

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jalan merupakan salah satu sarana perhubungan yang sangat penting bagi sektor ekonomi dan sosial. Sejalan dengan meningkatnya status sosial masyarakat, maka terjadi kecenderungan meningkatnya jumlah kendaraan secara global yang melewati suatu jalan. Pada saat menggunakan jalan, tuntutan pengguna jalan adalah kenyamanan, keselamatan dan kecepatan (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia tentang Jalan No. 34/2006). Untuk memenuhi tuntutan masyarakat pengguna jalan maka perkerasan harus memenuhi persyaratan kondisi fungsional dan struktural. Persyaratan fungsional menyangkut kerataan dan kekesatan permukaan perkerasan, sedangkan persyaratan kondisi struktural menyangkut kemampuan dalam mempertahankan kondisi fungsionalnya pada tingkat yang flsible. Kondisi struktural ditunjukkan oleh kekuatan atau daya dukung perkerasan yang biasanya dinyatakan dalam nilai struktural atau lendutan.

Lapis perkerasan jalan adalah suatu hal yang terpenting dari struktur konstruksi jalan dalam mendukung beban lalu lintas kendaraan. Penyediaan jalan raya yang aman dan nyaman sangat dibutuhkan oleh masyarakat dalam kelancaran suatu perjalanan tanpa ada hambatan.

Pemilihan material dalam hal ini agregat yang digunakan dalam pembangunan jalan yang tepat sesuai dengan kondisi daerah, adalah hal penting dalam pencapaian konsistensi kualitas perkerasan jalan sesuai dengan umur layan yang direncanakan. Dalam pembangunan konstruksi jalan raya di setiap daerah, harus memperhatikan jenis perkerasan atau jenis lapisan permukaan yang digunakan, agar dalam fungsinya dapat meningkatkan pembangunan daerah itu sendiri, yang dimana kualitas jalan yang baik akan mendukung daerah dari berbagai faktor seperti perekonomian, pembangunan daerah, dan faktor lainnya yang berhubungan dengan jalan raya.

Dengan beragamnya aktivitas masyarakat yang berkontribusi pada berbagai sektor, permintaan akan infrastruktur jalan terus tumbuh terutama perkerasan jalan. Seiring dengan peningkatan aktivitas tersebut, tingginya volume lalu lintas menjadi salah satu faktor yang merusak perkerasan jalan. Rembesan air, alur, retak, dan jenis kerusakan jalan lainnya termasuk kerusakan perkerasan jalan yang sering terjadi. Untuk mengatasi permasalahan tersebut diperlukan kombinasi perkerasan dengan tingkat kestabilan dan ketahanan yang tinggi yang dipengaruhi oleh jenis campuran beraspal, material penyusunnya dan kondisi lingkungan sekitar jalan.

Jenis teknologi perkerasan aspal yang paling umum digunakan untuk mencapai tingkat stabilitas dan daya tahan tinggi disebut sebagai Stone Matrix Asphalt (SMA). Jenis perkerasan ini termasuk dalam kategori bergradasi terbuka, yang berarti bahwa campurannya mengandung agregat kasar dalam jumlah yang signifikan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Wonson pada tahun 1996, Stone Matrix Asphalt adalah jenis lapisan permukaan yang tipis tetapi memiliki elastisitas

dan ketahanan yang sangat baik. Oleh karena itu sangat cocok untuk digunakan sebagai perkerasan jalan pada jalan raya dengan lalu lintas yang padat dan berat. Meskipun SMA memiliki ketahanan yang kuat terhadap kerusakan perkerasan seperti retakan, kerusakan permukaan masih sering terjadi. Itulah sebabnya sangat krusial untuk mempertimbangkan material lain ke dalam campuran untuk memperpanjang umur perkerasan jalan.

Indonesia umumnya menggunakan jenis lapisan permukaan konvensional berupa *Asphalt Concrete (AC)* dan *Hot Rolled Sheet (HRS)*, akan tetapi kinerja dari lapisan ini tidak selalu memberikan hasil yang memuaskan dan sering dijumpai kerusakan diantaranya berupa gelombang (*corrugation*), alur (*rutting*), butiran terlepas (*raveling*), keausan (*stripping*) dan retak-retak (*cracks*) pada permukaan perkerasan. Kondisi iklim tropis di Indonesia dengan pergantian cuaca panas dan hujan yang berganti-ganti serta peningkatan volume lalu lintas yang tinggi mengakibatkan perkerasan jalan di Indonesia sangat cepat mengalami kerusakan. Disisi lain, ketahanan terhadap repetisi beban, curah hujan dan ketahanan terhadap temperatur tinggi merupakan faktor yang perlu dipertimbangkan dalam penentuan rancangan perkerasan jalan di Indonesia (Pangaraya, 2015). Oleh karena itu, diperlukan campuran perkerasan yang bersifat fleksibel dengan stabilitas dan durabilitas yang tinggi, tahan terhadap cuaca panas dan oksidasi, tahan terhadap rembesan air serta aman bagi lingkungan.

Salah satu jenis perkerasan yang dapat dipertimbangkan menjadi solusi mengatasi permasalahan kerusakan jalan yang menunjang pembangunan jalan adalah *Stone Matrix Asphalt (SMA)* yang merupakan jenis perkerasan lentur yang dikembangkan di Jerman sekitar pertengahan tahun 1960-an (Blazejowski, 2016). Hingga awal tahun 1980-an SMA hanya dikenal di Jerman, beberapa negara Eropa utamanya negara Skandinavia di mana banyak penggunaan studded tires. Setelah standar teknis dipublikasikan oleh Jerman, kemudian SMA mulai dikenal luas di Eropa. Di Amerika Serikat SMA mulai berkembang pada tahun 1990-an, lalu berkembang ke Australia, Selandia Baru dan China. Saat ini SMA telah diteliti dan dikembangkan oleh banyak negara dan digunakan di seluruh dunia karena keandalannya. Beberapa karakteristik campuran untuk perkerasan jalan adalah Stabilitas, merupakan kemampuan lapisan perkerasan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur ataupun bleeding. Kemampuan tersebut terjadi sebagai hasil geseran antar butir, penguncian antar partikel dan daya ikat yang baik dari aspal.

