

DISERTASI

**EVALUASI PERILAKU CAMPURAN BERASPAL
PANAS YANG MENGGUNAKAN KARET ALAM
PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS DENGAN
PENDEKATAN MEKANISTIK DAN
EKSPERIMENTAL**

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Doktor Ilmu Teknik,
Bidang Ilmu Teknik Sipil



**HENDRIK JIMMYANTO
NIM. 03013682126004**

**PROGRAM STUDI ILMU TEKNIK
PROGRAM DOKTOR
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2024**

DISERTASI

**EVALUASI PERILAKU CAMPURAN BERASPAL
PANAS YANG MENGGUNAKAN KARET ALAM
PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS DENGAN
PENDEKATAN MEKANISTIK DAN
EKSPERIMENTAL**

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Doktor Ilmu Teknik,
Bidang Ilmu Teknik Sipil



**HENDRIK JIMMYANTO
NIM. 03013682126004**

**PROGRAM STUDI ILMU TEKNIK
PROGRAM DOKTOR
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2024**

HALAMAN PENGESAHAN

EVALUASI PERILAKU CAMPURAN BERASPAL PANAS YANG MENGUNAKAN KARET ALAM PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS DENGAN PENDEKATAN MEKANISTIK DAN EKSPERIMENTAL

LAPORAN DISERTASI

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Doktor Ilmu Teknik,
Bidang Ilmu Teknik Sipil

Diusulkan oleh

Hendrik Jimmyanto

NIM: 03013682126004

Telah disetujui

Pada tanggal

2024

Promotor:



Prof. Dr. Eng. Ir. Joni Arliansyah, M.T.
NIP. 196706151995121002

Ko-Promotor:



Dr. Edi Kadarsa, S.T, M.T.
NIP. 197311032008121003

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik



Prof. Dr. Eng. Ir. H Joni Arliansyah, M.T.
NIP. 196706151995121002

Koordinator Program Studi



Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T.
NIP. 195903211987031001

HALAMAN PERSETUJUAN

Dengan ini menyatakan bahwa disertasi Hendrik Jimmyanto yang berjudul "EVALUASI PERILAKU CAMPURAN BERASPAL PANAS YANG MENGGUNAKAN KARET ALAM PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS DENGAN PENDEKATAN MEKANISTIK DAN EKSPERIMENTAL" telah dipertahankan di hadapan sidang ujian tertutup Program Studi Ilmu Teknik Program Doktor, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya pada tanggal 04 Juni 2024.

Palembang, Juni 2024

Ditandatangani oleh Tim Penguji,

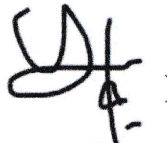
Ketua Tim Penguji:

Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T, M.T, IPM.
NIP. 197502112003121002

()

Anggota Tim Penguji:

1. Dr. Ir. Harmein Rahman, S.T, M.T.
NIP. 196905081997021001

()

2. Dr. Ir. Rosidawani, S.T, M.T.
NIP. 197605092000122001

()

3. Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T.
NIP. 195903211987031001

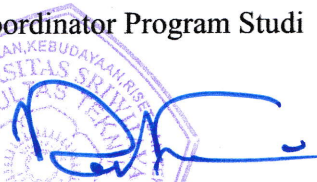
()

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik


Prof. Dr. Eng. Ir. Joni Arliansyah, M.T.
NIP. 196706151995121002

Koordinator Program Studi


Prof. Dr. Ir. Nukman, MT.
NIP. 195903211987031001

Pernyataan Orisinalitas/Pernyataan Plagiarisme

Nama : Hendrik Jimmyanto
NIM : 03013682126004
Judul : Evaluasi Perilaku Campuran Beraspal Panas yang Menggunakan Karet Alam Padat dan Limbah Ban Bekas dengan Pendekatan Mekanistik dan Eksperimental

Dengan ini saya menyatakan keaslian disertasi ini. Disertasi ini dibimbing oleh seorang Promotor dan satu Ko-Promotor dan tidak melibatkan plagiarisme. Jika ditemukan adanya plagiarisme dalam disertasi ini, saya bersedia menerima sanksi akademik apapun sesuai dengan regulasi yang telah ditetapkan Universitas Sriwijaya atas konsekuensinya.

Palembang, 2024



Hendrik Jimmyanto
NIM. 03013682126004

EVALUASI PERILAKU CAMPURAN BERASPAL PANAS YANG MENGGUNAKAN KARET ALAM PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS DENGAN PENDEKATAN MEKANISTIK DAN EKSPERIMENTAL

Hendrik Jimmyanto^{1*}, Joni Arliansyah², Edi Kadarsa²

¹Mahasiswa Program Studi Ilmu Teknik Program Doktor, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

²Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

*email: tienfukhendrik@yahoo.com

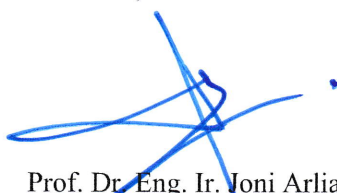
Abstrak

Karet merupakan polimer alam yang dapat dipakai untuk campuran dalam aspal karena karet sendiri memiliki sifat elastisitas tinggi, fleksibilitas dan ketahanan suhu yang baik. Sedangkan karet yang berasal dari limbah ban bekas yaitu *crumb rubber* pada dasarnya terdiri atas karet alam yang tervulkanisir, karbon hitam dan bahan penguat lainnya sehingga dapat membuat ketahanan yang baik bila dicampurkan sebagai bahan modifikasi aspal. Pada penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perilaku campuran beraspal panas yang menggunakan karet alam padat dan limbah ban bekas dengan pendekatan mekanistik dan eksperimental. Metode penelitian yang dilakukan berupa pengujian di laboratorium yaitu terdiri atas pengujian secara empiris seperti pengujian Marshall dan pengujian secara mekanistik seperti pengujian reologi aspal, pengujian modulus resilien campuran dan pengujian kelelahan campuran beraspal. Material yang digunakan sebagai bahan modifikasi aspal yaitu karet alam padat berbentuk serbuk yang diperoleh dari Puslit Karet Bogor sedangkan limbah ban bekas diperoleh dari pabrik daur ulang ban bekas yang telah berbentuk serbuk. Komposisi campuran karet alam padat (KA) dan limbah ban bekas (CR) yang digunakan sebanyak 35%KA +65%CR sehingga disebut dengan KACR. KACR ini digunakan sebagai bahan substitusi aspal dengan kadar 7% dan 10% terhadap berat aspal. selain itu juga potensi KACR juga dapat digunakan sebagai pengganti agregat halus dengan kadar 25% dan 50% terhadap berat pasir. Untuk jenis campuran beraspal panas menggunakan gradasi AC-WC yang mengacu pada Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan KACR sebagai bahan substitusi aspal mampu meningkatkan reologi aspal yaitu modulus resilien aspal sebesar 157,08% untuk 7% KACR dan 189,55% untuk 10% KACR, sedangkan untuk sudut phase mengalami penurunan yang dapat mengarah kepada fase viskoelastik walaupun aspal telah mengalami penuaan. Berdasarkan hasil pengujian Marshall penggunaan KACR sebagai bahan modifikasi aspal memiliki dampak yang lebih baik dibandingkan dengan penggunaannya sebagai substitusi pasir. Hasil pengujian mekanistik yaitu modulus resilien campuran yang menggunakan KACR sebagai bahan modifikasi aspal memiliki hasil yang lebih baik jika dibandingkan dengan penggunaannya sebagai substitusi pasir. Hasil pengujian ketahanan kelelahan campuran yang menggunakan KACR sebagai aspal modifikasi menunjukkan performa yang lebih baik dimana sampel KACR 10% memiliki jumlah pengulangan beban yang lebih besar daripada sampel kontrol. Berdasarkan hasil pengujian dapat dibentuk model matematis persamaan modulus resilien yang berbentuk regresi liner berganda yaitu: $\ln S_{mix} = 30,739 + 0,013 * KACR - 0,047 * KA - 0,036 * CR + 0,041 * VMA - 1,449 * VIM - 0,272 * VFA + 0,113 * Sbit + 0,038 * Suhu$, dengan batasan yaitu untuk KACR dengan rentang 0 – 10%, KA dan CR dengan rentang 0 – 50% dan suhu pengujian 25 – 40°C. Sedangkan model mekanistik ketahanan kelelahan yang mendekati yaitu: $\ln N_f = -54,218 - 0,294 * KACR + 0,146 * KA + 0,131 * CR + 0,591 * PI + 0,678 * VIM + 2,006 * Vol. Aspal + 2,245 * 10^{-12} * \epsilon + 4,30 * \ln S_{mix}$, dengan batasan model matematis ini yaitu KACR sebesar 0 – 10%, KA dan CR sebesar 0 – 50%, suhu pengujian 20°C.

Kata kunci: Karet Alam Padat, Limbah Ban Bekas, AC-WC, Marshall Parameter, Reologi Aspal, Modulus Resilien, Kelelahan, Mekanistik.

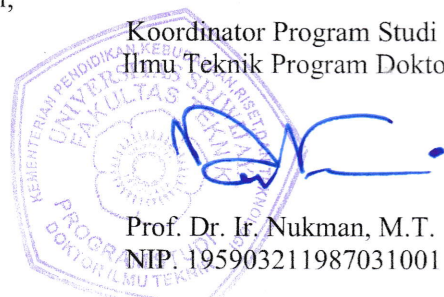
Palembang, Juni 2024
Mengetahui,

Promotor,



Prof. Dr. Eng. Ir. Joni Arliansyah, M.T.
NIP. 196706151995121002

Koordinator Program Studi
Ilmu Teknik Program Doktor



Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T.
NIP. 195903211987031001

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmat-Nya saya dapat menyelesaikan penulisan Laporan Disertasi ini yang berjudul “*Evaluasi Perilaku Campuran Beraspal Panas dengan Karet Alam Padat dan Limbah Ban Bekas dengan Pendekatan Mekanistik dan Eksperimental*”. Judul penelitian disertasi ini diambil karena untuk mendukung program pemerintah dalam penyerapan karet alam padat sebagai material dalam pembuatan perkerasan lentur jalan. Selain itu juga penggunaan limbah ban bekas/*crumb rubber* yang telah didaur ulang berbentuk serbuk juga dapat digunakan dalam campuran beraspal panas. Kedua bahan tersebut digunakan sebagai bahan modifikasi aspal dan juga sebagai pengganti agregat halus yaitu pasir. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, penggunaan karet alam padat dan limbah ban bekas sebagai bahan modifikasi aspal mampu meningkatkan reologi aspal dan ketahanan dalam penuaan aspal. Selain itu juga mampu meningkatkan kinerja mekanistik yaitu modulus resilien dan ketahanan kelelahan. Sedangkan penggunaan karet alam padat dan limbah ban bekas sebagai pengganti pasir dapat digunakan pada beban lalu lintas sedang.

Tak pula penulis mengucapkan banyak Terima Kasih kepada:

- 1) Tuhan Yang Maha Esa dan Guru Spiritual yang telah memberikan anugerah, kekuatan serta pemberkatan selama menempuh studi doktoral.
- 2) Kedua Orang Tua saya yang telah memberikan semangat, perhatian dan dukungan penuh dalam menempuh studi doktoral.
- 3) Rektor Universitas Sriwijaya yang telah memberikan dukungan selama masa studi.
- 4) Dekan Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya yang juga selaku Promotor Disertasi yaitu Prof. Dr. Eng. Ir. Joni Arliansyah, M.T beserta Ko-Promotor Disertasi yaitu Dr. Edi Kadarsa, S.T, M.T yang telah memberikan arahan, ide, gagasan, bimbingan, semangat, dukungan dan restu selama menempuh studi doktoral ini.

- 5) Koordinator Program Studi Ilmu Teknik Program Doktor, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya yaitu Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T. yang telah memberikan dukungan penuh, semangat, restu dan nasehat selama menempuh studi ini. Tak lupa juga kepada bagian Administrasi yaitu kepada Ibu Yuni Erika, Kak Aang, Kak Gilang yang telah banyak membantu dalam proses administrasi selama masa studi ini.
- 6) Prof. Dr. Ir. H. Anis Saggaff, M.SCE., MKU., IPU., ASEAN.Eng. APEC.Eng dan Dr. Ir. Hanafiah, M.S, IPM yang telah memberikan banyak gagasan, ide, ajaran dan teknik dalam mencari topik disertasi terkini.
- 7) Penguji Disertasi yaitu Dr. Ir. Harmein Rahman, S.T, M.T yang telah memberikan arahan, masukan, ide, analisis dan gagasan dalam mengembangkan hasil penelitian disertasi ini sampai menuju skala nasional maupun internasional. Tak lupa juga kepada Dr. Ir. Rosidawani, S.T, M.T, yang juga telah memberikan masukan terhadap perhitungan model serta analisis hasil penelitian disertasi.
- 8) Dr. Ir. K.M. Aminuddin, S.T, M.T, IPM, ASEAN.Eng beserta teman-teman dari Disperkim yaitu Kak Resi Jatmiko, Kak Wali Wadoyo ST, Andre Wijaya ST dan RM Fadel Satria ST yang telah banyak membantu dalam proses penelitian disertasi ini mulai dari persiapan material, kunjungan ke Bandung, proses pembuatan sampel dan sampai tahap pengujian akhir.
- 9) Teman-teman angkatan 2021 yaitu Warga 1721 dan juga teman-teman sePromotor yaitu Ibu Ramadhani, Ibu Delli, Kak Imad, Kak Lega, dan juga Ibu Mira yang telah memberikan dukungan dan semangat dalam menempuh studi ini. Tak lupa juga kepada teman-teman angkatan atas yaitu kakak tingkat (Ibu Ani Firda, Ibu Ika, Pak Mirka dan Ibu Titi).
- 10) Pak Endy dan Ibu Dr. Rindu Twidi Bethary, S.T, M.T dari Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang telah membantu dalam refrensi, ide penelitian dan konsultasi pengujian. Tak lupa juga kepada Dr. I Made Agus Ariawan, S.T, M.T sebagai Kepala Laboratorium Jalan Raya Universitas Udayana dan Pak I Nyoman Dinton selaku Teknisi Laboratorium yang telah membantu dalam pengujian lanjutan.

