

Kajian Pemanfaatan *Slag* Nikel sebagai Bahan Substitusi Parsial Agregat Halus pada Campuran Aspal Beton Lapis Antara (AC-BC)

Sainal Abidin ^{1*}, Hanafi Ashad ², Andi Alifuddin ³

1*) Dinas Bina Marga dan Bina Konstruksi Provinsi Sulawesi Selatan, Kota Makassar,
sainalbm@yahoo.com

2) Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia, Kota Makassar

3) Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia, Kota Makassar

Abstract

The rapid development of road infrastructure demands construction materials that are high-quality, cost-effective, and environmentally sustainable. One promising approach is the utilization of industrial by-products as alternative materials in asphalt mixtures. Nickel slag, a solid by-product of the nickel smelting process, exhibits physical characteristics comparable to natural aggregates and has been classified as non-hazardous (non-B3) waste. This study aims to evaluate the effect of using nickel slag as a partial replacement for fine aggregate on the Marshall characteristics of Asphalt Concrete–Binder Course (AC-BC) mixtures and to determine the optimum composition in accordance with the 2018 General Specifications for Highways (Revision 2) issued by Bina Marga. The research was conducted experimentally in the laboratory using the Marshall mix design method. Nickel slag was used to replace fine aggregate at proportions of 20%, 40%, 60%, and 80%. The evaluated parameters included stability, flow, density, Voids in Mixture (VIM), Voids in Mineral Aggregate (VMA), Voids Filled with Bitumen (VFB), Marshall Quotient (MQ), and Retained Marshall Stability (RMS). The Optimum Asphalt Content (OAC) was determined for each variation prior to immersion testing. The results indicate that incorporating nickel slag enhances mixture stability and density while maintaining volumetric properties within the specified limits. Based on the balance among stability, volumetric characteristics, MQ, and moisture resistance ($RMS \geq 90\%$), the 40% nickel slag substitution with an OAC of 5.58% demonstrated the most optimal performance. This mixture satisfies all technical requirements for AC-BC and is suitable for application as a binder course layer. Therefore, nickel slag shows strong potential as an alternative material in asphalt mixtures, supporting sustainable construction practices through industrial waste reduction and efficient utilization of local resources.

Keywords: AC-BC, Fine Aggregate, Marshall Characteristics, Nickel Slag, Optimum Asphalt Content, Sustainable Construction.

Abstrak

Peningkatan pembangunan infrastruktur jalan menuntut ketersediaan material konstruksi yang berkualitas, ekonomis, dan ramah lingkungan. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah pemanfaatan limbah industri sebagai material alternatif dalam campuran beraspal. *Slag* nikel merupakan limbah padat hasil proses peleburan bijih nikel yang memiliki karakteristik fisik menyerupai agregat alam dan telah dikategorikan sebagai limbah non-B3. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh pemanfaatan *slag* nikel sebagai bahan substitusi parsial agregat halus terhadap karakteristik Marshall pada campuran *Asphalt Concrete–Binder Course* (AC-BC) serta menentukan komposisi optimum yang memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2. Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan metode Marshall. Variasi *slag* nikel sebagai substitusi agregat halus adalah sebesar 20%, 40%, 60%, dan 80%. Parameter yang dianalisis meliputi stabilitas, *flow*, *density*, *Void in Mixture* (VIM), *Void in Mineral Aggregate* (VMA), *Void Filled with Bitumen* (VFB), *Marshall Quotient* (MQ), serta *Retained Marshall Stability* (RMS). Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) dilakukan untuk setiap variasi campuran sebelum dilakukan analisis karakteristik Marshall pada kondisi perendaman. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan *slag* nikel meningkatkan stabilitas dan kepadatan campuran tanpa melampaui

batas parameter volumetrik yang dipersyaratkan. Berdasarkan keseimbangan antara stabilitas, karakteristik volumetrik, MQ, dan ketahanan terhadap perendaman ($RMS \geq 90\%$), variasi 40% *slag* nikel sebagai bahan substitusi parsial agregat halus dengan KAO 5,58% memberikan kinerja paling optimum. Campuran ini memenuhi seluruh persyaratan teknis AC-BC dan layak diaplikasikan sebagai lapis antara (AC-BC). Dengan demikian, *slag* nikel berpotensi dimanfaatkan sebagai material alternatif dalam campuran aspal, sekaligus mendukung konsep konstruksi berkelanjutan melalui pengurangan limbah industri dan pemanfaatan sumber daya lokal.

Kata kunci: AC-BC, Agregat Halus, Kadar Aspal Optimum, Marshall, *Slag* Nikel.

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur, khususnya infrastruktur jalan, menjadi salah satu prioritas utama pemerintah dalam mendorong pertumbuhan ekonomi nasional dan pemerataan pembangunan wilayah. Peran jalan sebagai penghubung utama arus logistik, mobilitas masyarakat, dan konektivitas antarwilayah menjadikannya sebagai infrastruktur yang sangat vital. Berdasarkan data dari Kementerian Pekerjaan Umum pada tahun 2025 ditargetkan pembangunan jalan nasional baru sepanjang 154 Km serta preservasi jalan nasional sepanjang 1.642 Km. Selain itu, proyek pemeliharaan rutin dan rekonstruksi juga dilakukan secara masif di berbagai daerah dengan dukungan skema padat karya. Di Provinsi Sulawesi Selatan, berdasarkan data dari Dinas Bina Marga dan Bina Konstruksi (DBMBK) penanganan jalan provinsi mencapai panjang total 379,9 Km yang terbagi atas pemeliharaan berkala dan rekonstruksi dengan kontrak jangka panjang.

Sebagian besar proyek jalan tersebut menggunakan jenis perkerasan lentur (*flexible pavement*) dengan material utama berupa campuran beraspal panas. Perkerasan aspal menjadi pilihan karena sifatnya yang fleksibel, mudah dalam pelaksanaan, serta perawatannya yang relatif sederhana. Namun, kerusakan dini pada perkerasan aspal seperti retak, deformasi, dan lubang (*pothole*) masih menjadi persoalan klasik yang sering dijumpai. Kerusakan ini tidak hanya disebabkan oleh beban lalu lintas berlebih, tetapi juga oleh perubahan suhu, kelembaban, dan mutu material yang digunakan. Oleh karena itu, diperlukan inovasi material guna meningkatkan daya tahan dan kualitas campuran aspal.

Salah satu cara untuk meningkatkan performa campuran aspal adalah dengan mengganti sebagian komponen material penyusunnya menggunakan bahan alternatif yang lebih ekonomis, tersedia secara lokal, dan ramah lingkungan. Material yang dapat digantikan adalah agregat halus dan *filler*. Agregat halus dan *filler* sangat berpengaruh terhadap kinerja campuran aspal, terutama terhadap stabilitas, daya tahan terhadap air, serta kohesi dan adhesi antar material.

