



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Infrastruktur jalan memegang peranan penting dalam menjamin keandalan sistem transportasi darat karena berfungsi menopang pergerakan manusia, barang, dan jasa. Oleh karena itu jalan dikategorikan sebagai infrastruktur strategis yang kinerja layanannya sangat menentukan bagi efisiensi logistik, aksesibilitas wilayah, keselamatan lalu lintas serta daya saing ekonomi suatu daerah. Mutu dan keandalan perkerasan tidak hanya berimplikasi pada tingkat kenyamanan dan keamanan pengguna jalan, tetapi juga berkaitan erat dengan besaran biaya pemeliharaan dan rehabilitasi yang harus dialokasikan selama umur layanan infrastruktur. Dengan demikian, kualitas material perkerasan, khususnya campuran beraspal, menjadi faktor kunci dalam menjamin keberlanjutan penyelenggaraan prasarana jalan.

Perkembangan teknologi otomotif saat ini, telah menghasilkan kendaraan dengan kapasitas angkut dan dimensi yang lebih besar. Kondisi tersebut berdampak pada peningkatan beban sumbu dan intensitas pembebanan yang diteruskan ke lapisan perkerasan. Di sisi lain, pertumbuhan volume lalu lintas, terutama lalu lintas kendaraan berat, menyebabkan frekuensi repetisi beban pada permukaan jalan meningkat signifikan sehingga mempercepat terjadinya degradasi struktural maupun fungsional. Keadaan ini akan memicu kerusakan seperti terjadinya retak, deformasi permanen berupa alur (*rutting*) pada perkerasan campuran aspal. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa karakteristik campuran aspal konvensional saat ini memiliki keterbatasan dalam menahan pembebanan modern yang bersifat tinggi dan berulang, sehingga diperlukan upaya pengembangan dan rekayasa campuran beraspal dengan kinerja mekanik, stabilitas, dan durabilitas yang lebih baik agar mampu meningkatkan ketahanan terhadap *rutting* dan retak serta memperpanjang umur layanan perkerasan.

Pentingnya jalan sebagai infrastruktur transportasi menjadi fokus utama pembangunan dan pemeliharaan oleh pemerintah melalui instansi terkait. Investasi dalam pembangunan dan perawatan jalan sangat penting untuk memastikan kelancaran dan keamanan lalu lintas, serta untuk mengakomodasi pertumbuhan populasi dan permintaan transportasi yang terus meningkat. Hingga Tahun 2021 Indonesia memiliki jalan sepanjang 546.116 km, dengan perincian Jalan Nasional 47.017 km, Jalan Provinsi 54.551 km dan Jalan Kabupaten/Kota 444.548 Km. Sementara menurut jenis perkerasan yang digunakan, jalan aspal sepanjang 366.301 km dan non aspal 179.815 km (Badan Pusat Statistik, 2022). Data tersebut belum termasuk Jalan Desa yang dibangun melalui dana desa yang bersumber dari APBN.

Konstruksi jalan aspal atau dikenal juga dengan nama perkerasan lentur masih banyak diminati karena memiliki beberapa kelebihan misalnya: memberikan



nyamanan kepada pengendara, biaya konstruksi awal yang rendah, langsung dapat digunakan sesaat setelah konstruksi jalan selesai tanpa menunggu umur beton. Keuntungan pada perkerasan kaku, jenis pekerjaan pemeliharaan yang sederhana dan lain-lain. Material campuran aspal yang banyak digunakan di Indonesia saat ini adalah *asphaltic concrete* (AC) atau aspal beton, di mana jenis material ini mulai digunakan pada tahun 1970-an. Namun penggunaan campuran aspal beton banyak mengalami kerusakan berupa retak-retak pada aplikasi dengan ketebalan minimum utamanya di kondisi tanah dengan daya dukung rendah. Kerusakan tersebut diakibatkan oleh terjadinya pelapukan selaput aspal yang tipis dan material AC yang membutuhkan ketelitian tinggi dalam pelaksanaan. Kemudian pada sekitar pertengahan tahun 1980-an diperkenalkan campuran *Hot Rolled Sheet* (HRS). Berbeda dengan campuran AC yang menggunakan agregat dengan gradasi rapat, campuran HRS ini menggunakan agregat dengan gradasi senjang dan memiliki selaput aspal yang tebal. Pelaksanaan juga tidak terlalu membutuhkan ketelitian yang tinggi. Jenis campuran ini tidak mudah retak namun sangat rentan terhadap deformasi permanen (Nyoman, 2012).

*Stone Matrix Asphalt* (SMA) merupakan campuran aspal yang telah ada dalam spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2, namun belum banyak digunakan dalam konstruksi jalan di Indonesia. Kekuatan campuran SMA dalam menanggung beban kendaraan diperoleh dari rangka (skeleton) agregat kasar yang berbentuk matriks, sementara rongganya diisi oleh mastik, berupa campuran agregat halus dan filler dengan kadar aspal yang cukup tinggi. Sehingga di Eropa SMA dikenal dengan nama Stone Mastic Asphalt. Penemu SMA adalah Dr. Zichner, seorang insinyur Jerman yang juga manajer laboratorium untuk jalan di Strabag Bau AG, pada pertengahan tahun 1960-an. Pertama kali SMA dirancang untuk menahan kerusakan pada lapisan aus akibat studded tires, kemudian diketahui bahwa SMA memiliki durabilitas yang tinggi sehingga memiliki umur layanan yang panjang. Hingga awal tahun 1980-an SMA hanya dikenal di Jerman dan beberapa negara Eropa utamanya negara Skandinavia di mana banyak penggunaan studded tires. Setelah standar teknis dipublikasikan oleh Jerman, SMA kemudian mulai dikenal luas di Eropa. Sementara di Amerika Serikat SMA mulai berkembang pada tahun 1990-an, setelah itu berkembang pula ke Australia, Selandia Baru dan China. Saat ini SMA telah diteliti dan dikembangkan oleh banyak negara dan digunakan di seluruh dunia karena keandalannya (Blazejowski, 2016).

Beberapa keuntungan penggunaan SMA (Blazejowski, 2016) antara lain : umur layanan yang lebih lama, ketahanan terhadap deformasi akibat banyaknya kandungan agregat kasar serta interlocking dalam skeleton, bertambahnya fatigue life akibat kandungan aspal yang tinggi dalam campuran, mampu menahan beban lalu lintas yang lebih karena butiran agregat kasar yang keras, memiliki macrotexture yang baik yang dapat mengurangi cipratan air akibat lalu lintas, serta dapat mereduksi kebisingan. Meskipun demikian, SMA juga memiliki kelemahan antara lain: biaya yang relatif mahal sekitar 10-20% dibandingkan dengan campuran aspal lain karena kandungan aspal yang tinggi dan biaya penggunaan bahan penstabil



abilizer), adanya resiko kemunculan spot-spot aspal pada permukaan akibat salah pada saat produksi atau saat konstruksi.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk semakin mengembangkan campuran SMA. Penelitian pengaruh *nominal maximum aggregate* (NMAS) terhadap kinerja campuran dilakukan melalui uji *whell test*, uji permeabilitas, *beam bending test* dan uji cantabro. Terlihat bahwa *void in mineral aggregate* (VMA) dan *void filled with Asphalt* (VFA) dalam campuran SMA bertambah dengan semakin kecilnya NMAS dalam gradasi. Bertambahnya NMAS akan meningkatkan ketahanan terhadap *rutting*. Namun dengan berkurangnya NMAS akan meningkatkan ketahanan terhadap retak dan pelepasan butir (H. Liu et al., 2017a). Penelitian (Limón-Covarrubias et al., 2019) terkait pengaruh filler terhadap kinerja campuran SMA, menggunakan uji *semi circular bending* (SCB), menunjukkan bahwa filler berpengaruh terhadap *index energy* dan *fracture energy* campuran. Penelitian untuk mengatasi terjadinya draindown aspal, sebagai kelemahan campuran SMA, dilakukan dengan menggunakan serat alami berupa sabut kelapa, serat sisal dan serat batang pisang sebagai bahan stabilizer. Diperoleh bahwa sabut kelapa memberikan nilai ITS yang tinggi pada campuran SMA (Kiran Kumar & Ravitheja, 2019). Penelitian menggunakan *basalt fibre* dan *lignin fibre* dalam campuran aspal SMA dilakukan terhadap kinerja campuran pada temperatur tinggi, ketahanan terhadap retak, dan water stability. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan kinerja SMA dengan adanya penambahan serat, kinerja yang lebih baik diperlihatkan oleh BF (Wu et al., 2021). Penelitian penggunaan limbah berupa *palm oil clinker* (POC) sebagai pengganti agregat dalam SMA dilakukan (Babalghaith, Koting, Ramli Sulong, et al., 2020). Hasil studi menunjukkan bahwa POC dapat digunakan sebagai agregat halus dalam campuran SMA hingga 100%.

Di sisi lain diketahui bahwa agregat merupakan komponen terbesar dalam campuran aspal. Komposisi agregat, yang terdiri dari agregat kasar dan halus, berkisar 90% dari berat campuran atau 75% - 85% dari volume campuran, sisanya adalah filler dan bitumen. Oleh karena itu dibutuhkan banyak riset dalam upaya menemukan sumber baru yang dapat digunakan sebagai agregat dalam campuran. Indonesia merupakan negara penghasil nikel terbesar di dunia dengan produksi nikel sebesar 1,6 juta metrik ton pada tahun 2022, disusul Filipina yang terpaut jauh sebesar 330 ribu metrik ton dan Rusia 220 metrik ton. Perkiraan cadangan nikel dunia sebesar 139,419 juta metrik ton dan lebih dari setengah atau sekitar 52% cadangan tersebut berada di Indonesia. Sementara 90% cadangan nikel Indonesia berlokasi di Morowali (Sulawesi Tengah), Sorowako (Sulawesi Selatan), Kolaka dan Konawe (Sulawesi Tenggara) serta Tanjung Buli (Maluku Utara). Proses produksi nikel tersebut menghasilkan pula limbah berupa slag nikel yang telah mencapai 13 juta metrik ton per tahun (Pristiandaru, 2023).