- 11) PT. Modifikasi Bitumen Sumatera yaitu Bapak Imam, Bapak Arief dan Mbak Bella yang telah mengizinkan untuk pengujian aspal dan reologi aspal.
- 12) Bapak Hidayat dan Bapak Yudian Budhi Krisna dari BPJN Sumsel yang telah memberikan masukan dan memperkenalkan kepada pelaksana yang menggunakan aspal karet.
- 13) PT. Bintang Selatan Agung (BSA) di kota Palembang yang telah mendukung pemberian bantuan material agregat.
- 14) PT Aspal Bangun Sarana di kota Palembang yang telah membantu dalam pemberian bantuan berupa aspal penetrasi.
- 15) Yayasan Pendidikan Nasional Tridinanti beserta jajarannya, Rektor Universitas Tridinanti beserta jajarannya, Dekan Fakultas Teknik Universitas Tridinanti beserta jajarannya, serta teman-teman dari Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tridinanti yang telah memberikan semangat dan dukungan selama masa studi ini sampai dengan selesai studi doktoral.

Demikian kata pengantar dari saya semoga penulisan disertasi ini dapat bermanfaat dan berguna bagi semua kalangan. Akhir kata saya mengucapkan terima kasih.

Palembang, Juni 2024

Penulis

RINGKASAN

EVALUASI PERILAKU CAMPURAN BERASPAL PANAS YANG MENGGUNAKAN KARET ALAM PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS DENGAN PENDEKATAN MEKANISTIK DAN EKSPERIMENTAL

DISERTASI

Hendrik Jimmyanto, dibimbing oleh Promotor: Prof. Dr. Eng. Ir. Joni Arliansyah, M.T dan Ko-Promotor: Dr. Edi Kadarsa, S.T, M.T.

xxii + 234 halaman, 92 Tabel, dan 98 Gambar

Infrastruktur jalan yang banyak digunakan diberbagai negara yaitu jenis perkerasan campuran aspal panas (hotmix). Kerusakan perkerasan aspal dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti beban lalu lintas, penggunaan jenis material dan lingkungan sekitar. Karet merupakan polimer alam yang dapat dipakai untuk campuran dalam aspal karena karet sendiri memiliki sifat elastis tinggi, fleksibilitas dan ketahanan suhu yang baik. Sedangkan karet yang berasal dari limbah ban bekas yaitu crumb rubber pada dasarnya terdiri atas karet alam yang tervulkanisir, karbon hitam dan bahan penguat lainnya sehingga dapat membuat ketahanan yang baik bila dicampurkan sebagai bahan modifikasi aspal. Pada penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perilaku campuran beraspal panas yang menggunakan karet alam padat dan limbah ban bekas dengan pendekatan mekanistik dan eksperimental. Metode penelitian yang dilakukan berupa pengujian di laboratorium yaitu terdiri atas pengujian secara empiris seperti pengujian Marshall dan pengujian secara mekanistik seperti pengujian reologi aspal, pengujian modulus resilien campuran dan pengujian kelelahan campuran beraspal. Material yang digunakan sebagai bahan modifikasi aspal yaitu karet alam padat berbentuk serbuk yang diperoleh dari Puslit Karet Bogor sedangkan limbah ban bekas diperoleh dari pabrik daur ulang ban bekas yang telah berbentuk serbuk. Komposisi campuran karet alam padat (KA) dan limbah ban bekas (CR) yang digunakan sebanyak 35%KA +65%CR sehingga disebut dengan KACR. KACR ini digunakan sebagai bahan substitusi aspal dengan kadar 7% dan 10% terhadap berat aspal. selain itu juga potensi KACR juga dapat digunakan sebagai pengganti agregat halus dengan kadar 25% dan 50% terhadap berat pasir. Untuk jenis campuran beraspal panas menggunakan gradasi AC-WC yang mengacu pada Spesifikasi Bina Marga Tahun 2018 Revisi 2. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan KACR sebagai bahan substitusi aspal mampu meningkatkan reologi aspal yaitu modulus resilien aspal sebesar 157,08% untuk 7% KACR dan 189,55% untuk 10% KACR,

sedangkan untuk sudut phase mengalami penurunan yang dapat mengarah kepada fase viskoelastik walaupun aspal telah mengalami penuaan. Berdasarkan hasil pengujian Marshall penggunaan KACR sebagai bahan modifikasi aspal memiliki dampak yang lebih baik dibandingkan dengan penggunaannya sebagai substitusi pasir. Hasil pengujian mekanistik yaitu modulus resilien campuran yang menggunakan KACR sebagai bahan modifikasi aspal memiliki hasil yang lebih baik jika dibandingkan dengan penggunaannya sebagai substitusi pasir. Hasil pengujian ketahanan kelelahan campuran yang menggunakan KACR sebagai aspal modifikasi menunjukkan performa yang lebih baik dimana sampel KACR 10% memiliki jumlah pengulangan beban yang lebih besar daripada sampel kontrol. Berdasarkan hasil pengujian dapat dibentuk model matematis persamaan modulus resilien yang berbentuk regresi liner berganda yaitu: $\ln S_{mix} = 30,739 + 0,013*KACR - 0,047*KA - 0,036*CR + 0,041*VMA - 1,449*VIM - 0,272*VFA + 0,113*Sbit + 0,038*Suhu$, dengan batasan yaitu untuk KACR dengan rentang 0 – 10%, KA dan CR dengan rentang 0 – 50% dan suhu pengujian 25 – 40°C. Sedangkan model mekanistik ketahanan kelelahan yang mendekati yaitu: $\ln N_f = -54,218 - 0,294*KACR + 0,146*KA + 0,131*CR + 0,591*PI + 0,678*VIM + 2,006*Vol. Aspal + 2,245*10^{-12} * \epsilon + 4,30*\ln S_{mix}$, dengan batasan model matematis ini yaitu KACR sebesar 0 – 10%, KA dan CR sebesar 0 – 50%, suhu pengujian 20°C.

Keywords: Karet Alam Padat, Limbah Ban Bekas, AC-WC, Marshall Parameter, Reologi Aspal, Modulus resilien, Kelelahan, Mekanistik.

Referensi: 64

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul.....	i
Halaman Pengesahan	ii
Pernyataan Orisinalitas/Pernyataan Plagiarisme.....	iii
Kata Pengantar	iv
Ringkasan	v
Daftar Isi	vi
Daftar Gambar.....	vii
Daftar Tabel	viii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	7
1.3. Tujuan Penelitian	7
1.4. Ruang Lingkup Penelitian.....	9
1.5. Hipotesis Penelitian.....	10
1.6. Manfaat Penelitian	10
1.7. Posisi Penelitian	11
1.8. Keterbaruan Penelitian	21
1.9. Sistematika Penulisan.....	29
BAB II STUDI LITERATUR	30
2.1. Perkerasan Jalan	30
2.2. Aspal	30
2.3. Aspal Modifikasi	34
2.4. Reologi Aspal.....	36
2.5. Klasifikasi Aspal Performance Grade (PG)	41
2.6. Metode Desain Perkerasan Lentur	46
2.7. Tegangan dan Regangan	46
2.7.1 Modulus Kekakuan Campuran.....	47

2.7.2. Modulus Kekakuan Resilien Campuran Beraspal	48
2.7.3 Modulus Kekakuan Aspal (Sbit).....	50
2.8. Perkembangan Penelitian Aspal Karet.....	54
2.9. Gradasi Agregat	62
2.10. Ketahanan Kelelahan pada Campuran Aspal.....	64
2.11. Analisis Regresi	67
BAB III METODE PENELITIAN	71
3.1. Umum.....	71
3.2. Metode Penelitian.....	71
3.3. Pra Penelitian	73
3.4. Penelitian Tahap I	73
3.4.1. Persiapan dan Pengujian Material.....	74
3.4.2. Perancangan Kadar Optimum Aspal Penetrasi	77
3.4.3. Perancangan Pencampuran Aspal dan Karet.....	78
3.4.4. Pengujian Reologi Aspal.....	82
3.5. Penelitian Tahap II	84
3.6. Penelitian Tahap III.....	87
BAB IV PERILAKU FISIK DAN REOLOGI ASPAL YANG MENGUNAKAN KARET ALAM PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS.....	92
4.1. Umum.....	92
4.2. Metode Pencampuran Aspal dan Karet	92
4.3. Hasil Pengujian Karakteristik Karet.....	94
4.4. Perilaku Fisik dan Reologi Aspal Penetrasi	97
4.4.1. Hasil Pengujian Perilaku Fisik Aspal Penetrasi (As-Pen).....	97
4.4.2. Hasil Pengujian Viskositas Aspal Penetrasi (As-Pen)	99
4.4.3. Perilaku Reologi Aspal Penetrasi (As-Pen).....	100
4.5. Perilaku Fisik dan Reologi Aspal dengan Serbuk Karet Alam Padat dan Crumb Rubber (KACR).....	101
4.5.1. Hasil Pengujian Perilaku Fisik Aspal dengan KACR	101

4.5.2. Hasil Pengujian Viskositas Aspal dengan KACR	103
4.5.3. Perilaku Reologi Aspal Modifikasi dengan KACR	105
4.6. Pembahasan Perilaku Reologi Aspal Modifikasi	106
4.6.1. Pembahasan Perilaku Reologi Aspal dengan KACR.....	107
4.6.2. Pembahasan Perilaku Reologi Aspal dengan KACR Terhadap Kondisi Penunaan.....	110
4.7. Model Prediksi Stiffness Modulus Aspal yang Menggunakan Karet Alam Padat dan Limbah Ban Bekas	116
4.8. Simpulan.....	118

**BAB V KARAKTERISTIK MARSHALL CAMPURAN BERASPAL
PANAS AC-WC YANG MENGGUNAKAN KARET ALAM**

PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS	120
5.1. Hasil pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar....	121
5.2. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus....	122
5.3. Hasil Pengujian Analisa Saringan	123
5.4. Karakteristik Fisik Sampel Karet	125
5.5. Perancangan Campuran Beraspal Panas AC-WC	127
5.6. Hasil Pengujian Marshall Campuran Beraspal Panas AC-WC Aspal Penetrasi (As-Pen).....	129
5.7. Hasil Pengujian Marshall Campuran Beraspal Panas AC-WC yang Menggunakan KACR 7% dan KACR 10%	132
5.8. Hasil Pengujian Marshall untuk Sampel yang Menggunakan Aspen dan Substitusi KA dan CR sebagai Agregat Halus	139
5.9. Hasil Pengujian Marshall untuk Sampel yang Menggunakan KACR 7% dan Substitusi KA dan CR sebagai Agregat Halus	149
5.10. Hasil Pengujian Marshall untuk Sampel yang Menggunakan KACR 10% dan Substitusi KA dan CR sebagai Agregat Halus.....	158
5.11. Analisis dan Pembahasan Hasil Pengujian Marshall	167
5.12. Simpulan.....	173

BAB VI MODULUS RESILIEN CAMPURAN BERASPAL YANG MENGUNAKAN KARET ALAM PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS.....	175
6.1. Umum.....	175
6.2. Hasil Pengujian Modulus resilien Campuran yang Menggunakan Aspen, KACR 7 dan KACR 10.....	176
6.3. Hasil Pengujian Modulus resilien campuran yang Menggunakan KACR 7, KACR 7-25CRKA dan KACR 7-50CR	178
6.4. Hasil Pengujian Modulus resilien Campuran yang Menggunakan KACR 10, KACR 10-25CRKA dan KACR 10-50CR.....	180
6.5. Pembahasan Hasil Pengujian Modulus resilien Campuran Beraspal.....	182
6.6. Pengembangan Model Modulus resilien Campuran Beraspal panas yang Menggunakan KA dan CR Sebagai Modifikasi Aspal dan Pengganti Agregat Halus.....	183
6.6.1. Pengembangan Model Modulus resilien Campuran Metode Bonnaure (1977) Terhadap Hasil Penelitian	183
6.6.2. Pengembangan Pengembangan Model Modulus resilien Campuran Metode Nottingham (1984) Terhadap Hasil Penelitian.....	187
6.6.3. Pengembangan Model Modulus resilien Campuran Metode Shell (2003) Terhadap Hasil Penelitian	189
6.6.4. Perbandingan Perhitungan Prediksi Modulus resilien Campuran Beraspal.....	191
6.7. Pengembangan Model Matematis Modulus resilien Campuran Beraspal Panas yang Menggunakan KA dan CR.....	192
6.8. Simpulan.....	198
 BAB VII KETAHANAN KELELAHAN (FATIGUE) CAMPURAN BERASPAL PANAS YANG MENGGUNAKAN KARET ALAM PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS.....	 201
7.1. Umum.....	201