Seiring dengan perkembangan industri, berbagai limbah padat industri kini mulai dilirik untuk dimanfaatkan sebagai bahan pengganti agregat dalam campuran beraspal. Salah satu yang potensial adalah *slag* nikel, limbah hasil samping dari proses peleburan bijih nikel di industri *smelter*. Jenis limbah ini diproduksi dalam jumlah besar, memiliki komposisi mineral yang menyerupai agregat alami, dan telah banyak diteliti sebagai material konstruksi alternatif.

Di Kabupaten Bantaeng, Provinsi Sulawesi Selatan, beroperasi *smelter* nikel milik PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia (PT. HNAI), yang setiap tahunnya menghasilkan jutaan ton *slag* nikel. *Slag* ini belum sepenuhnya termanfaatkan dan sebagian besar masih menumpuk di lokasi industri, sehingga menimbulkan permasalahan lingkungan dan kebutuhan lahan tambahan. Padahal, berdasarkan uji *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP), *slag* nikel dari PT. HNAI terbukti lolos uji batas logam berat dan dapat diklasifikasikan sebagai non-B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) Berdasarkan Lampiran XIV Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, *slag* nikel dari proses peleburan bijih nikel (kode N102)

terdaftar sebagai salah satu limbah non-B3. Ini berarti *slag* tersebut aman digunakan untuk keperluan konstruksi, termasuk sebagai bahan pengganti agregat pada campuran aspal.

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa pemanfaatan *slag* nikel dalam konstruksi jalan memberikan hasil yang menjanjikan. *Slag* nikel, karena bentuk partikelnya yang kasar dan tidak beraturan, mampu meningkatkan kepadatan campuran dan daya tahan terhadap perkolasi air. Penelitian oleh (Manguma & Kamba, 2020) menunjukkan bahwa penambahan *slag* nikel mampu meningkatkan durabilitas campuran. Menurut penelitian Syaharuddin dkk, (2021) menemukan bahwa dengan kadar *slag* nikel hingga 10% pada campuran aspal beton mampu meningkatkan nilai *Indirect Tensile Strength* (ITS).

Namun, masih diperlukan penelitian lanjutan untuk mengetahui secara spesifik bagaimana kombinasi antara *slag* nikel berpengaruh terhadap kriteria Marshall, khususnya dalam campuran aspal jenis AC-BC (*Asphalt Concrete–Binder Course*). Campuran AC-BC sebagai lapisan antara memiliki peran penting dalam menahan tegangan geser dan beban lalu lintas yang diteruskan dari permukaan (AC-WC). Oleh karena itu, performa campuran ini sangat dipengaruhi oleh mutu *filler* yang digunakan.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji pengaruh penggunaan *slag* nikel sebagai bahan substitusi agregat halus terhadap kriteria Marshall pada campuran aspal AC-BC, menentukan persentase komposisi terbaik dari campuran *slag* nikel yang menghasilkan kinerja Marshall optimum, serta menilai kelayakan teknis penggunaan *slag* nikel sebagai agregat halus dalam campuran AC-BC sesuai dengan Standar Spesifikasi Umum 2018 Revisi 2.

2. METODE

A. Batasan Penelitian

Batasan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Penelitian ini hanya memfokuskan pada pemanfaatan *slag* nikel sebagai bahan substitusi parsial Agregat Halus dalam campuran aspal beton lapis antara (AC-BC).
2. Jenis campuran aspal yang digunakan adalah AC-BC (*Asphalt Concrete – Binder Course*) dengan menggunakan metode pencampuran panas (*hot mix*) dan pengujian menggunakan metode Marshall sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2.
3. Komposisi *slag* nikel sebagai bahan substitusi parsial agregat halus adalah sebesar 20 %, 40 %, 60 % dan 80 %.
4. Parameter evaluasi yang ditinjau terbatas pada parameter karakteristik Marshall, yaitu: stabilitas (*stability*), kelelahan (*flow*), *void* dalam campuran (VIM), *void* dalam agregat (VMA), dan *void* yang terisi aspal (VFB), *marshall quition* (MQ), *density* dan RMS.
5. Pengujian laboratorium dilakukan tanpa mempertimbangkan pengaruh umur campuran (*durability*) jangka panjang, beban lalu lintas, dan kondisi cuaca ekstrem secara langsung.
6. Material *slag* nikel diperoleh dari PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia di Kab. Bantaeng.
7. Agregat yang digunakan berasal dari Kabupaten Gowa.

B. Lokasi Penelitian

Penelitian dan Pengujian terkait karakteristik campuran aspal, agregat, dan sifat-sifat aspal dilaksanakan di UPTD Laboratorium Pengujian Bahan Konstruksi Dinas Bina Marga dan Bina Konstruksi Provinsi Sulawesi Selatan.

Material campuran aspal pada penelitian berasal dari material lokal yang berada di Provinsi Sulawesi Selatan. Batu pecah / agregat kasar dan agregat halus bersumber dari *quarry* di kawasan Bili-Bili, Kabupaten Gowa milik PT. Tri Star Mandiri. Bahan pengikat yang digunakan adalah aspal pertamina dengan penetrasi 60/70, sementara *Slag* Nikel yang digunakan bersumber dari PT. Huadi Nickel Alloy Indonesia (PT. HNAI) di Kabupaten Bantaeng.

Karena *slag* nikel yang dihasilkan melalui proses pendinginan dengan semprotan air bertekanan tinggi menghasilkan material berbentuk material *granular* yang berongga (kopong), maka dalam penelitian ini *slag* nikel tersebut terlebih dahulu diproses menggunakan alat pemecah batu (*crusher*) agar dapat di manfaatkan sebagai agregat halus (*fine aggregate*).

C. Alat dan Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas agregat dan aspal sebagai material utama penyusun campuran AC-BC. Agregat meliputi agregat kasar, agregat halus yang terdiri dari abu batu dan *slag* nikel sebagai bahan substitusi, serta *filler* yang berfungsi untuk mengisi rongga dalam campuran dan meningkatkan stabilitas. Aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70 yang umum dipakai pada perkerasan lentur sesuai dengan spesifikasi umum 2018 revisi 2. Seluruh bahan terlebih dahulu diuji untuk memastikan kesesuaiannya terhadap persyaratan teknis sebelum digunakan dalam proses pembuatan campuran dan pengujian Marshall.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini mencakup alat untuk pengujian sifat agregat, pengujian sifat aspal, serta peralatan pembuatan dan pengujian campuran aspal. Peralatan pengujian agregat meliputi satu set saringan ASTM, alat uji berat jenis agregat, alat uji abrasi Los Angeles, alat uji bentuk butir agregat, dan tabung silinder *sand equivalent* untuk uji setara pasir. Peralatan pengujian aspal meliputi alat uji penetrasi, titik lembek, titik nyala dan titik bakar, viskositas, daktilitas, berat jenis, serta kelarutan aspal. Sementara itu, peralatan untuk pembuatan dan pengujian campuran aspal terdiri dari cetakan *Marshall* (*mould*), *automatic asphalt compactor*, *ejector* untuk melepaskan benda uji, alat uji *Marshall*, oven, timbangan digital dengan ketelitian 0,1 gram, *thermometer*, *water bath*, serta jangka sorong untuk mengukur tebal benda uji.

