

## Evaluasi Volumetrik dan Marshall Campuran AC-BC dengan Pemanfaatan Limbah Kulit Kerang

Santy Masnauli Silaen<sup>1\*</sup>, Marwan Lubis<sup>2</sup>, Rizqia Fatikhah<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Medan Area, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Sumatera Utara, Indonesia

<sup>3</sup>Departemen Teknik Sipil, Universitas Indonesia, Indonesia

\*Penulis korespondensi, email: [santymasnaulisilaen@gmail.com](mailto:santymasnaulisilaen@gmail.com)

**Abstrak**—Pemanfaatan limbah kulit kerang sebagai material alternatif pada konstruksi perkerasan jalan menjadi salah satu upaya untuk mengurangi limbah sekaligus meningkatkan nilai guna material lokal. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi karakteristik volumetrik dan Marshall campuran Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC) dengan penggunaan serbuk kulit kerang sebagai substitusi agregat halus. Metode penelitian menggunakan pengujian Marshall berdasarkan spesifikasi Bina Marga dengan variasi kadar serbuk kerang sebesar 0%, 15%, 30%, 50%, dan 75%. Parameter yang dianalisis meliputi kepadatan, stabilitas, flow, Void in Mix (VIM), Void Filled with Asphalt (VFA), Void in Mineral Aggregate (VMA), dan Marshall Quotient (MQ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar serbuk kulit kerang menyebabkan nilai kepadatan, stabilitas, VFA, dan MQ menurun, sedangkan nilai flow, VIM, dan VMA meningkat. Nilai stabilitas tertinggi diperoleh pada variasi 15% sebesar 1174,25 kg. Berdasarkan evaluasi parameter Marshall, campuran dengan kadar serbuk kulit kerang 15%–30% masih memenuhi spesifikasi AC-BC. Pemanfaatan serbuk kulit kerang berpotensi menjadi material alternatif ramah lingkungan pada campuran perkerasan jalan, namun penggunaan kadar tinggi tidak direkomendasikan karena menurunkan kualitas campuran.

Kata kunci: AC-BC, Marshall, serbuk kulit kerang, volumetrik.

*This article is licensed under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.*

### 1. Pendahuluan

Perkerasan jalan merupakan salah satu infrastruktur transportasi yang memiliki peranan penting dalam mendukung mobilitas, pertumbuhan ekonomi, dan pemerataan pembangunan wilayah. Kinerja perkerasan jalan sangat dipengaruhi oleh kualitas material penyusun campuran beraspal, terutama pada lapisan Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC) yang berfungsi sebagai lapisan pengikat dan penahan beban lalu lintas [1]. Campuran AC-BC harus memiliki stabilitas tinggi, ketahanan deformasi, serta karakteristik volumetrik yang memenuhi spesifikasi agar mampu memberikan umur layanan yang optimal [2], [3].

Perencanaan campuran beraspal pada umumnya mengacu pada pendekatan kepadatan mutlak dan pengujian Marshall sebagaimana diatur dalam pedoman teknis Departemen Pekerjaan Umum dan standar nasional Indonesia [4]–[7]. Parameter Marshall seperti stabilitas, flow, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Asphalt (VFA), dan Marshall Quotient (MQ) menjadi indikator utama dalam menentukan mutu campuran aspal [8], [9]. Selain itu, kualitas agregat dan aspal juga harus memenuhi persyaratan berdasarkan standar pengujian nasional [10]–[14].

Penggunaan agregat alam secara terus-menerus dalam konstruksi jalan menimbulkan permasalahan lingkungan berupa eksploitasi sumber daya alam dan peningkatan limbah padat yang belum termanfaatkan secara optimal. Oleh karena itu, berbagai penelitian mulai mengembangkan material alternatif berbasis limbah sebagai substitusi agregat maupun filler dalam campuran perkerasan jalan. Pemanfaatan limbah industri dan limbah organik telah dilakukan melalui penggunaan abu cangkang kemiri pada paving block [15], abu kulit kopi pada campuran AC-WC [16], abu bonggol jagung sebagai filler [17], limbah marmer sebagai agregat campuran AC-BC [18], serta serbuk bata merah sebagai filler campuran aspal [19], [20]. Inovasi material konstruksi juga berkembang pada penggunaan reclaimed asphalt pavement dan recycled concrete aggregate [21], komposit berbasis batuan basalt dan dross aluminium [22], serta pemanfaatan limbah bata sebagai bahan campuran beton [23].

