

Analisis Kadar Aspal Optimum Laston Lapis Pengikat (AC-BC) yang Mengandung Agregat Uncrushed dengan Metode Marshall (Studi Kasus: Material Sungai Sa'dan, Quarry Area Bittuang)

Angkil Sari¹, Ermitha Ambun Rombe Dendo^{2*}, Abdias Tandi Arrang³

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Toraja, Sulawesi Selatan, Indonesia

^{2,3}Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Toraja, Sulawesi Selatan, Indonesia

Email Koresponden: ermithaambun@ukitoraja.ac.id

Abstrak

Perkerasan jalan Laston Lapis Pengikat (AC-BC) memerlukan kadar aspal optimum (KAO) agar diperoleh keseimbangan antara stabilitas, kelelahan, dan rongga udara dalam campuran. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis KAO pada campuran AC-BC yang menggunakan agregat alami (uncrushed aggregate) dari Sungai Sa'dan, Quarry Area Bittuang, Kabupaten Tana Toraja, melalui metode Marshall. Pengujian dilakukan di laboratorium terhadap karakteristik agregat kasar, agregat halus, dan aspal penetrasi 60/70, dilanjutkan dengan pembuatan benda uji pada lima variasi kadar aspal (4,5%; 5%; 5,5%; 6%; dan 6,5%) serta pengujian Marshall standar mengacu pada SNI 06-2489-1991 dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Pengaruh penambahan agregat uncrushed sebesar 10% terhadap kinerja campuran turut dianalisis melalui pengujian Marshall Immersion pada masa perendaman 30 menit dan 24 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh parameter Marshall, yaitu VIM, VMA, VFB, stabilitas, dan flow, memenuhi spesifikasi yang disyaratkan, dengan kadar aspal optimum diperoleh sebesar 5,50%. Pengujian Marshall Immersion menunjukkan adanya penurunan nilai VIM dan stabilitas seiring bertambahnya durasi perendaman, namun seluruh nilai masih berada dalam batas yang diizinkan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa agregat uncrushed dari Sungai Sa'dan berpotensi dimanfaatkan sebagai material alternatif perkerasan jalan yang ekonomis dan berkelanjutan.

Kata kunci : Kadar Aspal Optimum, AC-BC, Agregat Uncrushed, Metode Marshall, Perkerasan Jalan

Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur jalan memiliki peran penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi, memperlancar mobilitas masyarakat, serta menunjang distribusi barang dan jasa. Kualitas suatu jalan sangat bergantung pada bahan perkerasan yang digunakan, salah satunya aspal, yang berfungsi sebagai perekat antarpartikel agregat dalam campuran beraspal. Aspal banyak digunakan karena memiliki sifat lentur, kemudahan



pelaksanaan, serta biaya yang relatif ekonomis dibandingkan beton, dan tersedia cukup melimpah di Indonesia (Sukirman, 1992; Damanik, 2023).

Dalam campuran beraspal, agregat merupakan komponen utama yang membentuk struktur perkerasan dan menahan beban lalu lintas, sehingga kualitasnya berpengaruh langsung terhadap kekuatan, stabilitas, dan daya tahan campuran. Namun, ketersediaan agregat hasil pemecah batu (*crushed aggregate*) yang memenuhi standar teknis sering kali terbatas, terutama di daerah dengan akses material yang jauh dari lokasi proyek, seperti wilayah Toraja, Provinsi Sulawesi Selatan. Kondisi ini mendorong perlunya pemanfaatan sumber daya lokal sebagai alternatif bahan konstruksi, sepanjang material tersebut memenuhi persyaratan teknis sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018).