7.2. Hasil pengujian fatigue yang menggunakan Aspen, KACR 7 dan KACR 10	202
7.3. Hasil pengujian fatigue yang menggunakan KACR 7, KACR 7- 25CRKA dan KACR 7-50CR	205
7.4. Hasil pengujian fatigue yang menggunakan KACR 10, KACR 10- 25CRKA dan KACR 10-50CR	208
7.5. Analisis dan Pembahasan Hasil Pengujian Ketahanan Kelelahan ..	211
7.6. Pengembangan Model Ketahanan Kelelahan Campuran Beraspal yang menggunakan KA dan CR.....	212
7.6.1. Pengembangan Model Toeritis Ketahanan Kelelahan Shell..	213
7.6.2. Pengembangan Model Toeritis Ketahanan Kelelahan Asphalt Institute	215
7.6.3. Pengembangan Model Matematis Ketahanan Kelelahan yang Menggunakan KA dan CR.....	218
7.7. Simpulan.....	224
BAB VIII KESIMPULAN DAN SARAN	226
8.1. Kesimpulan	226
8.2. Saran	227
DAFTAR PUSTAKA	229
LAMPIRAN.....	234

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1. Alur permasalahan penelitian.....	8
Gambar 1.2. Road map penelitian.....	28
Gambar 2.1. Molekul Aspal.....	31
Gambar 2.2. Perilaku material elastik dan viskoelastik.....	37
Gambar 2.3. Pengujian DSR pada aspal.....	38
Gambar 2.4. Alat pengujian dan sampel pada DSR.....	39
Gambar 2.5. Tegangan dan regangan pada perkerasan jalan.....	47
Gambar 2.6. Regangan pada pengujian modulus resilien.....	48
Gambar 2.7. Nomogram Van der Poel.....	52
Gambar 2.8. Hubungan kekakuan dan suhu dengan berbagai frekuensi pembebanan.....	54
Gambar 2.9. Struktur kimia karet alam.....	56
Gambar 2.10. (a) tanpa ikatan silang, (b) ikatan silang.....	57
Gambar 2.11. Komposisi karet pada ban a) mobil penumpang, b) truk pengangkut.....	61
Gambar 2.12. Sampel dari serbuk <i>crumb rubber</i>	61
Gambar 2.13. Hasil SEM <i>crumb rubber</i>	61
Gambar 2.14. Jenis gradasi agregat.....	63
Gambar 2.15. Garis kelelahan khas – kriteria tegangan.....	65
Gambar 3.1. Skema penelitian disertasi.....	72
Gambar 3.2. Alur penelitian tahap I.....	74
Gambar 3.3. Ilustrasi teknik pencampuran aspal karet dengan agregat.....	80
Gambar 3.4. Skema penggunaan karet dalam penelitian.....	82
Gambar 3.5. Alur penelitian tahap II.....	85
Gambar 3.6. Alur penelitian tahap III.....	88
Gambar 3.7. Ilustrasi perbandingan model laboratorium dengan model teoritis.....	90
Gambar 4.1. Proses pencampuran aspal dengan karet.....	93

Gambar 4.2. Hasil pencampuran aspal dan karet.....	94
Gambar 4.3. Perbandingan gradasi antara pasir, karet alam padat dan <i>crumb rubber</i>	95
Gambar 4.4. SEM material <i>crumb rubber</i> (CR)	97
Gambar 4.5. Dokumentasi pengujian sifat fisik aspal.....	98
Gambar 4.6. Alat pengujian viskositas aspal	99
Gambar 4.7. Hasil pengujian viskositas aspal penetrasi	99
Gambar 4.8. Hasil pengujian viskositas aspal dengan 7% KACR.....	103
Gambar 4.9. Hasil pengujian viskositas aspal dengan 10% KACR.....	104
Gambar 4.10. Perbandingan hasil pengujian viskositas.....	104
Gambar 4.11. Black Diagram aspal modifikasi kondisi original	107
Gambar 4.12. Grafik isokronal modulus resilien aspal modifikasi kondisi Original	108
Gambar 4.13. Grafik isokronal phase angle aspal modifikasi kondisi Original	109
Gambar 4.14. Parameter rutting aspal modifikasi pada kondisi original (tanpa penuaan).....	110
Gambar 4.15. Parameter rutting aspal modifikasi pada kondisi TFOT	110
Gambar 4.16. Parameter fatigue aspal modifikasi	112
Gambar 4.17. Black Diagram aspal modifikasi pada kondisi TFOT.....	112
Gambar 4.18. Black Diagram aspal modifikasi pada kondisi PAV	113
Gambar 4.19. Grafik Cole-Cole aspal modifikasi kondisi original	114
Gambar 4.20. Grafik Cole-Cole aspal modifikasi kondisi TFOT	114
Gambar 4.21. Grafik Cole-Cole aspal modifikasi kondisi PAV	115
Gambar 4.22. Grafik logaritma elastic modulus	115
Gambar 4.23. Grafik logaritma viscous modulus	116
Gambar 5.1. Material (a) batu pecah, (b) screen 1-1, (c) abu batu, (d) pasir sungai, (e) filler abu batu	120
Gambar 5.2 Dokumentasi pengujian berat jenis agregat kasar dan agregat halus di laboratorium.....	123
Gambar 5.3. Gradasi agregat.....	124
Gambar 5.4. Hasil penyaringan agregat per gradasi	124

Gambar 5.5. Sampel (a) serbuk karet alam padat (KA), (b) <i>crumb rubber</i> (CR)	125
Gambar 5.6. Gradasi pasir sungai, KA dan CR sebelum pencampuran	126
Gambar 5.7. Rencana gradasi campuran AC-WC	129
Gambar 5.8. Hasil parameter Marshall (As-Pen).....	130
Gambar 5.9. Grafik hasil pengujian Marshall sampel Aspen, KACR 7 dan KACR 10	133
Gambar 5.10. Pembuatan dan pengujian sampel KACR 7 dan KACR 10 .	136
Gambar 5.11. Pengujian Marshall sampel Aspen-50CR, Aspen-50KA dan Aspen-25CR-25KA	141
Gambar 5.12. Grafik hasil pengujian Marshall sampel Aspen-50CR, Aspen-50KA dan Aspen-25CR-25KA	142
Gambar 5.13. Dokumentasi pembuatan dan pengujian sampel KACR7-50CR, KACR7-50KA, KACR7-25CRKA.....	150
Gambar 5.14. Grafik hasil pengujian Marshall sampel KACR7, KACR7-50CR, KACR7-50KA, KACR7-25CRKA.....	151
Gambar 5.15. Proses pengujian sampel KACR 10 di Laboratorium	159
Gambar 5.16. Grafik Hasil Pengujian Marshall untuk Sampel KACR10-50CR, KACR10-50KA dan KACR10-25CRKA.....	160
Gambar 5.17. Perbandingan KAO berbagai variasi campuran	167
Gambar 5.18. Perbandingan stabilitas Marshall	168
Gambar 5.19. Perbandingan nilai kelelahan/flow	169
Gambar 5.20, Perbandingan nilai stabilitas sisa Marshall	169
Gambar 6.1. Alat pengujian modulus resilien.....	175
Gambar 6.2. Perbandingan nilai Smix (Aspen, KACR 7 dan KACR 10) ..	177
Gambar 6.3. Pengaruh penggunaan KACR terhadap kepekaan suhu	177
Gambar 6.4. Perbandingan nilai Smix (Aspen, KACR 7, KACR 7-25CRKA dan KACR 7-50CR).....	179
Gambar 6.5. Pengaruh penggunaan KA dan CR pada sampel KACR 7 terhadap kepekaan suhu	179
Gambar 6.6. Perbandingan nilai Smix (Aspen, KACR 10, KACR 10-25CRKA dan KACR 10-50CR).....	181

Gambar 6.7. Pengaruh penggunaan KA dan CR pada sampel KACR 10 terhadap kepekaan suhu	181
Gambar 6.8. Perbandingan nilai Smix pada campuran yang diusulkan.....	182
Gambar 6.9. Penyesuaian hasil laboratorium dengan model Bonnaure 1977	186
Gambar 6.10. Penyesuaian hasil laboratorium dengan model Nottingham 1984	188
Gambar 6.11. Penyesuaian hasil laboratorium dengan model Shell (2003)	190
Gambar 7.1. Alat pengujian <i>Indirect Tensile Fatigue Test</i> (ITFT).....	201
Gambar 7.2. Grafik hubungan antara deformasi horizontal dengan jumlah pengulangan beban untuk sampel Aspen, KACR 7 dan KACR 10	204
Gambar 7.3. Grafik hubungan antara kumulatif horizontal strain dengan jumlah pengulangan beban untuk sampel Aspen, KACR 7 dan KACR 10.....	204
Gambar 7.4. Grafik hubungan modulus resilien dengan jumlah pengulangan beban untuk sampel Aspen, KACR 7 dan KACR 10	205
Gambar 7.5. Grafik hubungan antara deformasi horizontal dengan jumlah pengulangan beban untuk sampel Aspen, KACR 7, KACR 7-25CRKA dan KACR 7-50CR.....	207
Gambar 7.6. Grafik hubungan antara kumulatif horizontal strain dengan jumlah pengulangan beban untuk sampel Aspen, KACR 7, KACR 7-25CRKA dan KACR 7-50CR	207
Gambar 7.7. Grafik hubungan modulus resilien dengan jumlah pengulangan beban untuk sampel Aspen, KACR 7, KACR 7-25CRKA dan KACR 7-50CR.....	208
Gambar 7.8. Grafik hubungan antara deformasi horizontal dengan jumlah pengulangan beban untuk sampel Aspen, KACR 10, KACR 10-25CRKA dan KACR 10-50CR.....	209
Gambar 7.9. Grafik hubungan antara kumulatif horizontal strain dengan jumlah pengulangan beban untuk sampel Aspen, KACR 10, KACR 10-25CRKA dan KACR 10-50CR	209

Gambar 7.10. Grafik hubungan modulus resilien dengan jumlah pengulangan beban untuk sampel Aspen, KACR 10, KACR 10-25CRKA dan KACR 10-50CR.....	210
Gambar 7.11. Perbandingan nilai initial strain dari campuran usulan	211
Gambar 7.12. Grafik hasil perbandingan Model Shell dengan hasil uji Laboratorium	214
Gambar 7.13. Hubungan antara Nf dengan Strain (Model Shell vs Hasil Uji).....	214
Gambar 7.14. Grafik hasil perbandingan Model Asphalt Institute dengan hasil uji laboratorium	215
Gambar 7.15. Hubungan antara Nf dengan Strain (Model Asphalt Institute vs Hasil Uji)	216
Gambar 7.16. Hasil perbandingan model usulan ketahanan kelelahan dengan hasil uji laboratorium	219

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1.1. Hasil penelusuran (track) penelitian aspal dan karet alam.....	14
Tabel 1.2. Hasil penelusuran (track) penelitian aspal dan crumb rubber....	17
Tabel 1.3. Posisi Penelitian	20
Tabel 1.4. Persamaan dan perbedaan usulan penelitian dengan peneliti Sebelumnya	22
Tabel 2.1. Spesifikasi aspal dari pengujian Strategic Highway Research Program (SHRP).....	44
Tabel 2.2. Jenis karet yang digunakan sebagai modifikasi aspal.....	55
Tabel 2.3. Hasil penelitian penggunaan crumb rubber dengan campuran aspal.....	60
Tabel 2.4. Model campuran beraspal yang telah dikembangkan	68
Tabel 3.1. Ketentuan agregat kasar	75
Tabel 3.2. Pemeriksaan karet alam	76
Tabel 3.3. Pemeriksaan limbah ban bekas	76
Tabel 3.4. Jumlah sampel pengujian kadar optimum aspal penetrasi	77
Tabel 3.5. Penelitian substitusi agregat halus dengan crumb rubber dalam perkerasan lentur	81
Tabel 3.6. Variasi campuran aspal karet	82
Tabel 3.7. Variasi sampel pengujian reologi aspal	83
Tabel 3.8. Variasi dan jumlah sampel untuk penentuan KAO Kondisi 1 ...	84
Tabel 3.9. Variasi dan jumlah sampel untuk penentuan KAO Kondisi 2...	85
Tabel 3.10. Variasi dan jumlah sampel untuk penentuan KAO Kondisi 3.	86
Tabel 3.11. Variasi dan jumlah sampel untuk penentuan KAO Kondisi 4.	86
Tabel 3.12. Gambaran form hasil pengujian Marshall.....	87
Tabel 3.13. Jumlah dan variasi sampel pengujian modulus resilien	89
Tabel 3.14. Jumlah dan jenis variasi pengujian kelelahan	89
Tabel 4.1. Sifat kimia serbuk karet alam dan crumb rubber	96
Tabel 4.2. Kandungan unsur kimia makro	96