Dalam bidang perkerasan lentur, limbah kulit kerang mulai banyak diteliti karena memiliki kandungan mineral seperti kalsium karbonat yang berpotensi meningkatkan karakteristik campuran beraspal. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa limbah cangkang kerang dapat dimanfaatkan sebagai filler atau bahan substitusi pada campuran aspal dan beton. Veranita dan Kesuma melaporkan bahwa kombinasi cangkang lokan dan sabut kelapa mampu memengaruhi karakteristik campuran aspal beton [24]. Penelitian lain menunjukkan penggunaan limbah kulit kerang pada lapisan penetrasi makadam [25], substitusi cangkang kerang darah dan fly ash pada campuran aspal [26], serta pemanfaatan abu kerang simping pada campuran aspal beton [27]. Selain itu, pemanfaatan limbah kulit kerang hijau sebagai filler pada AC-WC juga menunjukkan pengaruh terhadap parameter Marshall campuran [28]. Penelitian terkait limbah cangkang kerang sebagai bahan substitusi dalam campuran beton aspal juga dilakukan oleh Veranita dkk. [29].

Meskipun berbagai penelitian mengenai pemanfaatan limbah pada campuran perkerasan telah dilakukan, kajian mengenai penggunaan serbuk kulit kerang sebagai pengganti agregat halus pada campuran AC-BC masih terbatas, khususnya yang mengevaluasi secara simultan parameter volumetrik dan karakteristik Marshall. Sebagian penelitian terdahulu lebih berfokus pada penggunaan limbah sebagai filler atau pada lapisan AC-WC, sedangkan penelitian pada lapisan AC-BC dengan substitusi agregat halus masih belum banyak dikembangkan. Oleh sebab itu, penelitian ini memiliki unsur kebaruan (novelty) berupa evaluasi komprehensif karakteristik volumetrik dan Marshall campuran AC-BC akibat substitusi agregat halus menggunakan limbah kulit kerang pada berbagai variasi persentase.

Penelitian ini menjadi penting karena selain mendukung konsep konstruksi berkelanjutan dan pengurangan limbah lingkungan, penggunaan limbah kulit kerang juga berpotensi menjadi alternatif material lokal yang ekonomis dan ramah lingkungan. Pengembangan material alternatif dalam bidang teknologi bahan konstruksi terus menjadi perhatian untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan infrastruktur [30]. Inovasi material pada konstruksi jalan juga perlu didukung oleh evaluasi kinerja mekanis dan struktural agar dapat diterapkan secara optimal pada pembangunan infrastruktur transportasi [31], [32].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan limbah kulit kerang sebagai pengganti agregat halus terhadap karakteristik volumetrik dan parameter Marshall campuran Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC). Evaluasi dilakukan melalui pengujian stabilitas, flow, kepadatan, VIM, VMA, VFA, dan Marshall Quotient guna menentukan persentase penggunaan limbah kulit kerang yang memenuhi spesifikasi campuran beraspal dan layak diterapkan pada konstruksi perkerasan jalan.

## **2. Metode**

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium untuk mengevaluasi karakteristik volumetrik dan Marshall campuran Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC) dengan pemanfaatan limbah kulit kerang sebagai substitusi agregat halus. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya

PT Adhi Karya (Persero) Tbk dengan mengacu pada spesifikasi Bina Marga dan Standar Nasional Indonesia (SNI). Tahapan penelitian meliputi persiapan material, pemeriksaan karakteristik material, perencanaan campuran, pembuatan benda uji, pengujian volumetrik, pengujian Marshall, serta analisis hasil pengujian.