Jenis perkerasan ini dianggap mempunyai kelebihan dibandingkan dengan jenis perkerasan lainnya karena perkerasan SMA mempunyai ketahanan terhadap alur, fleksibilitas dan durabilitas yang tinggi. Indonesia mulai mengenal Stone Matrix Asphalt (SMA) sekitar tahun 1990-an akan tetapi masih sangat jarang dijumpai, namun jenis perkerasan ini perlu dipertimbangkan menjadi salah satu solusi mengatasi kerusakan jalan, khususnya yang berkaitan dengan kerusakan retak dan alur. 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 (Blazejowski, 2016). Hal ini didukung oleh uji coba skala penuh yang telah dilakukan Pusjatan pada tahun 2010 mengenai penggunaan teknologi SMA dengan serat selulosa yang dikemas dalam bentuk pelet pada ruas jalan di Jawa Barat (Jatibarang-Palimanan) dengan ketebalan sekitar 5 cm padat yang sampai saat ini masih dalam kondisi baik (Iriansjah, 2010 dalam Suaryana, 2012).

Kondisi struktural perkerasan jalan menyangkut kemampuan dalam menopang beban-beban yang melintas di atasnya sehingga perkerasan dapat bertahan lama. Hal ini sangat dipengaruhi oleh kualitas dari agregat yang digunakan. Agregat merupakan komponen terbesar dalam sebuah campuran aspal. Komposisi agregat, yang terdiri dari agregat kasar dan agregat halus, berkisar 90% dari berat campuran atau 75% - 85% dari volume campuran, sisanya adalah filler dan bitumen. Dengan demikian, maka pengujian karakteristik agregat harus dilakukan sebelum digunakan dalam campuran khususnya campuran SMA.

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) (Pristiandaru, 2023). Tren penggunaan kendaraan listrik sebagai transportasi ramah lingkungan, yang mana bahan baterai lithium adalah nikel semakin mendorong perkembangan industri tambang nikel di Indonesia. Namun dari proses produksi nikel tersebut menghasilkan pula limbah berupa slag nikel yang telah mencapai 13 juta metrik ton per tahun. 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 furnace* (EAF), PS ball, fly ash bottom ash (FABA) dari PLTU, Spent Bleaching Earth (SBE), dan pasir foundry. Untuk itu pemanfaatan slag sebagai agregat pengganti dalam campuran perkerasan beraspal khususnya Campuran SMA perlu untuk diteliti.

Penelitian-penelitian yang telah dilakukan untuk semakin mengembangkan campuran SMA. Misalnya penelitian (Senja Rum Harnaeni et al., 2022) terhadap kinerja campuran SMA yang menggunakan limbah ban luar kendaraan bermotor dengan limbah steel slag sebagai pengganti agregat kasar pada campuran aspal AC-BC (*Asphalt Concrete Base Course*). Pengujian Marshall dilakukan dengan variasi limbah masing-masing 0%, 10%, 20%, 30% dan 40%. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh hasil bahwa campuran aspal AC-BC dengan menggunakan agregat pengganti limbah steel slag didapatkan nilai stabilitas tertinggi pada variasi limbah 20% yaitu 1900,43 kg; nilai flow dan nilai VFWA tertinggi pada variasi limbah 40% masing-masing adalah 3,50 mm, 78,40%; dan nilai MQ, nilai VMA, nilai VIM tertinggi pada campuran 10% steel slag yaitu sebesar 649,04 kg/mm, 16,25%, dan 4,48%.

Untuk penggunaan limbah ban luar kendaraan didapatkan hasil nilai stabilitas, nilai MQ & nilai VFWA tertinggi pada campuran 10% ban luar kendaraan yaitu 1150,02 kg, 363,55 kg/mm & 70,57%, nilai Flow, nilai VMA, & nilai VIM tertinggi pada campuran 40% yaitu 3,50%, 16,89%, dan 5,33%. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa karakteristik Marshall campuran aspal AC-BC dengan menggunakan limbah steel slag lebih baik digunakan sebagai material pengganti agregat kasar daripada limbah ban luar kendaraan.

Febe Priskila Supit dkk., 2021 dalam penelitian Pemanfaatan Limbah Nikel Sorowako Dalam Campuran Stone Matrix Asphalt Kasar, Dari hasil penelitian ini diketahui bahan berupa Limbah Nikel memenuhi standar syarat Umum, Bina Marga 2018, dan dapat di gunakan sebagai bahan, campuran perkerasan jalan. Kadar aspal yang digunakan pada pengujian Marshall SMA kasar adalah 6,00%, 6,250%, 6,50%, 6,75%, 7,00%. Nilai marshall immersion dengan nilai KAO ialah 7,00% dan didapatkan nilai stabilitas marshall sisa 95,55 % yang telah memenuhi syarat Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 yaitu 90%.

Penelitian Priambodo, Bonaventura Jangkung (2021)., Pengaruh Substitusi Steel Slag dengan penambahan serat selulosa alami dedak padi pada campuran SMA, kadar aspal optimum yang didapatkan yaitu 6,4% dengan penambahan serat selulosa alami berupa dedak padi sebesar 0,3%. Variasi prosentase substitusi steel slag terhadap agregat kasar yaitu 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Hasil dari substitusi steel slag terhadap agregat kasar yaitu nilai kepadatan mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar steel slag, nilai VIM mengalami penurunan, nilai VMA mengalami peningkatan, nilai VFB mengalami peningkatan, stabilitas mengalami penurunan, dan nilai kelelahan mengalami penurunan. Pada nilai VIM di tiap kadar steel slag tidak ada yang memenuhi batas persyaratan, sehingga tidak ditemukan kadar steel slag optimum pada penelitian ini.

Alirusi, R., dkk. (2023). Studi Experimental Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) Dengan Penambahan Zat Aditif Polyurethane Terhadap Ketahanan Deformasi dan Modulus. Dari hasil analisis campuran Split Mastic Asphalt (SMA) dengan penambahan Polimer Elvaloy, hasil pengujian Indirect Tensile Strength (ITS) menunjukkan nilai kuat tarik mengalami peningkatan, nilai regangan mengalami peningkatan dan nilai modulus elastisitas memiliki nilai fleksibilitas yang baik.