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan melalui Peraturan Pemerintah Nomor 22/2021 telah mengeluarkan sembilan limbah dari daftar bahan berbahaya dan beracun (B3) yaitu: slag besi, slag baja, slag nikel, mill scale, debu *electric arc*



nace (EAF), *PS ball*, *fly ash bottom ash* (FABA) dari PLTU, *Spent Bleaching Earth* (3E), dan pasir foundry. Penelitian terkait kandungan zat berbahaya dalam slag nikel dilakukan melalui uji *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP), dan menunjukkan hasil masih dibawah ambang batas yang diizinkan sehingga layak digunakan sebagai material bangunan jalan (Bethary & Intari, 2022a); (Masyuroh et al., 2022); (Susanto et al., 2020); (Dewiandratika, Maryam et al., 2018). Sementara itu penelitian terkait analisis siklus hidup/*Life Cycle Analysis* (LCA) terhadap penggunaan *steel slag* dalam campuran aspal dapat mengurangi emisi karbon hingga 14% jika dibandingkan dengan batu pecah agregat konvensional (Díaz-Piloneta et al., 2021). Dengan demikian pemanfaatan slag sebagai agregat dalam campuran perkerasan aspal semakin menarik untuk diteliti (Kemenperin, 2020); (Pristiandaru, 2023).

Berikut beberapa penelitian penggunaan slag nikel dalam campuran aspal. Slag nikel asal smelter PT Growth Java Industri, Banten, didalami penggunaannya sebagai agregat kasar dalam campuran AC-BC (Bethary & Intari, 2022a). Pemanfaatan slag nikel asal PT Vale, Sorowako, sebagai agregat halus dalam campuran AC-BC dilakukan oleh (Jusmidah et al., 2021). Slag nikel asal PT Vale digunakan pula sebagai agregat halus oleh (Kamba & Rachman, 2018) pada campuran aspal semi senjang HRS-Base. Kajian terhadap pemanfaatan slag nikel asal PT Aneka Tambang, Kolaka, sebagai pengganti agregat halus campuran AC-Base dilakukan oleh (Angka & Kushari, 2017). Hasil penelitian-penelitian tersebut di atas memperlihatkan hasil bahwa penggunaan material slag nikel memenuhi persyaratan kinerja Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan 2018 Revisi 2 baik dari segi stabilitas, kelelahan (*flow*) dan sifat volumetrik Marshall seperti VIM, VMA dan VFA.

Pemenuhan terhadap syarat campuran tersebut di atas dapat dicapai oleh karena sifat fisik yang dimiliki oleh slag nikel juga memenuhi persyaratan sebagai bahan penyusun campuran aspal seperti yang dimiliki oleh batuan konvensional yang sering digunakan dalam campuran aspal. Abrasi agregat kasar tidak melebihi 40% untuk campuran jenis *asphalt concrete* (AC) dan *hot rolled sheet* (HRS), sementara abrasi slag nikel 23,62%. Syarat penyerapan air maksimum 3%, slag nikel 0,24%. Berat jenis bulk untuk agregat kasar disyaratkan minimal 2, sementara berat jenis slag 2,9 (Bethary & Intari, 2022a). Studi penggunaan slag nikel dalam campuran aspal oleh Wang dan Thompson di Republic of Dominica menunjukkan pemenuhan terhadap standar setempat. Nilai stabilitas Marshall diperoleh sebesar 17.354 N (min 8000 N). *flow* 14 (min.8), VIM 4% (3,5-4,5%), VMA 14,5% dan 15,7 % (min. 14%); (G. Wang & Thompson, 2011).

Berdasarkan uraian tersebut di atas terkait kinerja campuran stone matrix asphalt (SMA) dapat diketahui beberapa hal antara lain: (1) Kinerja campuran SMA sangat dipengaruhi oleh sifat dan komposisi agregat penyusunnya misalnya: gradasi agregat, ukuran agregat maksimum dalam campuran, sifat fisik material pengisi (*filler*). (2) Penggunaan serat alami dalam campuran SMA tidak hanya berfungsi



bagai *stabilizing agent* tapi juga dapat meningkatkan kinerja campuran. (3) Adanya uang penggunaan limbah sebagai material pengganti dalam campuran SMA.

Syarat-syarat teknis agregat kasar dalam pembentukan campuran SMA pada dasarnya sejalan dengan persyaratan yang diterapkan pada campuran AC dan HRS. Meski demikian terdapat perbedaan yang memerlukan perhatian khusus, yaitu batasan maksimum abrasi untuk SMA yang ditetapkan pada tingkat 30%. Parameter kepipihan dan kelonjongan dengan rasio 1:5, batas maksimumnya adalah 10% untuk AC dan HRS, sementara SMA mempunyai batasan maksimum sebesar 5%. Melalui hasil penelitian pada berbagai jenis campuran aspal, terlihat adanya indikasi bahwa penggunaan slag nikel dengan ketelitian lebih tinggi pada tahap desain dapat dimanfaatkan dalam pengembangan campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA), sehingga dapat diperoleh campuran aspal berkinerja kinerja unggul dan berkelanjutan. Pada konteks ini penelitian dengan tema "**Studi Kinerja Campuran Stone Matrix Asphalt yang Menggunakan Slag Nikel Sebagai Agregat Kasar**" dilaksanakan. Dengan demikian, diharapkan bahwa penelitian ini tidak hanya memberikan pemahaman lebih mendalam terhadap karakteristik material, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teknologi konstruksi jalan raya yang berkelanjutan dan inovatif.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka dapat dituliskan beberapa rumusan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik Marshall dan kadar aspal optimum (KAO) campuran aspal SMA yang menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar serta efektifitas sabut kelapa sebagai *stabilizing agent*.
2. Bagaimana kinerja terhadap tarik tak langsung dan indeks toleransi retak campuran SMA yang menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar.
3. Bagaimana kinerja SMA agregat kasar slag nikel terhadap aus, karakteristik terhadap uji non destruktif dan uji mikrostruktur.
4. Bagaimana hubungan secara empirik antara nilai parameter marshall dan kuat tarik tak langsung campuran SMA yang menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar.

## 1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis karakteristik Marshall dan menentukan kadar aspal optimum (KAO) campuran aspal SMA yang menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar serta efektifitas sabut kelapa sebagai *stabilizing agent*.
2. Menganalisis kinerja terhadap tarik tak langsung dan indeks toleransi terhadap retak campuran SMA yang menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar.



Menganalisis kinerja campuran SMA agregat kasar slag nikel terhadap keausan, karakteristik terhadap uji non destruktif dan mikrostruktur.

.. Menemukan model hubungan empiris dari stabilitas dan kuat tarik tak langsung campuran SMA yang menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar.

#### 1.4. Batasan Masalah

Beberapa Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Jenis campuran yang digunakan berupa campuran dengan gradasi senjang yaitu *stone matrix asphalt* (SMA) Halus yang mengacu Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan 2018 revisi 2.
2. Material aspal yang digunakan merupakan produksi Pertamina dengan penetrasi 60/70, agregat batu pecah asal Bili Bili, slag nikel asal PT Vale Sorowako, *filler* menggunakan semen Tonasa.
3. *Stabilizing agent* yang digunakan berupa serat sabut kelapa dengan panjang serat 6 mm, komposisi dalam campuran sebesar 0,3% terhadap berat total campuran.
4. Variasi kadar aspal dalam campuran mengacu pada SNI 8129-2015 Spesifikasi Stone Matrix Asphalt yaitu: 6%, 6,25%, 6,5%, 6,75% dan 7%.
5. Kombinasi kadar slag nikel sebagai agregat kasar dalam campuran: 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%.
6. Penilaian kinerja SMA melalui: uji Marshall (SK SNI M-01-2003), *indirect tensile strength* (ASTM D6931-12), uji draindown (AASHTO T 305-97), analisis *Cracking Tolerance Index* (ASTM D8225-19), uji Cantabro loss, uji non destruktif dengan *utrasonic pulse velocity* (ASTM C597-2012) dan uji mikrostruktur melalui *scanning electron microscopy* (SEM) dan *energy dispersive x-ray spectroscopy* (EDX).

#### 1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Manfaat Teoritis: Penelitian ini diharap akan memperluas pemahaman tentang pengaruh slag nikel terhadap kinerja mekanik dan mikrostruktur campuran SMA.
2. Manfaat Praktis: Hasil studi diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan untuk desain campuran SMA gradasi halus dengan kandungan slag nikel 0–100% dengan agen penstabil serat kelapa 0,3% untuk meningkatkan stabilitas Marshall dan ketahanan terhadap retak.
3. Manfaat Kebijakan/Industri: Temuan dalam studi ini diharapkan dapat menjadi salah satu referensi penggunaan slag nikel sebagai agregat pada standar konstruksi jalan nasional dan mendukung program pengelolaan limbah industri secara berkelanjutan.
4. Manfaat Masyarakat: Diperoleh konstruksi infrastruktur jalan yang lebih tahan lama dan berpotensi menekan biaya perbaikan jalan dan mengurangi gangguan lalu lintas bagi pengguna.