Material yang digunakan terdiri atas agregat kasar, agregat sedang, agregat halus, filler, aspal penetrasi 60/70, dan serbuk kulit kerang. Kulit kerang terlebih dahulu dibersihkan, dikeringkan, dan dihancurkan hingga berbentuk serbuk agar dapat digunakan sebagai pengganti agregat halus pada campuran AC-BC. Sebelum dilakukan pencampuran, seluruh material diuji untuk mengetahui kesesuaiannya terhadap spesifikasi campuran beraspal panas. Pengujian yang dilakukan meliputi analisis saringan, berat jenis, dan daya serap agregat. Metode pengujian material disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Metode Pengujian Material

No	Pengujian	Metode	Spesifikasi
1	Analisa saringan	SNI 03-1968-1990	-
2	Berat jenis agregat	SNI 03-1969-1990	Minimum 2,5
3	Daya serap agregat	SNI 03-1969-1990	Maksimum 3%

Penelitian menggunakan variasi kadar serbuk kulit kerang sebagai pengganti agregat halus sebesar 0%, 15%, 30%, 50%, dan 75% dari berat agregat halus. Setiap variasi dibuat sebanyak enam benda uji sehingga total benda uji yang digunakan sebanyak 30 sampel. Variasi campuran yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Variasi Campuran Serbuk Kulit Kerang

No	Variasi Campuran	Persentase Serbuk Kerang
1	FA 100%	0%
2	SK 15%	15%
3	SK 30%	30%
4	SK 50%	50%
5	SK 75%	75%

Perencanaan campuran dilakukan menggunakan metode Marshall berdasarkan spesifikasi Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC). Kadar aspal rencana ditetapkan sebesar 5,5% dari total berat campuran. Komposisi agregat disusun berdasarkan gradasi yang memenuhi spesifikasi Bina Marga. Agregat dan aspal dipanaskan terlebih dahulu hingga mencapai suhu pencampuran. Selanjutnya material dicampur secara homogen sesuai variasi kadar serbuk kulit kerang yang telah ditentukan. Campuran dimasukkan ke dalam cetakan Marshall dan dipadatkan sebanyak 75 tumbukan pada masing-masing sisi benda uji. Benda uji yang telah selesai dipadatkan didiamkan selama 24 jam sebelum dilakukan pengujian volumetrik dan Marshall.

Pengujian volumetrik dilakukan untuk menentukan karakteristik campuran berupa berat isi, rongga dalam campuran (VIM), rongga dalam agregat (VMA), dan rongga terisi aspal (VFA). Pengukuran dilakukan berdasarkan berat kering, berat jenuh kering permukaan (SSD), dan berat benda uji di dalam air. Hasil pengujian volumetrik digunakan untuk mengevaluasi tingkat kepadatan dan rongga pada campuran akibat penggunaan serbuk kulit kerang sebagai pengganti agregat halus. Setelah pengujian volumetrik selesai dilakukan, benda uji direndam di dalam water bath pada suhu 60°C selama 30 menit sebelum diuji menggunakan alat Marshall.

Pengujian Marshall bertujuan untuk memperoleh nilai stabilitas dan flow campuran. Stabilitas menunjukkan kemampuan campuran menahan beban, sedangkan flow menunjukkan besarnya deformasi plastis campuran akibat pembebanan. Selain itu, nilai Marshall Quotient (MQ) juga dihitung

untuk mengetahui tingkat kekakuan campuran berdasarkan perbandingan antara stabilitas dan flow. Data hasil pengujian dianalisis dengan membandingkan parameter Marshall terhadap spesifikasi campuran AC-BC Bina Marga. Parameter yang dianalisis meliputi berat isi, stabilitas, flow, VIM, VMA, VFA, dan Marshall Quotient (MQ). Hasil analisis digunakan untuk menentukan kadar optimum penggunaan serbuk kulit kerang yang masih memenuhi persyaratan campuran Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC).

### 3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian karakteristik material dilakukan sebelum proses pencampuran Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC) untuk memastikan seluruh material memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan. Material yang diuji meliputi agregat kasar, agregat halus, dan serbuk kulit kerang sebagai bahan substitusi agregat halus. Pemeriksaan dilakukan terhadap analisis saringan, berat jenis, dan daya serap agregat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki nilai berat jenis bulk sebesar 2,627 dan daya serap sebesar 1,106%, sedangkan agregat halus memiliki berat jenis bulk sebesar 2,667 dan daya serap sebesar 1,544%. Serbuk kulit kerang memiliki berat jenis bulk sebesar 2,538 dan daya serap sebesar 2,229%, sehingga masih memenuhi spesifikasi minimum berat jenis agregat sebesar 2,5 dan maksimum daya serap sebesar 3%. Hasil pengujian karakteristik material disajikan pada Tabel 3.