Salah satu potensi sumber material lokal terdapat di Sungai Sa'dan, Quarry Area Bittuang, Kabupaten Tana Toraja, yang memiliki batuan sungai alami (*uncrushed aggregate*) dalam jumlah melimpah namun selama ini hanya dimanfaatkan sebagai bahan bangunan sederhana. Penelitian pada lokasi lain menunjukkan bahwa agregat alami sungai berpotensi memenuhi standar teknis untuk digunakan dalam campuran aspal beton, baik pada lapisan aus (AC-WC) maupun lapis pengikat (AC-BC), seperti pada Sungai Seriti Kabupaten Luwu (Mangetan et al., 2021), Sungai Bittuang (Wendani et al., 2020), Sungai Salo Pattejang Kabupaten Pangkep (Ambarura et al., 2021), dan Sungai Apanang Kabupaten Soppeng (Madallo & Mangontan, 2021).

Lapisan Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC) atau Laston Lapis Pengikat berfungsi menahan beban lalu lintas dan mendistribusikannya ke lapisan di bawahnya, sehingga campuran ini harus memiliki kadar aspal optimum agar diperoleh keseimbangan antara stabilitas, kelelahan, dan rongga udara. Salah satu metode yang umum digunakan untuk menentukan kadar aspal optimum adalah metode Marshall, yang menilai kekuatan, keawetan, dan stabilitas campuran beraspal melalui pengujian laboratorium (Mangetan et al., 2021). Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kadar aspal optimum pada campuran Laston lapis pengikat (AC-BC) yang menggunakan agregat alami

(uncrushed aggregate) dari Sungai Sa'dan, Quarry Area Bittuang, sekaligus mengevaluasi karakteristik Marshall campuran pada kondisi kadar aspal optimum tersebut.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental melalui pengujian laboratorium untuk menganalisis kadar aspal optimum campuran AC-BC yang menggunakan agregat uncrushed dari Sungai Sa'dan, Quarry Area Bittuang, Kabupaten Tana Toraja. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja. Material yang digunakan meliputi agregat kasar dan agregat halus dari Sungai Bittuang serta aspal penetrasi 60/70.

Tahap awal penelitian meliputi pengujian karakteristik material, yaitu analisa saringan, pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air, pengujian keausan agregat dengan mesin Los Angeles, indeks kepipihan dan kelonjongan, kadar lumpur, serta ketahanan agregat terhadap tumbukan, mengacu pada SNI 1969:2016, SNI 2417:2008, SNI 8287:2016, SNI 03-4428-1997, ASTM C136 (2012), dan ASTM D4791 (2010). Karakteristik aspal penetrasi 60/70 diuji meliputi daktilitas, titik nyala, titik bakar, serta penetrasi sebelum dan sesudah kehilangan berat.

Setelah material dinyatakan memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, dilakukan rancangan campuran (mix design) dengan lima variasi kadar aspal, yaitu 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, dan 6,5%, sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Benda uji dipadatkan sebanyak 75 tumbukan pada tiap sisi sesuai kategori lalu lintas berat, kemudian diuji dengan metode Marshall konvensional mengacu pada SNI 06-2489-1991 untuk memperoleh nilai stabilitas, flow, Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), dan Void Filled with Bitumen (VFB).

Tabel 1. Rencana Mix Design

No	Kadar Aspal (%)	Jumlah Benda Uji
1	4,5	3
2	5	3
3	5,5	3

No	Kadar Aspal (%)	Jumlah Benda Uji
4	6	3
5	6,5	3
6	KAO	9
	Jumlah	24

Sumber: Rancangan penelitian, 2026.

Kadar aspal optimum (KAO) ditentukan dari nilai tengah rentang kadar aspal yang memenuhi seluruh parameter Marshall secara bersamaan. Pada kondisi KAO, dibuat benda uji tambahan dengan penambahan agregat uncrushed sebesar 10% untuk diuji dengan metode Marshall Immersion, guna mengetahui pengaruh durasi perendaman (30 menit dan 24 jam) terhadap kinerja campuran. Data hasil pengujian kemudian dibandingkan terhadap Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 dan dianalisis secara deskriptif untuk menentukan karakteristik campuran AC-BC yang dihasilkan.