D. Tahapan Penelitian

a) Pengujian Aspal

Pengujian terhadap aspal penetrasi 60/70 dilakukan untuk memastikan kesesuaiannya dengan Spesifikasi Umum Bina Marga Revisi 2 (2020) sebelum digunakan dalam campuran AC-BC. Pemeriksaan meliputi uji penetrasi (SNI 2456:2011) untuk mengetahui tingkat kekerasan aspal, uji titik lembek (SNI 2434:2011) untuk menentukan suhu pelunakan, serta uji titik nyala dan titik bakar metode *Cleveland* (SNI 2433:2011) guna memastikan aspek keamanan pemanasan. Selain itu, dilakukan uji *daktilitas* (SNI 2432:2011) untuk menilai sifat plastis dan kohesif aspal, uji berat jenis (SNI 2441:2011) untuk menentukan massa jenis yang digunakan dalam perhitungan campuran, uji viskositas (SNI 7729:2011) untuk mengevaluasi karakteristik alir, serta uji kelarutan aspal (SNI 06-2441-1991) untuk mengetahui kadar bitumen murni yang larut dalam pelarut organik.

b) Pengujian Agregat Kasar

Pengujian agregat kasar diawali dengan analisis saringan (SNI ASTM C136:2012) untuk menentukan distribusi gradasi, serta pengujian berat jenis dan penyerapan air (SNI

1969:2016) guna mengetahui karakteristik fisik dasar agregat. Selanjutnya dilakukan pengujian ketahanan terhadap larutan sulfat (SNI 3407:2008) untuk menilai *durabilitas* terhadap pengaruh lingkungan, uji abrasi *Los Angeles* (SNI 2417:2008) untuk mengetahui ketahanan terhadap keausan dan tumbukan, serta uji kelekatan agregat terhadap aspal (SNI 2439:2011) untuk memastikan kemampuan ikatan dalam campuran. Pengujian tambahan meliputi uji butir pecah (SNI 7619:2012) untuk menilai tingkat angularitas, uji butiran pipih dan lonjong (ASTM D4791-10) untuk membatasi partikel yang berpotensi menurunkan stabilitas, serta pemeriksaan kadar material lolos ayakan No. 200 (SNI ASTM C117:2012) guna mengontrol fraksi halus agar sesuai spesifikasi.

c) Pengujian Agregat Halus

Pengujian agregat halus juga diawali dengan analisis saringan (SNI ASTM C136:2012) serta pengujian berat jenis dan penyerapan air (SNI 1970:2016) untuk menentukan sifat fisik dasar material. Untuk memastikan kebersihan dan kualitas agregat, dilakukan uji *sand equivalent* (SNI 03-4428-1997) guna mengukur kandungan partikel halus seperti lempung dan debu, serta uji *uncompacted void content* (SNI 03-6877-2002) untuk mengetahui karakteristik rongga dan indikasi bentuk butir. Selain itu, dilakukan pengujian butiran gampang pecah dan gumpalan lempung (SNI 03-4141-1996) untuk mengidentifikasi material lemah yang dapat menurunkan mutu campuran, serta pemeriksaan kadar material lolos ayakan No. 200 (SNI ASTM C117-2012) untuk memastikan fraksi halus tidak melebihi batas yang ditetapkan dalam spesifikasi teknis.

E. Rencana Campuran

Rencana campuran AC-BC dalam penelitian ini ditentukan menggunakan metode *trial and error* untuk memperoleh gradasi gabungan yang memenuhi spesifikasi gradasi rapat sesuai ketentuan. Tahap awal dilakukan dengan menentukan gradasi masing-masing fraksi agregat berdasarkan persentase berat yang lolos pada setiap saringan. Selanjutnya, beberapa fraksi agregat yang digunakan, yaitu agregat ukuran 1–2 cm, agregat ukuran 0,5–1 cm, abu batu, dan *filler*, digabungkan dalam proporsi tertentu hingga diperoleh komposisi yang menghasilkan gradasi gabungan dalam batas spesifikasi. Persentase proporsi masing-masing fraksi dikalikan dengan persentase lolos pada setiap ukuran saringan, kemudian seluruh hasilnya dijumlahkan untuk mendapatkan nilai gradasi total pada tiap nomor saringan sebagai dasar evaluasi kesesuaian campuran.

Penentuan Kadar Aspal Rencana (KAR) dilakukan berdasarkan komposisi gradasi agregat yang telah diperoleh, mengacu pada SNI 06-2489-1991 tentang metode Marshall. Nilai perkiraan kadar aspal campuran dihitung menggunakan **Persamaan 1**.

$$P_b = 0,035a + 0,045b + c + K \quad (1)$$

di mana:

a adalah persentase agregat kasar tertahan saringan No. 4

b adalah persentase agregat halus lolos saringan No. 4 dan tertahan No. 200

c adalah persentase lolos saringan No. 200, dan

K merupakan konstanta (0,5–1,0 untuk campuran *Asphalt Concrete*).

Nilai P_b yang diperoleh menjadi acuan kadar aspal pendekatan, kemudian dibuat variasi dua kadar di atas dan dua kadar di bawah nilai tersebut dengan interval 0,5%. Apabila hasil perhitungan menghasilkan angka desimal seperti 5,7%, maka dibulatkan menjadi 5,5% sebagai kadar aspal rencana untuk pengujian Marshall.

F. Pengujian Benda Uji Metode Marshall untuk Penentuan KAO

Penentuan kadar aspal optimum dilakukan melalui serangkaian percobaan dengan menggunakan agregat yang tetap, sedangkan kadar aspal divariasikan dalam beberapa tingkat persentase. Variasi kadar aspal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan kadar aspal terhadap sifat-sifat campuran aspal, sehingga nantinya dapat diperoleh kadar aspal yang paling sesuai. Hasil dari setiap variasi kadar aspal tersebut akan dianalisis dan disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara stabilitas, *flow* (kelelehan), rongga udara dalam campuran (*air voids/VIM*), serta *Marshall Quotient* (MQ). Berdasarkan grafik-grafik tersebut kemudian dapat ditentukan kadar aspal optimum yang memenuhi kriteria persyaratan teknis.

Dalam menentukan kadar aspal optimum, terdapat beberapa parameter Marshall yang menjadi acuan. Parameter tersebut meliputi nilai stabilitas, nilai *flow* (kelelehan), *Marshall Quotient* (MQ), volume rongga dalam campuran (*Void in Mix/VIM*), serta volume rongga yang terisi aspal (*Void Filled with Bitumen/VFB*). Parameter-parameter ini digunakan karena masing-masing mencerminkan karakteristik penting dari campuran aspal, seperti kekuatan, daya tahan terhadap deformasi, serta kepadatan dan kadar rongga dalam campuran.

