

Karakteristik Campuran HRS-Base Menggunakan Agregat Batu Sungai Nanggala Kecamatan Nanggala Kabupaten Toraja Utara

**Anastasia Granceselsi Pasang¹, Abdias Tandi Arrang²,
Ermitha Ambun Rombe Dendo^{3*}**

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

Lapisan pondasi atas (base course) pada struktur perkerasan lentur berperan penting dalam menyalurkan beban lalu lintas ke lapisan di bawahnya, salah satunya melalui campuran beraspal panas HRS-Base (Hot Rolled Sheet-Base). Agregat pada campuran HRS-Base umumnya berasal dari batu pecah hasil tambang, namun keterbatasan ketersediaan dan tingginya biaya transportasi mendorong pemanfaatan material lokal sebagai alternatif. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik agregat, aspal, dan filler, serta kinerja campuran HRS-Base yang menggunakan agregat batu Sungai Nanggala, Kecamatan Nanggala, Kabupaten Toraja Utara, berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Penelitian bersifat eksperimental dengan metode Marshall, meliputi pengujian karakteristik agregat (analisa saringan, keausan Los Angeles, berat jenis dan penyerapan, serta partikel pipih dan lonjong), pengujian sifat fisik aspal penetrasi 60/70, penentuan kadar aspal rencana, pengujian Marshall konvensional pada variasi kadar aspal 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7%, serta pengujian Marshall immersion untuk memperoleh nilai stabilitas Marshall sisa. Hasil pengujian menunjukkan seluruh karakteristik agregat, aspal, dan filler memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Parameter Marshall berupa stabilitas, flow, VIM, VMA, VFB, dan Marshall Quotient memenuhi persyaratan pada rentang kadar aspal yang diuji, dengan kadar aspal optimum (KAO) diperoleh sebesar 6,75%. Pada kadar tersebut, nilai stabilitas Marshall sisa (SMS) hasil pengujian Marshall immersion sebesar 90,50%, yang menunjukkan bahwa campuran HRS-Base dengan agregat batu Sungai Nanggala memiliki durabilitas yang memenuhi standar minimum 90%.

Kata kunci: HRS-Base, Karakteristik Agregat, Batu Sungai, Kadar Aspal Optimum, Uji Marshall.

Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur jalan merupakan salah satu faktor penting dalam mendukung kelancaran mobilitas serta pertumbuhan ekonomi suatu wilayah. Kualitas jalan tidak hanya ditentukan oleh kelancaran arus



lalu lintas, tetapi juga oleh kekuatan dan ketahanan lapisan perkerasan dalam menahan beban kendaraan serta pengaruh lingkungan sekitarnya. Salah satu lapisan penting dalam struktur perkerasan lentur adalah lapisan pondasi atas (base course), yang berfungsi meneruskan beban dari lapisan permukaan menuju lapisan di bawahnya sekaligus menjaga stabilitas konstruksi secara keseluruhan (Sukirman, 1999).

Struktur perkerasan lentur secara umum tersusun atas lapisan permukaan (surface course), lapisan pondasi atas (base course), lapisan pondasi bawah (subbase course), dan tanah dasar (subgrade), yang masing-masing memiliki fungsi berbeda dalam mendistribusikan beban kendaraan. Lapisan pondasi atas menahan sebagian besar tegangan akibat beban roda kendaraan sebelum diteruskan ke lapisan di bawahnya, sehingga material penyusunnya harus memiliki stabilitas dan daya dukung yang tinggi. Salah satu jenis campuran yang lazim digunakan pada lapisan ini adalah Lataston HRS-Base (Hot Rolled Sheet-Base), yaitu campuran beraspal panas bergradasi senjang yang dirancang untuk memberikan stabilitas tinggi, fleksibilitas yang baik, serta ketahanan terhadap deformasi plastis akibat repetisi beban lalu lintas.

Kualitas campuran HRS-Base sangat dipengaruhi oleh sifat material penyusunnya, yaitu agregat, aspal, dan filler. Agregat yang umum digunakan pada campuran HRS-Base berasal dari batuan hasil tambang seperti andesit, granit, atau basalt yang diperoleh melalui proses pemecahan (crushing). Namun demikian, keterbatasan ketersediaan material tersebut di sejumlah wilayah, terutama daerah yang jauh dari lokasi penambangan batu pecah, serta tingginya biaya pengangkutan, menjadi kendala tersendiri dalam pelaksanaan pekerjaan jalan. Kondisi ini mendorong perlunya kajian terhadap alternatif material lokal yang lebih mudah diperoleh dan lebih ekonomis, salah satunya agregat dari batu Sungai Nanggala, Kecamatan Nanggala, Kabupaten Toraja Utara, yang tersedia dalam jumlah melimpah di sekitar aliran sungai.