Parameter Marshall yang dianalisis terdiri atas lima besaran, yaitu: (1) stabilitas, yang menyatakan kemampuan maksimum campuran menahan beban sebelum terjadi keruntuhan (dinyatakan dalam kg); (2) flow atau kelelahan, yang menyatakan besarnya deformasi vertikal benda uji pada saat beban maksimum tercapai (dinyatakan dalam mm); (3) Void in Mix (VIM), yaitu persentase rongga udara yang tersisa dalam campuran padat terhadap volume total campuran; (4) Void in Mineral Aggregate (VMA), yaitu persentase rongga di antara butiran agregat pada campuran padat, termasuk rongga yang terisi aspal efektif; dan (5) Void Filled with Bitumen (VFB), yaitu persentase rongga VMA yang terisi oleh aspal. Kelima parameter tersebut dihitung dari data berat kering, berat dalam air, dan berat kondisi jenuh permukaan kering (SSD) benda uji, dikombinasikan dengan berat jenis agregat, berat jenis aspal, dan kadar aspal masing-masing benda uji, mengikuti prosedur SNI 06-2489-1991.

Pembahasan/hasil

A. Karakteristik Agregat Kasar

Hasil pengujian karakteristik agregat kasar uncrushed dari Sungai Bittuang disajikan pada Tabel 2. Seluruh parameter yang diuji, meliputi

berat jenis bulk, berat jenis SSD, berat jenis semu, penyerapan air, keausan agregat, indeks kepipihan, indeks kelongongan, kadar lumpur, serta ketahanan agregat terhadap tumbukan, memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Agregat Kasar (AC-BC)

Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Syarat/Batas	Hasil (%)	Keterangan
Berat Jenis Bulk	SNI 1969:2016	Min. 2,5	2,57	Memenuhi
Berat Jenis SSD	SNI 1969:2016	Min. 2,5	2,59	Memenuhi
Berat Jenis Semu	SNI 1969:2016	Min. 2,5	2,61	Memenuhi
Penyerapan Air	SNI 1969:2016	Maks. 3	0,49	Memenuhi
Keausan Agregat Kasar	SNI 2417:2008	Maks. 40	24,15	Memenuhi
Indeks Kepipihan	SNI 8287:2016	Maks. 25	5,20	Memenuhi
Indeks Kelongongan	SNI 8287:2016	Maks. 25	7,64	Memenuhi
Kadar Lumpur	SNI 03-4428:1997	Min. 0,2 - Maks. 1	0,80	Memenuhi
Ketahanan Terhadap Tumbukan	SNI 03-4426:1997	Maks. 30	12,19	Memenuhi

Sumber: Hasil pengujian laboratorium, 2025 (diadaptasi dari data tugas akhir).

B. Karakteristik Agregat Halus

Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus disajikan pada Tabel 3. Nilai berat jenis bulk, berat jenis SSD, dan berat jenis semu berada di atas batas minimum 2,5, sedangkan penyerapan air berada di bawah batas maksimum 3%, sehingga seluruh parameter dinyatakan memenuhi spesifikasi.

Tabel 3. Hasil Pengujian Agregat Halus (AC-BC)

Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Syarat/Batas	Hasil (%)	Keterangan
Berat Jenis Bulk	SNI 1969:2016	Min. 2,5	2,57	Memenuhi
Berat Jenis SSD	SNI 1969:2016	Min. 2,5	2,64	Memenuhi

Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Syarat/Batas	Hasil (%)	Keterangan
Berat Jenis Semu	SNI 1969:2016	Min. 2,5	2,77	Memenuhi
Penyerapan Air	SNI 1969:2016	Maks. 3	2,84	Memenuhi

Sumber: Hasil pengujian laboratorium, 2025 (diadaptasi dari data tugas akhir).

C. Karakteristik Aspal Penetrasi 60/70

Hasil pemeriksaan karakteristik aspal penetrasi 60/70 yang digunakan sebagai bahan pengikat campuran AC-BC disajikan pada Tabel 4. Nilai daktilitas, titik nyala, titik bakar, serta penetrasi sebelum dan sesudah kehilangan berat seluruhnya memenuhi syarat minimum yang ditetapkan.