Tabel 4.3. Kandungan unsur kimia oksida.....	96
Tabel 4.4. Pengujian aspal penetrasi	97
Tabel 4.5. Hasil pengujian reologi aspal penetrasi (As-Pen).....	100
Tabel 4.6. Temperatur kritis sampel As-Pen.....	101
Tabel 4.7. Hasil pengujian fisik aspal dengan KACR	102
Tabel 4.8. Hasil pengujian reologi aspal dengan 7%KACR.....	105
Tabel 4.9. Hasil pengujian reologi aspal dengan 10%KACR.....	106
Tabel 4.10. Temperatur kritis aspal.....	106
Tabel 4.11. Data-data yang digunakan dalam menentukan model prediksi	117
Tabel 4.12. Hasil validasi model prediksi	118
Tabel 5.1. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air batu pecah	121
Tabel 5.2. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air screen 1-1	121
Tabel 5.3. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan abu batu	122
Tabel 5.4. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan pasir sungai	122
Tabel 5.5. Hasil pengujian analisis saringan agregat	124
Tabel 5.6. Hasil pengujian analisa saringan karet alam dan crumb rubber.	125
Tabel 5.7. Hasil pengujian berat jenis CR.....	126
Tabel 5.8. Hasil pengujian berat jenis KA	127
Tabel 5.9. Perhitungan kadar aspal rencana.....	127
Tabel 5.10. Gradasi material untuk campuran AC-WC.....	128
Tabel 5.11. Rekap hasil pengujian Marshall Sampel As-Pen	129
Tabel 5.12. Hasil pengujian Marshall Sampel As-Pen	131
Tabel 5.13. Penentuan kadar aspal optimum (KAO) As-Pen	132
Tabel 5.14. Hasil pengujian Marshall sampel Aspen, KACR 7 dan KACR 10.....	135
Tabel 5.15. Penentuan kadar aspal optimum (KAO) KACR 7%.....	135
Tabel 5.16. Penentuan kadar aspal optimum (KAO) KACR 10%.....	135
Tabel 5.17. Hasil pengujian Marshall sampel KAO (Aspen, KACR 7 dan KACR 10)	136
Tabel 5.18. Hasil pengujian Marshall (KACR 7%).....	137
Tabel 5.19. Hasil pengujian Marshall (KACR 10%).....	138
Tabel 5.20. Hasil pengujian Marshall sampel Aspen, Aspen-50CR, Aspen-50KA	

dan Aspen-25CR-25KA.....	140
Tabel 5.21. Penentuan KAO sampel Aspen-50CR.....	143
Tabel 5.22. Penentuan KAO sampel Aspen-50KA.....	143
Tabel 5.23. Penentuan KAO sampel Aspen-25CR-25KA.....	143
Tabel 5.24. Hasil pengujian Marshall untuk sampel KAO (Aspen-50CR, Aspen-50KA dan Aspen-25CR-25KA).....	145
Tabel 5.25. Hasil pengujian Marshall sampel Aspen-50CR.....	146
Tabel 5.26. Hasil pengujian Marshall sampel Aspen-50KA.....	147
Tabel 5.27. Hasil pengujian Marshall sampel Aspen-25CR-25KA.....	148
Tabel 5.28. Hasil pengujian Marshall sampel KACR7, KACR7-50CR, KACR7-50KA, KACR7-25CRKA.....	149
Tabel 5.29. Penentuan KAO sampel KACR 7- 50CR.....	152
Tabel 5.30. Penentuan KAO sampel KACR 7- 50KA.....	152
Tabel 5.31. Penentuan KAO sampel KACR 7- 25CRKA.....	152
Tabel 5.32. Hasil pengujian Marshall untuk sampel KAO (KACR 7, KACR7- 50CR, KACR7-50KA, KACR7-25CRKA).....	153
Tabel 5.33. Hasil Pengujian Marshall Sampel KACR 7-50CR.....	155
Tabel 5.34. Hasil Pengujian Marshall Sampel KACR 7-50KA.....	156
Tabel 5.34. Hasil Pengujian Marshall Sampel KACR 7-25CRKA.....	157
Tabel 5.35. Hasil pengujian Marshall sampel KACR10, KACR10-50CR, KACR10-50KA, KACR10-25CRKA.....	158
Tabel 5.36. Penentuan KAO sampel KACR 10-50CR.....	161
Tabel 5.37. Penentuan KAO sampel KACR 10-50KA.....	161
Tabel 5.38 Penentuan KAO sampel KACR 10-25CRKA.....	161
Tabel 5.39. Hasil pengujian Marshall untuk sampel KAO (KACR 10, KACR10-50CR, KACR10-50KA, KACR10-25CRKA).....	162
Tabel 5.40. Hasil Pengujian Marshall Sampel KACR 10 -50CR.....	164
Tabel 5.41. Hasil Pengujian Marshall Sampel KACR 10 -50KA.....	165
Tabel 5.42. Hasil Pengujian Marshall Sampel KACR 10 -25CRKA.....	166
Tabel 5.43. Penilaian campuran yang memenuhi berdasarkan hasil pengujian Marshall.....	172
Tabel 6.1. Hasil pengujian Smix sampel Aspen, KACR 7 dan KACR 10 .	176

Tabel 6.2. Hasil pengujian Smix sampel KACR 7, KACR 7-25CRKA dan KACR 7-50CR.....	178
Tabel 6.3. Hasil pengujian Smix sampel KACR 10, KACR 10-25CRKA dan KACR 10-50CR.....	180
Tabel 6.4. Kumpulan data untuk pengembangan model modulus resilien campuran beraspal pada suhu 25°C	184
Tabel 6.5. Kumpulan data untuk pengembangan model modulus resilien campuran beraspal pada suhu 40°C	185
Tabel 6.6. Perbandingan rasio model teoritis Bonnaure (1977) dengan hasil laboratorium	187
Tabel 6.7. Perbandingan rasio model teoritis Nottingham (1984) dengan hasil laboratorium	189
Tabel 6.8. Perbandingan rasio model teoritis Shell (2003) dengan hasil laboratorium	190
Tabel 6.9. Perbandingan model prediksi modulus resilien campuran dengan penelitian yang dilakukan.....	192
Tabel 6.10. Usulan model matematis modulus resilien campuran beraspal	194
Tabel 6.11. Hasil analisis regresi model pengembangan modulus resilien campuran	195
Tabel 6.12. Perbandingan model teoritis dengan model matematis Smix ..	198
Tabel 7.1. Hasil pengujian fatigue yang menggunakan Aspen, KACR 7 dan KACR 10	202
Tabel 7.2. Hasil pengujian fatigue yang menggunakan KACR 7, KACR 7-25CRKA dan KACR 7-50CR.....	206
Tabel 7.3. Hasil pengujian fatigue yang menggunakan KACR 10, KACR 10-25CRKA dan KACR 10-50CR.....	208
Tabel 7.4. Data untuk pengembangan model ketahanan kelelahan (<i>fatigue</i>).....	213
Tabel 7.5. Perbandingan masing-masing model teoritis terhadap hasil pengujian kelelahan (<i>fatigue</i>).....	217
Tabel 7.6. Matriks perbandingan model teoritis fatigue dengan penelitian yang dilakukan	217

Tabel 7.7. Usulan model pengembangan ketahanan kelelahan-	220
Tabel 7.8. Hasil analisis regresi model ketahanan kelelahan (<i>fatigue</i>) yang diusulkan.....	221
Tabel 7.9. Perbandingan model teoritis dengan model matematis.....	223

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Infrastruktur jalan raya merupakan salah satu infrastruktur yang penting dan menjadi tulang punggung perekonomian negara dimana fungsi jalan secara tidak langsung dapat mendorong meningkatkan perekonomian akibat aksesibilitas atau pergerakan barang dan jasa (Peraka, et al, 2020). Infrastruktur jalan yang banyak digunakan diberbagai negara yaitu jenis perkerasan campuran aspal panas (hotmix) karena memberikan kinerja jangka panjang dan kualitas kendara yang baik (Tahami, et al 2019). Campuran aspal panas menggunakan aspal (sebagai bahan pengikat), agregat dan filler sebagai bahan material penyusunnya sehingga menghasilkan kinerja yang diharapkan yaitu mampu menahan beban dan mengurangi kerusakan yang terjadi.

Kerusakan perkerasan aspal dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti beban lalu lintas, penggunaan jenis material dan lingkungan sekitar. Faktor-faktor ini yang nantinya akan mempengaruhi kondisi dan umur perkerasan. Di antara faktor-faktor ini, beban lalu lintas memiliki pengaruh besar pada kinerja perkerasan dan menciptakan kesulitan dalam mempertahankan umur perkerasan (Bhandari, et al, 2022). Peningkatan beban gandar, volume lalu lintas, dan kesalahan desain dapat menyebabkan kerusakan pada perkerasan aspal termasuk retak alur, kelelahan dan kerentanan suhu. Kerusakan-kerusakan tersebut menyebabkan kenaikan biaya pemeliharaan dan penurunan umur pelayanan jalan (Arabani, et al, 2017).

Rekayasa perkerasan adalah proses menciptakan dan memelihara struktur perkerasan jalan untuk memenuhi kebutuhan lalu lintas dan lingkungan. Perkerasan aspal telah berevolusi dari permukaan granular berlapis tunggal di masa awal menjadi struktur berlapis-lapis di zaman modern. Hal ini dilakukan agar tercapai perkerasan yang lebih kuat dan mencapai umur layan yang panjang (Liu, et al 2020). Untuk mencapai umur layan yang panjang atau *long life pavement*, perlu diantisipasi terhadap desain perkerasan maupun campuran material (*job mix*) yang matang sehingga kegiatan pembangunan, pemeliharaan maupun sampai rehabilitasi dapat dirancang dengan biaya yang rendah (Harnaeni, 2021).

Secara umum perkerasan aspal sering disebut perkerasan lentur yang terdiri dari lapisan permukaan, lapisan pondasi atas, lapisan pondasi bawah dan lapisan tanah dasar dimana masing-masing lapisan memiliki spesifikasi tertentu seperti sifat material penyusun. Perencanaan perkerasan aspal juga bergantung pada ketebalan tiap lapisan yang ditinjau berdasarkan sifat material agar mampu menahan dan meneruskan beban sampai ke lapisan tanah dasar tanpa merusak struktur perkerasan.

Secara umum metode yang dapat mengkaji desain perkerasan lentur yaitu dengan pendekatan empiris dan pendekatan mekanistik. Pendekatan empiris merupakan metode yang dibuat berdasarkan pengalaman para pakar jalan dengan memakai persamaan dan grafik yang sudah ada contohnya AASHTO 1972 dan AASHTO 1993 (Widiastuti, 2018). Di Indonesia metode empiris yang sering digunakan yaitu Metode Analisa Komponen dalam SNI 1732-1989-F dan Metode Bina Marga 2002 dimana pendekatan ini telah dikembangkan menurut kondisi di Indonesia (Harnaeni, 2021). Sedangkan pendekatan mekanistik adalah metode yang didasarkan terhadap respon struktur perkerasan terhadap beban sumbu kendaraan. Modulus adalah respon material terhadap beban yang diberikan atau rasio antara tegangan dan regangan yang sangat dipengaruhi oleh waktu pembebanan (Rahman, et al 2018). Metode ini dapat dipakai sebagai dasar dalam melakukan desain dan juga evaluasi perkerasan jalan seperti yang dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu. Arshad, et al (2018) melakukan evaluasi desain perkerasan lentur permukaan dengan pendekatan mekanistik skala laboratorium. Hasil penyelidikan terhadap efek suhu tinggi pada modulus resilien campuran beton aspal dengan standar Malaysia diperoleh pengaruh kadar aspal yang lebih rendah, penggunaan aspal penetrasi yang lebih rendah dan penggunaan gradasi agregat dengan kadar halus yang lebih tinggi dapat meningkatkan nilai modulus elastisitas aspal.

Pendekatan desain perkerasan jalan dengan metode mekanistik skala laboratorium menggunakan alat pengujian *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) dan alat uji *Universal Material Testing Apparatus* (UMATTA) telah dilakukan oleh Rahman, et al (2018) untuk memperoleh modulus kekakuan campuran aspal. Hasil pengujian tersebut dibandingkan dengan model-model yang telah diturunkan dalam menghitung modulus campuran aspal seperti Metode Bonnaure et.al (1977),

Asphalt Institute (1982) dan Nottingham (Brown, et. al. 1984). Pendekatan mekanistik juga dapat digunakan untuk menganalisis performa dari usulan aspal modifikasi seperti aspal karet yang telah dilakukan oleh Souliman, et al (2020). Pada penelitian tersebut hasil analisis mekanistik digunakan untuk menilai kinerja aspal modifikasi dan performa struktur perkerasan sehingga diperoleh efektivitas biaya yang dikeluarkan.

Di Indonesia telah menerapkan pendekatan mekanistik dalam perencanaan perkerasan lentur yang tertuang dalam Manual Perkerasan Jalan Tahun 2017 Nomor 04/SE/Db/2017. Prosedur desain ini menggunakan data beban roda, struktur perkerasan dan sifat mekanik material dengan output berupa respon terhadap tegangan dan regangan yang didasarkan pada pengujian di laboratorium maupun di lapangan. Model struktur perkerasan ini juga mengacu pada AASHTO 1993 menggunakan model berupa struktur multi lapis yang bersifat elastik linier. Menurut Jasim, et al (2019), terdapat generasi baru pendekatan mekanistik yaitu Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) telah banyak digunakan di Amerika Serikat. MEPDG menggunakan analisis perkerasan mekanistik untuk menentukan respons kritis perkerasan terhadap beban lingkungan dan lalu lintas, yang dikaitkan dengan kinerja perkerasan. Dalam MEPDG, modulus dinamis campuran aspal yang diukur digunakan untuk mengkarakterisasi sifat viskoelastiknya (Cheng, et al 2021).