Berdasarkan uraian latar belakang dan adanya beberapa teori yang terkait, maka perlu penelitian laboratorium lanjut dengan tema **“Optimasi Penggunaan Slag Nikel terhadap Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt Kasar”**.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang permasalahan diatas, maka disusun beberapa rumusan permasalahan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik aspal pen 60/70, filler dan agregat serta slag nikel dari smelter PT Huadi Nickel Alloy di Kab. Bantaeng yang digunakan dalam campuran SMA Kasar.
2. Bagaimana hasil uji pengaliran aspal (*draindown*), campuran SMA yang

menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar.

3. Bagaimana hasil uji mekanik (marshall test), uji kuat tarik tak langsung (*ITS / Indirect Tensile Strength*) berupa tegangan-regangan (*stress-strain*) dan *Toughness Index*, campuran SMA yang menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar untuk mendapatkan kadar aspal optimum dan komposisi ideal campuran.
4. Bagaimana hubungan antara nilai stabilitas, flow, VIM dan VMA hasil uji mekanik (marshall test) dan kuat tarik tak langsung melalui uji (*ITS / Indirect Tensile Strength*) berupa tegangan-regangan (*stress-strain*) dan *Toughness Index*.

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian terhadap permasalahan dalam rumusan permasalahan di atas, maka dilakukan kajian untuk mendapatkan tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik aspal penetrasi 60/70, filler dan agregat serta slag nikel dari smelter PT Huadi Nickel-Alloy di Kab.Bantaeng yang digunakan dalam campuran SMA Kasar.
2. Menganalisis hasil uji pengaliran aspal (draindown), campuran SMA yang menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar.
3. Menganalisis hasil uji mekanik (marshall test) Kadar Aspal Optimum dan komposisi ideal serta uji kuat tarik tak langsung (*ITS /Indirect Tensile Strength*) campuran SMA yang menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar.
4. Menemukan hubungan antara nilai stabilitas hasil uji mekanik (marshall test) dan kuat tarik tak langsung (*ITS /Indirect Tensile Strength*) berupa tegangan-regangan (*stress-strain*) dan *Toughness Index* dari campuran SMA Kasar yang menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar.

1.4. Ruang Lingkup Penelitian

Agar penelitian ini berjalan dengan baik, batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian yang dilakukan adalah berbentuk uji eksperimen di laboratorium.
2. Penelitian dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Kabupaten Gowa dan Laboratorium Jalan dan Aspal Fakultas Teknik UKI Paulus Makassar.
3. Penelitian ini menggunakan material alam berupa batu pecah dari Bili-bili Kabupaten Gowa dan Slag Nikel dari PT Huadi Nickel-Alloy di Kab. Bantaeng dan sesuaikan dengan dasar hukum PP 22/2021 (Lampiran XIV – limbah non-B3 terdaftar) dan Permen LHK 19/2021 tentang tata cara pengelolaan limbah non-B3 terdaftar.
4. Material aspal yang digunakan merupakan aspal produksi Pertamina dengan penetrasi 60/70.
5. Material filler yang digunakan adalah abu batu.
6. *Stabilizing agent* berupa serat ijuk, komposisi sebesar 0,3% terhadap berat total campuran dengan panjang serat 6 mm.
7. Jenis campuran yang digunakan berupa campuran stone matrix asphalt (SMA) Kasar yang mengacu Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 revisi 2.

8. Persentase penggunaan aspal dalam campuran sebesar 6%, 6,25%, 6,5%, 6,75% dan 7%, mengacu pada SNI 8129_2015 Spesifikasi Stone Matrix Asphalt SMA.
9. Komposisi slag nikel dalam agregat kasar sebesar 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%.
10. Pengujian Karakteristik bahan campuran mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 revisi 2.
11. Pengujian pengaliran aspal / *Draindown* mengikuti AASHTO T 305-14 (2018).
12. Pengujian Karakteristik campuran SMA Kasar (Stabilitas, *Flow*, *VIM* dan *VMA*) dilakukan di laboratorium melalui uji Marshall menggunakan alat UTM
13. Kinerja terhadap tarik tak langsung dilakukan dengan uji *ITS (Indirect Tensile Strength)*.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah:

1. Slag Nikel sebagai limbah pada smelter pengolahan Nikel bisa dimanfaatkan dalam pengembangan campuran beraspal khususnya Campuran SMA Kasar.
2. Sebagai bahan alternatif dalam konstruksi perkerasan jalan.
3. Sebagai referensi bagi penelitian selanjutnya terutama di bidang teknologi material perkerasan beraspal untuk jalan.
4. Sebagai referensi dalam pemanfaatan material lokal terutama material buangan/limbah di sekitar kita.

1.6. Kebaruan Penelitian (Novelty)

Adapun kebaruannya dalam penelitian ini adalah:

1. Menemukan penggunaan limbah slag nikel dengan proses pendinginan menggunakan air sebagai pengganti agregat kasar dengan material yang sama pada campuran SMA Kasar.
2. Pemanfaatan limbah slag nikel dengan proses pendinginan menggunakan air secara optimal dalam campuran SMA Kasar mampu memberikan kualitas material terbaik.
3. Menemukan penggunaan limbah slag nikel dengan proses pendinginan menggunakan air memberikan kinerja perkerasan berupa karakteristik campuran yang baik, pengaliran aspal / *draindown* yang kecil, kadar aspal optimum yang kecil dan kuat tarik tidak langsung yang besar dalam campuran SMA Kasar sehingga lebih efisien dalam perkerasan jalan.
4. Teknologi campuran SMA Kasar dengan menggunakan limbah slag nikel dengan proses pendinginan menggunakan air merupakan kontribusi terbaru di Indonesia.

BAB II KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESA PENELITIAN

2.1 Kerangka Konseptual

Stone Matrix Asphalt (SMA) merupakan campuran beraspal yang dirancang untuk memiliki stabilitas tinggi dengan kerangka batu (stone-on-stone contact) dan kadar aspal relatif besar untuk meningkatkan daya tahan terhadap deformasi plastis dan keawetan. Penggunaan slag nikel sebagai pengganti agregat lokal (batu pecah) menjadi pendekatan inovatif yang mendukung keberlanjutan (sustainability) dan pemanfaatan limbah industri.