Tabel 4. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Aspal Penetrasi 60/70

No	Jenis Pengujian	SNI/ASTM	Hasil	Syarat	Keterangan
1	Daktilitas	SNI 2432-2011	125 %	Min. 100	Memenuhi
2	Titik Nyala	SNI 2433-2011	353 °C	Min. 200	Memenuhi
3	Titik Bakar	SNI 2433-2011	363 °C	Min. 200	Memenuhi
4	Penetrasi Sebelum Kehilangan Berat	SNI 2432-2011	64,20 %	Min. 60	Memenuhi
5	Penetrasi Sesudah Kehilangan Berat	SNI 2432-2011	64,30 %	Min. 60	Memenuhi

Sumber: Hasil pengujian laboratorium, 2025 (diadaptasi dari data tugas akhir).

D. Komposisi Campuran Agregat dan Filler

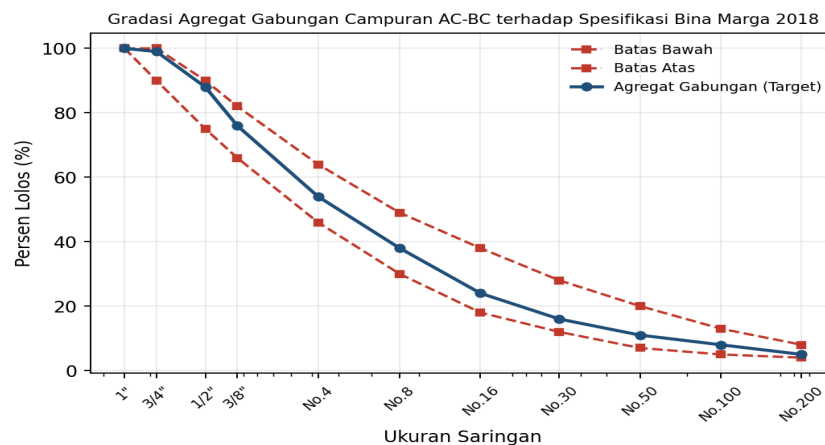
Komposisi campuran AC-BC ditentukan melalui penggabungan gradasi agregat kasar, agregat halus, dan filler terhadap target spesifikasi gradasi Bina Marga 2018, sebagaimana disajikan pada Tabel 5. Dari hasil penggabungan tersebut diperoleh proporsi agregat kasar sebesar 46,46%,

agregat halus sebesar 48,83%, dan bahan pengisi (filler) sebesar 4,71% terhadap total berat agregat 1.200 gram.

Tabel 5. Gradasi Agregat Gabungan Campuran AC-BC terhadap Spesifikasi Bina Marga 2018

Ukuran Saringan	Kisaran Lolos (%)	Target Lolos (%)
1"	100	100
3/4"	90-100	99
1/2"	75-90	88
3/8"	66-82	76
No.4	46-64	54
No.8	30-49	38
No.16	18-38	24
No.30	12-28	16
No.50	7-20	11
No.100	5-13	8
No.200	4-8	5

Sumber: Hasil perhitungan pengujian laboratorium, 2025 (diadaptasi dari data tugas akhir).



Gambar 1. Grafik Gradasi Agregat Gabungan Campuran AC-BC terhadap Spesifikasi Bina Marga 2018

Grafik pada Gambar 1 menunjukkan bahwa kurva gradasi agregat gabungan (target) berada di antara batas atas dan batas bawah spesifikasi Bina Marga 2018 pada seluruh ukuran saringan, dari saringan 1 inci hingga No.200. Hal ini menunjukkan bahwa gradasi agregat gabungan yang menggunakan agregat kasar uncrushed dari Sungai Sa'dan memenuhi

persyaratan gradasi untuk campuran AC-BC, sehingga dapat dilanjutkan ke tahap rancangan kadar aspal.