Aspal memiliki sifat viskoelastik dimana dapat berbentuk padat dan cair pada suhu tertentu. Aspal bersifat *viscous-liquid* saat suhu tinggi dan waktu pembebanan yang lama sedangkan aspal bersifat elastis-padat pada suhu yang rendah dan waktu pembebanan singkat (Caroles, 2021). Dalam menjamin sifat perkerasan campuran aspal di bawah pengaruh hal tersebut dapat dilakukan modifikasi aspal yaitu berupa aspal polimer. Karet merupakan polimer alam yang dapat dipakai untuk campuran dalam aspal karena karet sendiri memiliki sifat elastitas tinggi, fleksibilitas dan ketahanan suhu yang baik (Wititanapanit, et al, 2021). Produksi karet di Indonesia telah mencapai 3.301.405 ton pada tahun 2019, untuk tahun 2020 jumlah produksi karet menurun menjadi 3.037.348 ton. Pemerintah Indonesia saat ini telah mencanangkan penggunaan karet untuk campuran aspal sejak tahun 2018, hal ini dilakukan untuk meningkatkan

penyerapan karet alam di dalam negeri dalam proyek infrastruktur jalan guna menguatkan harga karet dan menyejahterakan petani karet dari krisis keuangan (Prastanto, et al. 2019). Jenis karet yang telah digunakan oleh peneliti sebelumnya dalam peningkatan sifat campuran aspal diantaranya adalah:

- 1) Karet alam jenis lateks berasal dari pencampuran getah karet cair dengan bahan stabilisasi untuk menjaga sifat karet tetap dalam wujud cair. Jenis karet ini lebih mudah dilakukan pencampuran terhadap aspal.
- 2) Karet alam jenis padatan berasal dari penggumpalan karet cair yang kemudian dicetak menjadi bentuk kompon padat, lembaran tipis ataupun bentuk cacahan.
- 3) Karet yang berasal dari limbah ban kendaraan berbentuk cacahan yang memiliki gradasi tertentu biasa disebut dengan *crumb rubber*.

Karet alam mempunyai bentuk rantai ikatan seperti spiral yang sifatnya sama dengan pegas sehingga memiliki sifat kenyal, selain itu karet alam memiliki molekul rantai yang panjang dan ikatan rangkap yang tidak mudah terputus sehingga secara fisik sifatnya dapat berupa elastis (Iriansyah, 2018). Sedangkan karet yang berasal dari limbah ban bekas yaitu *crumb rubber* pada dasarnya terdiri atas karet alam yang tervulkanisir, karbon hitam dan bahan penguat lainnya. Pada susunan ini dapat membuat ketahanan yang baik. Secara fisik, partikel *crumb rubber* memiliki bentuk yang tidak beraturan, permukaan kasar, luas permukaan yang besar dan berpori. Akibat hal tersebut maka *crumb rubber* dapat menyerap minyak dan resin dalam aspal melalui pori-pori partikel yang akan membentuk kesatuan ikatan yang padat (Wenhua Zheng, et al 2021). Bila *crumb rubber* digunakan dalam campuran beraspal maka dapat memberikan keuntungan *engineering* propertis yang baik. Adapun penelitian penggunaan karet tersebut pada campuran aspal yang telah dilakukan oleh peneliti dalam negeri maupun luar negeri di antaranya adalah:

- 1) Veena Venudharan, et al (2018) mencoba menggunakan *crumb rubber* pada aspal dengan kadar 10 -30 % terhadap aspal dengan pengujian reologi aspal diperoleh bahwa aspal yang dimodifikasi memiliki nilai kekakuan yang tinggi dan meningkatkan titik lembek.

- 2) Henry Prastanto, et al (2019) melakukan penelitian studi karakteristik fisik aspal panas dengan berbagai kadar variasi karet alam lateks dan karet padat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar karet 5-7% dapat meningkatkan karakteristik fisik dari aspal dan juga stabilitas Marshall.
- 3) Henri Siswanto (2019) melakukan penelitian efek penggunaan lateks untuk mengurangi kadar aspal pada lapisan AC-WC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kadar lateks 2-6% dapat mengurangi jumlah kadar aspal optimum.
- 4) Israel Rodríguez-Fernández, et al (2020) memanfaatkan crumb rubber pada campuran beraspal dengan pengujian Marshall. Kadar crumb rubber yang diterapkan sebesar 10-15% dapat mempengaruhi viskositas aspal dan stabilitas Marshall.
- 5) Abdalnaser M Al-Sabaei, et al (2020) melakukan penelitian reologi aspal modifikasi lateks dan *crumb rubber* menggunakan *dynamic shear rheometer* (DSR). Hasil penelitian menunjukkan penambahan kadar *crumb rubber* 8% maupun lateks 4% dapat meningkatkan modulus kompleks dan ketahanan *rutting*.
- 6) Sharvin Poovaneshvaran, et al (2020) melakukan penelitian *recycle crumb rubber* dan karet alam lateks (kadar kering 60%) untuk campuran aspal. Hasil penelitian menunjukkan aspal yang dicampur dengan *crumb rubber* memiliki kekuatan ikat yang lebih baik dari karet alam lateks, sebaliknya karet alam lateks tahan terhadap geser dibandingkan dengan *crumb rubber*.
- 7) Suleiman Abdulrahman, et al (2021) melakukan pengujian performa aspal dengan karet alam padat pada campuran panas dan hangat. Hasil penelitian menunjukkan campuran aspal dengan karet alam padat memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap pengupasan dan memiliki rasio kekuatan tarik yang tinggi.

Beberapa penelitian di atas menggunakan bahan karet alam berupa lateks, karet padat dan limbah ban bekas (*crumb rubber*) sebagai bahan campuran dalam aspal. Bahan tersebut sama-sama memiliki dampak yang baik terhadap karakteristik aspal. *Crumb rubber* merupakan jenis karet yang berasal dari limbah ban bekas yang diolah menjadi bentuk potongan atau serbuk dan dicampurkan pada aspal

sebagai upaya dalam mengurangi jumlah limbah ban bekas (Ismail Bakheit, et al 2019). Beberapa penelitian di atas hanya menguji reologi aspal saja, hanya sebagian yang membahas mengenai dampak penggunaan karet terhadap campuran aspal. Untuk melengkapi informasi penelitian aspal karet maka penulis mengusul menggunakan bahan gabungan antara karet alam padat dan limbah ban bekas sebagai bahan modifikasi aspal. Di Indonesia, bahan-bahan tersebut telah diatur dalam Spesifikasi Khusus Interim Campuran Beraspal Panas dengan Aspal Keras, Serbuk Karet Alam (SKAT) dan Ban Bekas Teraktivasi (Seksi SKh-1.6.16). Namun untuk komposisi karet alam dan ban bekas terhadap aspal panas belum tercantum dalam spesifikasi tersebut, padahal potensi penggunaan kedua bahan tersebut mampu meningkatkan kinerja dari campuran aspal panas dan juga mengurangi dampak terhadap lingkungan. Penggunaan bahan karet alam padat dan limbah ban bekas merupakan gap dari penelitian yang diusulkan.

Dalam Webinar Badan Kejuruan Kimia Persatuan Insinyur Indonesia (BKK PII) tanggal 4 Desember 2021 menyebutkan bahwa penggunaan karet pada campuran aspal seharusnya menjadi solusi untuk memperbaiki sifat aspal, tetapi telah menjadi beban dari para kontraktor dikarenakan adanya penambahan biaya sekitar 20 – 30% bila diaplikasikan dengan tebal yang sama dengan aspal biasa. Untuk mengatasi hal tersebut apakah bisa campuran aspal dengan karet alam dan ban bekas dihamparkan lebih tipis dari spesifikasi yang telah disesuaikan. Tebal tipisnya perkerasan jalan bergantung pada ukuran agregat dan modulus elastisitas pada material yang digunakan. Modulus elastisitas ini merupakan salah satu faktor penentuan kinerja pada perkerasan beraspal (Bethary, et al 2019), untuk memperhatikan kinerja campuran beraspal dengan bahan gabungan antara karet alam padat dan limbah ban bekas maka dapat dilakukan dalam pendekatan secara mekanistik. Melihat dari kajian literatur, teknologi penggunaan aspal yang menggunakan kombinasi antara karet alam padat dan limbah ban bekas terhadap campuran aspal panas belum banyak digunakan terutama di Indonesia, apalagi dapat diproduksi dalam bentuk serbuk maka dapat berpotensi digunakan sebagai bahan modifikasi aspal dan juga sebagai bahan pengganti agregat halus. Berdasarkan uraian sebelumnya maka dari itu penelitian ini mengusulkan penelitian mengenai efek penggunaan karet alam padat dan limbah ban bekas pada campuran

aspal panas sehingga penulis berkeinginan mengajukan judul penelitian disertasi: **“Evaluasi Perilaku Campuran Beraspal Panas yang Menggunakan Karet Alam Padat dan Limbah Ban Bekas dengan Pendekatan Mekanistik dan Eksperimental”**.

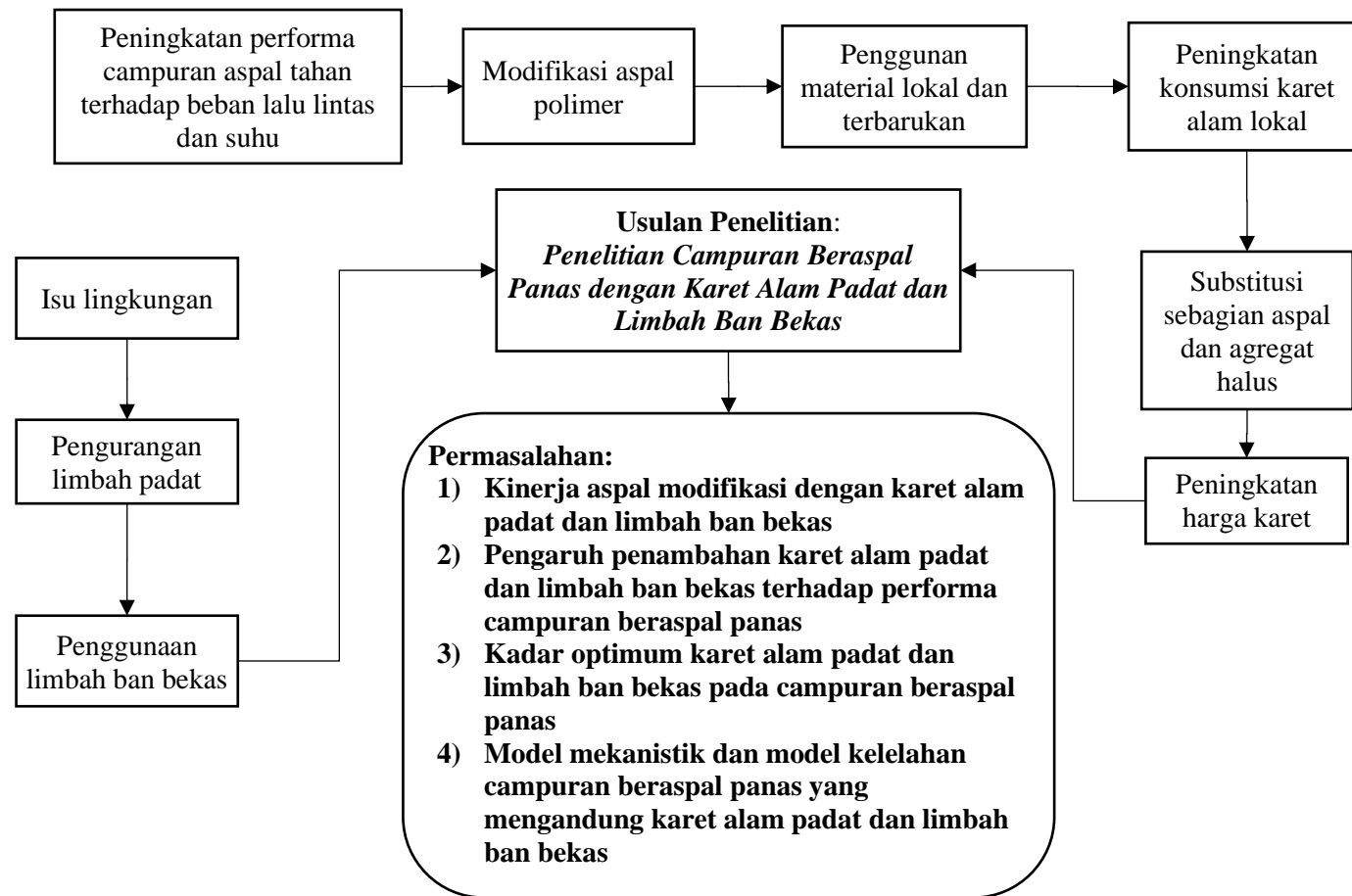
1.2. Rumusan Masalah

Penggunaan karet pada campuran aspal telah memberikan dampak positif dalam memperbaiki sifat aspal. Pemanfaatan campuran karet alam padat dan limbah ban bekas pada campuran aspal panas di Indonesia masih dalam tahap penelitian untuk memperoleh komposisi yang terbaik. Penggunaan sumber daya alam seperti aspal dapat mengalami keterbatasan jumlah. Penerapan aspal modifikasi merupakan solusi dalam menjaga keberlangsungan aspal. Pemanfaatan karet alam memiliki potensi yang baik terhadap reologi aspal dan juga peningkatan harga karet lokal apalagi dikombinasikan dengan limbah ban bekas yang dapat mengurangi penumpukan limbah padat (Gambar 1.1). Oleh karena itu perlu dilakukan kajian terhadap perilaku campuran aspal panas dengan karet alam padat dan limbah ban bekas dengan menggunakan pendekatan mekanistik dan eksperimental agar dapat diketahui karakteristik dan performanya. Terdapat beberapa rumusan masalah yang dikaji dalam penelitian ini:

- 1) Bagaimana kinerja aspal yang menggunakan campuran karet alam padat dan limbah ban bekas?
- 2) Bagaimana karakteristik Marshall pada campuran aspal panas yang menggunakan campuran karet alam padat dan limbah ban bekas dengan gradasi lapis permukaan AC-WC?
- 3) Bagaimana karakteristik campuran aspal panas yang menggunakan campuran karet alam padat dan limbah ban bekas yang ditinjau dengan pendekatan mekanistik dan eksperimental?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah mengevaluasi perilaku campuran aspal panas yang menggunakan karet alam padat dan limbah ban bekas dengan pendekatan mekanistik dan eksperimental.



