



Analisis Pemanfaatan Limbah Serbuk Besi Sebagai Bahan Pengganti *Filler* Terhadap Campuran Aspal

Ibnu Munir¹, Sazuatmo², Elsa Rati Hariza³

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Prof.Dr Hazairin,SH Bengkulu

ibnumunir@gmail.com¹, sazuatmo68@gmail.com², elsaratihariza@gmail.com³

Abstrak

Limbah serbuk besi merupakan sisa potongan atau sisa dari pembubutan besi tuang dari hasil pembungan bengkel bubut atau industry. Sisa potongan tersebut tidak lagi digunakan atau di buang menjadi limbah yang memiliki dampak negatif dengan mempengaruhi lingkungan sekitar industry. Kota Bengkulu memiliki beberapa bengkel bubut yang dapat menghasilkan limbah serbuk besi. Bahan campuran dari pemanfaatan limbah yang bisa dipakai dengan menggunakan limbah serbuk besi dengan tujuan mengurangi dan dapat mengelola limbah serbuk besi sebagai pengganti filler aspal panas, Dari pengujian marshall, kadar aspal optimum (KAO) yaitu 5,5% pada campuran aspal AC-WC, yakni dengan menggantikan 100% filler total dengan limbah serbuk besi sehingga didapatkan kadar penambahan optimum (KPO) 100%. Sehingga dapat ditarik Kesimpulan KPO sebesar 100% memiliki nilai VMA 15,62%, VFA 75,5%, VIM 3,91%, Stabilitas 2754,9 kg, Flow 2,6 mm, dan MQ 1355,55 kg. Didapatkan persentase Kadar Penambahan Optimum (KPO) serbuk besi sebagai bahan pengganti Filler terhadap campuran aspal dengan nilai kadar 100% pada KAO 5,5%. Pengujian ini dikerjakan untuk mengetahui pengaruh limbah serbuk besi sebagai bahan pengganti filler terhadap campuran aspal AC-WC yang mengalami pengaruh signifikan pada parameter marshall yang menyebabkan nilai Flow menurun sedangkan nilai VMA, VFA, VIM, Stabilitas, dan MQ meningkat pada KAO 5,5% yang ketatapannya telah ditentukan dengan menggantikan 100% filler.

Kata kunci: Serbuk Besi, Filler, Pengujian Marsall

1. Latar Belakang

Jalan raya merupakan lapis perkerasan yang lapisannya dimulai dari tanah dasar, lapis pondasi dan lapis Jalan raya merupakan lapis perkerasan yang lapisannya dimulai dari tanah dasar, lapis pondasi dan lapis permukaan aspal (Budianto & Lubis, 2020). Kekuatan dan keawetan suatu perkerasan jalan sangat ditentukan oleh daya dukung tanah, karena jenis aspal dan agregat-agregat yang digunakan sebagai bahan utama dalam pembuatan perkerasan lentur jalan. Dengan seiring berkembangnya jaman, banyak transportasi yang melintasi jalan dan membuat lapisan jalan semakin cepat rusak. Berbagai usaha dalam mengembangkan temuan baru untuk memperbaiki kekuatan jalan agar tidak cepat rusak (Arifiardi Winoto; Purnomo, Adhi, 2016). Salah satunya dengan memanfaatkan limbah industri untuk mendapatkan nilai tambah adalah bentuk inovasi dalam suatu penelitian.

Transportasi darat menduduki tempat yang strategis karena segala bidang kegiatan dapat berjalan dengan lancar jika sarana dan prasarana transportasi darat bisa optimal. Hal ini tidak sepenuhnya tercapai mengingat kondisi sebagian konstruksi jalan sangat memprihatinkan. Banyaknya jalan yang rusak dengan berbagai penyebab menambah potret buruk prasarana pada jalan. Usaha untuk memperbaiki konstruksi jalan secara terus menerus dilakukan. Berbagai inovasi dan temuan baru senantiasa dikembangkan dan diaplikasikan dalam usaha perbaikan dan optimalisasi prasarana jalan.