Berdasarkan hasil rancangan tersebut, ditentukan berat aspal dan agregat untuk setiap variasi kadar aspal terhadap total berat campuran 1.200 gram per benda uji, sebagaimana disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Berat Agregat dan Aspal untuk Penentuan KAO Campuran AC-BC

Variasi Kadar Aspal (%)	Berat Aspal (gr)	Total Berat Campuran (gr)	Berat Agregat (gr)
4,5	57	1200	1143
5	63	1200	1137
5,5	70	1200	1130
6	77	1200	1123
6,5	83	1200	1117

Sumber: Hasil perhitungan pengujian laboratorium, 2025.

E. Hasil Pengujian Marshall Campuran AC-BC

Hasil pengujian Marshall terhadap lima variasi kadar aspal disajikan pada Tabel 7. Pengujian dilakukan dengan pemadatan 2 x 25 tumbukan sesuai kategori lalu lintas berat, terhadap 15 benda uji (3 benda uji untuk setiap variasi kadar aspal).

Tabel 7. Hasil Pengujian Marshall Campuran AC-BC (2 x 25 Tumbukan)

Kadar Aspal (%)	VIM (%)	VMA (%)	VFB (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)
4,5	4,83	14,39	66,54	1056,30	2,50
5	4,42	15,08	70,85	1050,77	3,17
5,5	3,95	15,72	75,84	967,18	3,33
6	3,26	16,16	81,85	917,19	3,50
6,5	2,77	16,76	83,98	851,25	3,83

Sumber: Hasil perhitungan pengujian laboratorium, 2025. Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2: VIM 3,0-5,0%; VMA min. 14%; VFB min. 63%; stabilitas min. 800 kg; flow 2,0-4,0 mm.

Nilai VIM campuran menurun seiring bertambahnya kadar aspal, dari 4,83% pada kadar 4,5% menjadi 2,77% pada kadar 6,5%, karena rongga udara semakin terisi oleh aspal. Pada kadar aspal 6,5%, nilai VIM

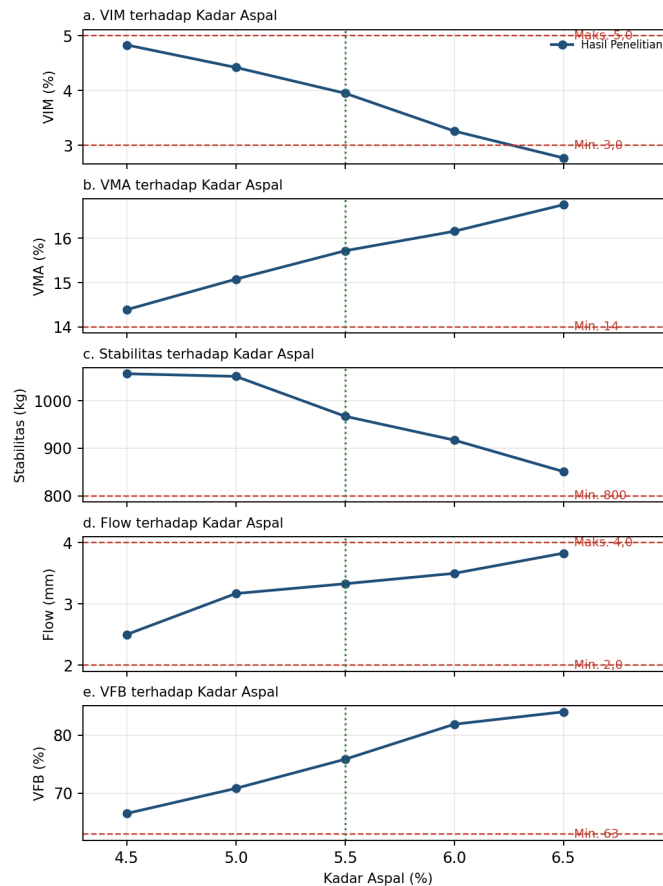
berada di bawah batas minimum 3,0% sehingga tidak memenuhi spesifikasi, sedangkan pada kadar aspal 4,5% hingga 6% nilai VIM masih berada dalam rentang yang disyaratkan.