Beberapa penelitian mengenai pemanfaatan agregat lokal pada campuran beraspal telah dilakukan di berbagai wilayah dengan karakteristik material yang berbeda-beda. Robby dan Tesalonika (2017)

mengkaji penggunaan batu Hampangen, Tangkiling, dan Awang Bangkal sebagai agregat campuran HRS-Base dan menemukan bahwa nilai stabilitas Marshall sisa menjadi salah satu parameter kunci dalam menilai kelayakan agregat lokal untuk digunakan pada lapisan pondasi. Chalid (2021) meneliti karakteristik campuran HRS-Base menggunakan agregat kasar batu kapur asal Tinoring dan memperoleh kadar aspal optimum yang berbeda dari campuran konvensional akibat perbedaan bentuk dan porositas agregat. Pampanglangi (2022) mengkaji karakteristik batu Gunung Posi'padang Balla, Kabupaten Mamasa, pada campuran Laston AC-WC, sedangkan Rerungan (2024) meneliti pemanfaatan batu Sungai Kula pada campuran HRS-Base. Hasil-hasil penelitian tersebut secara konsisten menunjukkan bahwa performa agregat lokal sangat bergantung pada karakteristik fisik dan mekanik sumber materialnya masing-masing, sehingga setiap sumber agregat lokal perlu diuji secara khusus dan tidak dapat digeneralisasi begitu saja dari hasil penelitian pada lokasi lain, sebelum dapat dimanfaatkan sebagai bahan perkerasan jalan.

Di wilayah Toraja Utara sendiri, kajian mengenai pemanfaatan material lokal sungai untuk konstruksi perkerasan jalan masih terbatas, sementara kebutuhan material perkerasan terus meningkat seiring berkembangnya pembangunan jalan di wilayah tersebut. Pemanfaatan batu Sungai Nanggala berpotensi memberikan efisiensi biaya konstruksi serta mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan melalui optimalisasi sumber daya lokal, mengingat lokasi sumber material relatif dekat dengan sejumlah ruas jalan yang membutuhkan pekerjaan perkerasan. Namun demikian, karakteristik fisik dan mekanik batu sungai, yang umumnya berbentuk membulat (rounded) akibat proses abrasi alami di sepanjang aliran sungai, berbeda dari batu pecah hasil tambang yang bersudut tajam (angular), sehingga daya interlocking dan performanya dalam campuran beraspal perlu dibuktikan melalui pengujian laboratorium yang komprehensif sebelum direkomendasikan sebagai bahan konstruksi.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik agregat, aspal, dan filler, serta kinerja campuran HRS-Base yang menggunakan batu Sungai Nanggala berdasarkan

Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, meliputi penentuan kadar aspal optimum (KAO) melalui pengujian Marshall konvensional dan evaluasi durabilitas campuran melalui pengujian Marshall immersion. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan teknis bagi instansi terkait dan pelaksana konstruksi dalam memanfaatkan material lokal batu Sungai Nanggala pada pembangunan infrastruktur jalan di Kabupaten Toraja Utara, sekaligus menjadi referensi bagi penelitian lanjutan mengenai pemanfaatan agregat sungai pada campuran beraspal panas di wilayah lain dengan karakteristik geologi yang serupa.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental yang dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Toraja, dengan lama penelitian kurang lebih 1 (satu) bulan. Material agregat kasar dan agregat halus bersumber dari Sungai Nanggala, Kecamatan Nanggala, Kabupaten Toraja Utara, Sulawesi Selatan, yang memiliki akses jalan yang memadai sehingga memudahkan proses pengangkutan material ke laboratorium. Material yang diambil berupa agregat berbentuk tidak beraturan (bulat hingga membulat) yang selanjutnya diproses melalui penumbukan di laboratorium untuk memperoleh gradasi agregat kasar dan agregat halus sesuai kebutuhan pengujian karakteristik dan rancangan campuran (mix design). Aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70 produksi PT. Karunia Jaya Karya, Kelurahan Panga', Kabupaten Toraja Utara, sedangkan filler yang digunakan adalah semen Portland. Seluruh tahapan pengujian mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 Divisi 6 tentang Perkerasan Beraspal.