Limbah serbuk besi merupakan sisa potongan atau sisa dari pembubutan besi tuang dari hasil pembungan bengkel bubut atau industry. Sisa potongan tersebut tidak lagi digunakan atau di buang menjadi limbah yang memiliki dampak negative dengan mempengaruhi lingkungan sekitar industry. Kota Bengkulu memiliki beberapa bengkel bubut yang dapat menghasilkan limbah serbuk besi. Bahan campuran dari pemanfaatan limbah yang bisa dipakai dengan menggunakan limbah serbuk besidengan tujuan mengurangi dan dapat mengelola limbah serbuk besi sebagai pengganti *filler* aspal panas. Hal ini dapat mengurangi limbah serbuk besi yang dihasilkan oleh bengkel bubut maupun industry yang menghasilkan limbah serbuk besi.

Berdasarkan penjelasan di atas, memperlihatkan perlunya sebuah studi untuk mempelajari pemanfaatan limbah industri, maka peneliti ingin melakukan penelitian yang berjudul “Analisis Pemanfaatan Limbah Serbuk Besi sebagai Bahan Pengganti *Filler* Terhadap Campuran Aspal”. Hal ini diperlukan untuk mewujudkan lingkungan yang bebas limbah industri dengan memanfaatkan limbah tersebut sebagai salah satu bahan pada campuran aspal panas. Inovasi ini dapat diterapkan dalam penggunaan aspal panas yang dapat digunakan sebagai lapisan perkerasan jalan agar sarana dan prasarana darat bisa lebih optimal.

2. Metode Penelitian

1. Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu penelitian dilakukan sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan. Tempat penelitian akan dilakukan di laboratorium Teknik Sipil Universitas Prof. Dr. Hazairin Kota Bengkulu.

2. Langkah-Langkah Penelitian

Penelitian ini menggunakan campuran AC-WC yang terdiri dari agregat kasar, agregat halus, aspal, *filler*, dan limbah serbuk besi. Berikut langkah- langkah dalam penelitian ini yaitu :

1. Tahap I

Pada tahapan ini adalah mempersiapkan peralatan dan bahan yang akan dipergunakan dalam penelitian.

2. Tahap II

Pada tahapan ini dilakukan pengujian fisik agregat dan pembuatan benda uji dengan cara membuat perencanaan campuran aspal dengan limbah serbuk besi.

3. Tahap III

Pada tahapan ini dilakukan pengujian *marshall* pada benda uji yang telah dibuat.

4. Tahap IV

Pada tahapan ini data-data yang telah didapat pada pengujian benda uji dengan menggunakan *marshall test* dikumpulkan dan dianalisa, sehingga didapat suatu kesimpulan dengan hasil penelitian ini.

3. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data yang dipakai penulis dalam penelitian ini, meliputi:

Data Primer, berdasarkan dari data alat-alat dan bahan yang akan digunakan pada pengujian di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Prof. Dr. Hazairin, SH. Kota Bengkulu.

Data Sekunder, berdasarkan studi literatur dan kajian-kajian yang pernah dilakukan sebelumnya.

4. Metode Pengujian

Metode uji sampel campuran aspal menggunakan *Marshall Test* berupa stabilitas dan kelelahan (*flow*) serta sifat-sifat volumetrik yang terdapat dalam pengujian *Marshall* dengan limbah serbuk besi sebagai bahan pengganti *filler*.

5. Metode Analisis Data

Pada tahap ini akan dilakukan analisis terhadap pengumpulan data yang telah dilakukan dengan menggunakan metode statistik sesuai hasil uji yang telah didapat dari laboratorium.

3. Hasil dan Diskusi

1 Hasil Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Prof. Dr. Hazairin, S.H Bengkulu pada bulan Juni 2025. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja campuran aspal beton lapis aus (AC-WC) dengan memanfaatkan limbah serbuk besi sebagai pengganti filler konvensional, serta menguji karakteristik mekanis campuran tersebut melalui uji Marshall.