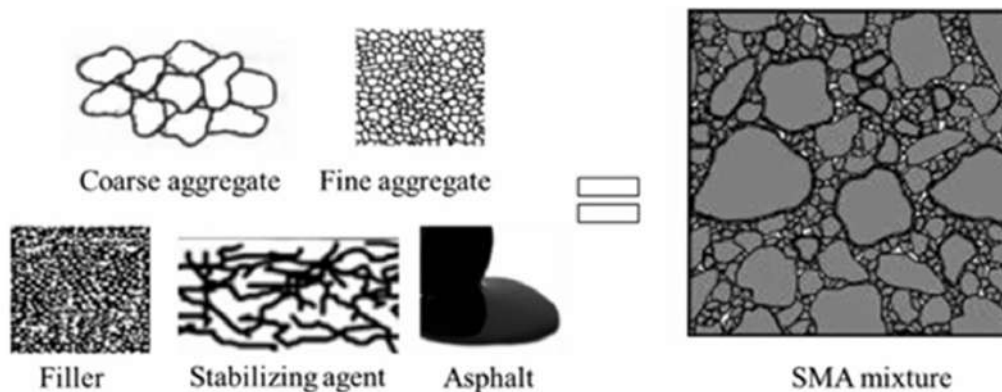


## BAB II KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS

### 1.1. Tinjauan Pustaka

#### 2.1.1. Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA)

Berdasarkan (AASHTO, 2012), SMA didefinisikan sebagai aspal campuran panas (*hot mix asphalt*, HMA) yang terdiri dari kerangka agregat kasar (*skeleton*) dengan *stone on stone contact* dan mortar pengikat aspal yang kaya akan aspal. Agregat kasar adalah fraksi agregat yang tertahan pada ayakan 4,75 mm (No. 4). Secara umum bagian campuran SMA terdiri dari: agregat kasar sebagai *skeleton*, mastic (yang tersusun dari: pengikat, filler, agregat halus dan stabilizer) serta rongga dalam campuran aspal seperti pada Gambar II.1. Kisaran perbandingan berat antara *mastic* dan *skeleton* berkisar 30:70. Gradasi agregat penyusun SMA merupakan gradasi senjang.

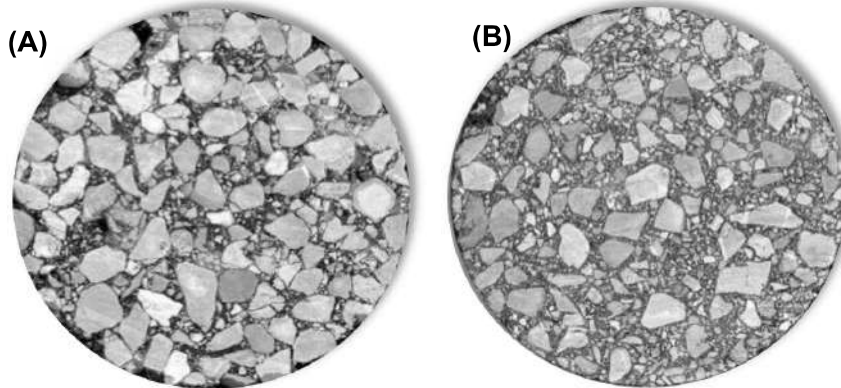


**Gambar II.1** Komponen Dasar Campuran SMA (Devulapalli et al., 2022)

SMA adalah campuran aspal yang kaya akan pengikat, memiliki susunan agregat yang saling mengunci, sehingga tahan terhadap alur (*rutting*) dan durabilitas yang tinggi sehingga dapat digunakan untuk perkerasan jalan dengan volume tinggi, lalu lintas padat, serta lalu lintas yang lambat atau terhenti, seperti jalan dengan beban berat tinggi di area industri, jalur bus, atau area terminal peti kemas. Fitur utama SMA adalah gradasinya yang unik, yang terdiri dari 20%-30% material yang lolos ayakan 4,75 mm, dan oleh karena itu memiliki sifat yang relatif kasar. Berdasarkan pedoman yang ada, gradasi harus ditentukan sebagai bagian dari proses desain campuran, melalui penggunaan konsep "*stone on stone contact*". Pada prinsipnya, hal ini mengacu pada situasi di mana agregat halus telah direduksi hingga mencapai titik di mana partikel agregat kasar bersentuhan satu sama lain, sehingga menghasilkan kekuatan pada kerangka agregat kasar (Mallick & El-Korchi, 2011). Pada awalnya Dr. Zichner memberikan komposisi campuran SMA dalam berat



bagai berikut: agregat kasar 5/8 mm (70%), pasir *chrused* 0/2 mm (12%), filler (1,5%) dan binder (7,5%). Perbandingan penampang campuran SMA dengan campuran gradasi menerus dapat dilihat pada Gambar II.2.



**Gambar II.2** Perbandingan Penampang Campuran (A) SMA dengan (B) Gradasi menerus

Hingga tahun 1980-an SMA hanya berkembang di Eropa. Pada akhir 1990 dilakukan studi terkait penggunaan SMA sebagai lapisan perkerasan di Eropa oleh tim dari United States (US). Tahun 1991 Federal Highway Administration (FHWA) menggagas dibuatnya pedoman terkait material dan konstruksi sebagai instrument awal penggunaan SMA di US. Pemanfaatan campuran SMA sebagai konstruksi jalan pertama kali di US pada tahun 1991 berlokasi di Wisconsin selanjutnya diikuti di Michigan, Georgia dan Missouri pada tahun yang sama. Hingga tahun 1997 di 28 negara bagian telah terbangun lebih dari 100 proyek pembangunan jalan yang memanfaatkan lebih dari 3 juta ton campuran SMA. Kebanyakan dari jalan tersebut merupakan jalan yang melayani lalu lintas bermuatan tinggi, dan ditemukan bahwa campuran SMA dapat memberikan kinerja yang baik selama umur layanan. Biaya ekstra pada masa konstruksi dapat diimbangi oleh kinerja yang tinggi dari campuran. Keunggulan utama SMA dibandingkan dengan campuran konvensional HMA bergradasi rapat antara lain umur layanan yang lebih panjang, mereduksi kebisingan, peningkatan ketahanan friksi, permukaan perkerasan yang kasar juga memberikan berdampak positif pada visibilitas karena dapat mereduksi kilatan cahaya pada malam hari dan mengurangi cipratan air (NAPA, 2002). Selanjutnya *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) mengembangkan prosedur rancangan campuran untuk campuran SMA yang kemudian digunakan di US, karena rancangan campuran yang semula diadopsi dari Eropa tidak sesuai dengan kondisi di US. Prosedur rancangan campuran tersebut memberikan pedoman untuk syarat material penyusun, gradasi agregat, kadar aspal optimum (KAO) dan penilaian terhadap konsep stone on stone contact. Kemudian setelah itu implementasi SMA sebagai lapisan perkerasan berkembang di US lalu ke Australia, Selandia Baru dan Kanada dan China. Saat ini SMA telah menjadi campuran dalam konstruksi perkerasan yang digunakan dan dapat diterima di seluruh dunia oleh karena kinerjanya yang handal (Devulapalli et al., 2022).



## .2. Kinerja Campuran SMA

Penelitian terhadap kinerja pekerasan di US dilakukan oleh Brown terhadap proyek jalan yang menggunakan campuran SMA sebagai lapisan permukaan. Data yang diperoleh kemudian dievaluasi kinerja perkerasan utamanya terhadap kerusakan rutting, cracking, ravelling dan lain-lain. Hasil menunjukkan bahwa 90% dari proyek jalan tersebut terjadi rutting hanya sedalam 4 mm. Ditemukan pula bahwa ketahanan terhadap terjadinya *cracking* (karena panas dan reflektif) lebih tinggi dari campuran aspal yang menggunakan gradasi menerus dan tidak ada tanda-tanda terjadinya pelepasan butir (*ravelling*) (Brown et al., 1997). Ketahanan SMA yang tinggi terhadap *rutting* juga ditemukan melalui penelitian laboratorium yang dilakukan khususnya untuk cuaca yang panas (Asi, 2006). Hasil penelitian lapangan memperlihatkan bahwa kemampuan SMA terhadap *rutting* diperoleh dari kandungan agregat kasar yang tinggi sehingga memungkinkan terjadinya *stone on stone contact* dalam campuran (C Kamaraj, PK Jain, BM Sharma, 2013). Jika dibandingkan dengan campuran aspal yang menggunakan agregat dengan gradasi rapat/menerus seperti *Asphaltic Concrete (AC)*, campuran SMA masih memiliki kemampuan menahan retak yang lebih baik, yang mana hal tersebut terjadi akibat tingginya kandungan agregat kasar (Mogawer & Stuart, 1994).

Campuran SMA yang dirancang dengan *air void (AV)* sebesar 3%-4% sangat rawan akan terjadinya fat spot dan deformasi permanen, oleh karena itu sangat penting untuk menjaga nilai AV tetap dalam batas yang disarankan (Brown et al., 1997). Penelitian yang dilakukan oleh Mogawer dan Stuart menunjukkan bahwa dari hasil *tensile strength ratio* dan *diametral modulus*, campuran SMA mempunyai potensi yang rendah terhadap terjadinya *moisture damage* jika dibandingkan dengan campuran aspal dengan bergradasi rapat (Mogawer & Stuart, 1994). Tingginya durabilitas dan kinerja selama waktu pemakaian jalan, juga ditemukan melalui studi yang dilakukan oleh (Woodward et al., 2016). Penggunaan bahan tambah berupa *stabilizing agents* selain berfungsi sebagai *drainage inhibitor* juga akan berkontribusi dalam campuran aspal untuk meningkatkan ketahanan terhadap temperatur dan kelembaban. Kehadiran *stabilizing agents* juga akan meningkatkan ketahanan campuran aspal terhadap fatigue dan retak pada temperatur rendah dan sedang. Di sisi lain tekstur permukaan perkerasan SMA yang kasar akan memberikan *skid resistance* yang besar sehingga memberikan keamanan pada pengendara (Behnood & Ameri, 2012); (Brown et al., 1997); (C Kamaraj, PK Jain, BM Sharma, 2013); (G Boscaino, FG Praticò, 2005).