Nilai VMA pada seluruh variasi kadar aspal berada di atas batas minimum 14% dan cenderung meningkat seiring bertambahnya kadar aspal, karena bertambahnya volume rongga agregat yang terisi aspal. Nilai stabilitas tertinggi diperoleh pada kadar aspal rendah dan menurun seiring bertambahnya kadar aspal, akibat lapisan aspal yang semakin tebal melapisi agregat sehingga ikatan antarbutir menjadi lebih lunak. Meskipun demikian, nilai stabilitas pada seluruh variasi kadar aspal tetap berada di atas batas minimum 800 kg.

Nilai flow pada seluruh variasi kadar aspal berada dalam rentang spesifikasi 2,0-4,0 mm dan cenderung meningkat seiring bertambahnya kadar aspal, karena selimut aspal yang semakin tebal menurunkan kekakuan campuran. Nilai VFB juga meningkat seiring bertambahnya kadar aspal, dari 66,54% pada kadar 4,5% menjadi 83,98% pada kadar 6,5%, karena berkurangnya rongga udara (VIM) menyebabkan proporsi rongga agregat yang terisi aspal menjadi lebih besar. Seluruh nilai VFB berada di atas batas minimum 63%.

F. Penentuan Kadar Aspal Optimum

Kadar aspal optimum ditentukan dari rentang kadar aspal yang memenuhi seluruh parameter Marshall secara bersamaan, yaitu VIM, VMA, VFB, stabilitas, dan flow. Nilai VMA, VFB, stabilitas, dan flow memenuhi syarat pada seluruh rentang kadar aspal 4,5% hingga 6,5%, sedangkan nilai VIM memenuhi syarat pada kadar aspal 4,5% hingga 6%. Berdasarkan batas kadar aspal yang memenuhi seluruh parameter tersebut, yaitu 4,5% dan 6,5%, diambil nilai tengah sehingga diperoleh kadar aspal optimum (KAO) campuran AC-BC sebesar 5,50%, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hubungan Parameter Marshall dengan Kadar Aspal dan Penentuan KAO

Garis putus-putus merah menunjukkan batas spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2; garis titik-titik hijau menunjukkan posisi KAO = 5,50%.

Nilai KAO sebesar 5,50% yang diperoleh pada penelitian ini menggunakan agregat uncrushed dari Sungai Sa'dan, Quarry Area Bittuang, berbeda dengan hasil penelitian Wendani et al. (2020) pada agregat sungai Bittuang yang memperoleh KAO sebesar 7,00%, maupun penelitian Mangetan et al. (2021) pada agregat Sungai Seriti Kabupaten Luwu. Perbedaan tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh perbedaan gradasi agregat gabungan, kadar filler, serta karakteristik fisik agregat pada masing-masing lokasi pengambilan material, sehingga kebutuhan aspal untuk menyelimuti permukaan agregat dan mengisi rongga antaragregat turut berbeda. Kadar filler juga berperan dalam menentukan kebutuhan aspal suatu campuran, karena filler yang lebih halus menghasilkan luas permukaan spesifik yang lebih besar sehingga cenderung meningkatkan

kebutuhan aspal untuk mencapai kondisi VMA dan VFB yang disyaratkan (Narita, 2011).

G. Pengaruh Penambahan Agregat Uncrushed terhadap Kinerja Campuran

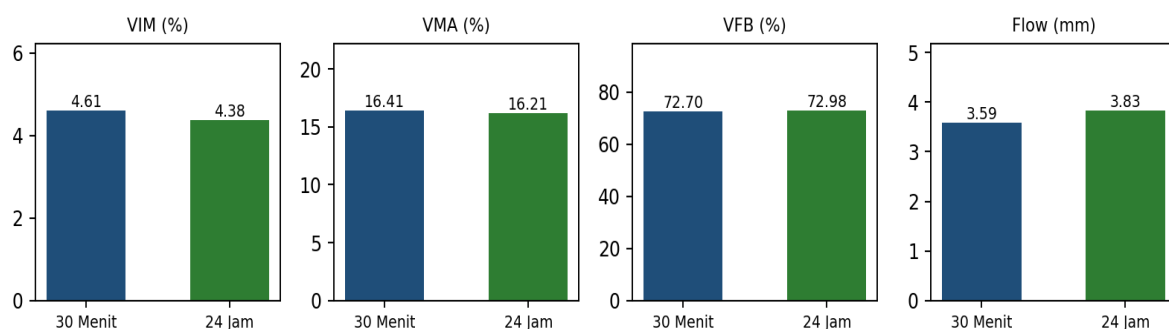
Pada kondisi kadar aspal optimum, dilakukan pengujian Marshall Immersion dengan penambahan agregat uncrushed sebesar 10% untuk mengetahui pengaruh durasi perendaman terhadap kinerja campuran AC-BC. Hasil pengujian pada perendaman 30 menit dan 24 jam disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian Marshall Immersion dengan Penambahan Agregat Uncrushed 10%