Pemanfaatan limbah serbuk besi dalam penelitian ini dimaksudkan sebagai bentuk inovasi material alternatif yang berpotensi meningkatkan kekuatan dan daya tahan lapisan perkerasan jalan, sekaligus menjadi solusi terhadap permasalahan limbah industri yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Hipotesis utama yang mendasari penggunaan serbuk besi adalah karena sifatnya yang sangat halus dan berat jenisnya yang tinggi, serbuk ini akan mengisi rongga mikro yang tidak terjangkau oleh filler mineral konvensional, sehingga meningkatkan kepadatan makro dan mikro, yang pada akhirnya akan menghasilkan peningkatan signifikan pada parameter stabilitas dan ketahanan deformasi campuran AC-WC. Fokus pengujian diarahkan pada parameter-parameter utama uji Marshall, seperti stabilitas, *flow*, *void in mix* (VIM), *void in mineral aggregate* (VMA), dan *void filled with asphalt* (VFA), guna mengetahui pengaruh penggunaan serbuk besi terhadap performa mekanis campuran aspal dan memverifikasi apakah campuran modifikasi ini memenuhi standar ketat yang ditetapkan untuk perkerasan jalan berkinerja tinggi.

Filler yang digunakan berupa serbuk besi murni dengan komposisi 100% terhadap berat agregat total. Proses penelitian meliputi beberapa tahapan utama, yaitu:

1. Pengujian sifat fisik agregat kasar, sedang, dan halus, termasuk berat jenis dan daya serap air, yang dilakukan sesuai standar SNI untuk memastikan kualitas dan kelayakan material dasar.
2. Pengujian sifat fisik aspal penetrasi 60/70, meliputi berat jenis, penetrasi, titik lembek, dan titik nyala, di mana hasil pengujian ini vital untuk menyesuaikan temperatur pencampuran dan pemadatan di laboratorium.
3. Pengujian karakteristik Marshall untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO) serta parameter-parameter pendukung lainnya yang menunjukkan kualitas campuran aspal, dengan tujuan spesifik untuk mengukur sejauh mana serbuk besi mempengaruhi matriks aspal-agregat.

2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat

a. Agregat Kasar

Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air pada agregat kasar menunjukkan bahwa berat jenis bulk (*Bulk Specific Gravity*) rata-rata sebesar 2,73 gr/cc, berat jenis kering permukaan jenuh (SSD) sebesar 2,80 gr/cc, dan berat jenis semu (*Apparent Specific Gravity*) sebesar 2,94 gr/cc. Nilai penyerapan air rata-rata sebesar 2,39%. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa agregat kasar yang digunakan memiliki porositas yang masih berada dalam batas wajar, sehingga layak digunakan dalam campuran aspal. Agregat dengan berat jenis tinggi akan memberikan kepadatan dan kekuatan struktural yang baik pada campuran, berperan sebagai kerangka utama yang menahan tegangan vertikal dan horizontal yang timbul dari beban lalu lintas, sementara nilai penyerapan yang relatif rendah (<3%) menunjukkan daya tahan yang baik terhadap penetrasi air, sehingga meningkatkan stabilitas termal dan durabilitas campuran aspal terhadap kondisi lingkungan tropis yang ditandai oleh curah hujan tinggi dan suhu permukaan perkerasan yang ekstrem.

b. Agregat Medium

Untuk agregat ukuran sedang, hasil pengujian menunjukkan berat jenis bulk sebesar 3,38 gr/cc, SSD sebesar 3,45 gr/cc, dan berat jenis semu mencapai 3,65 gr/cc, dengan penyerapan air 2,12%. Nilai berat jenis yang sangat tinggi pada agregat medium menandakan bahwa material memiliki densitas tinggi dan kemampuan menahan beban yang baik, sehingga sangat mendukung peningkatan daya dukung lapisan perkerasan. Densitas yang ekstrem ini (jauh di atas rata-rata agregat alam) menjadi keunggulan material dalam menyediakan volume padat yang besar dalam campuran. Tingkat penyerapan yang rendah mengindikasikan minimnya porositas internal, yang berpengaruh terhadap ketahanan campuran terhadap air dan deformasi plastis akibat lalu lintas berat, sehingga menjamin bahwa volume aspal tidak akan terserap berlebihan ke dalam pori-pori agregat, memaksimalkan aspal efektif yang tersedia untuk perekatan antar-butiran.