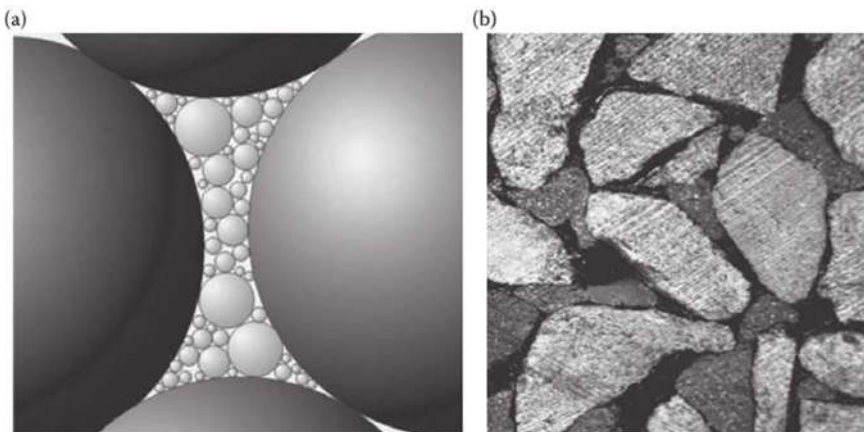
Meskipun memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan campuran aspal yang menggunakan gradasi rapat, campuran SMA juga memiliki banyak tantangan. Kemampuan menahan beban yang dimiliki oleh *skeleton* dari agregat kasar membutuhkan perancangan yang teliti. Campuran SMA menggunakan aspal dalam jumlah yang banyak dibandingkan dengan campuran aspal konvensional. Kondisi ini dipicu oleh ketebalan lapisan film aspal yang melapisi setiap butiran agregat. Dampak yang timbul dari kondisi ini, SMA sangat rentan terhadap fenomena *draindown*,



adial di mana bahan pengikat meleleh dan kemudian terlepas atau mengalir dari permukaan butiran agregat. Fenomena ini sering terjadi dalam proses transportasi u pada tahap penghamparan di lokasi proyek konstruksi. Banyak spesifikasi dan rancangan campuran misalnya terkait dengan sifat-sifat bahan, gradasi, dan parameter volumetrik membutuhkan verifikasi, modifikasi, pengembangan sehubungan dengan iklim, topografi dan karakteristik lalu lintas yang berbeda-beda di berbagai wilayah. Hal lain yang menjadi tantangan adalah biaya yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan campuran aspal konvensional.

### 2.1.3. Gradasi, Nominal Maximum Aggregate Size dan Break Point Sieve

Stone Matrix Asphalt adalah aspal campuran panas yang terdiri dari dua bagian yaitu: rangka agregat kasar dan bahan pengisi rongga berupa mortar dengan kandungan pengikat yang tinggi. Rangka agregat kasar (*stone skeleton*) ini nantinya akan menahan beban dan dikenal pula dengan istilah *active grains* sementara bahan pengisi rongga berupa mortar atau *mastic* tidak menahan beban dan disebut *passive grains*. Gambar rangka agregat kasar yang terisi mastic pada SMA dapat dilihat Gambar II.2.



**Gambar II.3** Rangka Agregat Kasar yang Terisi Mastic, (a) Diagram skematik (b) Contoh aktual

Hal tersebut di atas memperlihatkan bahwa tujuan merancang struktur agregat dalam campuran SMA adalah dengan terbentuknya rangka yang kuat disusun oleh butiran agregat kasar. Rangka yang kuat ini diperoleh dari kontak antara batuan dengan batuan sehingga tidak terlalu banyak ruang untuk agregat halus. Oleh karena itu gradasi yang sesuai untuk campuran SMA adalah gradasi senjang. Gradasi senjang adalah adanya gangguan pada fraksi agregat yang berurutan dalam suatu campuran agregat, gangguan tersebut diakibatkan oleh kurangnya satu atau lebih fraksi agregat. Gradasi agregat yang tepat dapat meyakinkan adanya kontak antara batuan dengan batuan. Hasil observasi beberapa peneliti menunjukkan gradasi agregat memegang peranan yang penting terhadap kinerja campuran SMA. (E.R. Brown, 1993); (Cooley & Hurley, 2004); (Devulapalli et al., 2020).



Kontak antara batuan dengan batuan (*stone on stone contact*) dan *nominal maximum aggregate size* (NMAS) memegang peranan yang sama pentingnya dalam campuran SMA. NMAS akan menentukan pada bagian mana dalam perkerasan campuran SMA akan ditempatkan. Pada Tahun 1991 di US gradasi pertama yang diaplikasikan menggunakan NMAS 19 mm, lalu pada Tahun 1999 dikeluarkan pedoman campuran SMA dengan NMAS antara 4,75 mm sampai 25 mm. NMAS antara 9,5 mm – 25 mm memberikan hasil yang sangat memuaskan pada perkerasan jalan di US, sementara untuk NMAS kurang dari 9,5 mm masih terbatas dalam pengembangan di laboratorium. Di China direkomendasikan dua NMAS yaitu 13 mm dan 16 mm oleh *Chinese Agencies* pada Tahun 2004. Sementara itu di India pada Tahun 2008, oleh *Indian Road Congress* (IRC) diterbitkan spesifikasi SMA dengan NMAS 13 mm untuk lapisan *wearing course* dan NMAS 19 mm sebagai *binder course* (Devulapalli et al., 2022).

Banyak studi yang dilakukan mengkonfirmasi bahwa NMAS memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja campuran SMA. Campuran SMA yang menggunakan NMAS 25 mm memiliki permeabilitas yang tinggi dibandingkan dengan NMAS 9,5 mm, dikonfirmasi pula bahwa campuran NMAS 9,5 mm memiliki kepadatan yang lebih tinggi dari NMAS 25 mm. Studi yang dilakukan oleh Sarang, dkk menggunakan NMAS 16 mm dan 13 mm pada campuran SMA bahan pengikat aspal modifikasi polymer tanpa *stabilizing agent*, diperoleh hasil bahwa campuran dengan NMAS lebih besar memiliki ketahanan terhadap rutting. Hasil pengujian *indirect tensile strength* (ITS), rasio *tensile strength*, *wheel tracking machine* (WTM), terlihat kinerja yang lebih pada NMAS 16 mm (Sarang et al., 2015). Penelitian terhadap ketahanan aus pada permukaan campuran SMA dengan NMAS 14 mm dan 10 mm mengacu pada gradasi EN13108-5 ditemukan nilai yang hampir sama, meskipun secara makrostruktur NMAS 14 mm lebih besar (Woodward et al., 2016). Penelitian (H. Liu et al., 2017b) terhadap campuran dengan empat NMAS yaitu 5 mm, 13 mm, 20 mm dan 30 mm diperoleh bahwa dengan semakin meningkatnya NMAS maka nilai VMA dan VFA semakin kecil, dari pengujian WTM diperoleh nilai dynamic stability meningkat seiring dengan peningkatan nilai NMAS yang mengindikasikan semakin tingginya resistensi terhadap *rutting*. Pada Uji *three bending point* terlihat bahwa semakin kecil nilai NMAS akan menyebabkan berkurangnya kekakuan dan meningkatnya regangan, sementara nilai regangan tekuk juga semakin kecil, dapat disimpulkan bahwa NMAS yang mengecil akan meningkatkan ketahanan retak pada campuran. Pada SMA campur hangat ditemukan pula bahwa semakin besar NMAS ketahanan terhadap deformasi permanen juga meningkat, studi ini menggunakan NMAS 9,5 mm, 12,5 mm dan 19 mm (Rezvan & Hassan, 2017).

Konsep penting lainnya terkait dengan gradasi campuran SMA adalah penentuan *break point sieve*, yang diartikan sebagai saringan yang memisahkan antara agregat kasar dan agregat halus. Partikel yang tertahan pada *break point sieve* adalah *active grains* yang akan menahan beban yang dialami oleh perkerasan melalui kontak antara batuan dengan batuan dalam campuran. Sementara partikel yang lolos *break point sieve* adalah *passive grain*, yang diikat



rgan aspal membentuk material yang disebut mastic. Jika *break point sieve* lebih  
ngi maka tekstur permukaan campuran akan kasar dan jika lebih kecil maka tekstur  
mukaan akan semakin halus. Break point sieve bervariasi tergantung terhadap  
NMAS. Campuran SMA dengan NMAS lebih besar dari 12,5 mm break point sieve-  
nya adalah 4,75 mm. Sementara untuk NMAS 9,5 mm dan 4,75 mm *break point*  
*sieve*-nya secara berturut adalah 2,36 mm dan 1,18 mm (Blazejowski, 2016); (Qiu &  
Lum, 2006); (Lynn et al., 1999); (Brown et al., 1997); (Prowell et al., 2002); (Xie et al.,  
2003).

