi Jalan, Surabaya.

Rahmawati, S., Yuniarti, W., & Mahardika, A. (2020). "Karakteristik mineral pasir pantai dan aplikasinya dalam perkerasan jalan". *Jurnal Mineral & Material*, Vol. 4, No. 2, Hal. 90–98, Pusat Penelitian Material, Bandung.

Shafira, S., Pratama, R., & Kusuma, H. (2022). "Peran infrastruktur jalan dalam pengembangan wilayah". *Jurnal Transportasi dan Logistik*, Vol. 7, No. 2, Hal. 56–65, Pusat Penelitian Transportasi, Jakarta.

SNI ASTM C117. (2012). "Metode Uji Bahan yang Lolos Saringan No. 200 pada Agregat Halus dan Agregat Kasar". Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

SNI ASTM C127. (2012). "Metode Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar". Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

SNI ASTM C128. (2012). "Metode Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus". Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

SNI ASTM C131. (2012). "Metode Uji Keausan Agregat Kasar dengan Mesin Los Angeles". Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

SNI ASTM C136. (2012). "Metode Uji Analisis Saringan untuk Agregat Halus dan Agregat Kasar". Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

SNI ASTM C40. (1992). "Metode Uji Kandungan Zat Organik dalam Agregat Halus". Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

SNI 03-6861.1. (2002). "Metode Pengujian Kadar Ion Klorida dalam Mortar dan Beton". Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

Sukirman. (2003). *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Nova, Bandung.

Suryani, D., Firmansyah, R., & Mutiarasari, N. (2021). "Kajian kerusakan jalan pada daerah rawan cuaca ekstrem". *Jurnal Rekayasa Transportasi*, Vol. 5, No. 4, Hal. 201–210, Fakultas Teknik UNHAS, Makassar.