2.1.1. Variabel Penelitian

1. Variabel Independen (X):

Persentase penggantian agregat lokal dengan slag nikel (%)

- a. 0% (Kontrol)
- b. 25%
- c. 50%
- d. 75%
- e. 100%

2. Variabel Antara (Intervening Variable):

Sifat fisik campuran, meliputi:

- a. Tekstur permukaan dan kelekatan aspal-agregat
- b. Gradasi dan struktur skeleton agregat
- c. Densitas dan porositas campuran

3. Variabel Dependen (Y):

Karakteristik kinerja SMA yang mencakup:

- a. Ketahanan terhadap Deformasi
- b. Ketahanan terhadap Kelelahan (*Fatigue Resistance*)
- c. Fleksibilitas dan Kelenturan
- d. Durabilitas atau Keawetan

2.1.2. Hubungan Konseptual Tiap Aspek

1. Ketahanan terhadap Deformasi

- a. Makna: Kemampuan campuran SMA menahan deformasi permanen akibat beban lalu lintas berulang (*rutting*).
- b. Faktor pengaruh: Gradasi agregat dan struktur *skeleton* padat dari slag nikel meningkatkan *interlocking* antar agregat dan mengurangi deformasi plastis.
- c. Indikator uji: Stabilitas Marshall.

Semakin tinggi kadar slag nikel → semakin baik interlocking → semakin tinggi ketahanan terhadap deformasi.

2. Ketahanan terhadap Kelelahan (*Fatigue Resistance*)

- a. Makna: Kemampuan campuran SMA menahan kerusakan akibat pembebanan

- berulang jangka panjang tanpa mengalami retak.
- b. Faktor pengaruh: Tekstur permukaan slag nikel yang kasar meningkatkan adhesi aspal–agregat, menjaga integritas lapisan antar partikel.
 - c. Indikator uji: *Indirect Tensile Strength (ITS)* pada kondisi *repeated load*.

Kelekatan aspal dengan slag yang tinggi menurunkan risiko retak akibat kelelahan (*fatigue cracking*).

3. *Fleksibilitas dan Kelenturan*

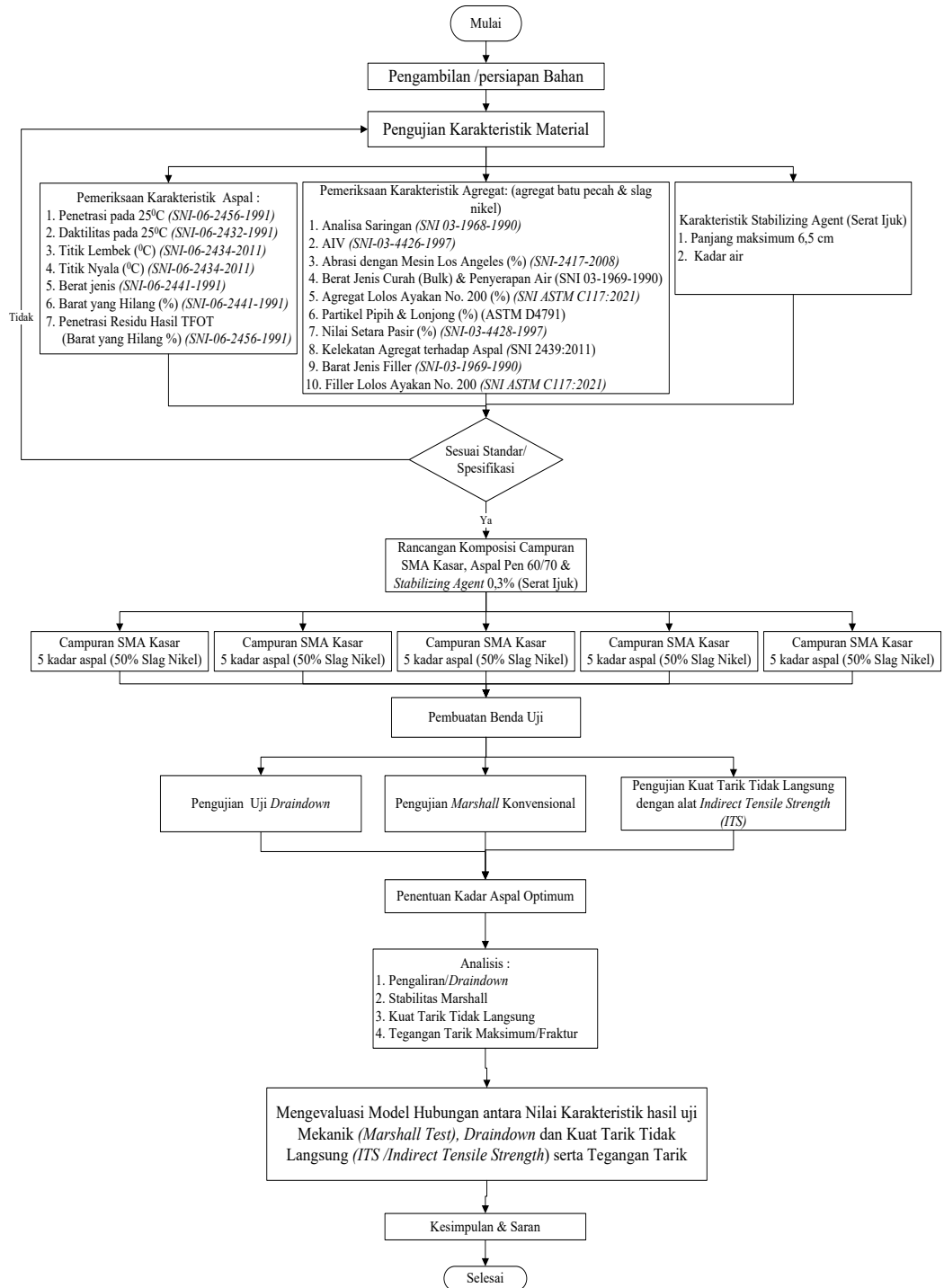
- a. Makna: Kemampuan campuran SMA untuk mengalami deformasi tanpa retak, khususnya pada kondisi suhu rendah.
- b. Faktor pengaruh: Kadar aspal tinggi pada SMA dan sifat elastis aspal yang terikat kuat pada slag meningkatkan kelenturan.
- c. Indikator uji: *Indirect Tensile Strength (ITS)*, *Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM)*.