c. Agregat Halus

Agregat halus memiliki berat jenis bulk rata-rata 2,50 gr/cc, SSD sebesar 2,56 gr/cc, dan berat jenis semu 2,64 gr/cc, dengan penyerapan air 2,09%. Agregat halus berfungsi sebagai pengisi rongga antar-butiran agregat kasar, sehingga mempengaruhi tingkat kepadatan dan kelekatan aspal terhadap agregat. Nilai berat jenis dan penyerapan yang baik menunjukkan bahwa agregat halus memiliki tekstur permukaan dan komposisi mineral yang sesuai, meningkatkan adhesi aspal serta ketahanan campuran terhadap efek pelapukan dan air. Agregat halus ini berfungsi untuk membentuk matriks mortar bersama filler serbuk besi dan aspal, yang merupakan elemen kunci dalam

menentukan *workability* campuran saat proses konstruksi dan meminimalkan rongga udara untuk mencegah oksidasi aspal.

3. Pengujian Keausan Agregat (Abrasi Los Angeles)

Hasil uji keausan agregat menggunakan mesin Los Angeles Abrasion menunjukkan nilai keausan rata-rata sebesar 22,02%, di mana nilai maksimum yang diizinkan untuk campuran AC-WC adalah $\leq 40\%$. Nilai ini mengindikasikan bahwa agregat yang digunakan memiliki ketahanan aus yang sangat baik, mampu menahan gesekan dan tekanan akibat beban kendaraan serta abrasi permukaan jalan. Dengan angka keausan yang hanya sedikit di atas setengah dari batas maksimum yang diizinkan, ini menunjukkan sumber material agregat yang berasal dari batuan keras dan kompak. Agregat dengan ketahanan aus yang baik akan menghasilkan lapisan perkerasan yang lebih stabil, awet, dan tidak mudah pecah, sehingga secara langsung mendukung umur layanan jalan yang lebih panjang dan mengurangi biaya pemeliharaan akibat kerusakan dini perkerasan.

4 Pengujian Analisa Saringan (Gradasi Agregat)

Analisis saringan dilakukan terhadap tiga jenis agregat (kasar, sedang, halus) untuk mengetahui distribusi ukuran butiran. Hasil menunjukkan:

- Agregat kasar memiliki persentase lolos kumulatif 30,19% pada saringan No. 4.
- Agregat medium memiliki persentase lolos kumulatif 36,85% pada saringan No. 8.
- Agregat halus menunjukkan persentase lolos kumulatif 51,50% pada saringan No. 8.

Komposisi gradasi ini telah memenuhi standar gradasi ideal campuran AC-WC (Bina Marga, 2018), yaitu kombinasi seimbang antara butiran kasar dan halus untuk menghasilkan struktur padat dengan rongga udara minimum. Gradasi yang baik akan memengaruhi stabilitas, *workability*, serta durabilitas campuran aspal, karena mampu mengoptimalkan pembentukan matriks padat dan distribusi beban yang merata pada lapisan perkerasan. Kecermatan dalam desain gradasi menjamin bahwa *skeleton* agregat yang terbentuk memiliki interlock yang kuat, yang sangat penting untuk menahan geser dan mencegah pergeseran lateral pada saat dilalui kendaraan berat.

5 Pengujian Aspal Penetrasi 60/70

Aspal yang digunakan memiliki nilai penetrasi rata-rata sebesar 66,4 (0,1 mm), termasuk dalam kategori aspal keras sedang, yang ideal untuk kondisi iklim tropis.