Parameter	Perendaman 30 Menit	Perendaman 24 Jam
VIM (%)	4,61	4,38
VMA (%)	16,41	16,21
VFB (%)	72,70	72,98
Stabilitas (kg)	953,46	916,23
Flow (mm)	3,59	3,83

Sumber: Hasil perhitungan pengujian laboratorium, 2025.

Pengaruh Durasi Perendaman terhadap Parameter Marshall (Agregat Uncrushed 10%)

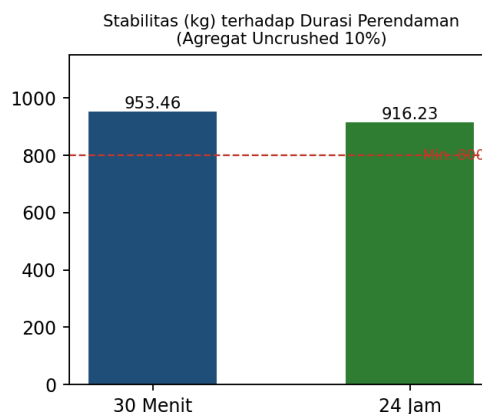


Gambar 3. Pengaruh Durasi Perendaman terhadap Nilai VIM, VMA, VFB, dan Flow (Agregat Uncrushed 10%)

Nilai VIM menurun dari 4,61% pada perendaman 30 menit menjadi 4,38% pada perendaman 24 jam, karena rongga udara dalam campuran sedikit berkurang akibat terisinya celah-celah kecil oleh air; kedua nilai masih berada dalam rentang spesifikasi 3,0-5,0%. Nilai VMA juga menurun

sedikit dari 16,41% menjadi 16,21%, namun tetap berada di atas batas minimum 14%, menunjukkan bahwa perbedaan durasi perendaman tidak memberikan perubahan signifikan terhadap rongga antaragregat.

Nilai VFB meningkat dari 72,70% menjadi 72,98% seiring bertambahnya durasi perendaman, sejalan dengan berkurangnya nilai VIM. Nilai flow meningkat dari 3,59 mm menjadi 3,83 mm, namun masih berada dalam rentang spesifikasi 2,0-4,0 mm, menunjukkan bahwa campuran dengan agregat uncrushed masih mampu mempertahankan kinerja Marshall yang baik meskipun mengalami perendaman air dalam durasi yang lebih lama.



Gambar 4. Pengaruh Durasi Perendaman terhadap Nilai Stabilitas (Agregat Uncrushed 10%)

Nilai stabilitas menurun dari 953,46 kg pada perendaman 30 menit menjadi 916,23 kg pada perendaman 24 jam, akibat air yang mulai masuk ke dalam rongga campuran dan mengurangi daya ikat antara aspal dan agregat. Penurunan tersebut relatif kecil, yaitu sekitar 3,9%, dan nilai stabilitas pada kedua durasi perendaman tetap berada jauh di atas batas minimum 800 kg. Kondisi ini menunjukkan bahwa campuran AC-BC dengan tambahan agregat uncrushed sebesar 10% memiliki ketahanan yang baik terhadap pengaruh air dalam jangka waktu perendaman yang lebih lama, sehingga berpotensi diaplikasikan pada kondisi lapangan yang terpapar air, seperti pada musim hujan atau daerah dengan drainase yang kurang optimal.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa campuran AC-BC dengan agregat uncrushed dari Sungai Sa'dan, Quarry Area Bittuang, memenuhi seluruh parameter Marshall sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu nilai stabilitas minimum 800 kg, flow pada rentang 2-4 mm, VIM pada rentang 3-5%, VMA minimum 14%, dan VFB pada batas yang diizinkan. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa campuran memiliki kinerja yang baik dari sisi kekuatan, kelenturan, dan keawetan.