Sebelum pengujian Marshall dapat dilakukan, langkah awal yang harus dipersiapkan adalah pembuatan benda uji. Benda uji dibuat dengan menggunakan agregat sesuai gradasi rencana, kemudian dicampur dengan kadar aspal yang telah ditentukan sesuai variasi yang direncanakan. Pada setiap variasi kadar aspal, dibuat sebanyak tiga buah benda uji untuk mendapatkan hasil yang representatif. Dengan demikian, jika terdapat lima variasi kadar aspal yang diuji, maka total benda uji yang disiapkan adalah 15 buah. Benda uji tersebut selanjutnya akan diuji menggunakan alat Marshall untuk memperoleh nilai stabilitas, *flow*, VIM, VFB, dan MQ, yang kemudian dianalisis guna menentukan kadar aspal optimum.

Tabel 1 Jumlah Sampel untuk Penentuan KAO

No	Variasi kadar aspal (%)	Jumlah benda uji (Buah) <i>Slag</i> 0 %	Jumlah benda uji (Buah) <i>Slag</i> 20 %	Jumlah benda uji (Buah) <i>Slag</i> 40 %	Jumlah benda uji (Buah) <i>Slag</i> 60 %	Jumlah benda uji (Buah) <i>Slag</i> 80 %
1	KAR – 1	3	3	3	3	3
2	KAR- 0,5	3	3	3	3	3
3	KAR	3	3	3	3	3
4	KAR + 0,1	3	3	3	3	3
5	KAR + 1	3	3	3	3	3
Jumlah		15	15	15	15	15
Total Benda Uji		75				

Penentuan KAO dilakukan melalui metode *narrow range*. Penentuan ini memperhatikan parameter *Marshall* dengan ketentuan sebagai berikut: densitas, nilai VMA minimal 15%, VIM antara 3% hingga 5%, VFA minimal 65%, stabilitas minimal 800 kg, dan *flow* antara 2 mm hingga 4 mm. Nilai KAO diambil dari titik tengah rentang kadar aspal yang memenuhi seluruh kriteria tersebut sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan.

G. Pembuatan Benda Uji Variasi *Slag* Nikel

Selanjutnya membuat benda uji (AC-BC) menggunakan KAO dan bahan pengisi berupa *slag* nikel sebagai substitusi abu batu dengan kadar 20 % 40% 60 % dan 80%. Benda uji yang telah jadi kemudian dilakukan Uji Marshall Setelah mendapatkan data dari hasil

pengujian laboratorium, kemudian dilakukan analisis dan pembahasan sehingga mendapatkan kesimpulan dan saran hasil pengujian.

Tabel 2 Jumlah Benda Uji Marshall terhadap variasi *Slag* Nikel

No.	Kode Benda Uji	Variasi <i>Slag</i> Nikel (%)	Total
1	AC-BC 0	0	6
2	AC-BC SN20	20	6
3	AC-BC SN40	40	6
4	AC-BC SN60	60	6
5	AC-BC SN80	80	6
Total Benda Uji			30

H. Pengujian Benda Uji Metode Marshall

Alat Marshall merupakan alat uji tekan yang dilengkapi dengan *proving ring* (cincin penguji) berkapasitas 22,2 kN (5000 lbs) serta *flow* meter. *Proving ring* berfungsi untuk mengukur nilai stabilitas, sedangkan *flow* meter digunakan untuk mengukur kelelahan plastis dari benda uji. Benda uji *Marshall* berbentuk silinder dengan diameter 4 inci (10,2 cm) dan tinggi 2,5 inci (6,35 cm). Prosedur pengujian Marshall dilakukan berdasarkan standar SNI 06-2489-1991, AASHTO T245-90, atau ASTM D 1559-76.

Tujuan dari pengujian *Marshall* adalah untuk mengevaluasi kinerja campuran aspal, yang meliputi parameter stabilitas, *flow*, *Marshall Quotient* (MQ), *Voids in Mineral Aggregate* (VMA), *Void in Mix* (VIM), dan densitas. Selain itu, pengujian ini juga bertujuan untuk menilai daya tahan campuran terhadap beban maksimum (stabilitas) serta kemampuan campuran dalam mengalami deformasi plastis. *Flow* didefinisikan sebagai perubahan bentuk atau regangan yang dialami oleh campuran mulai dari kondisi tanpa beban hingga mencapai beban maksimum. Nilai *flow* kemudian dinyatakan dalam satuan milimeter.

Setelah proses pembuatan benda uji selesai, dilakukan tahap perendaman sebelum uji Marshall dilaksanakan. Benda uji dimasukkan ke dalam *water bath* dengan suhu 60 °C selama kurang lebih 30 menit. Perendaman ini berfungsi untuk mensimulasikan kondisi lingkungan yang sesungguhnya, khususnya pengaruh air terhadap kinerja campuran. Melalui tahapan ini dapat diketahui tingkat keawetan campuran serta potensi kerusakan yang mungkin timbul akibat penetrasi dan pengaruh air terhadap struktur internal campuran beraspal. Setelah perendaman selesai, permukaan benda uji dikeringkan, kemudian diletakkan pada dudukan yang tersedia pada alat Marshall. Selanjutnya, dilakukan penyetelan pada dial gauge untuk pengukuran stabilitas dan *flow*. Pengujian Marshall dilakukan dengan menjalankan mesin penekan hingga benda uji mencapai beban maksimum. Nilai stabilitas diperoleh dari pembacaan pada *proving ring*, sedangkan nilai *flow* diperoleh dari pembacaan *flow* meter yang terpasang pada alat Marshall.

I. Metode Analisis Data

Metode analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara deskriptif berdasarkan hasil pengujian laboratorium terhadap campuran aspal AC-BC dengan substitusi *slag* nikel sebagai agregat halus. Setelah seluruh pengujian selesai dan data terkumpul, tahap analisis dilakukan untuk menafsirkan karakteristik campuran secara menyeluruh, baik dari aspek volumetrik maupun parameter *Marshall*. Data yang dianalisis meliputi dimensi benda uji, berat kering, berat dalam air, berat kondisi SSD, nilai stabilitas, serta nilai *flow*. Dari data

tersebut dilakukan perhitungan berat jenis agregat, berat jenis efektif campuran, berat jenis maksimum, serta parameter rongga seperti VIM, VMA, dan VFA. Nilai stabilitas yang diperoleh dari alat uji dikoreksi sesuai prosedur standar, kemudian dihitung nilai Stabilitas Marshall Sisa (RMS) untuk mengevaluasi ketahanan campuran terhadap pengaruh perendaman.