#### 2.1.4. Kontak Antar Batuan

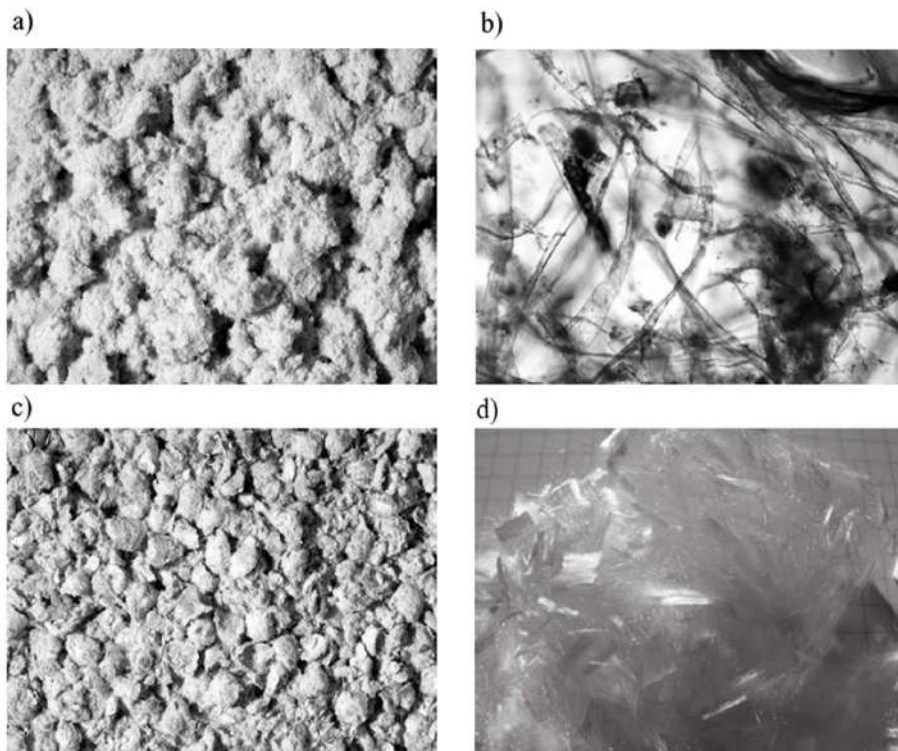
Kontak antara batu ke batu (*Stone on Stone Contact*) adalah salah satu fitur  
khas pada campuran SMA yang membedakannya dengan campuran aspal lainnya.  
Secara umumnya, kontak antara batu ke batu dapat dicapai melalui rancangan  
campuran yang tepat. Meskipun rancangan campuran SMA hampir mirip dengan  
campuran bergradasi rapat, namun ada sedikit modifikasi dilakukan pada gradasi,  
sifat volumetrik, kadar aspal pengikat, *draindown* dan juga pada sifat Marshall.  
Banyak negara telah mengembangkan prosedur desain campuran sendiri sesuai  
dengan kondisi lalu lintas, lingkungan, dan geografis di tempatnya. Jerman  
mengembangkan metode berdasarkan sifat volumetrik (yaitu: rongga dalam agregat  
mineral, berat satuan, rongga udara dan kadar aspal) dan kadar aspal optimum  
(KAO) ditentukan berdasarkan rongga udara yang diijinkan. Dalam spesifikasi di US,  
umumnya desain campuran SMA didasarkan pada memastikan kontak batu ke batu  
dari agregat kasar. Demikian pula, di India dan Australia, desain campuran SMA  
bergantung pada perolehan kontak antara batu ke batu dengan mengatur gradasi  
agregat dan rongga udara dalam agregat kasar. Beberapa peneliti menegaskan  
bahwa desain campuran SMA harus memastikan struktur kerangka agregat kasar  
yang memadai, yaitu kontak antar batu, dan sifat volumetrik yang memuaskan.  
Selama bertahun-tahun, US mengikuti aturan 30-20-10 dalam mendesain gradasi  
agregat campuran SMA, yang berarti campuran harus memiliki setidaknya 30% lolos  
saringan 4,75 mm, 20% lolos saringan 2,36 mm, dan 10% lolos saringan 0,075 mm.  
Studi NCAT menunjukkan bahwa pada material yang lolos saringan dari 4,75 mm  
merupakan titik krusial terjadinya kontak antar batuan (Blazejowski, 2016);  
(Devulapalli et al., 2022).

#### 2.1.5. Drainase Aspal (Asphalt Draindown)

Campuran SMA menggunakan aspal dalam jumlah yang banyak  
dibandingkan dengan campuran aspal konvensional. Hal ini diakibatkan oleh  
tebalnya film aspal yang menyelimuti butiran agregat. Akibatnya pada campuran SMA  
sangat rawan terjadi efek *draindown*, kejadian di mana bahan pengikat meleleh dan  
terlepas/mengalir dari butiran agregat saat proses transportasi ataupun dalam  
penghamparan di lokasi pekerjaan. Ada dua teknik yang dapat digunakan dalam  
mereduksi terjadinya draindown yaitu: (1) memberi bahan tambahan yang akan  
mengabsorpsi bagian aspal dan (2) memberi bahan tambah berupa polymer yang  
akan meningkatkan viskositas aspal saat suhu tinggi sehingga dapat mengurangi



indown. Penggunaan bahan tambah yang berfungsi untuk mengabsorpsi aspal merupakan *stabilizing agent* yang sangat populer digunakan. Sifat utama yang dituntut dari bahan stabilizing adalah: daya resap yang memadai untuk aspal dan kemampuan untuk bekerja tanpa melemahkan campuran. Bahan baku yang digunakan pada jenis ini antara lain: selulosa (material yang paling banyak digunakan), *pseudoselulosa* (dibuat dari gilingan kertas bekas), serat mineral (seperti rock wool), mineral selulosa (campuran antara selulosa dan serat mineral dalam berbagai komposisi), polymer selulosa (campuran antara serat selulosa dan serat polymer dalam berbagai komposisi), *wax selulosa* (campuran antara serat selulosa dan wax, bahan ini tidak hanya berfungsi sebagai stabilizer tapi juga merubah viskositas aspal sehubungan dengan tempertur), tekstil (dari berbagai limbah produksi tekstil), plastik (contohnya: polypropylene), gelas (seperti: fiberglass wool), kulit (limbah produksi kulit) dan bahan lainnya (Blazejowski, 2016). Beberapa jenis stabilizing agent dapat dilihat pada Gambar II.4.



**Gambar II.4** Beberapa Jenis *Stabilizers Agent* (a) Serat selulosa, (b) Serat Selulosa gambar diperbesar 100x, (c) Serat dalam bentuk pelet (d) Serat Polypropylene

Penelitian penggunaan serat selulosa seperti: serat sisal, serat sabut kelapa, serat batang pisang, serat jute terbukti dapat mengurangi terjadinya draindown hingga 50%. Berbagai dosis penggunaan serat selulosa dalam penelitian berkisar dari 0,1% - 0,5% namun berdasarkan hasil penelitian disarankan 0,3% (P. Kumar et al., 2004); (Sharma & Goyal, 2006); (Oda et al., 2012); (Panda et al., 2013); (Awanti, 2013); (Lavasani et al., 2015); (AlSaadi et al., 2023). Sementara penelitian penggunaan *stabilizing agent* berbasis polymer sebagai seperti: *crumb rubber*



modified binder (CRMB), ground tire rubber (GTR) modified binder, styrene-butadiene-styrene (SBS), polypropylene, polythene, polyethylene, gilsonite, shredded waste plastic (SWP) juga dapat berfungsi sebagai *drain inhibitor* dalam campuran SMA meskipun tidak memberikan hasil yang lebih baik dari serat selulosa (Chen et al., 2009); (Al-Hadidy & Yi-qiu, 2009); (Ahmadinia et al., 2012); (Mokhtari & Moghadas Nejad, 2012); (Sarang et al., 2015); (Babagoli et al., 2015); (Alshehri et al., 2023).

### 2.1.6. Campuran SMA di Indonesia

Penggunaan teknologi campuran SMA dalam konstruksi jalan di Indonesia tidak terlalu berkembang dengan baik. Campuran SMA pertama kali digunakan sebagai lapisan perkerasan pada Tahun 1992 di jalan nasional ruas Tangerang – Merak (berfungsi dengan baik hingga Tahun 2003), ruas Bawen – Salatiga (berfungsi dengan baik hingga Tahun 2005), Tahun 1994 ruas Kalianda – Bakauheni (ruas telah mengalami kerusakan pada Tahun 1994). Beberapa ruas yang dibangun di luar Pulau Jawa juga tidak dapat memperlihatkan kinerja yang baik. Penggunaan campuran SMA sebagai material perkerasan yang terbaru di sirkuit Mandalika, Nusa Tenggara Barat. Kendala tidak berkembangnya penggunaan campuran SMA di Indonesia adalah karena kurangnya produksi agregat yang memenuhi spesifikasi. Agregat untuk campuran SMA disyaratkan berbentuk kubus yang diperoleh dari crusher kombinasi tipe jaw crusher dan *secondary cone crusher*. Kebanyakan agregat yang hanya diproduksi melalui *jaw crusher* cenderung berbentuk pipih dan lonjong (Maharani & Hilda B., 2022).

Di Indonesia spesifikasi untuk SMA adalah SNI 8129:2015 yang terbit pada Tahun 2015. SNI ini mengacu pada AASHTO M 325-08 (2012) Standard Specification for Stone Matrix Asphalt dan AASHTO R46-08 (2012) Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt dan hasil penelitian yang dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan Kementerian Pekerjaan Umum. Pada tahun 2018 campuran SMA masuk dalam Spesifikasi Umum untuk Pekerjaan Jalan dan Jembatan yang kemudian di revisi pada Tahun 2020.