4. *Durabilitas atau Keawetan*

- a. Makna: Kemampuan campuran SMA mempertahankan sifat mekanisnya terhadap pengaruh air, suhu, dan waktu.
- b. Faktor pengaruh: Slag nikel memiliki porositas rendah dan stabil secara kimia, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap pengelupasan aspal (*stripping*) dan penetrasi air.
- c. Indikator uji: Indeks Stabilitas Sisa (ITSR), Permeabilitas, Uji Perendaman Marshall.

Tabel 2.1. Hubungan antar Variabel

Variabel	Hubungan Utama	Dampak terhadap Kinerja SMA
Penggunaan Slag Nikel	Mengubah sifat fisik campuran	Memengaruhi deformasi, kelelahan, fleksibilitas, durabilitas
Sifat Fisik Campuran	Menentukan kontak antar agregat dan adhesi	Menentukan kekuatan dan keawetan campuran
Kinerja SMA	Hasil akhir pengaruh komposisi slag	Menunjukkan kinerja lapisan terhadap beban lalu lintas dan lingkungan



Gambar 2.1. Konsep Pengujian

Tabel 2.2. Peneliti Terdahulu

No.	Penulis	Judul Penelitian	Sumber	Pokok Penelitian	Temuan / Kajian	Persamaan	Perbedaan
1.	(Li, C et al., 2023).	<i>Analysis of Low-Temperature Rheological and Mechanical Properties of Steel Slag Asphalt Mixture Based on Direct Tensile Test</i>	Journal of Materials in Civil Engineerin g, 35(3), 04022463	Sifat Reologi dan Mekanik pada suhu rendah campuran beraspal yang menggunakan terak baja berdasarkan Uji Tarik Langsung	Hasilnya bahwa, dengan menurunnya suhu, kelenturan dan laju perubahan regangan kumulatif ketiga campuran beraspal secara bertahap menurun. Perubahan regangan kumulatif ketiga campuran aspal mencapai minimum, yaitu kurang dari 10%. Selain itu, tidak ada satu pun yang mencapai 75% dalam waktu 3.600 detik. Spesimen campuran dengan terak baja yang menggantikan semua agregat menunjukkan kinerja adaptasi deformasi terhadap suhu rendah. Sampel campuran yang menggunakan agregat memiliki kinerja adaptasi deformasi suhu rendah yang paling buruk.	Uji Marshall & ITS	Campuran (AC), Slag Baja
2.	(Wu, H et al 2022).	<i>Effects and reaction mechanism of acid rain on the pavement performance of asphalt mixtures with steel slag aggregates</i>	Journal of Materials in Civil Engineerin g, 34(10), 04022272	simulasi perendaman hujan asam dirancang berdasarkan perubahan rongga udara dan kestabilan Marshall dalam campuran. Dampak perendaman hujan asam pada campuran aspal karet yang mengandung terak baja dipelajari melalui spektroskopi inframerah transformasi Fourier, mikroskop gaya atom, dan pemindaian mikroskop elektron	Hasil penelitian menunjukkan bahwa aspal karet menjadi rapuh dan keras setelah direndam hujan asam karena komponen ringannya berubah menjadi komponen lebih berat akibat degradasi karet dan oksidasi aspal. juga mengurangi daya rekat antara pengikat aspal dan agregat dengan cara mengikis lapisan aspal dan bereaksi dengan komponen dalam terak baja.	Uji Marshall	Campuran (AC), Aspal Karet, Media Perendaman air hujan
3.	(Ferreira da Costa et al., 2020a)	<i>Use of Banana Fibers in SMA Mixtures</i>	Journal of Materials in Civil Engineerin g, Volume 32, Issue 1, 2020	Penelitian kelayakan penggunaan serat tanaman pisang dalam campuran SMA sebagai <i>stabilizing agent</i> . Dilakukan evaluasi pengaruh panjang serat terhadap sifat mekanik campuran SMA. Dosis serat 0,3% terhadap berat campuran panjang serat 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm. Dilakukan uji ITS, modulus resilien dan dinamis, <i>flow number</i> , dan umur kelelahan.	Secara keseluruhan, serat meningkatkan sifat mekanik yang dianalisis. Peningkatan ini lebih terasa pada sampel dengan serat 15 dan 20 mm. Dengan demikian, jumlah serat yang lebih kecil dan lebih panjang lebih bermanfaat untuk penguatan serat campuran daripada serat yang lebih besar dan lebih pendek. Nampaknya, jumlah serat yang lebih kecil dan lebih panjang menghasilkan kinerja campuran yang lebih baik dibandingkan dengan jumlah serat yang lebih kecil. Namun demikian, untuk lebih memahami mekanisme ini, penelitian di masa mendatang	Uji Marshall, ITS	Fiber (serat buatan)