Selanjutnya, hasil analisis digunakan untuk membandingkan kinerja campuran AC-BC pada setiap variasi persentase *slag* nikel sebagai bahan substitusi agregat halus. Tahapan analisis meliputi pengumpulan dan dokumentasi data hasil uji *Marshall* dari seluruh sampel, penyusunan data dalam bentuk nilai rata-rata dan standar deviasi, serta penyajian dalam bentuk grafik untuk mempermudah perbandingan antar variasi campuran. Interpretasi dilakukan dengan membandingkan kecenderungan perubahan stabilitas, *flow*, dan parameter volumetrik terhadap peningkatan kadar *slag* nikel, sehingga dapat ditentukan persentase komposisi terbaik yang menghasilkan kinerja Marshall optimum serta layak secara teknis sesuai spesifikasi yang berlaku.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Material

a) Pemeriksaan Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan berupa batu pecah ukuran 2–3 cm, 1–2 cm, dan 0,5–1 cm yang diperoleh dari wilayah Bili-Bili, Kabupaten Gowa, dan telah diuji di UPTD Laboratorium Pengujian Bahan Konstruksi Dinas Bina Marga dan Bina Konstruksi Provinsi Sulawesi Selatan. Hasil analisis gradasi menunjukkan bahwa distribusi ukuran butir masing-masing fraksi berada dalam rentang yang sesuai untuk campuran AC-BC. Pengujian sifat fisik seperti berat jenis *bulk*, SSD, dan semu menunjukkan nilai yang memenuhi persyaratan spesifikasi, demikian pula dengan nilai penyerapan air yang masih dalam batas yang diizinkan. Ketahanan terhadap pelapukan melalui uji *soundness*, nilai abrasi *Los Angeles*, angularitas agregat, serta kadar butiran pipih dan lonjong juga memenuhi ketentuan teknis. Secara keseluruhan, agregat kasar yang digunakan memiliki karakteristik kekuatan, kekerasan, dan bentuk butir yang baik sehingga layak digunakan sebagai material penyusun campuran AC-BC.

b) Pemeriksaan Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan berupa abu batu telah melalui pengujian gradasi dan sifat fisik untuk memastikan kesesuaiannya terhadap Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi II. Hasil analisis saringan menunjukkan distribusi ukuran butir yang memenuhi kriteria gradasi untuk campuran bergradasi menerus. Nilai berat jenis *bulk*, SSD, dan semu berada dalam rentang yang dipersyaratkan, dengan tingkat penyerapan air yang masih dapat diterima. Pengujian *sand equivalent* menunjukkan tingkat kebersihan agregat yang baik, sedangkan hasil uji *soundness* serta kandungan gumpalan lempung dan butir mudah pecah berada di bawah batas maksimum spesifikasi. Dengan demikian, agregat halus berupa abu batu dinyatakan memenuhi persyaratan teknis dan layak digunakan dalam campuran AC-BC.

c) Pemeriksaan *Slag* Nikel

Slag nikel yang digunakan sebagai bahan substitusi agregat halus juga telah diuji karakteristik gradasi dan sifat fisiknya. Hasil analisis saringan menunjukkan bahwa *slag* nikel memiliki distribusi ukuran butir yang dominan pada fraksi halus dengan persentase lolos ayakan No. 200 masih berada di bawah batas maksimum yang dipersyaratkan. Nilai

berat jenis bulk, SSD, dan semu relatif lebih tinggi dibandingkan agregat halus alami, yang menunjukkan potensi kontribusi terhadap peningkatan stabilitas campuran. Tingkat penyerapan air *slag* nikel tergolong rendah, serta nilai *sand equivalent* menunjukkan tingkat kebersihan material yang sangat baik. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, *slag* nikel memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi II dan layak dimanfaatkan sebagai bahan substitusi agregat halus dalam campuran AC-BC.

d) Hasil Penggabungan Gradasi Campuran untuk Mencari Kadar Aspal Optimum (KAO)

Gradasi campuran agregat dalam penelitian ini disusun secara menerus dengan komposisi abu batu sebesar 50%, batu pecah ukuran 2–3 sebesar 9%, batu pecah ukuran 1–2 sebesar 11%, dan batu pecah ukuran 0,5–1 sebesar 30%. Penentuan gradasi gabungan dilakukan dengan mengalikan persentase komposisi masing-masing fraksi terhadap nilai persentase lolos saringan dari hasil uji gradasi, kemudian menjumlahkan seluruh hasil tersebut untuk memperoleh gradasi total campuran. Hasil penggabungan menunjukkan bahwa gradasi campuran berada dalam batas spesifikasi AC-BC yang dipersyaratkan, sehingga komposisi tersebut digunakan sebagai dasar dalam penentuan kadar aspal rencana dan selanjutnya sebagai acuan dalam pencarian Kadar Aspal Optimum (KAO) melalui pengujian Marshall.

B. Pemeriksaan Aspal

Jenis aspal yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal keras penetrasi 60/70 produksi Pertamina yang umum diaplikasikan pada perkerasan jalan di wilayah beriklim tropis. Berdasarkan hasil pengujian karakteristik yang telah dilakukan, seluruh parameter seperti penetrasi, titik lembek, titik nyala dan titik bakar, daktilitas, berat jenis, viskositas, serta kelarutan menunjukkan nilai yang berada dalam batas spesifikasi yang dipersyaratkan. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa aspal penetrasi 60/70 yang digunakan memiliki sifat fisik dan kinerja yang sesuai sebagai bahan pengikat dalam campuran beton aspal *Asphalt Concrete Binder Course* (AC-BC), sehingga layak digunakan dalam proses perancangan dan pengujian campuran pada penelitian ini.

C. Penentuan Kadar Aspal Rencana (KAR)

Penentuan kebutuhan KAR dilakukan berdasarkan hasil penetapan fraksi campuran agregat yang telah diperoleh sebelumnya. Perhitungan pendekatan kadar aspal campuran menggunakan parameter persentase agregat tertahan saringan No. 8 (a), persentase agregat lolos saringan No. 8 dan tertahan No. 200 (b), serta persentase agregat lolos saringan No. 200 (c), dengan memperhitungkan nilai konstanta (K) sesuai persentase lolos saringan No. 200 dan faktor koreksi (F) berdasarkan jenis campuran. Berdasarkan data yang diperoleh, nilai a sebesar 63%, b sebesar 32,96%, dan c sebesar 4,05%, dengan nilai K sebesar 0,20 karena persentase lolos saringan No. 200 $\leq 5\%$, serta faktor F sebesar 1 untuk campuran Laston/AC. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pendekatan kadar aspal (P_b) sebesar 5,50%. Nilai tersebut kemudian dijadikan sebagai kadar aspal tengah dalam variasi pengujian, sehingga ditetapkan rentang kadar aspal sebesar 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, dan 6,5% untuk keperluan pengujian Marshall dalam menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO).