Gambar 1.1. Alur permasalahan penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka tujuan khusus dari penelitian yang dilakukan yaitu:

- 1) Menginvestigasi reologi aspal yang menggunakan campuran karet alam padat dan limbah ban bekas dengan pengujian *dynamic shear rheometer* (DSR).
- 2) Mengidentifikasi parameter Marshall pada campuran aspal panas AC-WC yang menggunakan karet alam padat dan limbah ban bekas sebagai material perkerasan jalan.
- 3) Mengevaluasi modulus resilien dari campuran aspal panas yang menggunakan karet alam padat dan limbah ban bekas.
- 4) Mengevaluasi ketahanan kelelahan (*fatigue*) dari campuran aspal panas yang menggunakan karet alam padat dan limbah ban bekas.
- 5) Menyusun model modulus resilien dan model ketahanan kelelahan (*fatigue*) untuk campuran aspal panas yang menggunakan karet alam padat dan limbah ban bekas dengan pendekatan mekanistik dan eksperimental.

1.4. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa batasan sebagai berikut:

- 1) Material campuran terdiri atas: aspal pen 60-70 yang diperoleh dari PT Aspal Bangun Sarana. Sedangkan batu pecah sebagai agregat kasar, pasir sebagai agregat halus dan abu batu sebagai filler.
- 2) Karet alam yang digunakan yaitu karet alam padat berbentuk cacahan dan limbah ban bekas yang berbentuk serbuk. Karet alam padat dan serbuk limbah ban bekas ini digunakan sebagai bahan modifikasi aspal dan sebagai bahan pengganti agregat halus yaitu pasir.
- 3) Jenis gradasi campuran aspal yaitu berupa *asphalt concrete wearing course* (AC-WC) dengan gradasi mengacu pada spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.
- 4) Melakukan perancangan, pengujian dan evaluasi campuran aspal panas dengan penambahan campuran karet alam padat berbentuk cacahan dan limbah ban bekas.
- 5) Pengujian laboratorium berupa pengujian *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) untuk menganalisis reologi aspal modifikasi. Marshall Test, alat uji modulus

resilien dengan alat *Universal Testing Material (UTM)*, dan pengujian ketahanan kelelahan (*fatigue*) menggunakan metode uji ITFT (*indirect tensile fatigue test*) untuk campuran aspal yang diusulkan.

- 6) Model matematik modulus resilien dan ketahanan kelelahan dibuat berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan dengan analisis statistika.

1.5. Hipotesis Penelitian

Adapun hipotesis yang menjadi dasar dalam penelitian disertasi ini yaitu:

- 1) Penggunaan campuran karet alam padat dan limbah ban bekas sebagai bahan modifikasi aspal mampu meningkatkan reologi aspal.
- 2) Adanya penggunaan campuran karet alam padat dan limbah ban bekas mampu meningkatkan stabilitas Marshall.
- 3) Penggunaan karet alam padat dan limbah ban bekas mampu meningkatkan kinerja mekanistik campuran aspal.
- 4) Teknik dan suhu pencampuran karet alam padat dan limbah ban bekas pada aspal akan mempengaruhi kinerja campuran aspal.
- 5) Dapat dibentuk model matematis modulus resilien dan model ketahanan kelelahan dari campuran beraspal panas dengan karet alam padat dan limbah ban bekas.

1.6. Manfaat Penelitian

Adapun beberapa kontribusi dari penelitian ini dalam bidang ilmu pengetahuan:

- 1) Memberikan manfaat potensi produk lokal yaitu karet alam padat terutama di wilayah Sumatera Selatan sebagai bahan polimer alami yang dapat menggantikan sebagian aspal sebagai bahan yang tak terbarukan.
- 2) Memberikan kontribusi pemikiran terkait dengan potensi penggunaan limbah ban bekas sebagai bahan substitusi aspal untuk mencegah dampak pencemaran lingkungan akibat penumpukan limbah ban bekas.
- 3) Memberikan informasi terkait dengan efek penggunaan karet alam padat dan limbah ban bekas sebagai substitusi pada agregat halus dalam campuran beraspal panas.

- 4) Memberikan kontribusi pengetahuan terkait dengan performa lapisan permukaan jalan yang menggunakan campuran karet alam padat dan limbah ban bekas untuk para pihak pengguna jalan (pemerintah dan swasta).
- 5) Memberikan kontribusi terhadap ilmu pengetahuan mengenai model mekanistik untuk campuran beraspal panas dengan karet alam padat dan limbah ban bekas terutama pada lapis permukaan.

1.7. Posisi Penelitian

Penelitian mengenai campuran aspal karet yang diusulkan yaitu menggunakan karet alam padat dan limbah ban bekas belum dilakukan oleh peneliti terdahulu. Berdasarkan hasil studi literatur, penggunaan karet alam berupa lateks (bentuk cair) dan padat serta limbah ban bekas telah dilakukan, namun belum ada penelitian lanjut mengenai campuran keduanya yaitu karet padat dengan limbah ban bekas. Penelitian ini merupakan lanjutan dari penelitian aspal karet guna memberikan informasi mengenai kontribusi pemanfaatan karet dalam campuran aspal panas. Posisi penelitian merupakan hasil literatur review penelitian dari 5 tahun sebelumnya mengenai aspal karet yang bersumber pada jurnal internasional terindeks scopus.

Adapun hasil penelusuran peneliti terdahulu mengenai campuran aspal konvensional telah banyak dilakukan melalui pengujian reologi aspal, pengujian makrostruktur seperti pengujian empiris dan simulatif, pengujian dengan pendekatan mekanistik. Untuk penelusuran penelitian aspal karet telah banyak dilakukan pada tahun 2019 – 2021 dengan berbagai macam jenis karet alam seperti karet alam lateks, karet alam padat dan limbah ban bekas (*crumb rubber*). Berikut secara ringkas penelitian aspal karet yang dilakukan peneliti terdahulu:

- 1) Henry Prastanto, et al (2019) menggunakan bahan karet lateks dengan kadar 3%, 5% dan 7% terhadap berat aspal dan karet padat bentuk kompon dengan kadar 3%, 5%, 7% dan 9% terhadap berat aspal. Hasil penelitian menunjukkan kadar karet antara 5 – 7% mampu meningkatkan stabilitas Marshall.
- 2) Henri Siswanto (2019) menggunakan campuran karet alam jenis lateks 2%, 4% dan 6% terhadap berat aspal dengan tujuan mengurangi penggunaan

aspal. Hasil penemuan diperoleh bahwa untuk kadar lateks 4% memiliki stabilitas Marshall tertinggi.

- 3) Ismail Bakheit, et al (2019) melakukan modifikasi pencampuran *crumb rubber* pada agregat dan *filler* dengan variasi *crumb rubber* sebesar 6%, 12%, 18% dan 24% terhadap berat aspal. Hasil penelitian menunjukkan usulan modifikasi pencampuran mampu mendorong untuk meningkatkan umur layanan perkerasan.
- 4) Sharvin Poovaneshvaran, et al (2020) menguji reologi aspal dengan penambahan *crumb rubber* 5%, 10% dan 15% terhadap berat aspal dan karet lateks 5% dan 10% terhadap aspal. Hasil pengujian ditemukan bahwa kadar optimum *crumb rubber* 10% dan kadar optimum karet lateks 5% mampu meningkatkan kekakuan, titik melembek dan *torsional recovery*.
- 5) Arief Ramadhan, et al (2020) menggunakan 2 jenis karet yaitu karet alam tinggi kadar amoniak dan karet padat jenis SIR-20 (Standard Indonesian Rubber) untuk menguji sifat fisik aspal modifikasi. Penggunaan lateks karet alam lebih direkomendasikan dan menguntungkan daripada karet padat jika dilihat dari metode pencampurannya.
- 6) Jarurat Wititanapanit, et al (2020) menguji performa campuran aspal dengan karet alam lateks melalui pengujian kelelahan, keretakan terhadap suhu dan ketahanan deformasi permanen. Kadar karet alam lateks yang digunakan 0%, 3% dan 7%. Penggunaan karet alam lateks dengan aspal mampu meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi untuk kadar optimum 7%.
- 7) Abdulnaser M Al-Sabaeei, et al (2020) telah melakukan pengujian pengaruh penambahan karet alam dan *crumb rubber* pada aspal penetrasi 80/100 terhadap karakteristik reologi. Hasil pengujian reologi menunjukkan bahwa penambahan *crumb rubber* sampai 8% dan karet alam sampai 4% mampu meningkatkan modulus kompleks dan ketahanan rutting.
- 8) Suleiman Abdulrahman, et al (2021) menggunakan karet alam padat yang dilarutkan dalam pelarut toluena agar mudah dicampurkan dengan aspal. Kadar karet alam padat terhadap aspal 2,5%; 5%; 7,5% dan 10%. Hasil pengujian menunjukkan ketahanan terhadap rutting dan peningkatan kuat tarik untuk kadar optimum 7%.

Berdasarkan uraian singkat peneliti terdahulu mengenai pemanfaatan karet pada aspal mampu meningkatkan stabilitas Marshall, ketahanan terhadap suhu, ketahanan retak dan ketahanan deformasi permanen. Namun bila penggunaan kadar karet yang tinggi berpotensi mengurangi jumlah penggunaan aspal. Berikut ditampilkan penelusuran (*track*) penelitian mengenai penggunaan karet alam terhadap aspal (Tabel 1.1. dan Tabel 1.2.). Setelah menelaah penelusuran (*track*) penelitian yang berkaitan dengan aspal karet maka penulis membuat ringkasan posisi penelitian untuk menggambarkan penelitian lain yang sedang atau telah dikembangkan sebelumnya yang dapat dilihat pada Tabel 1.3. Posisi penelitian terbagi berdasarkan jenis material dan juga pendekatan penelitian yang disusun berdasarkan tahun peneliti sebelumnya. Tabel tersebut menunjukkan untuk penelitian aspal dan karet alam padat dengan pendekatan penelitian berupa fundamental test, kinerja fatigue dan mikrostruktur belum dilakukan, sedangkan usulan penelitian sekarang mengacu pada material aspal + karet alam + crumb rubber dengan pendekatan penelitian berupa sifat fisik aspal, Marshall test, Fundamental test dan kinerja beban berulang (*fatigue*). Adapun penelitian lanjutan yang disarankan yaitu dengan mengacu pada jenis pendekatan penelitian berupa ketahanan deformasi dan pengujian mikrostruktur.

Tabel 1.1. Hasil penelusuran (*track*) penelitian aspal dan karet alam

No.	Judul Penelitian	Tahun	Peneliti	Penerbit	Tujuan Penelitian	Jenis Karet	Hasil Penelitian
1	<i>Study of physical characteristic of rubberized hot mix asphalt based on various dosage of natural rubber latex and solid rubber</i>	2019	Henry Prastanto, Yusep Firdaus, Santi Puspitasari, Arief Ramadhan, Asron Ferdian Falaah	<i>IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering</i>	Mempelajari karakteristik aspal karet pada skala laboratorium	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Cationic latex</i> • <i>Prevulcanized latex</i> • <i>Rubber compound</i> 	Kadar 5% - 7% latex pravulkanisasi meningkatkan stabilitas Marshall
2	<i>Effect of Latex to Minimize the Use of Asphalt in Asphalt Concrete Wearing Course</i>	2019	Henri Siswanto	<i>Trans Tech Publications Ltd, Switzerland</i>	Menginvestigasi penambahan karet lateks terhadap campuran AC-WC	Karet alam lateks	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilitas Marshall tertinggi pada kadar lateks 4%. • Mengurangi penggunaan kadar aspal konvensional
3	<i>Impacts of recycled crumb rubber powder and natural rubber latex on the modified asphalt rheological behaviour, bonding, and resistance to shear</i>	2020	Sharvin Poovaneshvaran, Mohd Rosli Mohd Hasan, Ramadhansyah Putra Jaya	<i>Construction and Building Materials</i>	Menyelidiki reologi aspal, ikatan dan ketahanan terhadap geser dari pengikat aspal modifikasi	<ul style="list-style-type: none"> • Karet alam lateks • <i>Crumb rubber</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan kekakuan, titik lembek dan <i>torsional recovery</i> • Kadar optimum <i>crumb rubber</i> = 10% • Kadar optimum lateks = 5% • <i>Crumb rubber</i> sangat bagus dalam kekuatan ikat sedangkan karet latek tahan terhadap kuat geser.
4	<i>Development of Rubberized Asphalt Technology Based on</i>	2020	Arief Ramadhan, Santi Puspitasari, Henry Prastanto,	<i>Macromolecular Symposian</i>	Memberikan informasi dasar tentang pemilihan jenis karet alam segar yang sesuai untuk	<ul style="list-style-type: none"> • <i>High ammoniated natural rubber latex</i> 	Lateks karet alam pravulkanisir dapat meningkatkan sifat aspal terutama dalam hal