Pengujian volumetrik dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan serbuk kulit kerang terhadap karakteristik campuran AC-BC. Parameter yang dianalisis meliputi berat isi, rongga dalam campuran (VIM), rongga terisi aspal (VFA), dan rongga dalam agregat (VMA). Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar kadar serbuk kulit kerang yang digunakan, maka nilai berat isi campuran cenderung mengalami penurunan. Campuran tanpa serbuk kulit kerang memiliki nilai berat isi tertinggi sebesar 2,352, sedangkan campuran dengan kadar serbuk kulit kerang 75% memiliki nilai berat isi sebesar 2,247. Penurunan berat isi disebabkan oleh berat jenis serbuk kulit kerang yang lebih rendah dibandingkan agregat halus alami sehingga kepadatan campuran menjadi berkurang. Hasil pengujian volumetrik campuran disajikan pada Tabel 4.

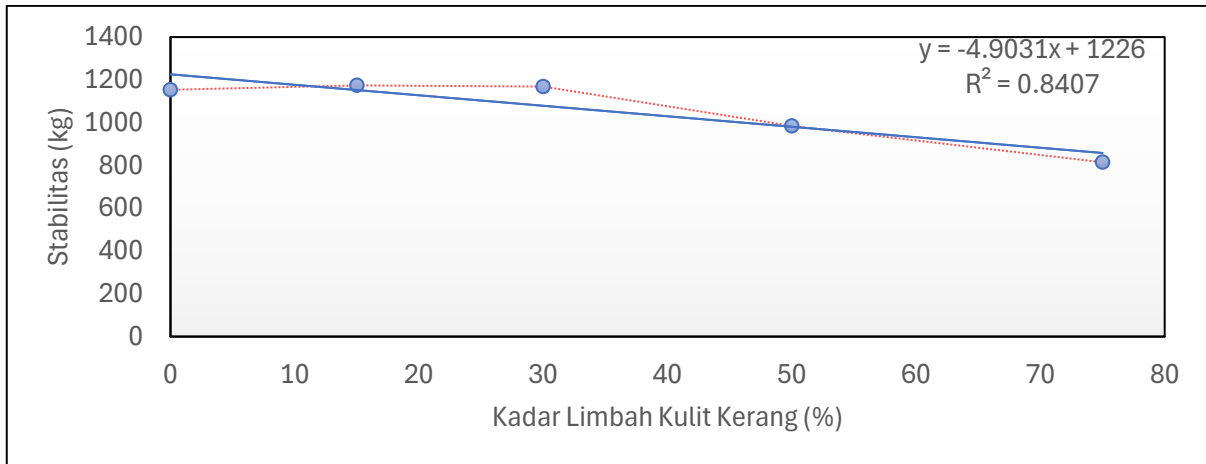
Hubungan antara kadar serbuk kulit kerang terhadap berat isi campuran direkomendasikan ditampilkan dalam bentuk grafik agar tren penurunan kepadatan campuran dapat diamati dengan lebih jelas. Grafik tersebut dapat menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase penggunaan serbuk kulit kerang, maka campuran cenderung memiliki rongga yang lebih besar dan tingkat kepadatan yang lebih rendah. Kondisi ini dipengaruhi oleh bentuk partikel serbuk kulit kerang yang tidak sepadat agregat alami serta memiliki kemampuan pengisian rongga yang lebih rendah. Selain itu, peningkatan rongga dalam campuran menyebabkan distribusi aspal menjadi kurang merata sehingga memengaruhi struktur internal campuran. Rekomendasi grafik hubungan kadar serbuk kulit kerang terhadap berat isi campuran disajikan pada Gambar 1.

Tabel 3. Hasil Pengujian Karakteristik Material

Material	Berat Jenis Bulk	Berat Jenis SSD	Berat Jenis Semu	Daya Serap (%)
Agregat Kasar	2,627	2,656	2,706	1,106
Agregat Halus	2,667	2,719	2,794	1,544
Serbuk Kulit Kerang	2,538	2,595	2,690	2,229

Tabel 4. Hasil Pengujian Volumetrik Campuran AC-BC

Variasi Campuran	Berat Isi	VIM (%)	VFA (%)	VMA (%)
FA 100%	2,352	5,183	67,789	15,966
SK 15%	2,337	5,582	65,300	16,530
SK 30%	2,325	6,285	63,018	16,943
SK 50%	2,293	7,600	58,200	18,110
SK 75%	2,247	9,440	52,230	19,740