D. Hasil Pengujian Campuran Aspal Beton Lapis Antara (AC-BC)

Pengujian karakteristik Marshall dilakukan untuk mengetahui sifat mekanis dan volumetrik campuran aspal AC-BC yang meliputi stabilitas, *flow*, *density*, VIM, VMA, dan VFA. Pengujian dilaksanakan pada variasi kadar aspal rencana dengan persentase substitusi *slag*

nikel sebagai agregat halus sebesar 0%, 20%, 40%, 60%, dan 80% terhadap abu batu. Hasil pengujian ini digunakan sebagai dasar dalam menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) dengan metode *narrow range*, yaitu dengan memilih rentang kadar aspal yang memenuhi seluruh persyaratan karakteristik Marshall sesuai spesifikasi, kemudian menetapkan nilai tengah dari rentang tersebut sebagai KAO masing-masing variasi campuran.

Berdasarkan hasil analisis, nilai tengah KAO untuk variasi substitusi *slag* nikel 0% diperoleh sebesar 5,75%, untuk 20% sebesar 5,63%, untuk 40% sebesar 5,58%, untuk 60% sebesar 5,51%, dan untuk 80% sebesar 5,49% (**Tabel 3**). Terlihat bahwa peningkatan persentase substitusi *slag* nikel cenderung menurunkan nilai KAO. Penurunan ini dipengaruhi oleh karakteristik *slag* nikel yang memiliki berat jenis relatif tinggi dan nilai penyerapan air yang rendah, sehingga kebutuhan aspal untuk melapisi permukaan agregat menjadi lebih kecil karena pori atau rongga pada material *slag* nikel relatif sedikit.

Tabel 3 Rangkuman Nilai KAO

Variasi <i>Slag</i> Nikel (%)	Rentang KAO (%)	KAO (%)
0	5,40 - 6,10	5,75
20	5,36 - 5,91	5,63
40	5,21 - 5,96	5,58
60	5,02 - 6,00	5,51
80	5,05 - 5,93	5,49

E. Hubungan Kadar Aspal dan Variasi Substitusi Parsial *Slag* Nikel Sebagai Agregat Halus Pada Karakteristik *Marshall*

Hubungan antara kadar aspal dan variasi substitusi parsial *slag* nikel sebagai agregat halus terhadap karakteristik Marshall menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap sifat volumetrik dan mekanis campuran AC-BC. Pada parameter kepadatan, peningkatan kadar aspal secara umum menyebabkan nilai *density* meningkat karena rongga dalam campuran semakin terisi oleh aspal. Selain itu, penambahan *slag* nikel cenderung menghasilkan nilai *density* yang lebih tinggi dibandingkan campuran kontrol, mengingat berat jenis *slag* nikel yang relatif besar. Namun demikian, pada beberapa kombinasi kadar aspal dan persentase *slag* nikel tertentu, terjadi penurunan *density* yang tidak konsisten. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh distribusi butiran *slag* nikel yang kurang seragam serta proses pencampuran manual yang memungkinkan terjadinya ketidakhomogenan campuran.

Pada parameter *Void in Mineral Aggregate* (VMA) dan *Void in Mix* (VIM), perubahan kadar aspal dan variasi *slag* nikel menunjukkan kecenderungan yang berbeda. Nilai VMA pada seluruh variasi masih memenuhi batas minimum yang dipersyaratkan, dengan pola umum menurun seiring bertambahnya kadar aspal hingga titik tertentu, kemudian meningkat kembali. Hal ini disebabkan oleh semakin tertutupnya rongga antar agregat akibat penambahan aspal. Sementara itu, nilai VIM cenderung menurun dengan meningkatnya kadar aspal karena rongga udara semakin terisi, namun peningkatan proporsi *slag* nikel justru menyebabkan nilai VIM relatif lebih tinggi dibandingkan campuran kontrol. Peningkatan VIM ini berkaitan dengan perubahan struktur internal campuran dan peningkatan kekakuan akibat karakteristik *slag* nikel.

Pada parameter *Voids Filled with Bitumen* (VFB), stabilitas, dan *flow*, terlihat bahwa peningkatan kadar aspal berkontribusi terhadap kenaikan VFB karena semakin banyak rongga antar agregat yang terisi oleh aspal. Seluruh variasi campuran memenuhi persyaratan stabilitas minimum, meskipun secara umum peningkatan substitusi *slag* nikel cenderung menurunkan nilai stabilitas dibandingkan campuran kontrol. Penurunan ini dipengaruhi oleh sifat permukaan dan karakteristik butiran *slag* nikel yang berbeda dari agregat alami. Sementara itu, nilai *flow* meningkat seiring bertambahnya kadar aspal karena

campuran menjadi lebih plastis, dan pada beberapa variasi *slag* nikel tinggi terjadi peningkatan deformasi yang lebih besar.

Marshall Quotient (MQ), sebagai rasio antara stabilitas dan *flow*, menunjukkan kecenderungan meningkat pada variasi *slag* nikel hingga 40% karena peningkatan stabilitas lebih dominan dibandingkan kenaikan *flow*. Hal ini menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih kaku dan memiliki ketahanan deformasi yang lebih baik. Namun pada variasi 60% dan 80%, meskipun nilai stabilitas dan ketahanan sisa masih baik, parameter volumetrik terutama VIM menunjukkan kecenderungan tidak optimal. Penurunan rongga udara yang terlalu kecil berpotensi menyebabkan bleeding dan menurunkan durabilitas jangka panjang, sehingga perlu dipertimbangkan keseimbangan antara kinerja struktural dan aspek keawetan campuran.

F. Analisis Campuran AC-BC Kondisi KAO

Nilai KAO yang telah ditentukan selanjutnya digunakan sebagai dasar pembuatan benda uji untuk pengujian *Marshall*. Benda uji diberi perlakuan perendaman dalam *waterbath* pada suhu 60°C selama 30 menit dan 24 jam. Hasil pengujian *Marshall* pada kondisi KAO disajikan pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**. Data hasil pengujian tersebut kemudian dianalisis lebih lanjut terhadap parameter Density, VIM, VMA, VFB stabilitas *Marshall*, *flow Marshall*, stabilitas *Marshall* sisa dan RMS.

KAO	Variasi Slag Nikel	Perendaman Sampel					
		30 Menit (Standar)					
		Mdensity	MVIM	MVMA	MVFB	MS	MF
(%)	(%)	(gr/cc)	(%)	(%)	(%)	(kg)	(mm)
5.75	0	2.300	4.482	17.21	73.96	1,798	2.67
5.63	20	2.314	4.066	16.61	75.51	1,820	3.71
5.58	40	2.324	3.733	16.21	76.98	2,050	3.65
5.51	60	2.348	2.839	15.29	81.43	2,130	3.46
5.49	80	2.357	2.487	14.94	83.35	2,164	3.32
Spesifikasi		-	3-5	Min. 14	Min. 65	Min 800	2-4