- Berat jenis aspal: 1,13 gr/cc (Menunjukkan densitas yang baik).
- Titik lembek (*Softening Point*): 54,5°C (Menunjukkan ketahanan terhadap pelunakan pada suhu operasi tinggi).
- Titik nyala (*Flash Point*): 245°C (Menjamin keamanan penanganan dan pemanasan aspal di *Asphalt Mixing Plant*).

Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa aspal memiliki stabilitas termal yang baik, tidak mudah melunak pada suhu tinggi, dan aman digunakan dalam proses pencampuran. Densitas yang tinggi juga meningkatkan daya lekat (adhesi) antara aspal dan agregat, yang penting untuk mencegah pengelupasan (*stripping*) dan memperpanjang umur layanan perkerasan. Titik lembek yang relatif tinggi memastikan bahwa aspal dapat mempertahankan viskositas yang memadai pada suhu perkerasan di siang hari, sehingga mengurangi risiko *bleeding* dan *rutting*.

6 Pengujian Marshall

Uji Marshall dilakukan untuk menentukan stabilitas, *flow*, kepadatan (*density*), kadar aspal optimum (KAO), VIM, VMA, dan VFA. Kadar aspal yang diuji berturut-turut adalah 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, dan 6,5% dari berat total campuran.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar aspal optimum (KAO) diperoleh pada 5,5%, di mana:

- Nilai stabilitas maksimum tercapai, yang merupakan indikator utama daya dukung lapisan perkerasan terhadap beban aksial.

- Nilai *flow* masih dalam batas standar (2–4 mm), memastikan campuran memiliki fleksibilitas yang cukup untuk menahan retak tanpa menjadi terlalu lunak.
- Nilai VIM berada pada rentang 3–5%, rentang optimal untuk mengurangi potensi pengerasan aspal akibat udara (oksidasi) sambil mencegah terjadinya *bleeding*.
- Nilai VMA berkisar antara 15–17%, memastikan volume yang memadai untuk aspal efektif dan udara, yang merupakan faktor kunci dalam durabilitas campuran.
- Nilai VFA menunjukkan keseimbangan ideal antara kekakuan dan fleksibilitas campuran, berada dalam batas 65% hingga 75%.

Kombinasi parameter tersebut mengindikasikan bahwa campuran dengan penambahan serbuk besi sebagai filler menghasilkan kinerja Marshall yang optimal, memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018. Kesesuaian ini membuktikan bahwa substitusi filler konvensional dengan serbuk besi tidak menurunkan, bahkan berpotensi meningkatkan, kualitas struktural campuran AC-WC.

7. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian di atas, dapat disimpulkan bahwa limbah serbuk besi yang digunakan sebagai pengganti filler dalam campuran aspal AC-WC memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap karakteristik Marshall serta kinerja mekanis campuran. Serbuk besi, yang memiliki berat jenis jauh lebih tinggi daripada filler mineral konvensional (seperti semen atau kapur), secara langsung meningkatkan densitas campuran total. Peningkatan densitas ini sangat krusial, karena campuran menjadi lebih padat, yang ditunjukkan oleh nilai VIM (Void in Mix) yang terjaga dalam rentang optimal. Kepadatan yang superior ini berkorelasi langsung dengan peningkatan stabilitas Marshall, yang mengindikasikan kemampuan campuran menahan beban vertikal dan geser dari lalu lintas. Dengan demikian, serbuk besi berperan ganda: sebagai pengisi rongga mikro yang efektif dan sebagai penambah berat isi campuran.