No.	Penulis	Judul Penelitian	Sumber	Pokok Penelitian	Temuan / Kajian	Persamaan	Perbedaan
					harus mempertimbangkan untuk mengoptimalkan kandungan serat dengan mempertimbangkan jumlah serat yang ada dalam campuran ketika variasi panjang serat dianalisis.		
4.	(Luan, Y et al.,2022)	<i>Mechanical property evaluation for steel slag in asphalt mixture with different skeleton structures using modified Marshall mix design methodology</i>	Journal of Materials in Civil Engineerin g, 34(1), 04021382	Penelitian ini yaitu metode desain campuran Marshall modifikasi, dan konsep rasio nominal aspal-agregat sesuai dengan desain campuran aspal yang menggunakan terak baja. Uji kinerja dilakukan untuk mengevaluasi lebih lanjut pengaruh metode yang dimodifikasi terhadap sifat mekanik gradasi campuran AC dan SMA.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa indeks kinerja campuran terak baja dapat memenuhi persyaratan spesifikasi dengan menggunakan metode desain campuran Marshall yang dimodifikasi; Campuran SMA dengan terak baja menunjukkan ketahanan alur gradasi SMA yang lebih baik karena karakteristik ketahanan gesekan internal yang kuat dan kekuatan yang lebih tinggi; ketahanan retak pada suhu rendah juga dapat ditingkatkan. Hasil keseluruhan menunjukkan bahwa efek peningkatan kinerja terak baja untuk campuran aspal, dan metode desain Marshall yang dimodifikasi dapat digunakan sebagai panduan desain campuran untuk penerapan terak baja dalam campuran aspal, campuran aspal, meningkatkan keberlanjutan perkerasan aspal.		Campuran (AC), Marshall Modifikasi, Terak Baja
5.	(Cui, P et al., 2023).	<i>Texture characteristic and its enhancement mechanism in stone mastic asphalt incorporating steel slag</i>	Constructio n and Building Materials, 369, 130440	Karakteristik tekstur dan mekanisme penguatan pada campuran stone mastic asphalt yang menggunakan terak baja sebagai agregat. Penelitian ini menguji mekanisme peningkatan indeks tekstur perkerasan berdasarkan hasil scan tekstur laser. Tekstur campuran (SMA) juga dievaluasi menggunakan alat uji kekesatan.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa tekstur campuran SMA lebih kasar karena tekstur terak baja yang lebih tajam dan lebih kasar dibandingkan agregat alami. Peningkatan penguatan campuran SMA diperoleh dari campuran SMA yang menggunakan penggabungan terak baja dan agregat alami. Studi ini memberikan pemahaman tentang mekanisme peningkatan tekstur permukaan dan mekanisme penguatan dengan mendaur ulang terak baja.	Uji Marshall	Terak Baja
6.	(Bethary, 2020)	<i>Development Of Asphalt Mix Stiffness</i>	Internation al Journal of	Studi untuk memperoleh nilai modulus dari pengujian <i>Dynamic Shear Rheometer</i> (DSR) untuk modulus aspal dan pengujian UMATTA	Hasil modulus campuran menunjukkan bahwa campuran kombinasi slag dan RAP memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan campuran	Uji ITS	Campuran (AC), Perkerasan

No.	Penulis	Judul Penelitian	Sumber	Pokok Penelitian	Temuan / Kajian	Persamaan	Perbedaan
		<i>Modulus Model Using Slag Materials and Reclaimed Asphalt Pavement</i>	GEOMATE, Sept., 2020, Vol.19, Issue 73	untuk modulus campuran. sebagai salah satu parameter desain metode mekanistik untuk evaluasi struktural perkerasan. Campuran aspal panas gradasi AC BC dengan enam belas kombinasi menggunakan RAP, slag EAF dan kombinasi keduanya dengan persentase hingga 30%.	kontrol yang menggunakan aspal pen 60/70 dan agregat alami.		aspal reklamasi (RAP)
7.	(Zhao, X et al 2022).	<i>Laboratory investigation on road performances of asphalt mixtures using steel slag and granite as aggregate</i>	Construction and Building Materials, 315, 125655	Penelitian ini untuk menganalisis kinerja campuran beraspal yaitu AC dan SMA yang menggunakan terak baja dan granit sebagai agregat. Kekurangan sumber daya batu alam dan pencemaran lingkungan yang parah mendorong pemanfaatan sumber daya bermutu rendah dan limbah padat. Dengan demikian, terak baja dan granit dapat digunakan untuk menggantikan agregat konvensional dalam konstruksi perkerasan aspal. Dalam penelitian ini, campuran aspal yang mengandung granit dan terak baja (<i>granite and steel slag/GSAM</i>) dibuat dan selanjutnya dibandingkan dengan campuran aspal yang dibuat dengan agregat batu kapur/agregat alami untuk mengetahui kinerja dari campuran beraspal tersebut. Dua jenis campuran beraspal yaitu aspal beton (AC), dan <i>stone matriks asphalt</i> (SMA) dibuat dengan metode <i>Marshall</i> . Stabilitas <i>Marshall</i> , modulus dinamis, ketahanan kerusakan terhadap kelembaban, ketahanan alur, ketahanan deformasi permanen, dan ketahanan retak dievaluasi pada semua campuran aspal yang disiapkan melalui uji laboratorium.	Hasilnya menunjukkan bahwa kinerja campuran AC-GSAM dan SMA-GSAM ditingkatkan seperti stabilitas pada suhu tinggi dan ketahanan retak saat suhu rendah. Namun, karena karakteristik terak baja, ketahanan GSAM terhadap kerusakan kelembaban jangka panjang masih memerlukan perbaikan dan penelitian lebih lanjut. Kesimpulannya, penggunaan terak baja dan granit sebagai pengganti agregat dalam campuran aspal secara teknis tepat.	Uji Marshall, Uji ITS	Campuran (AC-GSAM dan SMA-GSAM), agregat Granit, Terak Baja
8.	(Zhao et al., 2023)	<i>Road performance, VOCs emission and economic</i>	Case Studies in Construction	Pemanfaatan limbah padat secara komprehensif dalam rekayasa jalan raya, <i>asphalt rubber hot mix</i> (ARHM-13) dibuat dengan <i>steel slag</i> dan aspal yang dimodifikasi	Hasilnya campuran aspal <i>steel slag</i> menunjukkan kinerja perkerasan yang lebih baik daripada campuran aspal basal. Kekompakan, ketahanan terhadap selip dan kinerja anti rembesan	Uji Marshall, Uji ITS	Campuran (AC), Aspal Karet, Steel Slag