**Tabel II.1** Spesifikasi gradasi agregat gabungan campuran SMA (Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2020)

Ukuran Ayakan		% Berat Yang Lolos Terhadap Total Agregat		
ASTM	(mm)	SMA Kasar	SMA Halus	SMA Tipis
1"	25	100		
¾"	19	90 – 100	100	
½"	12,5	50 – 88	90 – 100	100
3/8"	9,5	25 – 60	50 – 80	70 – 95
No. 4	4,75	20 – 28	20 – 35	30 – 50
No. 8	2,36	16 – 24	16 – 24	20 – 30
No. 16	1,18			14 – 21
No. 30	0,600			12 – 18
No. 50	0,300			10 – 15
No. 100	0,150			
No. 200	0,075	8 – 11	8 – 11	8 – 11



Terdapat dua gradasi SMA dalam SNI 8129:2015 yaitu SMA Kasar dengan *ninal maximum aggregate size* (NMAS) 19 mm dan SMA Halus NMAS 12,5 mm. Dalam Spesifikasi Umum 2018 Revisi 2 campuran SMA ditambahkan satu gradasi dengan NMAS 9,5 mm dan disebut SMA Tipis. Gradasi dari ketiganya dapat dilihat dalam Tabel II.1.

### 2.1.7. Kadar Aspal Optimum SMA

Berdasarkan AASHTO 325-08 (2012) tentang Spesifikasi SMA, kadar aspal optimum (KAO) dari benda uji campuran SMA harus berada pada kisaran 6,0% sampai 7,0%. Kadar aspal dibawah 6,0% dapat berdampak buruk pada durabilitas campuran.

### 2.1.8. Penggunaan Aditif Serat Alami, Serat Logam, Polimer dan Nano Partikel dalam Campuran SMA

Penggunaan serat alami dalam campuran SMA seringkali dilakukan untuk mengatasi draindown asphalt dan usaha peningkatan kinerja aspal terkait stabilitas serta ketahanan terhadap deformasi. Serat alami berupa serat batang pisang, sisal dan pelet memberikan hasil yang lebih baik terhadap ketahanan *rutting* dan *fatigue* (Shiva Kumar & Ravi Shankar, 2020). Kinerja yang lebih baik diperoleh dari serat yang lebih panjang dalam jumlah sedikit dari pada serat pendek dengan jumlah lebih banyak pada komposisi yang sama (Ferreira da Costa et al., 2020). Peningkatan kinerja SMA terhadap stabilitas dan nilai ITS juga meningkat dengan penambahan serat batang pisang, sisal dan sabut kelapa. Komposisi serat yang disarankan adalah 0,3% berdasarkan berat total campuran dan serat sabut kelapa memberikan hasil yang terbaik (N. L. N. K. Kumar & Ravitheja, 2019). Pemanfaatan serat basal dan serat lignin dalam SMA mampu meningkatkan ketahanan yang terhadap fraktur, hasil terbaik diberikan oleh serat basal. Hasil uji SEM serat basal memperlihatkan jaringan solid dalam campuran (Wu et al., 2021).

Selain serat alami, serat mineral, serat baja serta polimer juga dimanfaatkan dalam usaha peningkatan kinerja campuran SMA. Studi penggunaan *fibreglass* dan polimer Ethylene Vinyl Acetate (EVA) digunakan untuk memodifikasi aspal dalam campuran SMA, hasil yang dapat diterima untuk kinerja *fatigue* dan modulus resilien diperoleh pada kombinasi 4% EVA dan 0,1 % serat kaca (Aboutalebi Esfahani & Mirian, 2021). Gradasi senjang campuran SMA cenderung mengurangi kekuatan tarik, untuk itu digunakan serat baja dalam campuran. Studi (Jasni et al., 2020) menunjukkan bahwa penambahan 0,3% serat baja memberikan stabilitas dan kekakuan yang lebih baik, sedangkan 0,5% serat untuk modulus resilien dan peningkatan modulus rangkai pada suhu 250C dan 0,4% pada suhu 400C.

Modifikasi aspal dengan *crumb rubber* tidak berpengaruh negatif pada sifat volumetrik campuran dan menunjukkan hasil yang sama dengan benda uji referensi pada kinerja Marshall dan ITS. Efek positif penggunaan *crumb rubber* adalah adanya penurunan kebisingan pada uji akustik lapangan (Sangiorgi et al., 2018). Studi penggunaan aspal karet dalam SMA yang dilakukan (Kurnia et al., 2020)



perlihatkan stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan SMA dengan aspal buton dan aspal kilang. Kinerja tersebut dicapai dengan KAO yang lebih rendah dibandingkan dengan dua jenis aspal lainnya. Aspal yang dimodifikasi dengan polimer stirena-butadiena-stirena (SBS) dan *nanoclay* akan memperbaiki sifat reologi aspal dan dalam campuran SMA meningkatkan stabilitas dan ketahanan terhadap deformasi, juga berpengaruh positif dengan menurunnya *draindown asphalt* (Ameli, Babagoli, Khabooshani, et al., 2020). Hasil yang sejalan diperlihatkan oleh studi Mojabi dkk, polimer SBS dalam campuran SMA meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan akibat kelembaban, komposisi terbaik pada angka 5% SBS terhadap berat total campuran. Penelitian tersebut dilakukan dengan membandingkannya dengan penggunaan serat selulosa arbocel dan serat komposit C25. Serat arbocel unggul dalam hal *draindown*, pada uji SCB untuk energi retak polimer SBS unggul dari keduanya (Mojabi et al., 2020). Studi penambahan nano partikel logam dalam SMA dilakukan oleh Jing Li dan Tang, aspal asli dimodifikasi dengan menggunakan nano-CuO, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, masing-masing 2% dan 4% berat aspal dan carbon nano tube (CNT) sebanyak 1% dan HDPE dengan komposisi 3% dan 5% juga terhadap berat aspal. Hasil modifikasi aspal terjadi penurunan tingkat penetrasi dan titik lembek, dalam pengujian sifat mekanik campuran terjadi peningkatan ITS, modulus resilien, ketahanan terhadap deformasi dan fatigue pada keseluruhan variasi (Jing Li & Tang, 2023).

### 2.1.9. Substitusi Material Penyusun Campuran SMA

Peningkatan kemampuan campuran aspal terhadap deformasi dan fatigue dapat diperoleh dari substitusi filler dalam campuran SMA menggunakan abu sekam padi (ASP). ASP mampu menurunkan regangan aspal, sehingga stabilitas pun meningkat. Abu limbah batu bara tidak menunjukkan hasil sebaik ASP (Ameli, Babagoli, Norouzi, et al., 2020). Campuran SMA yang menggunakan limbah Palm Oil Clinker (POC) sebagai agregat halus dapat memenuhi persyaratan stabilitas, kelelahan dan sifat volumetrik campuran. Hasil tersebut dapat dicapai hingga penggunaan 100% POC. Peningkatan variasi POC berpengaruh pada meningkatnya KAO campuran, namun *draindown asphalt* menurun. Komposisi POC dalam campuran berpengaruh positif terhadap nilai modulus resilien, nilai ITS dan ketahanan terhadap fraktur (Babalghaith, Koting, Sulong, et al., 2020).

### 2.1.10. Penggunaan Slag dalam Campuran Aspal

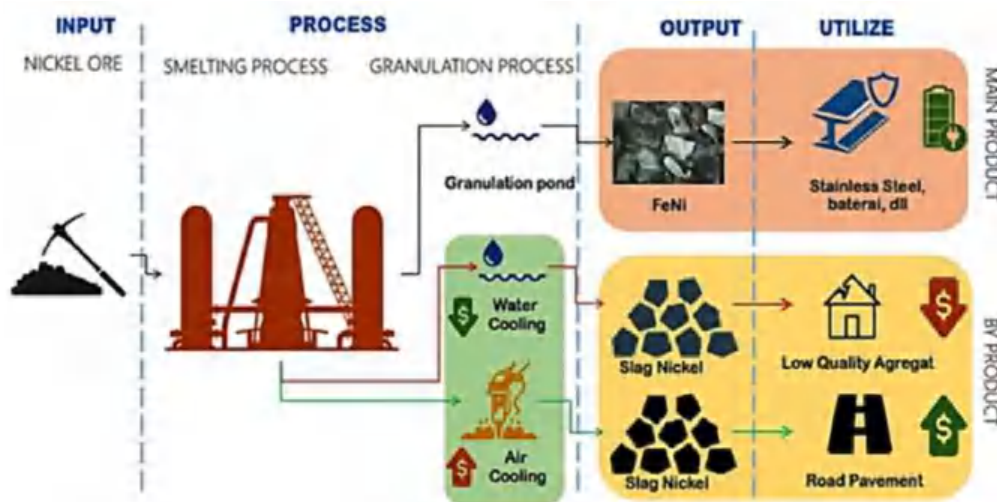
Industri pengolahan nikel tidak hanya menghasilkan logam nikel, tetapi juga menghasilkan limbah berupa slag nikel selama proses peleburan. Jika tidak dikelola dengan benar, dapat menjadi sumber pencemaran lingkungan. Diperlukan pendekatan yang berkelanjutan dalam mengelola slag nikel ini untuk menjaga keseimbangan antara pertumbuhan industri dan pelestarian lingkungan. Komposisi kimia berupa silika, magnesium, kalsium, dan besi, memberikan petunjuk bahwa agregat slag nikel memiliki kekerasan material yang berpotensi digunakan sebagai material konstruksi. Terkait dengan unsur kimia yang terkandung dalam slag nikel telah diteliti dan secara lengkap komposisinya dapat dilihat pada Tabel II.2.