Kadar aspal optimum (KAO) campuran AC-BC yang menggunakan agregat uncrushed diperoleh sebesar 5,50%, berdasarkan keseimbangan antara parameter stabilitas, flow, VIM, VMA, dan VFB yang seluruhnya memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Pengujian Marshall Immersion dengan penambahan agregat uncrushed sebesar 10% menunjukkan adanya penurunan nilai VIM dan stabilitas seiring bertambahnya durasi perendaman, namun seluruh nilai tetap berada dalam batas yang disyaratkan, sehingga agregat uncrushed dari Sungai Sa'dan berpotensi dimanfaatkan sebagai material alternatif perkerasan jalan yang ekonomis dan berkelanjutan bagi wilayah Toraja dan sekitarnya.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian lanjutan dengan variasi gradasi agregat maupun rentang kadar aspal yang lebih luas, serta pengujian keawetan campuran secara lebih menyeluruh, agar pemanfaatan agregat uncrushed sebagai material perkerasan jalan dapat dikaji secara lebih komprehensif.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Toraja, atas dukungan fasilitas Laboratorium Teknik Sipil selama pelaksanaan pengujian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan selama proses penelitian dan penulisan, serta kepada seluruh pihak yang telah membantu pelaksanaan pengujian material dan pengujian Marshall di laboratorium.

Daftar Pustaka

- Ambarura, D. J. M. (2021). Karakteristik Campuran AC-BC Menggunakan Batu Sungai Salo Pattejang Kecamatan Bungoro Kabupaten Pangkep. *Paulus Civil Engineering Journal*, 3(4), 570-576. <https://doi.org/10.52722/ztdajn17>
- ASTM C117. (2012). *Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. ASTM International.
- ASTM C136. (2012). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International.
- ASTM D4791. (2010). *Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*. ASTM International.
- Damanik, R. (2023). *Teknologi Bahan Perkerasan Jalan*. Medan: Penerbit USU Press.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). *Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)*. Jakarta: Kementerian PUPR.
- R. F. Madallo, R. Mangontan, and Alpius, "Pemanfaatan Batu Sungai Apanang Kecamatan Marioriwawo Kabupaten Soppeng Sebagai Agregat Pada Campuran AC-BC", *PCEJ*, vol. 3, no. 4, pp. 531–537, Jan. 2024, <https://doi.org/10.52722/w5fsbr76>
- Mangetan, Y., Madallo, E. S., & Wendani, A. (2021). Penggunaan Batu Sungai Seriti Kabupaten Luwu pada Campuran AC-BC. *Jurnal Infrastruktur*, 6(1), 22–30. <https://doi.org/10.52722/j06sjsy94>
- Narita, K. (2011). Pengaruh Filler terhadap Karakteristik Campuran Aspal Beton. *Jurnal Transportasi*, 11(1), 15–23.
- SNI 03-4428-1997. (1997). *Metode Pengujian Kadar Lumpur dan Sand Equivalent (SE)*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 06-2489-1991. (1991). *Metode Pengujian Campuran Aspal dengan Alat Marshall*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1969:2016. (2016). *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1970:2016. (2016). *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*. Badan Standardisasi Nasional.

Sukirman, S. (1992). *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Bandung: Nova.

Wendani, A., Mangontan, A., & Datu, E. (2020). Studi Penggunaan Agregat Sungai Bittuang sebagai Campuran AC-BC. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 7(2), 35–44. <https://doi.org/10.52722/g5t7qk49>