Pemeriksaan karakteristik agregat meliputi analisa saringan untuk menentukan distribusi ukuran butir (SNI ASTM C136:2012), pengujian keausan dengan mesin Los Angeles untuk menilai ketahanan agregat terhadap abrasi (SNI 2417:2008), pengujian berat jenis curah (bulk) dan penyerapan air agregat kasar (SNI 1969:2016) dan agregat halus (SNI 1970:2016), pengujian ketahanan agregat terhadap tumbukan (SNI 03-4426-1997), serta pengujian partikel pipih dan lonjong untuk menilai bentuk butir

agregat (ASTM D4791-10). Pemeriksaan karakteristik aspal meliputi pengujian penetrasi pada suhu 25°C untuk menentukan derajat kekerasan aspal (SNI 2456:2011), pemeriksaan titik nyala dan titik bakar sebagai indikator keamanan penanganan aspal (SNI 2433:2011), pemeriksaan titik lembek (SNI 2434:2011), pengujian berat jenis aspal terhadap air suling (SNI 2441:2011), dan pengujian daktilitas pada suhu 25°C untuk menentukan kekuatan tarik material (SNI 2432:2011). Berat jenis filler semen Portland diperiksa dengan mengacu pada prosedur SNI ASTM C136:2012.

Volume lalu lintas dan gradasi campuran HRS-Base direncanakan mengikuti batasan gradasi agregat gabungan untuk Lataston HRS-Base sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, dengan menentukan gradasi ideal pada nilai tengah dari setiap batasan spesifikasi saringan, baik untuk fraksi agregat kasar maupun agregat halus. Kadar aspal rencana (Pb) ditentukan menggunakan persamaan (1) berikut:

$$Pb = 0,035(\%CA) + 0,045(\%FA) + 0,18(\%Filler) + \text{Konstanta} \dots\dots\dots (1)$$

dengan CA adalah persentase agregat kasar, FA adalah persentase agregat halus, dan Filler adalah persentase bahan pengisi dalam campuran, sedangkan konstanta ditetapkan sebesar 0,75 sesuai Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah (2002). Dari perhitungan tersebut diperoleh nilai kadar aspal perkiraan yang kemudian dibulatkan, lalu divariasikan dengan penambahan dan pengurangan bertahap sebesar 0,5% sehingga diperoleh variasi kadar aspal yang diuji yaitu 5,0%; 5,5%; 6,0%; 6,5%; dan 7,0% terhadap berat total campuran.

Pada setiap variasi kadar aspal dibuat 3 (tiga) benda uji untuk pengujian Marshall konvensional, sedangkan pada kadar aspal optimum (KAO) dibuat tambahan 3 (tiga) benda uji untuk pengujian Marshall immersion, sehingga total benda uji yang dibuat pada penelitian ini berjumlah 21 buah, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Jumlah Benda Uji Campuran HRS-Base

Kadar Aspal (%)	Jumlah Benda Uji Marshall Konvensional (buah)	Jumlah Benda Uji Marshall Immersion (buah)
5,0	3	-
5,5	3	-

6,0	3	-
6,5	3	-
6,75 (KAO)	3	3
7,0	3	-
Total	21	3

Pengujian Marshall konvensional dilakukan dengan membebani benda uji berbentuk silinder pada suhu tertentu hingga terjadi keruntuhan, untuk memperoleh nilai stabilitas, flow, Void in Mixture (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Bitumen (VFB), dan Marshall Quotient (MQ) pada setiap variasi kadar aspal. Kadar aspal optimum ditentukan berdasarkan rentang kadar aspal yang mampu memenuhi seluruh parameter Marshall secara bersamaan sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu stabilitas minimum 600 kg, VFB minimum 68%, VIM pada rentang 3%–5%, VMA minimum 17%, flow minimum 3 mm, dan Marshall Quotient minimum 250 kg/mm. Selanjutnya, pengujian Marshall immersion dilakukan pada kadar aspal optimum dengan merendam benda uji pada suhu 60°C selama 24 jam di dalam waterbath, untuk memperoleh nilai stabilitas Marshall sisa (SMS) menggunakan persamaan (2):

$$SMS = (Stabilitas Marshall Immersion / Stabilitas Marshall Konvensional) \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

dengan nilai minimum stabilitas Marshall sisa yang disyaratkan sebesar 90% (Robby & Tesalonika, 2017). Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan hasil pengujian terhadap ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, kemudian disajikan dalam bentuk tabel untuk memperlihatkan kecenderungan perubahan setiap parameter terhadap variasi kadar aspal.