**Tabel II.2** Komposisi Kimia Slag Nikel (Susanto et al., 2020)

Parameter Kimia	Hasil Uji (%)
SiO <sub>2</sub>	40,39
MgO	18,66
CaO	16,34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,13
LoI	5,4
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,11
MnO	0,65
K <sub>2</sub> O	0,13
Na <sub>2</sub> O	0,06

Limbah slag dihasilkan melalui peleburan bijih nikel, dimana slag cair dengan suhu sekitar  $\pm 1550^{\circ}\text{C}$  langsung dialirkan melalui saluran slag (*slag runner*) ke kolam granulasi (*slag granulation pond*). Selanjutnya, slag cair yang mengalir mengalami pendinginan melalui dua proses: pertama, dengan semprotan air bertekanan tinggi (*water cooling*) untuk memecah slag menjadi butiran-butiran (*granule*), dan kedua dengan pendinginan udara (*air cooling*). Pada metode yang kedua ini ukuran butiran limbah slag nikel dapat diatur menggunakan alat pemecah batu (*stone crusher*). Agregat slag ini memiliki sifat angularitas dan kekerasan yang tinggi sehingga cocok untuk material konstruksi. Gambar II.5 memperlihatkan proses pengolahan nikel.



**Gambar II.5** Proses Pengolahan Nikel dan Limbah Slag Nikel

Slag nikel adalah limbah dari proses pengolahan nikel dan merupakan material jalan yang ramah lingkungan berdasarkan uji *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP). Karakteristik fisik slag nikel dari proses pendinginan udara memenuhi syarat sebagai agregat dalam campuran aspal AC baik sebagai agregat kasar maupun agregat halus yang dicampur panas. Demikian pula halnya dengan sifat mekanik campuran seperti stabilitas dan ITS ditemukan bahwa slag nikel sebagai agregat kasar maupun agregat halus memenuhi syarat yang ditetapkan,



akan mengalami kenaikan dibanding dengan benda uji referensi (G. Wang et al., 11); (Said, 2021); (Bethary & Intari, 2022b).

Slag baja yang digunakan sebagai material agregat jalan memberikan hasil yang serupa. Penelitian adhesi antara slag baja dengan aspal melalui uji alat penarik adhesi PosiTestAT-A, mikroskop elektron pemindai, uji adsorpsi netto, spektrometer inframerah, dan rheometer geser dinamis memperlihatkan rekatan yang kuat. Tekstur pada permukaan slag baja menghasilkan efek seperti kerangka dan adanya reaksi kimia berupa vibrasi peregangan N-H dari amina dan amida, serta vibrasi peregangan SiO-H akan meningkatkan adhesi agregat slag baja dan aspal. Daya rekat aspal dan slag baja melebihi batu kapur, granit dan basalt. Polaritas yang lebih tinggi dan komponen alkali yang melimpah pada slag baja berkontribusi pada kekuatan ikatan dan cenderung mengurangi kerentanan kelembaban. Namun penelitian memperlihatkan adanya peningkatan konsumsi aspal dalam campuran (W. Liu et al., 2020); (J. Liu et al., 2023). Pada campuran *open graded asphalt friction course* (OGAFC) yang menggunakan slag baja *basic oxygen furnace* (BOF) sebagai agregat kasar diperoleh adanya peningkatan kinerja campuran OGAFC tidak hanya dalam hal ketahanan terhadap *rutting*, potensi retak dan sifat modulus, tetapi juga meningkatnya umur kelelahan campuran jika dibandingkan dengan agregat alami. Hasil tersebut dicapai bahkan hingga penggunaan slag baja BOF 100% (Santanu et al., 2023).

Penelitian ini mengusung inovasi dengan menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar dalam campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) yang dicampur panas, ditambah dengan serat alami sabut kelapa sebagai *stabilizing agent*. Variabel penelitian melibatkan evaluasi kinerja campuran dengan indikator Marshall, kuat tarik tak langsung (ITS), kinerja terhadap retak, durabilitas campuran melalui cantabro loss, uji mikrostruktur dan analisis dengan uji non destruktif. Pada Tabel II.3 berikut, dibandingkan posisi penelitian ini dengan studi-studi terdahulu melalui berbagai variabel penelitian. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengisi kesenjangan penelitian tetapi juga membawa kontribusi baru dalam pemahaman material konstruksi dan metode evaluasi perkerasan jalan raya.



Tabel II.3 Posisi Penelitian

No.	Author	Asphalt Mixture										Materials										Research Variables									
		Gradation	Porous	HMA	WMA	CMA	Slag	RAP	Fibre	Rubber	Plastic	Metallic Waste	Agricul. Waste	Others	Bitumen Prop.	Marshall Design	Modulus Elast.	Fatigue	Fracturre	ITS	Others.										
1.	(Ameli, Babagoli, Khabooshani, et al., 2020)	●		●				●							●	●					● <sup>1)</sup>										
2.	(Shiva Kumar & Ravi Shankar, 2020)	●		●				●							●		●			●											
3.	(H. Liu et al., 2017a)	●		●				●							●	●	●			●	● <sup>2)</sup>										
4.	(Serin et al., 2021)		●	●						●								●													
5.	(N. L. N. K. Kumar & Ravitheja, 2019)	●		●				●							●	●				●											
6.	(Babalghaith, Koting, Sulong, et al., 2020)	●		●										●	●	●				●	● <sup>3)</sup>										
7.	(Wu et al., 2021)	●		●				●							●	●		●		●	● <sup>5)</sup>										
8.	(Ameli, Babagoli, Norouzi, et al., 2020)	●		●				●							●	●			●	●	● <sup>7)</sup>										
9.	(Jasni et al., 2020)	●		●				●							●	●															
10.	(Leon et al., 2023)	●		●				●							●	●		●													
11.	(Norouzi et al., 2021)	●		●				●							●	●			●	●	● <sup>7)</sup>										
12.	(Mojabi et al., 2020)	●		●				●							●	●			●	●	●										
13.	(Sangiorgi et al., 2018)	●		●				●							●	●			●	●	● <sup>10)</sup>										
14.	(Shiva Kumar et al., 2019)	●		●				●							●	●			●	●	●										



Asphalt Mixture Gradation      Mixture Temperature      Materials      Research Variables

No.	Author	AC	HRA	SMA	Porous	HMA	WMA	CMA	Slag	RAP	Fibre	Rubber	Plastic	Metallic Waste	Agricul. Waste	Others	Bitumen Prop.	Marshall Design	Modulus Elast.	Fatigue	Fracturre	ITS	Others.
15.	(Pouranian et al., 2020)	●		●		●										● <sup>11)</sup>	●	●	●	●		● <sup>12)</sup>	● <sup>12)</sup>
16.	(Ferreira da Costa et al., 2020)			●		●					●						●	●	●	●		●	● <sup>12)</sup>
17.	(Jasni et al., 2020)			●		●					●						●	●	●	●		● <sup>13)</sup>	● <sup>13)</sup>
18.	(Kurnia et al., 2020)			●		●						●				● <sup>14)</sup>	●	●	●	●		● <sup>13)</sup>	● <sup>13)</sup>
19.	(Aboutalebi Esfahani & Mirian, 2021)			●		●					●					● <sup>15)</sup>	●	●	●	●			
20.	(Jing Li & Tang, 2023)			●								●				● <sup>22)</sup>	●	●	●	●	●	● <sup>7)</sup>	● <sup>7)</sup>
21.	(Bethary, 2020)	●				●			●	●							●	●	●	●		● <sup>3)</sup>	● <sup>3)</sup>
22.	(G. Wang et al., 2011)	●				●											●	●	●	●		● <sup>16)</sup>	● <sup>16)</sup>
23.	(Said, 2021)					●											●	●	●	●			
24.	(Shen et al., 2020)					●											●	●	●	●		● <sup>17)</sup>	● <sup>17)</sup>
25.	(Bethary & Intari, 2022b)					●											●	●	●	●		● <sup>18)</sup>	● <sup>18)</sup>
26.	(W. Liu et al., 2020)					●											●	●	●	●		● <sup>19)</sup>	● <sup>19)</sup>
27.	(J. Liu et al., 2023)					●											●	●	●	●		● <sup>20)</sup>	● <sup>20)</sup>
28.	(Zhao et al., 2023)					●						●				● <sup>4)</sup>	●	●	●	●		● <sup>21)</sup>	● <sup>21)</sup>
29.	(Santanu et al., 2023)					●											●	●	●	●		●	●
30.	(R. Wang et al., 2023)					● <sup>21)</sup>										● <sup>4)</sup>	●	●	●	●		●	●





## 1. Kerangka Konseptual

Jumlah perjalanan yang kian hari semakin tinggi berakibat pada pertumbuhan lalu lintas yang sangat pesat. Teknologi kendaraan juga semakin maju di mana dikembangkan kendaraan yang dapat mengangkut beban yang semakin berat namun dengan konfigurasi roda yang sederhana, dengan tekanan angin yang tinggi pada roda kendaraan. Hal tersebut berakibat pada beban *axle load* yang meningkat sehingga tegangan pada permukaan perkerasan sangat besar. Pada kondisi ini dibutuhkan jenis perkerasan yang memiliki ketahanan yang tinggi terhadap kerusakan alur (*rutting*). Campuran SMA yang ditemukan oleh Dr. Zichner memiliki ketahanan yang tinggi terhadap kerusakan jalan jenis ini selain itu disebutkan pula bahwa SMA memiliki *skid resistance* yang baik.