Gambar 1 Hasil Uji Marshall Kondisi KAO 30 Menit

KAO	Variasi Slag Nikel	Perendaman Sampel						RMS
		24 Jam						
		Mdensity	MVIM	MVMA	MVFB	MS	MF	
(%)	(%)	(gr/cc)	(%)	(%)	(%)	(kg)	(mm)	(%)
5.75	0	2.297	4.644	17.35	73.24	1,662	3.16	92.43
5.63	20	2.312	4.164	16.69	75.06	1,725	3.82	94.74
5.58	40	2.318	3.966	16.42	75.84	1,947	3.74	94.96
5.51	60	2.345	2.958	15.39	80.78	2,058	3.69	96.59
5.49	80	2.348	2.859	15.27	81.27	2,111	3.53	97.55
Spesifikasi		-	3-5	Min. 14	Min. 65	Min 800	2-4	Min. 90

Gambar 2 Hasil Uji Marshall Kondisi KAO 24 Jam dan RMS

e) *Marshall Density*

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai *density* campuran cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya persentase substitusi *slag* nikel. Campuran tanpa *slag* nikel memiliki nilai *density* paling rendah, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada variasi *slag* nikel 80%. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa *slag* nikel memiliki berat jenis relatif tinggi serta

kemampuan mengisi rongga antar agregat secara lebih efektif dibandingkan agregat halus alami. Struktur campuran yang lebih rapat tersebut berpotensi meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi air serta memperbaiki kinerja campuran setelah proses perendaman. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa peningkatan proporsi *slag* nikel dalam campuran aspal berkontribusi terhadap kenaikan nilai kepadatan.

f) Marshall VIM dan VMA

Nilai *Void in Mix* (VIM) menunjukkan kecenderungan menurun dengan meningkatnya variasi *slag* nikel, khususnya pada kadar aspal optimum tertentu. Penurunan VIM menandakan berkurangnya rongga udara dalam campuran akibat meningkatnya kepadatan dan efektivitas pengisian rongga oleh butiran *slag* nikel. Nilai VIM yang berada dalam rentang spesifikasi mencerminkan keseimbangan yang baik antara kepadatan dan ruang udara, sehingga campuran tidak berpotensi mengalami *bleeding* maupun mudah ditembus air. Sejalan dengan itu, nilai *Void in Mineral Aggregate* (VMA) juga mengalami penurunan seiring bertambahnya persentase *slag* nikel, meskipun seluruh variasi masih memenuhi batas minimum spesifikasi. Penurunan VMA menunjukkan susunan agregat yang semakin rapat akibat karakteristik *slag* nikel yang memiliki berat jenis tinggi dan bentuk butiran yang mampu meningkatkan *interlocking* antar partikel. Namun demikian, nilai VMA yang masih berada di atas batas minimum memastikan bahwa ruang antar agregat tetap cukup untuk menampung aspal efektif dan menjaga durabilitas campuran.

g) Marshall VFB, Stability, dan Flow

Parameter *Void Filled with Bitumen* (VFB) menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya variasi *slag* nikel, yang mengindikasikan bahwa semakin besar persentase rongga agregat yang terisi oleh aspal efektif. Kondisi ini memperlihatkan terbentuknya lapisan aspal yang lebih merata dan ikatan yang lebih baik antara agregat dan aspal, sehingga meningkatkan kohesi dan adhesi dalam campuran. Pada parameter stabilitas Marshall, hasil pengujian perendaman menunjukkan kecenderungan peningkatan stabilitas dengan bertambahnya proporsi *slag* nikel, yang menandakan peningkatan ketahanan campuran terhadap pengaruh air dan suhu. Sementara itu, nilai *flow* masih berada dalam rentang spesifikasi dan menunjukkan bahwa campuran tidak bersifat terlalu kaku maupun terlalu plastis. Dengan demikian, peningkatan stabilitas akibat penambahan *slag* nikel tidak menyebabkan campuran menjadi getas dan tetap mampu menyesuaikan deformasi akibat beban lalu lintas.

h) Marshall Quotient dan Retained Marshall Stability

Evaluasi terhadap *Marshall Quotient* (MQ) menunjukkan bahwa campuran dengan variasi *slag* nikel hingga 40% memenuhi seluruh persyaratan spesifikasi dan memberikan keseimbangan yang baik antara stabilitas dan *flow*. Pada variasi ini diperoleh kekakuan optimum tanpa mengurangi fleksibilitas campuran, sehingga sesuai untuk lapisan AC-BC yang berfungsi sebagai *binder course* dalam menahan tegangan geser dan beban lalu lintas. Pada variasi 60% dan 80%, meskipun parameter mekanis relatif tinggi, terdapat ketidaksesuaian pada parameter volumetrik tertentu sehingga kurang optimal secara keseluruhan. Sementara itu, nilai *Retained Marshall Stability* (RMS) menunjukkan tren peningkatan dengan bertambahnya variasi *slag* nikel, yang menandakan bahwa campuran memiliki ketahanan yang baik terhadap perendaman dan mampu mempertahankan kekuatan strukturalnya setelah jenuh air. Nilai RMS yang tinggi mengindikasikan penurunan stabilitas akibat perendaman relatif kecil, sehingga campuran memiliki durabilitas yang baik dalam kondisi lingkungan basah.

G. Pembahasan Substitusi Parsial *Slag* Nikel sebagai Agregat Halus terhadap Kinerja Campuran AC-BC

Hasil pemeriksaan parameter Marshall menunjukkan bahwa campuran beraspal dengan variasi substitusi *slag* nikel sebesar 0%, 20%, dan 40%, masing-masing pada kadar aspal optimum (KAO) sebesar 5,75%, 5,63%, dan 5,58%, telah memenuhi seluruh persyaratan spesifikasi yang ditetapkan. Sementara itu, campuran dengan variasi substitusi *slag* nikel sebesar 60% dan 80%, masing-masing pada kadar aspal optimum (KAO) 5,51% dan 5,49%, tidak memenuhi batas minimum spesifikasi, khususnya terhadap parameter *Void in the Mix* (VIM), meskipun parameter Marshall lainnya masih berada dalam batas yang dipersyaratkan.

Berdasarkan evaluasi seluruh parameter Marshall yang diperoleh dari hasil pengujian, kondisi campuran yang dinilai paling optimum/maksimal dan memenuhi seluruh persyaratan spesifikasi adalah campuran dengan variasi substitusi *slag* nikel sebesar 40% pada kadar aspal optimum sebesar 5,58%. Meskipun nilai *Retained Marshall Stability* (RMS) tertinggi diperoleh pada variasi *slag* nikel 80% dengan kadar aspal 5,49%, namun campuran tersebut tidak dapat ditetapkan sebagai kondisi optimum karena nilai VIM yang dihasilkan berada di luar batas spesifikasi yang dipersyaratkan, sehingga berpotensi menurunkan kinerja dan durabilitas campuran dalam jangka panjang.

4. PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian, pemanfaatan *slag* nikel sebagai substitusi parsial agregat halus pada campuran *Asphalt Concrete–Binder Course* (AC-BC) secara umum mampu memenuhi persyaratan karakteristik Marshall sesuai spesifikasi yang berlaku, baik ditinjau dari parameter stabilitas, *flow*, VMA, VFB, *Marshall Quotient*, maupun *Retained Marshall Stability* (RMS). Meskipun pada variasi substitusi tinggi yaitu 60% dan 80% terjadi ketidaksesuaian pada nilai *Void in the Mix* (VIM) pada kondisi kadar aspal optimum setelah perendaman, campuran tetap menunjukkan ketahanan yang sangat baik terhadap pengaruh air berdasarkan nilai RMS yang tinggi. Komposisi optimum diperoleh pada variasi substitusi *slag* nikel sebesar 40% dengan kadar aspal optimum (KAO) 5,58%, yang memberikan keseimbangan terbaik antara stabilitas, deformasi, dan durabilitas terhadap perendaman. Oleh karena itu, *slag* nikel berpotensi digunakan sebagai bahan substitusi parsial agregat halus dalam campuran AC-BC dengan batasan proporsi optimum agar seluruh parameter teknis tetap terpenuhi dan kinerja perkerasan tetap terjaga.

5. DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2018). *Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing* (38th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Alwie, rahayu deny danar dan alvi furwanti, Prasetio, A. B., Andespa, R., Lhokseumawe, P. N., & Pengantar, K. (2020). Tugas Akhir Tugas Akhir. *Jurnal Ekonomi* Volume 18, Nomor 1 Maret 201, 2(1), 41–49.
- Andi Batari Angka & Kushari Kushari (2017), *Slag Nikel Sebagai Bahan Substitusi pada Karakteristik Campuran AC-Base*, Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat (SNP2M).
- Arrang, A. T., Irmawaty, R., Djamaluddin, R., & Parung, H. (2024). Mechanical and microstructural evaluation of utilizing nickel slag as sustainable aggregate in asphalt mixtures. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(2), 13954–13962. <https://doi.org/10.48084/etasr.13954>
- Asphalt Institute. (2014). *Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types* (MS-2, 7th ed.). Asphalt Institute.

- Azizah, N., Tjaronge, M. W., Amiruddin, A. A., & Lando, A. T. (2025). Performance of asphalt concrete mixtures containing nickel slag. (1), 20565–20572. <https://doi.org/10.48084/etasr.9051>
- Bethary, R. T., & Intari, D. E. (2022). Penggunaan Limbah Slag Nikel Untuk Material Jalan Ramah Lingkungan. *Fondasi : Jurnal Teknik Sipil*, 11(1), 34. <https://doi.org/10.36055/fondasi.v0i0.14473>
- Demmalino, U. A., Lambe, C. S. W., Rachman, R., & Alpius. (2019). Pengujian slag nikel sebagai pengganti agregat pada campuran HRS-Base. *Paulus Civil Engineering Journal*, 1(2), 64–72. <https://doi.org/10.52722/pcej.v1i2.371>
- Dimas B. Ariyanto (2023), Analisis Modulus Resilien terhadap Campuran Aspal Beton Lapis Antara (AC-BC) dengan Modifikasi Slag Nikel, Skripsi, Untirta.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). Spesifikasi Umum 2018 Revisi 2. In Edaran Dirjen Bina Marga Nomor 16.1/SE/Db/2020 (Issue Oktober).
- Fajr Thariq, M. A. Z. (2023). Pemanfaatan Terak Nikel Sebagai Bahan Pengganti Agregat Dalam Campuran Beraspal Lapis Aus (AC-WC).
- Gunawan, F., Setyawan, A., & Sarwono, D. (2019). Pemanfaatan limbah slag nikel sebagai agregat campuran aspal panas. *Jurnal Teknik Sipil*, 26(2), 101–110.
- Harnaeni, S. R., Lestari, P. R., Balich, R. P., & Aulia, G. (2022). Komparasi Karakteristik Marshall AC-BC dengan Penggunaan Limbah Ban Luar dan Limbah Steel Slag sebagai Pengganti Agregat Kasar. *JRST (Jurnal Riset Sains Dan Teknologi)*, 6(2), 211. <https://doi.org/10.30595/jrst.v6i2.15355>
- Huda Mutaqin, Agung (2023) “pemanfaatan slag nikel sebagai bahan pengganti agregat dalam campuran beraspal lapis antara(ac-bc)”. s1 thesis, fakultas teknik universitas sultan ageng tirtayasa.
- Hunter, R. N., Read, J., & Self, A. (2015). The Shell Bitumen Handbook. In Read, J., & Whiteoak, D. (2003). The Shell bitumen handbook. Thomas Telford. (Sixth edit).
- Kamba, C., & Rachman, R. (2018). Marshall Characteristics Test On Hot Rolled Sheet Base Combine Using Nickel Slag For Half Gap Graded. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 5(3), 14–19.
- Manguma, F., Kamba, C., Program, M., Teknik, S., Kristen, U., & Paulus, I. (2020). Pengaruh Penggunaan Slag Nikel Terhadap Indeks Kekuatan Sisa Campuran HRS-WC Pengaruh Penggunaan Slag Nikel Terhadap Indeks Kekuatan Sisa Campuran HRS-WC. 2(3), 197–204.
- Putra, D. M., Nasrul, & Ngii, E. (2020). Potensi slag nikel halus (FeNi4) sebagai agregat halus pada campuran aspal. *STABILITA: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 8(1), 1–10.
- SNI 1968:2011. (2011). Metode pengujian tentang analisis saringan agregat halus dan kasar. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2489:2011. (2011). Metode pengujian campuran aspal dengan alat Marshall. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 8135-2015 Spesifikasi Aspal Keras Berdasarkan Kelas Penetrasi, Badan Standardisasi Nasional. 2015.
- SNI 8198:2015. (2015). Campuran beraspal panas dengan aspal keras. Badan Standardisasi Nasional.
- Suaryana, N. (2016). Studi pemanfaatan slag sebagai bahan konstruksi perkerasan jalan. *Jurnal Litbang Jalan dan Jembatan*, 33(2), 87–98.
- Sukirman, S. (2016). Beton Aspal Campuran Panas. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Supit, Febe Priskila, and Robert Mangontan. “Pemanfaatan Limbah Nikel Sorowako Dalam Campuran Stone Matrix Asphalt Kasar.” *Paulus Civil Engineering Journal* 3, no. 1 (2021): 63–69.
- Syahrudin, Hafam, S. M., & Alifuddin, A. (2021). Pengaruh Variasi Slag Nikel Sebagai Bahan Tambah Agregat Halus pada Campuran Lapisan Aspal Beton. *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, 6(2), 101–107. <https://doi.org/10.33096/jtsm.v6i2.334>
- Tjaronge, M. W., Irmawaty, R., & Alpius. (2020). Performance of asphalt mixtures containing nickel slag aggregates. , 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118125>
- Utami Arruantasik Demmalino, Cyntia S. W. Lambe, Rais Rachman, & Alpius, Pengujian Slag Nikel Sebagai Pengganti Agregat pada Campuran HRS-Base, *Paulus Civil Engineering Journal*, Vol. 1 No. 2, (2019). DOI:10.52722/we81n887