Pembahasan/Hasil

1. Karakteristik Agregat

a. Analisa Saringan Agregat

Hasil analisa saringan agregat kasar dan agregat halus batu Sungai Nanggala disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisa Saringan Agregat Kasar dan Agregat Halus

Ukuran Saringan (mm)	Persen Lolos Agregat Kasar (%)	Persen Lolos Agregat Halus (%)
25,0	100,00	100,00
19,0	100,00	100,00
12,5	22,81	100,00
9,5	14,62	100,00
4,75	0,00	100,00
2,36	0,00	42,05
1,18	0,00	11,73
0,600	0,00	5,81
0,300	0,00	4,03
0,150	0,00	1,50
0,075	0,00	1,28
Pan	0,00	0,00

Hasil pengujian analisa saringan agregat kasar menunjukkan bahwa pada saringan 1" dan 3/4" seluruh agregat lolos 100%, kemudian menurun tajam pada saringan 1/2" (22,81%) dan 3/8" (14,62%), serta tidak ada agregat yang lolos pada saringan No.4 hingga Pan (0%). Pola ini menunjukkan bahwa agregat kasar batu Sungai Nanggala didominasi oleh butiran berukuran antara 3/4" hingga 1/2", sesuai dengan fungsinya sebagai fraksi kasar dalam campuran. Pada agregat halus, seluruh butiran lolos saringan No.4 hingga No.8 (100%–42,05%), kemudian menurun secara bertahap hingga 1,28% pada saringan No.200, yang mengindikasikan gradasi agregat halus yang cukup rapat dengan kandungan butiran sangat halus (lolos No.200) yang relatif rendah, sehingga berpotensi mengurangi risiko penggumpalan serta mendukung interlocking antarbutir dalam campuran.

b. Keausan Agregat (Abrasion)

Tabel 3. Hasil Pengujian Keausan Agregat dengan Mesin Los Angeles

Jenis Pengujian	Metode	Hasil Pengujian (%)	Spesifikasi Maks (%)	Keterangan
Keausan Agregat (Los Angeles)	SNI 2417:2008	18,85	40	Memenuhi

Hasil pengujian keausan agregat dengan alat abrasi Los Angeles diperoleh nilai 18,85%, yang jauh berada di bawah batas maksimum 40% yang disyaratkan oleh Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Nilai keausan yang relatif rendah ini mengindikasikan bahwa agregat batu Sungai

Nanggala memiliki kekerasan dan ketahanan yang baik terhadap gaya abrasi serta benturan, sehingga tidak mudah hancur atau terdegradasi selama proses pencampuran, pemadatan, maupun akibat beban lalu lintas berulang setelah menjadi bagian dari struktur perkerasan.

c. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Tabel 4. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Parameter	Hasil Pengujian	Spesifikasi Min	Keterangan
Berat Jenis Bulk	2,61	2,5	Memenuhi
Berat Jenis Bulk (SSD)	2,65	2,5	Memenuhi
Berat Jenis Semu	2,71	2,5	Memenuhi
Penyerapan (%)	1,42	Maks 3	Memenuhi

Nilai berat jenis bulk, bulk SSD, dan semu agregat kasar berturut-turut sebesar 2,61; 2,65; dan 2,71, seluruhnya berada di atas batas minimum 2,5 yang disyaratkan. Nilai penyerapan air sebesar 1,42% juga berada jauh di bawah batas maksimum 3%. Nilai berat jenis yang cukup tinggi mengindikasikan kepadatan partikel agregat yang baik, sedangkan nilai penyerapan yang rendah menunjukkan porositas agregat yang kecil, sehingga kebutuhan aspal untuk menyelimuti permukaan agregat tidak berlebihan dan campuran dapat mempertahankan kadar aspal efektifnya dengan baik.

d. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Tabel 5. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Parameter	Hasil Pengujian	Spesifikasi Min	Keterangan
Berat Jenis Bulk	2,51	2,5	Memenuhi
Berat Jenis Bulk (SSD)	2,56	2,5	Memenuhi
Berat Jenis Semu	2,66	2,5	Memenuhi
Penyerapan (%)	2,27	Maks 3	Memenuhi

Sama halnya dengan agregat kasar, nilai berat jenis agregat halus juga memenuhi batas minimum 2,5, dengan nilai penyerapan sebesar 2,27% yang masih berada di bawah batas maksimum 3%, meskipun sedikit lebih tinggi dibandingkan agregat kasar. Perbedaan ini wajar terjadi karena luas permukaan spesifik agregat halus yang lebih besar dibandingkan agregat kasar, sehingga kapasitas penyerapan airnya relatif lebih tinggi. Secara keseluruhan, nilai penyerapan yang masih memenuhi spesifikasi

menunjukkan bahwa agregat halus batu Sungai Nanggala tidak terlalu porous, sehingga tidak akan menyerap aspal secara berlebihan pada saat pencampuran.

e. Kekuatan Agregat Terhadap Tumbukan dan Bentuk Partikel

Tabel 6. Hasil Pengujian Kekuatan Agregat Terhadap Tumbukan serta Partikel Pipih dan Lonjong

Parameter	Hasil Pengujian (%)	Spesifikasi Maks (%)	Keterangan
Kekuatan thd Tumbukan (SNI 03-4426-1997)	8,40	30	Memenuhi
Partikel Pipih (ASTM D4791-10)	6,09	10	Memenuhi
Partikel Lonjong (ASTM D4791-10)	1,32	10	Memenuhi
Partikel Pipih dan Lonjong	0,77	10	Memenuhi