Kinerja optimal campuran ini didukung pula oleh kualitas agregat yang digunakan. Nilai keausan agregat yang sangat rendah, rata-rata 22,02% (jauh di bawah batas maksimum 40%), menunjukkan ketahanan agregat yang luar biasa terhadap abrasi dan pecah. Selain itu, nilai berat jenis yang tinggi pada agregat (terutama agregat medium dengan berat jenis bulk mencapai 3,38 gr/cc) berkontribusi pada kerangka struktural yang kuat. Sinergi antara agregat yang keras dan tahan aus dengan filler serbuk besi yang padat memastikan bahwa *skeleton* agregat memiliki *interlock* yang maksimal. Kombinasi ini menghasilkan lapisan perkerasan yang tidak hanya stabil, tetapi juga sangat tahan terhadap disintegrasi dan kegagalan struktural akibat tekanan berulang dari beban lalu lintas berat.

Hasil pengujian Marshall menunjukkan bahwa pada Kadar Aspal Optimum (KAO) 5,5%, stabilitas campuran mencapai nilai maksimum, namun nilai *flow* tetap berada dalam batas standar yang dapat diterima (2–4 mm). Fenomena ini merupakan indikator keberhasilan desain campuran. Peningkatan stabilitas tanpa disertai *flow* yang terlalu rendah menunjukkan bahwa campuran tidak menjadi terlalu kaku atau rapuh; campuran mempertahankan fleksibilitas yang memadai untuk menahan retak termal dan kelelahan (*fatigue cracking*). Lebih lanjut, nilai VIM, VMA, dan VFA juga berada dalam batas spesifikasi Bina Marga 2018. Pengendalian VIM pada 3–5% sangat vital untuk membatasi penetrasi air dan udara, yang merupakan penyebab utama pengerasan dini aspal (oksidasi) dan pengelupasan (*stripping*).

Penggunaan limbah serbuk besi sebagai pengganti filler merupakan langkah inovatif yang memadukan keunggulan teknis dengan solusi lingkungan. Secara teknis, serbuk besi meningkatkan karakteristik fungsional campuran. Secara ekologis, metode ini mengalihkan limbah industri yang sebelumnya mungkin berakhir di tempat penimbunan, menjadikannya material bernilai tambah dalam konstruksi infrastruktur. Keberhasilan penelitian ini memberikan validasi bahwa limbah serbuk besi tidak hanya dapat digunakan, tetapi juga dapat meningkatkan performa perkerasan jalan raya. Pendekatan ini mendukung konsep pembangunan berkelanjutan di sektor teknik sipil, di mana material sisa dapat digunakan untuk menciptakan produk dengan kualitas superior.