Gambar 1. Grafik Hubungan Kadar Serbuk Kulit Kerang terhadap Berat Isi Campuran

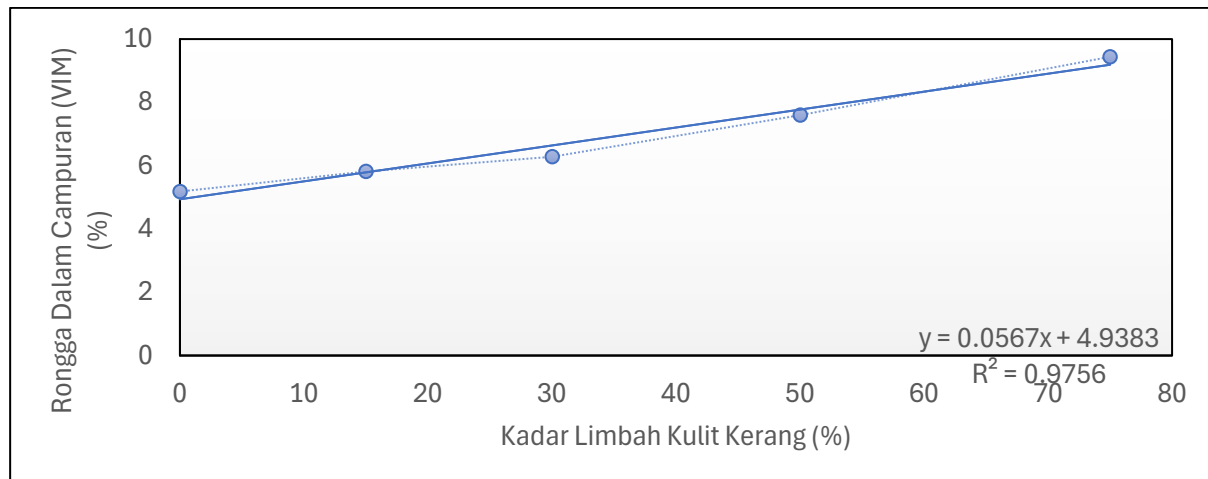
Nilai rongga dalam campuran (VIM) mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar serbuk kulit kerang. Nilai VIM pada campuran normal sebesar 5,183% meningkat menjadi 9,440% pada variasi campuran dengan kadar serbuk kulit kerang 75%. Peningkatan nilai VIM menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih berongga akibat penggunaan serbuk kulit kerang dalam jumlah besar. Rongga yang terlalu besar dapat menyebabkan campuran lebih mudah dimasuki air dan udara sehingga berpotensi mempercepat proses kerusakan perkerasan jalan. Selain itu, nilai rongga terisi aspal (VFA) mengalami penurunan dari 67,789% menjadi 52,230% akibat bertambahnya kadar serbuk kulit kerang. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa kemampuan aspal dalam mengisi rongga campuran menjadi semakin rendah.

Setelah pengujian volumetrik selesai dilakukan, benda uji kemudian diuji menggunakan alat Marshall untuk memperoleh nilai stabilitas, flow, dan Marshall Quotient (MQ). Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai stabilitas tertinggi diperoleh pada variasi campuran SK 15% sebesar 1174,25 kg. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan serbuk kulit kerang dalam jumlah terbatas masih mampu meningkatkan kekuatan campuran karena rongga antar agregat dapat terisi dengan lebih baik. Namun, pada variasi campuran SK 50% dan SK 75%, nilai stabilitas mengalami penurunan menjadi 985 kg dan 815 kg. Penurunan stabilitas tersebut menunjukkan bahwa penggunaan serbuk kulit kerang dalam jumlah besar menyebabkan campuran menjadi kurang padat dan kurang mampu menahan beban lalu lintas. Hasil pengujian Marshall disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Marshall Campuran AC-BC

Variasi Campuran	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	Marshall Quotient (kg/mm)
FA 100%	1153	4,67	247
SK 15%	1174,25	4,70	249,88
SK 30%	1169	4,87	240
SK 50%	985	5,01	198
SK 75%	815	5,03	162