Hasil pengujian kekuatan agregat terhadap tumbukan diperoleh nilai 8,40%, jauh di bawah batas maksimum 30%, yang menunjukkan agregat batu Sungai Nanggala memiliki ketahanan yang baik terhadap gaya kejut atau tumbukan mendadak. Pada pengujian bentuk partikel, indeks kepipihan sebesar 6,09%, indeks kelonjongan 1,32%, dan indeks partikel pipih dan lonjong sebesar 0,77%, seluruhnya memenuhi batas maksimum 10%. Rendahnya persentase partikel pipih dan lonjong menunjukkan bahwa agregat batu Sungai Nanggala didominasi oleh bentuk butiran yang relatif membulat dan kubikal, sehingga distribusi tegangan dalam campuran menjadi lebih merata dan risiko kerusakan dini akibat pecahnya butiran pipih pada saat pemadatan atau pembebanan dapat diminimalkan.

Secara keseluruhan, seluruh parameter karakteristik agregat kasar dan agregat halus batu Sungai Nanggala pada Tabel 2 hingga Tabel 6 memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, sehingga agregat tersebut secara teknis layak digunakan sebagai bahan penyusun campuran HRS-Base.

2. Karakteristik Aspal Penetrasi 60/70

Tabel 7. Hasil Pengujian Karakteristik Aspal Penetrasi 60/70

Parameter	Hasil Pengujian	Spesifikasi Min	Spesifikasi Max	Satuan	Keterangan
Penetrasi sebelum	68,50	60	70	0,1 mm	Memenuhi

kehilangan berat					
Penetrasi setelah kehilangan berat	64,60	54	-	0,1 mm	Memenuhi
Daktilitas	150	100	-	cm	Memenuhi
Titik Nyala	355	200	-	°C	Memenuhi
Titik Bakar	363,5	200	-	°C	Memenuhi

Hasil pengujian menunjukkan seluruh parameter aspal penetrasi 60/70 yang digunakan telah memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, sehingga aspal tersebut layak digunakan sebagai bahan pengikat pada campuran HRS-Base.

3. Karakteristik Filler

Pengujian berat jenis filler semen Portland yang digunakan pada campuran memperoleh nilai 3,1, yang telah memenuhi spesifikasi minimum sebesar 2,5, sehingga filler tersebut layak digunakan sebagai bahan pengisi rongga dalam campuran HRS-Base.

4. Kadar Aspal Rencana dan Komposisi Campuran

Berdasarkan perhitungan kadar aspal rencana, diperoleh nilai perkiraan kadar aspal (Pb) sebesar 5,76%, yang dibulatkan menjadi 6% sebagai kadar aspal tengah. Dengan penambahan dan pengurangan bertahap sebesar 0,5%, diperoleh variasi kadar aspal yang digunakan yaitu 5,0%; 5,5%; 6,0%; 6,5%; dan 7,0%. Komposisi total campuran HRS-Base untuk setiap variasi kadar aspal disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Komposisi Total Campuran HRS-Base

Komponen	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Berat agregat (gr)	1084	1079	1074	1069	1064
Berat filler (gr)	56	55	54	53	52
Berat aspal (gr)	60	66	72	78	84
Berat campuran (gr)	1200	1200	1200	1200	1200

5. Hasil Pengujian Marshall Konvensional

Nilai rata-rata parameter Marshall pada setiap variasi kadar aspal disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Nilai Rata-Rata Parameter Marshall Konvensional pada Setiap Variasi Kadar Aspal

Parameter	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%	Persyaratan Bina Marga 2018
Stabilitas (kg)	766,59	797,65	861,89	872,10	856,14	Min 600
Flow (mm)	3,20	3,40	3,23	3,47	3,57	Min 3
VIM (%)	6,70	4,84	3,31	4,91	3,74	3–5
VMA (%)	15,55	14,92	14,60	17,02	17,02	Min 17
VFB (%)	57,56	67,57	77,54	71,18	78,04	Min 68

Nilai stabilitas seluruh variasi kadar aspal memenuhi persyaratan minimum 600 kg, dengan nilai tertinggi pada kadar aspal 6,5% sebesar 872,10 kg. Nilai flow cenderung meningkat seiring bertambahnya kadar aspal, yang menunjukkan campuran menjadi lebih plastis pada kadar aspal tinggi. Nilai VIM menurun seiring bertambahnya kadar aspal, dari 6,70% pada kadar 5,0% menjadi 3,31% pada kadar 6,0%, dan hanya kadar aspal 5,5%–7,0% yang memenuhi rentang persyaratan 3–5%. Nilai VMA baru memenuhi persyaratan minimum 17% pada kadar aspal 6,5% dan 7,0%, sedangkan nilai VFB memenuhi persyaratan minimum 68% pada kadar aspal 6,0%–7,0%. Hal ini menunjukkan bahwa tidak seluruh parameter Marshall dapat dipenuhi secara bersamaan pada satu kadar aspal yang sama, sehingga penentuan kadar aspal optimum perlu mempertimbangkan rentang kadar aspal yang memenuhi seluruh parameter secara simultan.