	<i>Asphalt Cement (AC Pen 60) and Fresh Natural Rubber in Indonesia</i>		Asron Ferdian Falaah, Dadi Rusadi Maspanger, Woro Andriani, Muhammad Irfan Faturrohman, Teddi Santo Sofyan, and Yusep Firdaus	<i>WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim</i>	diterapkan selama uji coba lapangan dan peningkatan implementasi aspal karet berbasis teknologi karet alam segar di Indonesia.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Standard Indonesian Rubber (SIR)20</i> 	pemulihan elastis untuk menahan beban lalu lintas yang tinggi.
5	<i>Use of Natural Rubber Latex (NRL) in Improving Properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)</i>	2020	Prawit Paotong, Saravut Jaritngam, and Pichai Taneerananon	<i>ENGINEERING JOURNAL Volume 24 Issue 2</i>	Menjelaskan hasil penyelidikan sifat-sifat campuran aspal reklamasi (RAP) dengan penambahan karet alam	<ul style="list-style-type: none"> • Karet lateks • RAP • Semen 	Pencampuran kadar karet 5-15% berat dengan RAP dan kadar semen 3-7% menghasilkan campuran yang memenuhi spesifikasi Thailand Department of Highways.
6	<i>Aging and Rheological Properties of Latex and Crumb Rubber Modified Bitumen Using Dynamic Shear Rheometer</i>	2020	Abdulnaser M Al-Sabaei, Bayu Agus Mustofa, Muslich Hartadi Sutanto, Sri Sunarjono & Nura Bala	<i>ITB Institute for Research and Community Services</i>	Membandingkan pengaruh lateks karet alam dan crumb rubber terhadap karakteristik aspal konvensional dan sebelum dan sesudah penuaan.	<ul style="list-style-type: none"> • Karet lateks • <i>Crumb rubber</i> 	Penambahan <i>crumb rubber</i> hingga 8% dan karet alam lateks hingga 4% dapat meningkatkan modulus kompleks dan ketahanan <i>rutting</i> .
7	<i>Performance-related and rheological characterisation of natural rubber modified bitumen</i>	2020	Jarurat Wititanapanit, Juan S. Carvajal-Munoz, Gordon Airey	<i>Construction and Building Materials</i>	Mengevaluasi pengaruh karet alam pada kinerja suhu tinggi-menengah-rendah	<ul style="list-style-type: none"> • Karet alam 	<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan karet alam pada aspal mampu tahan terhadap suhu sedang sampai tinggi • Kadar optimum 7% lateks

8	<i>Investigating the interaction behavior between asphalt binder and rubber in rubber asphalt by molecular dynamics simulation</i>	2020	Fucheng Guo, Jiupeng Zhang, Jianzhong Pei, Bochao Zhou, Augusto Cannone Falchetto, Zhuang Hu	<i>Construction and Building Materials</i>	Mengetahui perilaku aglomerasi dan mekanisme adsorpsi aspal karet berdasarkan simulasi dinamika molekuler.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>cis-polybutadiene rubber</i> (BR) • <i>styrene butadiene rubber</i> (SBR) • <i>natural rubber</i> (NR) 	Aglomerasi bahan pengikat aspal berubah secara signifikan dengan penambahan karet. Adsorpsi berbagai jenis karet ke fraksi ringan aspal pengikat mengikuti urutan ini: BR > SBR > NR.
9	<i>An examination of natural rubber modified asphalt: Effects of rubber latex contents based on macro- and micro-observation analyses</i>	2021	Peerapong Jitsangiam, Korakod Nusit, Tanapon Phenrat, Sarayoot Kumlai, Suriyavut Pra-ai	<i>Construction and Building Materials</i>	Menginvestigasi pengaruh penambahan kadar karet alam pada aspal melalui pengujian makrostruktur dan mikrostruktur	<ul style="list-style-type: none"> • Karet alam lateks 	Kadar karet lateks 7% merupakan kadar optimal yang dapat interaksi silang dan menjembatani antara ikatan aspal dengan karet.
10	<i>Mechanical performance and global warming potential of unaged warm cup lump modified asphalt</i>	2021	Suleiman Abdulrahman, Mohd Rosli Hainin, Mohd Khairul Idham Mohd Satar, Norhidayah Abdul Hassan, Aliyu Usman	<i>Journal of Cleaner Production</i>	Mengidentifikasi kerusakan kelembaban, sifat tarik dan emisi karbon dari aspal modifikasi karet dalam aspal campuran panas dan hangat	<ul style="list-style-type: none"> • Karet padat tipis alam 	Hasil pengujian sifat tarik menunjukkan bahwa suhu pencampuran 140°C memiliki ketahanan retak yang lebih tinggi dibandingkan dengan Suhu pencampuran 180°C.

Tabel 1.2. Hasil penelusuran (*track*) penelitian aspal dan *crumb rubber*

No.	Judul Penelitian	Tahun	Peneliti	Penerbit	Tujuan Penelitian	Jenis Karet	Hasil Penelitian
1	<i>Analysis of physico-chemical properties for crumb rubber in process of asphalt modification</i>	2017	Peilong Li, Zhan Ding, Peng Zou, Anshi Sun	<i>Construction and Building Materials</i>	Menginvestigasi sifat fisik dan kimia campuran <i>crumb rubber</i> dan aspal	• <i>Crumb rubber</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Suhu yang terlalu tinggi atau terlalu lama dapat menyebabkan degradasi atau agregasi karet remah yang berlebihan serta penuaan aspal, yang akan menyebabkan kinerja aspal karet memburuk. • Kadar optimum karet dalam campuran 20%.
2	<i>Investigations on behavioral characteristics of asphalt binder with crumb rubber modification: Rheological and thermo-chemical approach</i>	2018	Veena Venudharan, Krishna Prapoorna Biligiri, Narayan Chandra Das	<i>Construction and Building Materials</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Menyelidiki perilaku reologi dan termokimia bahan pengikat aspal-karet • Mengevaluasi pengaruh berbagai parameter pada kinerja pengikat aspal karet 	• <i>Crumb rubber</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Inklusi <i>crumb rubber</i> dalam bahan pengikat aspal menurunkan penetrasi dan meningkatkan titik lembek sehingga menghasilkan bahan pengikat yang lebih kaku. • Kandungan <i>crumb rubber</i> yang lebih tinggi dan gradasi yang lebih halus menghasilkan pengikat yang lebih kaku.
3	<i>High temperature rheological characteristics of activated crumb rubber modified asphalts</i>	2019	Zixuan Chen, Jianzhong Pei, Tao Wang, Serji Amirkhanian	<i>Construction and Building Materials</i>	Menyelidiki metode pengobatan baru dampak <i>crumb rubber</i> pada kinerja reologi suhu tinggi dari pengikat yang dimodifikasi.	• <i>Crumb rubber</i>	Hasilnya menggambarkan bahwa kinerja reologi suhu tinggi pengikat karet yang diuji dalam penelitian ini meningkat.

4	<i>Modification of the dry method for mixing crumb rubber modifier with aggregate and asphalt based on the binder mix design</i>	2019	Ismail Bakheit, Huang Xiaoming	<i>Construction and Building Materials</i>	Memodifikasi metode panas dalam pencampuran <i>crumb rubber</i> pada agregat.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Crumb rubber</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nilai stabilitas Marshall yang diperoleh dari usulan metode pencampuran aspal karet ini lebih tinggi dibandingkan dengan metode kering dan basah. • Nilai kedalaman alur yang diperoleh dari usulan campuran lebih kecil dari pada campuran basah dan kering. • Pemanfaatan usulan pencampuran ini bisa mendorong untuk meningkatkan umur layan perkerasan dengan kondisi lalu lintas yang tinggi.
5	<i>The use of high content of fine crumb rubber in asphalt mixes using dry process</i>	2019	Seyed Amid Tahami, Ali Foroutan Mirhosseini, Samer Dessouky, Helge Mork, Amir Kavussi	<i>Construction and Building Materials</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mengevaluasi penggunaan serbuk <i>crumb rubber</i> berkadar tinggi sebagai pengisi dalam campuran aspal. • Memberikan pengembangan lebih lanjut dalam metode proses kering dengan mempertimbangkan efek proses pengawetan, kandungan dan ukuran <i>crumb rubber</i> yang berbeda 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Crumb rubber</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Penerapan proses curing dan <i>crumb rubber</i> yang sangat halus secara simultan dalam campuran aspal, meningkatkan ketahanan campuran aspal terhadap kegagalan. • Kinerja campuran dengan kandungan <i>crumb rubber</i> yang tinggi dapat melemah, yang dapat ditingkatkan dengan proses pengawetan.

6	<i>Impacts of recycled crumb rubber powder and natural rubber latex on the modified asphalt rheological behaviour, bonding, and resistance to shear</i>	2020	Sharvin Poovaneshvaran, Mohd Rosli Mohd Hasan, Ramadhansyah Putra Jaya	<i>Construction and Building Materials</i>	Menyelidiki reologi aspal, ikatan dan ketahanan terhadap geser dari pengikat aspal modifikasi	<ul style="list-style-type: none"> • Karet alam lateks • <i>Crumb rubber</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan kekakuan, titik melembek dan <i>torsional recovery</i> • Kadar optimum <i>crumb rubber</i> = 10% • Kadar optimum latex = 5% • <i>Crumb rubber</i> sangat bagus dalam kekuatan ikat sedangkan karet latek tahan terhadap kuat geser.
7	<i>Aging and Rheological Properties of Latex and Crumb Rubber Modified Bitumen Using Dynamic Shear Rheometer</i>	2020	Abdulnaser M Al-Sabaeei, Bayu Agus Mustofa, Muslich Hartadi Sutanto, Sri Sunarjono & Nura Bala	<i>ITB Institute for Research and Community Services</i>	Membandingkan pengaruh lateks karet alam dan <i>crumb rubber</i> terhadap karakteristik aspal konvensional dan sebelum dan sesudah penuaan.	<ul style="list-style-type: none"> • Karet alam lateks • <i>Crumb rubber</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Penambahan <i>crumb rubber</i> hingga 8% dan karet alam lateks hingga 4% dapat meningkatkan modulus kompleks dan ketahanan <i>rutting</i>.
8	<i>Microstructure analysis and mechanical performance of crumb rubber modified asphalt concrete using the dry process</i>	2020	Israel Rodríguez-Fernández, Farrokh Tarpoudi Baheri, Maria Chiara Cavalli, Moises Bueno	<i>Construction and Building Materials</i>	Mengetahui pengaruh penambahan <i>crumb rubber</i> pada campuran aspal menggunakan proses kering dengan menghubungkan sifat mekanik dengan karakterisasi mikrostruktur.	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Crumb rubber</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Karet remah terdispersi dengan baik dalam campuran aspal ketika waktu pengkondisian ditingkatkan • Dari analisis ESEM, terlihat bahwa struktur mikro berubah mendekati ikatan-ikatan pada waktu 60 menit, sedangkan untuk waktu 120 menit tidak dapat terlihat lagi.

Tabel 1.3. Posisi Penelitian

Pendekatan Penelitian	Jenis Material			
	Aspal + Karet Alam		Aspal + <i>Crumb Rubber</i> (limbah ban bekas)	Usulan Penelitian
	Lateks	Padat		Aspal + Karet Alam + <i>Crumb Rubber</i> (limbah ban bekas)
Sifat Fisik Aspal, Marshall Test	Henry Prastanto, et al (2019) Henry Siswanto (2019) Poovaneshvaran, et al (2020) Arief Ramadhan, et al (2020) Prawit Paotong, et al (2020) Al-Sabaei, et al (2020) Peerapong Jitsangiam, et al (2021)	Henry Prastanto, et al (2019) Arief Ramadhan, et al (2020)	Veena Venudharan, et al (2018) Ismail Bakheit, et al (2019) Poovaneshvaran, et al (2020) Al-Sabaei, et al (2020) Israel Rodríguez, et al (2020)	POSISI PENELITIAN : Evaluasi Perilaku Campuran Beraspal Panas dengan Karet Alam Padat dan Limbah Ban Bekas dengan Pendekatan Mekanistik dan Eksperimental
Fundamental Test: DSR, Modulus, <i>Shear</i>	Poovaneshvaran, et al (2020) Al-Sabaei, et al (2020) Wititanapanit (2021) Peerapong Jitsangiam, et al (2021)		Veena Venudharan, et al (2018) Zixuan Chen, et al (2019) Seyed Amid Tahami, et al (2019) Poovaneshvaran, et al (2020) Al-Sabaei, et al (2020)	
Kinerja <i>Fatigue</i> (Beban Berulang)			Seyed Amid Tahami, et al (2019)	
Ketahanan Deformasi (<i>rutting</i>)	Wititanapanit (2021) Peerapong Jitsangiam, et al (2021)	Abdulrahman, et al (2021)	Seyed Amid Tahami, et al (2019)	
<i>Microstructure Test</i>	Peerapong Jitsangiam, et al (2021)		Veena Venudharan, et al (2018) Al-Sabaei, et al (2020) Israel Rodríguez, et al (2020)	
				Penelitian selanjutnya: Perilaku campuran beraspal panas dengan karet alam padat dan limbah ban bekas dengan pengujian ketahanan deformasi permanen dan pengujian mikrostruktur

1.8. Keterbaruan Penelitian

Penelitian ini merupakan bagian dari pemanfaatan karet dalam campuran perkerasan lentur berdasarkan studi literatur yang telah dipelajari. Gambar 1.1 merupakan alur permasalahan penelitian yang diperoleh dari kajian studi literatur dimana material karet yang digunakan berupa karet alam padat dan limbah ban bekas. Namun untuk penggunaan kedua material tersebut dalam campuran aspal masih belum ada yang melakukannya berdasarkan hasil dari kajian studi literatur yang dilakukan. Penelitian ini juga mengacu pada beberapa peneliti terdahulu mengenai topik aspal karet yang digunakan sebagai dasar referensi dalam membuat topik penelitian yang diusulkan.