Secara keseluruhan, campuran AC-WC yang dimodifikasi dengan serbuk besi telah terbukti memenuhi, bahkan melampaui, persyaratan spesifikasi Bina Marga 2018. Hasil ini memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk merekomendasikan limbah serbuk besi sebagai material fungsional dalam teknik perkerasan jalan. Namun, untuk implementasi skala penuh, disarankan untuk melakukan pengujian lanjutan yang mencakup simulasi kondisi lapangan yang lebih realistis, seperti pengujian *wheel tracking* untuk memverifikasi ketahanan terhadap *rutting* jangka panjang dan pengujian durabilitas air (seperti *cantabro loss test*), guna memastikan performa struktural dan daya tahan lapisan aspal di bawah kondisi iklim dan lalu lintas yang sebenarnya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian analisis pemanfaatan limbah serbuk besi sebagai bahan pengganti *filler* terhadap campuran aspal AC-WC dapat disimpulkan sebagai berikut: 1. Dari pengujian Marshall, kadar aspal optimum (KAO) yaitu sebesar 5,5% pada campuran aspal AC-WC, angka ini ditetapkan setelah mengevaluasi berbagai variasi kadar aspal dan merupakan titik di mana kinerja campuran mencapai keseimbangan terbaik antara stabilitas dan fleksibilitas. Kadar aspal optimum ini didapatkan dengan menggantikan 100% *filler* total dengan limbah serbuk besi sebagai material tunggal pada fraksi *filler* sehingga didapatkan kadar penambahan optimum (KPO) sebesar 100%. Penetapan KPO 100% ini menunjukkan bahwa limbah serbuk besi layak secara teknis untuk sepenuhnya menggantikan *filler* konvensional tanpa memerlukan *filler* tambahan lainnya. Sehingga dapat ditarik kesimpulan KPO sebesar 100% memiliki nilai VMA (Void in Mineral Aggregate) 15,62%, VFA (Void Filled with Asphalt) 75,5%, VIM (Void in Mix) 3,91%, Stabilitas yang sangat tinggi 2754,9 kg, *Flow* yang terkontrol 2,6 mm, dan MQ (Marshall Quotient) 1355,55 kg. Semua nilai parameter Marshall ini tidak hanya memenuhi batas spesifikasi teknis Bina Marga 2018, tetapi nilai Stabilitas dan MQ-nya bahkan jauh melampaui standar minimal yang dipersyaratkan, menegaskan kualitas struktural campuran yang superior. 2. Didapatkan persentase Kadar Penambahan Optimum (KPO) serbuk besi sebagai bahan pengganti *Filler* terhadap campuran aspal berada dengan nilai kadar 100% pada KAO 5,5%. Hasil ini secara definitif menunjukkan bahwa limbah serbuk besi dapat berfungsi sebagai *filler* substitusi total yang efisien, memberikan solusi inovatif terhadap manajemen limbah industri sambil menciptakan campuran aspal yang berkinerja tinggi. Kombinasi KAO 5,5% dan KPO 100% ini merepresentasikan formulasi campuran yang paling efektif dan paling efisien dari segi teknis dalam konteks penelitian ini. Pengujian ini dikerjakan untuk mengetahui pengaruh limbah serbuk besi sebagai bahan pengganti *filler* terhadap campuran aspal AC-WC yang mengalami pengaruh signifikan pada parameter Marshall. Pemanfaatan serbuk besi, yang memiliki berat jenis lebih tinggi dan kehalusan yang baik, berhasil mengisi rongga mikro secara lebih efektif dibandingkan *filler* konvensional, menghasilkan matriks aspal-agregat yang lebih kompak. Dampak dari penambahan serbuk besi ini menyebabkan nilai *Flow* menurun secara terkontrol, yang mengindikasikan kekakuan campuran sedikit meningkat, sedangkan nilai VMA, VFA, VIM, Stabilitas, dan MQ meningkat pada KAO 5,5% yang mana ketetapanannya telah ditentukan dengan menggantikan 100% *filler*. Peningkatan pada Stabilitas dan MQ, didampingi dengan VIM dan VFA yang masih optimal, merupakan bukti langsung bahwa serbuk besi telah memperkuat ikatan antar-butiran agregat, meningkatkan daya tahan campuran terhadap deformasi permanen, dan memperpanjang umur layanan perkerasan jalan.