6. Analisis Marshall Quotient (MQ)

Marshall Quotient (MQ) merupakan perbandingan antara nilai stabilitas dan flow yang menggambarkan tingkat kekakuan (stiffness) relatif suatu campuran beraspal. Nilai MQ pada setiap variasi kadar aspal, yang diperoleh dari hasil bagi stabilitas rata-rata terhadap flow rata-rata pada Tabel 9, disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Nilai Marshall Quotient (MQ) pada Setiap Variasi Kadar Aspal

Parameter	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%	Persyaratan Bina Marga 2018
Marshall Quotient (kg/mm)	239,56	234,60	266,83	251,33	239,82	Min 250

Nilai Marshall Quotient hanya memenuhi persyaratan minimum 250 kg/mm pada kadar aspal 6,0% (266,83 kg/mm) dan 6,5% (251,33 kg/mm), sedangkan pada kadar aspal 5,0%, 5,5%, dan 7,0% nilai MQ berada sedikit di bawah batas minimum. Nilai MQ yang terlalu rendah mengindikasikan campuran yang cenderung lebih lentur dan mudah mengalami deformasi, sedangkan nilai MQ yang terlalu tinggi menunjukkan campuran yang terlalu kaku dan berpotensi getas. Kecenderungan nilai MQ yang mencapai puncak pada kadar aspal 6,0%–6,5% ini sejalan dengan kecenderungan nilai stabilitas tertinggi pada rentang kadar aspal yang sama, sehingga memperkuat indikasi bahwa rentang kadar aspal 6,5%–7,0% merupakan rentang yang paling proporsional dalam menyeimbangkan seluruh parameter Marshall pada campuran HRS-Base ini.

7. Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Berdasarkan hasil analisis parameter Marshall, rentang kadar aspal yang memenuhi seluruh persyaratan secara bersamaan berada pada kisaran 6,5% hingga 7,0%. Mengacu pada Sukirman (2010), kadar aspal optimum untuk campuran HRS-Base sebagai lapisan pondasi ditentukan dari nilai tengah rentang tersebut, sehingga diperoleh KAO sebesar 6,75%. Nilai parameter Marshall pada KAO 6,75% dengan variasi waktu perendaman disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Nilai Rata-Rata Parameter Marshall pada Kadar Aspal Optimum 6,75%

Variasi Perendaman	VMA (%)	VIM (%)	VFB (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)
30 menit	17,03	4,51	73,52	840,19	3,50
24 jam	17,01	4,48	73,65	755,11	3,83

Pada kadar aspal optimum 6,75%, nilai VMA, VIM, dan VFB relatif tidak banyak berubah antara perendaman 30 menit dan 24 jam, sedangkan nilai stabilitas menurun dari 840,19 kg pada perendaman 30 menit menjadi 755,11 kg pada perendaman 24 jam, dan nilai flow meningkat dari 3,50 mm menjadi 3,83 mm. Penurunan stabilitas dan peningkatan flow setelah perendaman lebih lama menunjukkan bahwa air memberikan pengaruh

terhadap kekuatan campuran, meskipun seluruh nilai masih berada dalam batas yang wajar untuk campuran beraspal panas.

8. Stabilitas Marshall Sisa

Nilai stabilitas Marshall sisa (SMS) diperoleh dari perbandingan stabilitas Marshall immersion (perendaman 24 jam) terhadap stabilitas Marshall konvensional (perendaman 30 menit) pada kadar aspal optimum 6,75%, sebagaimana disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. Nilai Stabilitas Marshall Sisa Campuran HRS-Base pada KAO
6,75%

Kadar Aspal (%)	Stabilitas Konvensional (kg)	Stabilitas Immersion (kg)	Stabilitas Marshall Sisa (%)
6,75	797,65	765,74	96,00
6,75	877,42	797,65	90,91
6,75	845,51	701,93	85,44
Rata-rata	840,19	755,11	90,50

Nilai rata-rata stabilitas Marshall sisa yang diperoleh sebesar 90,50%, yang telah memenuhi persyaratan minimum Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 sebesar 90%. Hal ini menunjukkan bahwa campuran HRS-Base dengan agregat batu Sungai Nanggala memiliki durabilitas yang cukup baik terhadap pengaruh air dan rendaman jangka panjang.