Kemampuan SMA menahan beban sehingga tidak menyebabkan terjadinya deformasi yang akan berakibat *rutting* diperoleh dari komponen penyusun campuran yang sebagian besar terdiri dari agregat kasar yang membentuk rangka (*skeleton*) sehingga memungkinkan adanya kontak antara batuan dengan batuan. Gradasi agregat penyusun campuran memberikan pengaruh utama terhadap peningkatan kinerja SMA.

Penelitian ini akan memanfaatkan slag sebagai agregat dalam campuran aspal karena didorong oleh beberapa hal antara lain:

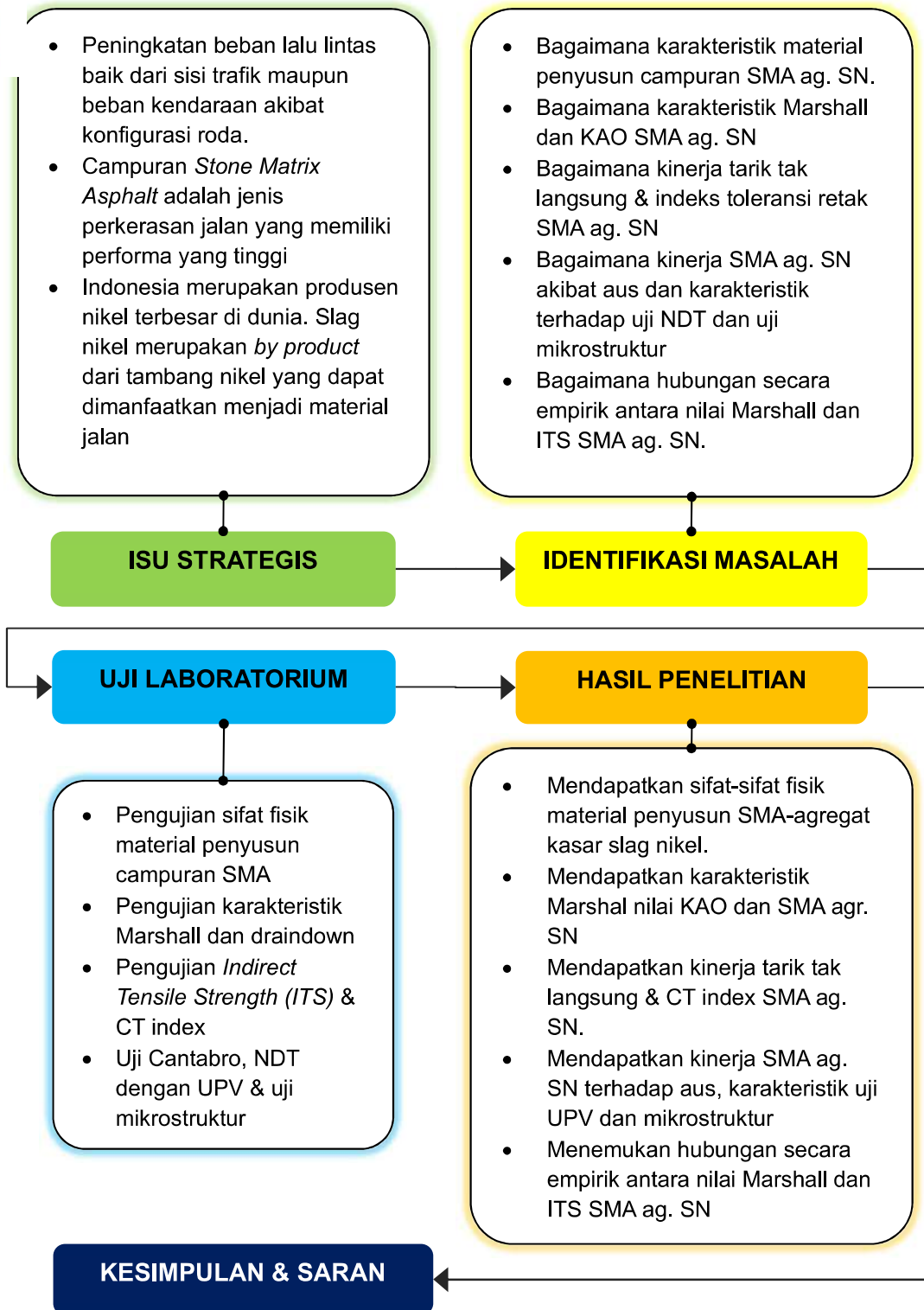
1. Performa mekanis yang baik, slag sering memiliki karakteristik mekanis yang baik, termasuk kekerasan yang tinggi dan ketahanan terhadap keausan. Ini dapat meningkatkan performa campuran aspal, khususnya dalam hal kekuatan dan ketahanan terhadap deformasi. Hasil evaluasi laboratorium penggunaan slag nikel dalam campuran aspal panas dengan gradasi rapat menunjukkan bahwa kinerja yang memuaskan (G. Wang et al., 2011). Penelitian dilakukan (Kamba & Rachman, 2018) menggunakan slag nikel sebagai agregat dalam campuran aspal tipe HRS Base juga memperlihatkan hasil yang memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan.
2. Peningkatan sifat adhesi, slag cenderung memiliki sifat adhesi yang baik terhadap aspal, membantu meningkatkan kohesi antara agregat dan matriks aspal, yang dapat memperbaiki kinerja campuran aspal. Studi sifat adhesi slag terhadap aspal dilakukan oleh (Moura et al., 2020) terhadap dua jenis slag baja yaitu: *air-cooled blast furnace slag* (ACBFS) and *Linz-Donawitz steel slag* (LD). Hasil studi menunjukkan pengaruh yang kuat dari komposisi kimia dan karakteristik energi permukaan slag baja terhadap adhesi aspal. Slag baja LD memiliki daya lekat yang lebih baik dibandingkan ACBS.
3. Peningkatan ketahanan terhadap iklim ekstrem, slag dapat meningkatkan ketahanan campuran aspal terhadap iklim ekstrem, termasuk perubahan suhu yang drastis, pembekuan, dan pencairan, sehingga memperpanjang umur pakai jalan. Evaluasi terhadap campuran aspal yang mengandung



*reclaimed asphalt pavement* (RAP) dan agregat kasar *steel slag aggregate* (SSA) yang disiapkan dalam dua tingkat penuaan dua dan diberi perlakuan *freeze-thaw* lima siklus kemudian diuji terhadap ketahanan fraktur. Hasil pengujian menunjukkan penggunaan RAP menurunkan ketahanan retak namun sebaliknya SSA meningkatkannya (Fakhri & Ahmadi, 2017).

4. Keberlanjutan lingkungan, slag merupakan limbah industri yang dihasilkan dari proses metalurgi. Dengan memanfaatkannya sebagai agregat kasar, dapat mengurangi volume limbah dan mendukung praktik daur ulang dan keberlanjutan lingkungan. Hasil *uji toxicity characteristic leaching procedure* (TCLP) memperlihatkan bahwa kandungan zat kimia berbahaya slag nikel berada di bawah referensi TCLP-B yang artinya bahwa material tersebut dapat langsung digunakan sebagai material jalan (Bethary & Intari, 2022a); (Masyurroh et al., 2022); (Susanto et al., 2020); (Dewiandratika, Maryam et al., 2018).
5. Penurunan biaya produksi, pemakaian slag sebagai agregat kasar dapat mengurangi biaya produksi campuran aspal, terutama jika slag tersedia secara lokal atau sebagai limbah dari pabrik lokal. berdasarkan studi yang ada, penerapan sebagian besar bahan limbah padat daur ulang (misalnya RAP, slag dan fly ash) pada perkerasan jalan raya memberikan hasil yang memuaskan dari segi lingkungan dan ekonomi, yang secara konkret diwujudkan dalam pengurangan konsumsi energi, emisi gas rumah kaca, biaya, dan indikator lainnya. Namun demikian, beberapa faktor, seperti jarak angkut yang lebih jauh dari bahan padat limbah daur ulang dan potensi pelindian logam berat, dapat menghambat proses daur ulang (Jin Li et al., 2019).

Dengan pertimbangan ini, penelitian ini diarahkan untuk mengisi celah pengetahuan terkait penggunaan slag nikel sebagai agregat kasar dalam campuran aspal stone matrix asphalt (SMA), dengan tujuan utama untuk meningkatkan performa dan ketahanan terhadap deformasi. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi yang berharga terhadap pengembangan teknologi campuran aspal sebagai perkerasan jalan yang lebih unggul dan berkelanjutan. Secara visual diagram kerangka konseptual penelitian ini dapat dilihat pada Gambar II.6.



Gambar II.6 Kerangka Konseptual Penelitian



## 1. Hipotesis Penelitian

Hipotesis penelitian ini didasarkan pada keunggulan sifat mekanis campuran stone matrix asphalt (SMA) sebagai lapisan permukaan yang tahan terhadap deformasi serta keandalan slag nikel sebagai agregat kasar dalam campuran aspal, maka diajukan pendekatan inovatif dengan memasukkan slag nikel sebagai agregat kasar dalam campuran SMA, sehingga diperoleh suatu lapisan perkerasan berupa campuran aspal yang berkinerja tinggi namun ramah lingkungan karena memanfaatkan material buangan sebagai komponen penyusunnya. Oleh karena itu dibutuhkan studi melalui penelitian laboratorium dan analisis data yang akan menjadi landasan utama untuk menguji hipotesis ini, dengan harapan penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang berharga dalam pengembangan teknologi campuran aspal yang lebih inovatif dan berkelanjutan.