Hubungan antara kadar serbuk kulit kerang terhadap nilai stabilitas direkomendasikan ditampilkan dalam bentuk grafik agar perubahan kemampuan campuran dalam menahan beban dapat dianalisis secara visual. Grafik tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kadar serbuk kulit kerang hingga 15% masih mampu meningkatkan stabilitas campuran, tetapi setelah melewati batas tersebut nilai stabilitas mengalami penurunan secara signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa serbuk kulit kerang memiliki batas optimum dalam campuran AC-BC sebelum menyebabkan penurunan kualitas campuran. Selain itu, grafik juga dapat memperlihatkan kecenderungan penurunan nilai Marshall Quotient akibat meningkatnya deformasi plastis campuran. Rekomendasi grafik hubungan kadar serbuk kulit kerang terhadap stabilitas campuran disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Hubungan Kadar Serbuk Kulit Kerang terhadap Stabilitas Campuran

Nilai flow campuran mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar serbuk kulit kerang dalam campuran. Campuran normal memiliki nilai flow sebesar 4,67 mm, sedangkan campuran dengan kadar serbuk kulit kerang 75% memiliki nilai flow sebesar 5,03 mm. Peningkatan nilai flow menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih plastis dan lebih mudah mengalami deformasi akibat pembebanan. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh meningkatnya rongga dalam campuran serta menurunnya tingkat kepadatan campuran akibat penggunaan serbuk kulit kerang. Selain itu, nilai Marshall Quotient juga mengalami penurunan dari 247 kg/mm pada campuran normal menjadi 162 kg/mm pada variasi SK 75%. Penurunan nilai Marshall Quotient menunjukkan bahwa kekakuan campuran semakin menurun seiring bertambahnya kadar serbuk kulit kerang.

Berdasarkan seluruh hasil pengujian, penggunaan serbuk kulit kerang sebagai substitusi agregat halus masih layak digunakan pada campuran AC-BC dengan kadar penggunaan sebesar 15% hingga 30%. Pada rentang tersebut, sebagian besar parameter Marshall masih memenuhi spesifikasi Bina Marga, terutama pada nilai stabilitas, flow, VFA, dan Marshall Quotient. Namun, penggunaan serbuk kulit kerang di atas 30% menyebabkan penurunan kualitas campuran yang ditandai dengan meningkatnya rongga campuran dan menurunnya stabilitas serta kekakuan campuran. Dengan demikian, limbah kulit kerang memiliki potensi sebagai material alternatif ramah lingkungan dalam campuran AC-BC apabila digunakan dalam batas optimum tertentu.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, penggunaan limbah kulit kerang sebagai substitusi agregat halus pada campuran Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC) memberikan pengaruh terhadap karakteristik volumetrik dan parameter Marshall campuran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan kadar serbuk kulit kerang menyebabkan nilai berat isi campuran mengalami penurunan. Penurunan tersebut dipengaruhi oleh berat jenis serbuk kulit kerang yang lebih rendah dibandingkan agregat halus alami sehingga tingkat kepadatan campuran menjadi berkurang. Selain itu, nilai rongga dalam campuran (VIM) dan rongga dalam agregat (VMA) mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar serbuk kulit kerang. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih berongga akibat penggunaan serbuk kulit kerang dalam jumlah besar.

Hasil pengujian Marshall menunjukkan bahwa nilai stabilitas tertinggi diperoleh pada variasi campuran dengan kadar serbuk kulit kerang 15% sebesar 1174,25 kg. Nilai tersebut menunjukkan bahwa penggunaan serbuk kulit kerang dalam jumlah terbatas masih mampu meningkatkan kekuatan campuran AC-BC. Namun, setelah kadar serbuk kulit kerang melebihi 30%, nilai stabilitas mengalami penurunan yang cukup signifikan. Penurunan tersebut diikuti dengan meningkatnya nilai flow dan menurunnya Marshall Quotient (MQ), sehingga campuran menjadi lebih plastis dan kurang kaku terhadap

pembebanan lalu lintas. Meskipun demikian, seluruh variasi campuran masih memenuhi persyaratan minimum flow berdasarkan spesifikasi Bina Marga.