9. Pembahasan Terintegrasi

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat, aspal, dan filler yang bersumber dari Sungai Nanggala memenuhi seluruh persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, sehingga layak digunakan sebagai material campuran HRS-Base. Nilai keausan yang rendah (18,85%), berat jenis yang memenuhi syarat, serta rendahnya persentase partikel pipih dan lonjong (0,77%) menunjukkan bahwa meskipun berasal dari sungai dan berbentuk relatif membulat, agregat batu Sungai Nanggala tetap memiliki kekerasan dan bentuk butiran yang mendukung kinerja campuran beraspal, sebanding dengan agregat hasil pemecahan batu (crushed stone) pada umumnya.

Sekalipun demikian, tidak seluruh parameter Marshall terpenuhi pada satu kadar aspal yang sama. Stabilitas dan VFB cenderung terpenuhi

pada kadar aspal menengah hingga tinggi (6,0%–7,0%), sementara VMA baru terpenuhi pada kadar aspal yang lebih tinggi (6,5%–7,0%), dan Marshall Quotient hanya terpenuhi pada rentang yang lebih sempit (6,0%–6,5%). Kondisi ini menegaskan bahwa penentuan kadar aspal optimum pada campuran HRS-Base tidak dapat didasarkan pada satu parameter saja, melainkan harus mempertimbangkan titik temu (irisan) dari seluruh parameter secara simultan, sebagaimana tercermin pada penetapan KAO sebesar 6,75% dalam penelitian ini, yaitu nilai tengah dari rentang kadar aspal 6,5%–7,0% yang memenuhi seluruh persyaratan teknis.

Kecenderungan ini konsisten dengan temuan pada penelitian penggunaan agregat lokal lain, seperti batu Hampangen, Tangkiling, dan Awang Bangkal pada campuran HRS-Base (Robby & Tesalonika, 2017) maupun batu kapur asal Tinoring (Chalid, 2021), yang juga menunjukkan bahwa karakteristik gradasi dan bentuk agregat lokal berpengaruh signifikan terhadap rentang kadar aspal yang dapat memenuhi seluruh parameter Marshall secara bersamaan. Perbedaan sumber dan jenis batuan pada masing-masing penelitian tersebut menghasilkan kadar aspal optimum yang bervariasi, yang menguatkan argumen bahwa setiap sumber agregat lokal, termasuk batu Sungai Nanggala, memerlukan pengujian karakteristik dan penentuan KAO tersendiri sebelum dapat diterapkan pada pekerjaan konstruksi jalan secara luas.

Dengan kadar aspal optimum 6,75% dan nilai stabilitas Marshall sisa 90,50%, yang telah memenuhi ambang batas minimum durabilitas sebesar 90%, agregat batu Sungai Nanggala menunjukkan potensi yang baik sebagai material lokal alternatif pada campuran HRS-Base. Nilai SMS di atas ambang minimum, meskipun tidak jauh melampauinya, mengindikasikan bahwa campuran memiliki ketahanan yang memadai terhadap pengaruh air dan rendaman jangka panjang, namun tetap perlu diimbangi dengan pengendalian mutu pelaksanaan di lapangan, seperti pemadatan yang optimal dan pengendalian suhu pencampuran, agar durabilitas aktual di lapangan tidak menyimpang jauh dari hasil pengujian laboratorium. Secara umum, hasil penelitian ini mendukung pemanfaatan batu Sungai Nanggala sebagai material lokal alternatif guna mendukung

pembangunan infrastruktur jalan di Kabupaten Toraja Utara secara lebih efisien dan berkelanjutan, sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap agregat hasil tambang yang harus didatangkan dari lokasi yang lebih jauh.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang dilakukan terhadap karakteristik material dan kinerja campuran HRS-Base menggunakan agregat batu Sungai Nanggala, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Karakteristik agregat, aspal, dan filler. Hasil pengujian agregat kasar dan agregat halus batu Sungai Nanggala, meliputi analisa saringan, keausan Los Angeles (18,85%), berat jenis dan penyerapan, kekuatan terhadap tumbukan (8,40%), serta partikel pipih dan lonjong (0,77%), seluruhnya memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Demikian pula karakteristik aspal penetrasi 60/70 (penetrasi, daktilitas, titik nyala, dan titik bakar) serta berat jenis filler semen Portland (3,1) juga memenuhi spesifikasi yang disyaratkan, sehingga seluruh material penyusun layak digunakan pada campuran HRS-Base.
2. Karakteristik campuran HRS-Base. Pada pengujian Marshall konvensional dengan variasi kadar aspal 5,0%–7,0%, parameter stabilitas, flow, VIM, VMA, VFB, dan Marshall Quotient menunjukkan kecenderungan yang berbeda-beda terhadap perubahan kadar aspal, dan tidak seluruhnya terpenuhi pada satu kadar aspal yang sama. Rentang kadar aspal yang memenuhi seluruh parameter secara bersamaan berada pada 6,5%–7,0%, sehingga ditetapkan kadar aspal optimum (KAO) sebesar 6,75%, dengan nilai stabilitas rata-rata 840,19 kg, flow 3,50 mm, VIM 4,51%, VMA 17,03%, dan VFB 73,52% pada kondisi perendaman standar 30 menit.
3. Stabilitas Marshall sisa. Hasil pengujian Marshall immersion pada KAO 6,75% memperoleh nilai stabilitas Marshall sisa (SMS) sebesar 90,50%, yang memenuhi persyaratan minimum 90% sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, sehingga campuran HRS-Base