Referensi

- 1 Arifiardi Winoto; Purnomo, Adhi, I. H. (2016). "Pengaruh Penggunaan Pasir Pantai Carita Sebagai Campuran Agregat Halus Pada Lapis Permukaan Aspal Beton Terhadap Persyaratan Parameter Marshall". *Jurnal Menara*, XI(Vol 11 No 1 (2016): Menara: Jurnal Teknik Sipil),16.<http://journal.unj.ac.id/unj/index.php/menara/article/view/7969>
- 2 Ayunaning, K. (2015). *Perbandingan Penggunaan Laston (Lapis Aspal Beton) Dan Lapen (Lapis Penetrasi Makadam) Dengan Menggunakan Tambahan Filler Limbah Kulit Kerang Pada Lapisan Perkerasan*. Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur. Bina Marga. (2005) "Perencanaan Tebal Lapis Tambah Perkerasan Lentur dengan Metode Lendutan Pd. T-05-2005-B". Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga. Jakarta.
- 3 Badan Standarisasi Nasional. (1991). "Metode Pengujian Campuran Aspal Dengan Alat Marshall (SNI 06-2489:1991)". Standar Nasional Indonesia. Jakarta.
- 4 Bahri, S. (2017). Pemanfaatan Limbah Serbuk Besi Sebagai Agregat Halus Pada Campuran Aspal Panas. *Inersia, Jurnal Teknik Sipil*, 9(2), 39–46. <https://doi.org/10.33369/ijts.9.2.39-46>
- 5 Budianto, M. D. ., & Lubis, Z. (2020). "Alternatif Penggunaan Agregat Halus Batu Kapur Mantup Dalam Campuran Aspal Panas AC-WC". 4(1), 559– 570.
- 6 Daryus, A. (2018). "Diktat Kuliah Proses Produksi". <http://ft.unsada.ac.id> Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga. (2010).
- 7 Spesifikasi Umum Bina Marga Divisi 6 Tahun 2010 (Revisi 3). In *Spesifikasi Umum Bina Marga* (3rd ed.). Departemen Pekerjaan Umum. http://mpk.binakonstruksi.pu.go.id/upload/file/Spesifikasi_umum_bina_marga_2010.pdf
- 8 Devi, Chintya Umma and Affandy, Azizah Nur. (2021). "Penggunaan Limbah Serbuk Besi sebagai Campuran Agregat Halus pada Asphalt Concrete- Wearing Course (AC-WC)". *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 4(3), 533-544.
- 9 Hendro, S., (2010). "Besi Tuang". <https://teknikmesinindustri.wordpress.com/2010/05/26/besituang/>. Diakses 13 April 2024
- 10 Krebs, R.D. and R.D. Walker. (1971). "Highway Materials". McGraw-Hill Book Company. New York, N.Y.
- 11 Muntohar, Agus. (2009) "Influence of Plastic Waste Fibers on the Strength of Lime-Rice Husk Ash Stabilized Clay Soil". *Civil Engineering Dimension*, 11(1), 32-40.
- 12 Paryati, N. (Program S. T. S. / U. B. (2015). KUAT TEKAN BETON DENGAN PENAMBAHAN SERBUK BESI DAN BAJA. *Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 3(1), 2031. <http://jurnal.unismabekasi.ac.id/index.php/bentang/article/view/381>

- 13 Salsabilla, Shafira Nadia; Firmasyah, Hasbi and Sugiono, Cipto M. (2022). "Dampak Penambahan Limbah Serbuk Besi sebagai Pengganti Beberapa Agregat Halus terhadap Stabilitas Campuran Aspal dengan Metode *Marshall Test*". *Jurnal Teknik Sipil Universitas Madura*, 7(1), 13- 18.
- 14 Saputra, Iman; Rosalina; Yusnar, Cut. (2021) "Substitusi Parsial Agregat Halus dengan Serbuk Besi pada Campuran Laston AC-WC". *Jurnal Sipil Sains Terapan*, 3(2), 31-39.
- 15 Soeprapto. (2000) "Bahan dan Struktur Jalan". Biro Penerbit. Yogyakarta. *Shell Bitumen*. (1990). "*Shell Bitumen Handbook*". Shell Bitumen, England Sukirman, S. (1992). "Perkerasan Lentur Jalan Raya". Nova. Bandung.
- 16 Sukirman, S. (1995). "Perkerasan Jalan Raya". Nova. Bandung. Sukirman, S. (2007). "Beton Aspal Campuran Panas". Granit. Jakarta. *The Asphalt Institute*. (1988). "*Mix Design Methods for Asphalts Concrete*". Manual Series No.2 (MS-2). Lexington, KY.
- 17 Utomo, N., Wahjudijanto, I., & Yasin, F. S. R. (2020). Penggunaan Limbah Serbuk Besi Sebagai Material Pengisi (Filler) Pada Campuran Struktur Perkerasan Jalan Kolektor Ponco-Jatirogo (STA. 130+ 200–STA. 138+700). *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 12(2), 64-74.
- 18 Mempengaruhi Audit Delay (Studi Empiris pada Perusahaan yang Terdaftar Secara Konsisten di LQ45 pada Bursa Efek Indonesia)", *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Ekonomi Universitas Riau*, 3(8), pp. 1–12.