Nilai rongga terisi aspal (VFA) mengalami penurunan seiring meningkatnya kadar serbuk kulit kerang dalam campuran. Penurunan nilai VFA menunjukkan bahwa kemampuan aspal dalam mengisi rongga campuran menjadi semakin rendah akibat perubahan karakteristik permukaan dan bentuk partikel serbuk kulit kerang. Pada variasi campuran dengan kadar serbuk kulit kerang 50% dan 75%, beberapa parameter Marshall tidak lagi memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan. Hal tersebut menunjukkan bahwa penggunaan serbuk kulit kerang dalam jumlah besar dapat menurunkan kualitas dan durabilitas campuran perkerasan jalan.

Secara keseluruhan, penggunaan limbah kulit kerang sebagai pengganti agregat halus pada campuran Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC) dinilai layak digunakan pada kadar substitusi 15% hingga 30%. Pada rentang tersebut, campuran masih mampu memenuhi sebagian besar parameter Marshall yang dipersyaratkan dan menunjukkan performa yang cukup baik terhadap stabilitas serta karakteristik volumetrik. Pemanfaatan limbah kulit kerang juga memberikan manfaat dari aspek lingkungan karena dapat mengurangi limbah cangkang kerang yang tidak termanfaatkan. Dengan demikian, limbah kulit kerang berpotensi menjadi material alternatif ramah lingkungan pada konstruksi perkerasan jalan.

#### Daftar Pustaka

- [1] S. Sukirman, *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Bandung, Indonesia: Nova, 1994.
- [2] Departemen PU, *Petunjuk Pelaksanaan Lapis Aspal Beton (LASTON) Untuk Jalan Raya*. Jakarta, Indonesia: Yayasan Badan Penerbit PU, 1989.
- [3] S. Sukirman, *Beton Aspal Campuran Panas*. Jakarta, Indonesia: Granit, 2003.
- [4] Departemen Pekerjaan Umum, *Pedoman Perencanaan Campuran Beraspal Panas Dengan Pendekatan Kepadatan Mutlak*. Jakarta, Indonesia: PT Adhi Karya (Persero) Tbk, 1999.
- [5] Departemen PU, *Pedoman Teknik Perencanaan Campuran Beraspal Dengan Pendekatan Kepadatan Mutlak*. Jakarta, Indonesia: Departemen PU, 1999.
- [6] Pustran-Balitbang PU, *Metode Pengujian Campuran Aspal Dengan Alat Marshall*. Jakarta, Indonesia: Pustran Balitbang PU, 1991.
- [7] Pusjatan-Balitbang PU, *Metode Pengujian Campuran Beraspal Panas Dengan Alat Marshall*. Bandung, Indonesia: Pusjatan Balitbang PU, 2003.
- [8] Departemen Kimpraswil, *Campuran Beraspal Panas Buku V Spesifikasi Khusus*. Jakarta, Indonesia: Departemen Kimpraswil, 2002.
- [9] RSNI, *Pedoman Pelaksanaan Lapis Campuran Beraspal Panas*. Jakarta, Indonesia: Badan Litbang PU, 2005.
- [10] SNI 03-1968-1990, *Metode Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus dan Agregat Kasar*. Jakarta, Indonesia: Pustran Balitbang Pekerjaan Umum, 1990.
- [11] SNI 03-1969-1990, *Metode Pengujian Berat Jenis Agregat Halus dan Agregat Kasar*. Jakarta, Indonesia: Pustran Balitbang Pekerjaan Umum, 1990.
- [12] SNI 03-1969-1990, *Metode Pengujian Daya Serap Agregat Halus dan Agregat Kasar*. Jakarta, Indonesia: Pustran Balitbang Pekerjaan Umum, 1990.
- [13] SNI 03-6388-2000, *Spesifikasi Agregat Lapis Pondasi Bawah, Lapis Pondasi Atas dan Lapis Pondasi Permukaan*. Bandung, Indonesia: Pusjatan Balitbang PU, 2000.
- [14] SNI 06-2441-1991, *Metode Pengujian Berat Jenis Aspal*. Jakarta, Indonesia: Pustran Balitbang Pekerjaan Umum, 1991.
- [15] L. C. Cahyono, Y. R. D. Sinta, N. R. Jannah, I. A. Fikriyah, P. N. Anwar, D. R. S. Putri, and A. P. Utomo, "Pemanfaatan limbah abu cangkang kemiri industri makanan sebagai substitusi agregat halus paving block," *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, pp. 677–684, 2023.
- [16] F. Rosyad and H. Pranata, "Analisis pengaruh filler abu kulit kopi terhadap stabilitas dan kepadatan aspal AC-WC," *Rang Teknik Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 361–366, 2024.