No.	Penulis	Judul Penelitian	Sumber	Pokok Penelitian	Temuan / Kajian	Persamaan	Perbedaan
		<i>benefit evaluation of asphalt mixture by incorporating steel slag and SBS/CR composite modified asphalt</i>	Materials, Volume 18, 2023	dengan SBS/CR. Kinerja perkerasan dari campuran <i>steel slag</i> dan <i>basalt asphalt</i> , termasuk stabilitas Marshall, kerentanan terhadap kelembaban, kinerja suhu tinggi dan suhu rendah, dievaluasi di laboratorium. Dikombinasikan dengan kasus proyek bagian perkerasan uji coba di Beijing-Qinhuangdao Expressway, dan kekompakan, kerataan, ketahanan selip dan ketahanan rembesan perkerasan aspal diuji. Dianalisis pula emisi senyawa organik yang mudah menguap/ <i>volatile organic compounds</i> (VOC) dan kinerja ekonomi campuran aspal.	campuran aspal dengan <i>steel slag</i> lebih unggul daripada basalt dalam hal kerataan permukaan. Konsentrasi emisi VOC dari campuran aspal <i>steel slag</i> selama proses pencampuran, penyebaran dan penggulangan lebih tinggi dibandingkan dengan campuran basalt. Pengantian basalt dengan <i>steel slag</i> dapat mengurangi sekitar 56,7% biaya agregat dan meningkatkan 6,2% biaya aspal. Total biaya bahan baku untuk campuran aspal sepanjang 1 km dengan menggunakan <i>slag baja</i> berkurang sekitar 10,5%. Penelitian dari studi ini memberikan dukungan teoritis untuk promosi dan pemanfaatan steel slag dan crumb rubber di konstruksi jalan.		
9.	(Dondi, G et al., 2021).	<i>Use of steel slag as an alternative to aggregate and filler in road pavements</i>	Materials, 14(2), 345.	Saat ini penggunaan Bahan Konstruksi dan Pembongkaran (CDM) dapat dianggap sebagai solusi yang tepat untuk pembangunan atau rehabilitasi perkerasan jalan. Dalam konteks ini, sangat penting untuk meminimalkan produksi limbah, dan memilih penggunaan kembali melalui siklus produksi baru untuk menggantikan bahan mentah alami. Seperti yang diilustrasikan dalam penelitian ini, terak baja memiliki sifat mekanik yang membenarkan penggunaannya sebagai agregat dalam pembuatan campuran bitumen. Dalam konstruksi jalan, penggunaannya difokuskan pada substitusi agregat halus dan filler pada campuran aspal. Karakterisasi mekanis, stabilitas Marshall, dan uji modulus ketahanan tarik tidak langsung (ITSM) digunakan untuk mengevaluasi kinerja laboratorium campuran.	Tujuan penelitian ini adalah untuk menyediakan penggunaan bahan-bahan tersebut untuk konstruksi seluruh struktur perkerasan jalan; dalam penelitian ini penulis menggunakan bahan-bahan ini baik dalam karakterisasi lapisan semen dan pada lapisan konglomerat bitumen. Dalam kedua kasus tersebut, penggunaan terak baja mendukung peningkatan kekakuan campuran	Uji Marshall	Campuran (AC), Terak Baja
10.	(Shen et al., 2020)	<i>Effect of different fibers on pavement</i>	Journal of Materials in Civil	Penelitian ini menyelidiki pengaruh dan mekanisme dari tiga jenis serat: basalt fiber (BF), polyester fiber (PF), dan lignin fiber (LF)	Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat perbedaan kinerja perkerasan setelah penambahan serat; serat dapat meningkatkan	Uji Marshall	Campuran (AC), Fiber Buatan

No.	Penulis	Judul Penelitian	Sumber	Pokok Penelitian	Temuan / Kajian	Persamaan	Perbedaan
		<i>performance of asphalt mixture containing steel slag</i>	Engineering, Volume 32, Issue 11, 2020	- terhadap kinerja perkerasan campuran aspal yang mengandung <i>basic oxygen steel making furnace slag</i> (BOF). Uji modulus dinamik, uji tekuk pada suhu rendah, dan uji tekuk <i>fatigue</i> tiga titik.	dinamika modulus dinamis campuran aspal slag baja, terutama pada daerah frekuensi yang lebih rendah; serat dapat meningkatkan ketahanan retak suhu rendah campuran aspal terak baja; kinerja <i>antislid</i> ditingkatkan setelah penambahan serat; serat juga dapat meningkatkan ketahanan terhadap beban tarik lentur berulang untuk meningkatkan kinerja antifatigue campuran aspal terak baja; selain itu, BF menawarkan kinerja perkerasan jalan yang optimal. Penelitian ini dapat menjadi referensi yang berguna untuk aplikasi praktis BF, PF, dan LF dalam rekayasa jalan.		
11.	(Shiha, M et al., 2020).	<i>Modeling and performance evaluation of asphalt mixtures and aggregate bases containing steel slag</i>	Construction and Building Materials, 248, 118710	Studi ini berfokus pada kelayakan penggunaan <i>Electric Arc Furnace Steel slag</i> (EAFS) sebagai pengganti agregat alami (<i>Limestone, LS</i>) pada lapisan Hot Mix Asphalt (HMA) dan granular base. Kinerja campuran aspal yang diteliti adalah stabilitas Marshall, kehilangan stabilitas, kekuatan tarik tidak langsung, dan rasio kekuatan tarik serta Triaksial Beban Berulang (RLT).	Hasil RLTT menunjukkan bahwa seiring dengan peningkatan EAFS, kekakuan secara umum meningkat, modulus ketahanan (Mr) yang memiliki akurasi sangat baik. Hasil menunjukkan kinerja yang lebih baik untuk campuran HMA dan basis agregat tidak terikat yang mengandung EAFS dibandingkan dengan yang hanya menggunakan agregat alami.	Uji Marshall, Uji ITS	Campuran (AC), <i>Electric Arc Furnace Steel slag</i> (EAFS)
12.	(Santanu et al., 2023)	<i>Mechanical Properties of Open-Graded Asphalt Friction Course Mixtures with Basic Oxygen Furnace Steel Slag as Coarse Aggregates</i>	Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 35, Issue 4, 2023	<i>Open-graded asphalt friction course</i> (OGAFC) adalah lapisan aspal yang memungkinkan drainase limpasan air permukaan dengan cepat dan memungkinkan pengurangan hydroplaning serta cipratan air. Campuran OGAFC membutuhkan agregat berkualitas tinggi untuk menyalurkan beban lalu lintas ke lapisan di bawahnya. Penelitian ini mengevaluasi sifat kinerja mekanis campuran OGAFC menggunakan <i>basic oxygen furnace</i> (BOF) <i>steel slag</i> sebagai pengganti agregat kasar dengan persentase 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Campuran OGAFC dengan dua jenis bahan pengikat aspal yang	Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan slag baja BOF tidak hanya meningkatkan kinerja campuran OGAFC dalam hal ketahanan terhadap rutting, potensi retak, dan sifat modulus, tetapi juga meningkatkan umur kelelahan campuran OGAFC. Campuran OGAFC dengan kandungan slag baja BOF hingga 100% menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan dengan campuran dengan agregat alami.	Uji Marshall, Uji ITS	Asphalt Porous, Gradasi <i>Open-graded asphalt friction course</i> (OGAFC), Steel Slag