yang menggunakan agregat batu Sungai Nanggala dapat dinyatakan memiliki durabilitas yang memadai terhadap pengaruh air dan rendaman jangka panjang.

Berdasarkan uraian tersebut, secara umum dapat disimpulkan bahwa agregat batu Sungai Nanggala, Kecamatan Nanggala, Kabupaten Toraja Utara, layak dimanfaatkan sebagai material lokal alternatif pada campuran HRS-Base untuk mendukung pembangunan perkerasan jalan yang efisien dan berkelanjutan di wilayah Kabupaten Toraja Utara.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa hal yang dapat disarankan, yaitu:

1. Dalam penerapan di lapangan, disarankan kadar aspal yang digunakan pada campuran HRS-Base mengacu pada kadar aspal optimum (KAO) sebesar 6,75%, karena pada kadar tersebut seluruh parameter Marshall menunjukkan keseimbangan terbaik antara kekuatan dan durabilitas campuran.
2. Karakteristik agregat, aspal, dan filler yang digunakan telah memenuhi spesifikasi, namun perlu dipastikan penyimpanan bahan tetap terlindung dari debu dan air untuk menghindari perubahan berat serta penurunan kualitas material sebelum pencampuran.
3. Mengingat nilai Marshall Quotient dan VMA hanya terpenuhi pada rentang kadar aspal yang relatif sempit, disarankan dilakukan pengendalian mutu yang ketat pada tahap produksi campuran di lapangan, termasuk keseragaman gradasi agregat dan suhu pencampuran, agar kadar aspal aktual tidak menyimpang dari KAO yang telah ditetapkan.
4. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji kinerja campuran HRS-Base menggunakan agregat batu Sungai Nanggala pada kondisi pembebanan berulang (repetisi beban), variasi suhu, atau paparan cuaca ekstrem, guna melengkapi evaluasi durabilitas jangka panjang campuran di lapangan.

5. Instansi terkait di Kabupaten Toraja Utara dapat mempertimbangkan hasil penelitian ini sebagai salah satu dasar teknis dalam pemanfaatan material lokal sungai untuk pekerjaan perkerasan jalan, guna mendukung efisiensi biaya konstruksi tanpa mengesampingkan aspek mutu dan keselamatan infrastruktur.

Daftar Pustaka

- Chalid, N. I. (2016). Karakteristik Campuran Aspal Hrs-Base Menggunakan Agregat Kasar Batu Kapur Asal Tinoring. *Pena Teknik: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik*, 81-94. https://doi.org/10.51557/pt_jiit.v1i1.50
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2) – Divisi 6: Perkerasan Beraspal. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2018). *Manual Desain Perkerasan Jalan (Revisi 2018)*. Jakarta: PUPR.
- Pampanglangi, M., & Kamba, C. (2022). Karakteristik Batu Gunung Posi'padang Balla Kabupaten MamasaYang Menggunakan Campuran Laston AC-WC. *Paulus Civil Engineering Journal*, 4(3), 479-487. <https://doi.org/10.52722/eh8wek94>
- Rerungan, V., Bungin, E. R., & Bumbungan, M. (2024). Penggunaan Batu Sungai Kula Kabupaten Luwu Utara Pada Campuran HRS-BASE. *Paulus Civil Engineering Journal*, 6(4), 709-719. <https://doi.org/10.52722/mbqpx831>
- Tesalonika, A. (2017). Kajian Penggunaan Batu Hampangen, Batu Tangkiling Dan Batu Awang Bangkal Sebagai Agregat Campuran Pada Hot Rolled Sheet-Base (HRS-BASE). *Jurnal Teknika: Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Keteknikan*, 1(1), 26-32. <https://doi.org/10.52868/jt.v1i1.1370>
- Sukirman, S. (1999). *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Bandung: Nova.