- [17] I. Ichsan, A. Olii, A. S. Hidayat, and P. Parwati, "Penggunaan abu bonggol jagung sebagai pengganti filler dalam komposisi campuran aspal AC-WC," *Innovative: Journal of Social Science Research*, vol. 4, no. 6, pp. 3017–3027, 2024.
- [18] W. T. Payung, "Pemanfaatan limbah marmer sebagai agregat dalam campuran AC-BC," *Paulus Civil Engineering Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 467–472, 2023.
- [19] M. Abdurrohimi, S. R. Harnaeni, and S. Sunarjono, "A preliminary study: Utilization red brick powder as filler in asphalt mixture," in *Proceedings of the 6th Mechanical Engineering, Science and Technology International Conference (MEST 2022)*, Paris, France: Atlantis Press, 2023, pp. 73–87.
- [20] M. A. S. R. Harnaeni and S. Sunarjono, "A preliminary study: Utilization red brick powder as filler in asphalt mixture," in *The 6th Mechanical Engineering, Science and Technology (MEST 2022) International Conference*, Singapore: Springer Nature, 2023, p. 73.
- [21] A. Y. Putri and P. S. Wulandari, "Pengaruh penggunaan reclaimed asphalt pavement dan recycled concrete aggregate pada lapis pondasi agregat terhadap kekuatan mekanis," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS*, 2025, pp. 245–256.
- [22] M. Al Muttaqii, F. Kurniajaya, and A. E. Hadi, "Karakteristik material komposit berbasis batuan basalt dan dross Al," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 21–27, 2022.
- [23] P. Paikun, S. A. Amdani, D. A. Susanto, and D. Saepurrahman, "Analysis of the compressive strength of concrete from brick wall waste as a concrete mixture," *ASTONJADRO*, vol. 12, no. 1, pp. 150–162, 2023.
- [24] B. T. Veranita and H. Kesuma, "Analisis karakteristik campuran aspal beton menggunakan kombinasi semen dengan cangkang lokan dan sabut kelapa sebagai filler," *Jurnal Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala*, vol. 9, no. 1, pp. 1–9, 2020.
- [25] K. Ayunaning and K. Juliati, "Use of shells waste filler in pavement layer using lapen (macamam penetration layer)," *Procedia of Engineering and Life Science*, vol. 2, no. 2, 2022.
- [26] T. Suhendra, Y. Darma, S. M. Saleh, A. B. Dasopang, F. Mauladea, and S. Humayra, "Pengaruh substitusi cangkang kerang darah dan fly ash terhadap campuran perkerasan aspal," *Journal of Planning and Research in Civil Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 700–706, 2025.
- [27] K. N. I. Sari, A. Maliki, and A. B. K. Suharso, "Pemanfaatan campuran limbah karet ban dengan filler abu kerang simping pada aspal beton," *Axial: Jurnal Rekayasa dan Manajemen Konstruksi*, pp. 25–34, 2022.
- [28] K. Ayunaning and R. D. Sutrisno, "Analisis pengaruh penggunaan limbah serbuk kulit kerang hijau sebagai filler pada campuran aspal AC-WC," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 2, no. 2, pp. 28–36, 2025.
- [29] A. Veranita, Y. Andi, and D. Rahmat, "Utilization of conch shell waste and sugar cane dregs as filler substitutes in concrete asphalt mixtures," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 971, no. 1, 2022, p. 012011.
- [30] M. R. Fatriady, M. R. Rachman, M. Jamal, I. W. Muliawan, W. Mustika, and D. S. S. Mabui, *Teknologi Bangunan dan Material*. Makassar, Indonesia: Tohar Media, 2022.
- [31] P. R. Rangan, B. A. Ampangallo, Z. Patongloan, and P. Sulli, "Perencanaan jembatan Sungai Sangpiak dengan menggunakan struktur baja," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil Universitas Yapis Papua*, vol. 2, no. 1, 2023, pp. 207–217.
- [32] R. P. Kayana, M. Aswin, and A. S. Lubis, "Pemeriksaan terhadap komposit crumb rubber-engineered cementitious composite (ECC) kerikil aspal porous berbasis styrofoam berdasarkan uji tekan dan uji lentur," *Portal: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 17, no. 2, pp. 320–327, 2025.