No.	Penulis	Judul Penelitian	Sumber	Pokok Penelitian	Temuan / Kajian	Persamaan	Perbedaan
				dimodifikasi. Kinerja mekanis campuran OGAFC dievaluasi dalam hal ketahanan terhadap <i>rutting</i> (uji rangkai dinamis dan uji alat pelacak roda Hamburg), potensi retak (kekuatan tarik tidak langsung, indeks toleransi retak, dan uji tekuk setengah lingkaran), umur kelelahan (uji kelelahan tarik tidak langsung), dan sifat modulus (modulus kekakuan tarik tidak langsung dan modulus resilien).			
13.	(Wang et al., 2023)	<i>Potential contribution of steel slag fillers to asphalt mastic in terms of microwave heating efficiency, electromagnetic mechanism and fatigue durability</i>	International Journal of Pavement Engineering, Volume 2024, Issue 1, 2023	Studi ini menginvestigasi potensi dari <i>filler steel slag</i> pada aspal <i>mastic</i> , yang meliputi mekanisme interaksi aspal-filler, efisiensi pemanasan gelombang mikro, mekanisme penyerapan elektromagnetik, dan daya tahan kelelahan. Mekanisme mikroskopis fisika-kimia dari pengisi terak baja, pengisi batu kapur, dan interaksi antara pengisi dan pengikat yang dimodifikasi dengan <i>stirena-butadiena-stirena</i> (SBS) telah dikarakterisasi. Efisiensi pemanasan gelombang mikro dari aspal mastic berbasis slag baja (SBS-SS) dan aspal mastic berbasis batu kapur (SBS-LS) dikuantifikasi. Perilaku dielektrik dari filler dan <i>mastic</i> yang sesuai dikarakterisasi lebih lanjut untuk mengungkap mekanisme elektromagnetik yang terkait dengan teknologi pemanasan gelombang mikro. Evolusi kekakuan dan daya tahan lelah aspal berbasis SBS di bawah efektivitas slag baja dan pengisi batu kapur dinilai dengan model teori kerusakan kontinum viskoelastik dan pendekatan energi disipatif.	Filler terak baja menunjukkan potensi yang lebih besar untuk meningkatkan efisiensi panas gelombang mikro dibandingkan dengan filler batu alam karena komposisi oksida besi yang lebih tinggi. Mastik SBS-SS memiliki konstanta dielektrik dan faktor kehilangan yang lebih besar secara keseluruhan dibandingkan dengan mastik SBS-LS, sehingga menghasilkan kemampuan penyimpanan dan konversi energi medan listrik yang unggul. Penambahan pengisi terak baja memperbesar sensitivitas beban aspal dan melemahkan impedansi fatik dan umur fatik komposit <i>mastic</i> wangi aspal.	Uji Marshall, Uji ITS	<i>filler steel slag</i> , aspal modifikasi dengan <i>stirena-butadiena-stirena</i> (SBS)
14.	(Leon, L et al., 2023).	<i>Intermediate Temperature Fracture Resistance of</i>	The Baltic Journal of Road and Bridge	Penelitian ini untuk menguji ketahanan patah pada suhu menengah untuk campuran SMA yang menggunakan Agregat Beton Daur Ulang yang Tidak Diolah. Penelitian ini	Dalam penelitian ini ditentukan bahwa kandungan beton daur ulang /RCA antara 10% dan 35% akan mencapai beban puncak, energi patah, dan nilai kekuatan campuran sampai mengalami patah	Campuran SMA	Agregat Beton Daur Ulang, suhu (5 °C, 15 °C, 25 °C) dan

No.	Penulis	Judul Penelitian	Sumber	Pokok Penelitian	Temuan / Kajian	Persamaan	Perbedaan
		<i>Stone Matrix Asphalt Containing Untreated Recycled Concrete Aggregate</i>	Engineerin g, 18(1), 94-121	menggunakan agregat batu kapur dengan agregat beton daur ulang. Metode Marshall digunakan untuk pengujian desain campuran yang mengandung 0%, 10%, 35% dan 50% beton daur ulang. Uji tekuk setengah lingkaran (SCB) untuk mendapatkan kekuatan campuran. Pengujian dilakukan pada suhu menengah (5 °C, 15 °C, 25 °C) dan kedalaman takik yang bervariasi (0,2H, 0,3H, dan 0,4H).	yang sebanding dengan campuran murni.		kedalaman takik yang bervariasi (0,2H, 0,3H, dan 0,4H), Uji <i>Fracture</i>
15	(Yang, C <i>et al.</i> , 2022)	<u>Performance characterization and enhancement mechanism of recycled asphalt mixtures involving high RAP content and steel slag</u>	Journal of Cleaner Production , 336, 130484	Penelitian ini untuk menganalisis Karakteristik kinerja dan mekanisme peningkatan campuran aspal daur ulang yang menggunakan kandungan RAP dan terak baja. Pemanfaatan kembali perkerasan aspal reklamasi (RAP) untuk mencapai sistem daur ulang sumber daya untuk rekayasa perkerasan jalan. Sedangkan terak baja, merupakan limbah padat dengan sifat mekanik yang sangat baik dan alkalinitas tinggi, dapat meningkatkan kinerja campuran aspal.	Campuran aspal daur ulang yang mengandung 50%, 60% dan 70% kandungan RAP dan terak baja. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan terak baja dalam campuran aspal daur ulang dengan kandungan RAP 70% menunjukkan indeks kinerja yang diinginkan dibandingkan dengan basal. Daya rekat dan kinerja mekanis campuran aspal daur ulang dapat ditingkatkan secara signifikan dengan terak baja karena strukturnya yang berpori seperti sarang lebah dan sudut yang lebih besar, bentuk bulat yang lebih rendah, dan tekstur yang lebih kasar. Terak baja dan aspal daur ulang menunjukkan tingkat pengelupasan yang lebih rendah dan daya rekat yang lebih besar dibandingkan dengan basal, sehingga menghasilkan kerentanan kelembaban dan ketahanan retak yang lebih baik pada campuran aspal daur ulang.	Uji Marshall	Campuran (AC), aspal daur ulang yang menggunakan kandungan RAP dan terak baja.