Adapun penelitian sejenis yang dijadikan sebagai acuan dalam penelitian ini:

- 1) Bakheit, I., & Xiaoming, H. (2019). *Modification of the dry method for mixing crumb rubber modifier with aggregate and asphalt based on the binder mix design*. *Construction and Building Materials*, 220, 278-284.
- 2) Poovaneshvaran, S., Hasan, M. R. M., & Jaya, R. P. (2020). *Impacts of recycled crumb rubber powder and natural rubber latex on the modified asphalt rheological behaviour, bonding, and resistance to shear*. *Construction and Building Materials*, 234, 117357.
- 3) Ramadhan, A., et al. (2020). *Development of Rubberized Asphalt Technology Based on Asphalt Cement (AC Pen 60) and Fresh Natural Rubber in Indonesia*. In *Macromolecular Symposia* (Vol. 391, No. 1, p. 2000075).
- 4) Al-Sabaei, A. M., Agus Mustofa, B., Sutanto, M. H., Sunarjono, S., & Bala, N. (2020). *Aging and Rheological Properties of Latex and Crumb Rubber Modified Bitumen Using Dynamic Shear Rheometer*. *Journal of Engineering & Technological Sciences*, 52(3).
- 5) Abdulrahman, S., Hainin, M. R., Satar, M. K. I. M., Hassan, N. A., & Usman, A. (2021). *Mechanical performance and global warming potential of unaged warm cup lump modified asphalt*. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126653.
- 6) Sugiyanto, G. (2017). *Marshall Test Characteristics of Asphalt Concrete Mixture with Scrapped Tire Rubber As A Fine Aggregate*. *Jurnal Teknologi*, 79(2).

Tabel 1.4. Persamaan dan perbedaan usulan penelitian dengan peneliti sebelumnya

Uraian	Penelitian yang diusulkan (Aspal + Karet Alam Padat + <i>Crumb Rubber</i>)	Ismail Bakheit, et al (2019) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i>)	Sharvin Poovaneshvaran, et al (2020) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i> ; Aspal + Karet Alam Cair)	Arief Ramadhan, et al (2020) (Aspal + Karet Pravulkanisasi; Aspal + Karet Alam Padat)	Abdulnaser M Al-Sabaeei, et al (2020) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i> ; Aspal + Karet Alam)	Suleiman Abdulrahman, et al (2021) (Aspal + Karet Alam Padat)	Gito Sugiyanto (2017) (Aspal + Karet substitusi agregat halus)
Judul	Evaluasi Perilaku Campuran Beraspal Panas dengan Karet Alam Padat dan Limbah Ban Bekas Dengan Pendekatan Mekanistik dan Eksperimental	<i>Modification of the dry method for mixing crumb rubber modifier with aggregate and asphalt based on the binder mix design</i>	<i>Impacts of recycled crumb rubber powder and natural rubber latex on the modified asphalt rheological behaviour, bonding, and resistance to shear</i>	<i>Development of Rubberized Asphalt Technology Based on Asphalt Cement (AC Pen 60) and Fresh Natural Rubber in Indonesia</i>	<i>Aging and Rheological Properties of Latex and Crumb Rubber Modified Bitumen Using Dynamic Shear Rheometer</i>	<i>Mechanical performance and global warming potential of unaged warm cup lump modified asphalt</i>	<i>Marshall Test Characteristics of Asphalt Concrete Mixture with Scrapped Tire Rubber As A Fine Aggregate</i>
Material	<ul style="list-style-type: none"> • Aspal pen 60-70 • Serbuk <i>Crumb rubber</i> (limbah ban bekas) • Cacahan karet alam padat • Batu pecah sebagai agregat kasar • Pasir sebagai agregat halus • Abu batu sebagai filler 	<ul style="list-style-type: none"> • Aspal pen 60/70 • <i>Crumb rubber</i> • Crushed basalt aggregate • Limestone filler 	<ul style="list-style-type: none"> • Aspal pen 60/70 • <i>Crumb rubber</i> • Latex (60% kadar kering) • Silane additive 	<ul style="list-style-type: none"> • Asphalt pen 60/70 • High ammoniated natural rubber latex • Standard Indonesian Rubber (SIR) 20, • Rubber chemicals 	<ul style="list-style-type: none"> • Aspal pen 80/100 • Natural rubber • <i>Crumb rubber</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Asphalt pen 60/70 • Granite aggregates • Cup lump (karet alam padat) 	<ul style="list-style-type: none"> • Aspal pen 60/70 • Coarse aggregate • Fine aggregate • Scrapped tire rubber • Filler: semen portland

Uraian	Penelitian yang diusulkan (Aspal + Karet Alam Padat + <i>Crumb Rubber</i>)	Ismail Bakheit, et al (2019) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i>)	Sharvin Poovaneshvaran, et al (2020) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i> ; Aspal + Karet Alam Cair)	Arief Ramadhan, et al (2020) (Aspal + Karet Pravulkanisasi; Aspal + Karet Alam Padat)	Abdulnaser M Al-Sabaeei, et al (2020) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i> ; Aspal + Karet Alam)	Suleiman Abdulrahman, et al (2021) (Aspal + Karet Alam Padat)	Gito Sugiyanto (2017) (Aspal + Karet substitusi agregat halus)
Metode Pengujian	<ul style="list-style-type: none"> Penetration Viscosity Softening point Ductility <i>Dynamic Shear Rheometer</i> (DSR) Marshall test Pengujian modulus resilien dengan metode kuat tarik tak langsung (<i>indirect tensile strength</i>) Pengujian kelelahan (<i>fatigue</i>): metode uji tarik lentur balok 4 titik 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Marshall stability testing</i> <i>Wheel tracking test</i> <i>Indirect tensile strength</i> 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Penetration test</i> <i>Softening point</i> <i>Elastic recovery test</i> <i>Torsional recovery</i> <i>Rotational viscosity</i> <i>High temperature storage stability</i> <i>Dynamic shear rheometer</i> <i>Bond Test</i> 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Penetration</i> <i>Viscosity</i> <i>Softening point</i> <i>Ductility</i> <i>Flash and fire point</i> <i>Solubility in C₂HCl₃</i> <i>Specific gravity</i> <i>Storage stability</i> <i>Elastic recovery</i> 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Rolling Thin Film Oven (RTFO) Test</i> <i>Conventional Properties Tests</i> <i>Dynamic shear rheometer (DSR) test</i> 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Indirect tensile strength</i> <i>Resilient modulus</i> <i>Dynamic creep</i> <i>Asphalt pavement analyzer</i> <i>Stripping test</i> <i>Tensile strength ratio</i> <i>Emission test</i> 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Asphalt test</i>, <i>Marshall Test.</i>
Komposisi Bahan dan Campuran	Campuran karet (100%) yang dibuat terdiri atas: 65% <i>crumb rubber</i> + 35% karet padat yang lolos saringan No. 30 (0.6 mm). Campuran karet sebagai substitusi	<i>Crumb rubber</i> 6%, 12%, 18%, dan 24% terhadap berat aspal	<ul style="list-style-type: none"> <i>Crumb rubber</i> 5%, 10% dan 15% terhadap aspal., Gradasi <i>crumb rubber</i> lolos ayakan 0.425 mm Latex 5% dan 10% terhadap aspal 	Kadar karet 7% terhadap aspal	<ul style="list-style-type: none"> <i>Crumb rubber</i> 4%, 6% dan 8% terhadap aspal <i>Natural rubber</i> 4%, 6% dan 8% terhadap aspal 	Karet alam padat dengan kadar 2.5, 5.0, 7.5, dan 10.0%	Substitusi agregat halus dengan <i>Scrapped tire rubber</i> (50% dan 100%) terhadap berat agregat halus

Uraian	Penelitian yang diusulkan (Aspal + Karet Alam Padat + <i>Crumb Rubber</i>)	Ismail Bakheit, et al (2019) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i>)	Sharvin Poovaneshvaran, et al (2020) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i> ; Aspal + Karet Alam Cair)	Arief Ramadhan, et al (2020) (Aspal + Karet Pravulkanisasi; Aspal + Karet Alam Padat)	Abdulnaser M Al-Sabaeei, et al (2020) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i> ; Aspal + Karet Alam)	Suleiman Abdulrahman, et al (2021) (Aspal + Karet Alam Padat)	Gito Sugiyanto (2017) (Aspal + Karet substitusi agregat halus)
	aspal sebesar 7% terhadap berat aspal. Substitusi agregat halus dengan karet: <i>crumb rubber</i> (50% dan 100%) dan karet alam padat (0%, 50% dan 100%)		<ul style="list-style-type: none"> Silane additive 0,1% terhadap aspal 				
Prosedur Campuran	<p>Persiapan campuran dengan memanaskan aspal sampai berubah menjadi cair seluruhnya, lalu masukan <i>crumb rubber</i> dan cacahan karet alam padat seluruhnya, dengan suhu pencampuran 175°C.</p> <p>Waktu pencampuran aspal dengan karet selama 30 menit.</p> <p>Teknik pencampuran = aspal karet dipanaskan + agregat dipanaskan kemudian dicampur.</p>	<p>Terdapat 3 metode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <i>Dry proses</i> = agregat + <i>crumb rubber</i> dipanaskan 180–190°C kemudian dicampur dengan aspal <i>Wet proses</i> = aspal + <i>crumb rubber</i> dipanaskan 180–190°C kemudian dicampur dengan agregat <i>Complex proses</i> = agregat + aspal dipanaskan 180–190°C kemudian 	<p>Aspal di panaskan lalu dimasukkan karet secara langsung sambil di aduk.</p> <p>Suhu pencampuran 160°C dengan mixer geser tinggi pada kecepatan 1000 rpm selama 30 menit.</p>	<p>Persiapan karet pravulkanisasi pada suhu 60°C selama 15 menit lalu dicampur <i>rubber chemicals</i>.</p> <p>Persiapan karet SIR 20 menggunakan alat open mill, lalu hasilnya diberikan aspal sedikit dengan bantuan alat high shear inline mixer</p> <p>Kadar karet 7% terhadap aspal</p>	<p>Pencampuran aspal dengan <i>crumb rubber</i>: Suhu pencampuran 160°C selama 1 jam dengan menggunakan mixer kecepatan 3000 rpm</p> <p>Pencampuran aspal dengan <i>natural rubber</i>: Suhu pencampuran 160°C selama 1 jam dengan menggunakan mixer kecepatan 800 rpm</p>	<p>Karet alam padat dipotong dan diayak lolos saringan 10 mm, lalu direndam dengan toluene solution selama 24 jam dengan ratio 2:1 (toluene: karet)</p> <p>Pembuatan campuran aspal dan karet alam padat dengan kadar 2.5, 5.0, 7.5, dan 10.0% pada kecepatan pengadukan 4000 rpm pada suhu pencampuran 160°C selama 2 jam</p>	<p>Pembuatan sampel Marshall untuk menentukan kadar optimum aspal dalam campuran normal dan campuran substitusi agregat halus</p>

Uraian	Penelitian yang diusulkan (Aspal + Karet Alam Padat + <i>Crumb Rubber</i>)	Ismail Bakheit, et al (2019) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i>)	Sharvin Poovaneshvaran, et al (2020) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i> ; Aspal + Karet Alam Cair)	Arief Ramadhan, et al (2020) (Aspal + Karet Pravulkanisasi; Aspal + Karet Alam Padat)	Abdulnaser M Al-Sabaeei, et al (2020) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i> ; Aspal + Karet Alam)	Suleiman Abdulrahman, et al (2021) (Aspal + Karet Alam Padat)	Gito Sugiyanto (2017) (Aspal + Karet substitusi agregat halus)
	Suhu pencampuran dan pepadatan antara aspal karet dengan agregat yaitu 175°C dan 165°C.	dicampur dengan <i>crumb rubber</i>		Campuran aspal dan karet Suhu pencampuran 150°C dan 170°C Waktu pencampuran bervariasi 1,2,3,4 dan 6 jam		Pencampuran aspal modifikasi dengan agregat untuk beberapa variasi suhu pencampuran dan suhu pepadatan: 165°C dan 145°C 180°C dan 160°C 140°C dan 130°C	
Variabel Penelitian	<ul style="list-style-type: none"> Jenis material Komposisi campuran karet terhadap aspal Komposisi karet terhadap substitusi agregat halus Teknik dan metode pencampuran 	<ul style="list-style-type: none"> Jenis material Komposisi <i>crumb rubber</i> Metode pencampuran 	<ul style="list-style-type: none"> Jenis material Komposisi campuran 	<ul style="list-style-type: none"> Jenis material Waktu pencampuran Suhu pencampuran 	<ul style="list-style-type: none"> Jenis material Komposisi campuran Teknik pencampuran 	<ul style="list-style-type: none"> Komposisi kadar karet terhadap aspal Suhu pencampuran dan pepadatan pada campuran aspal modifikasi dengan agregat 	<ul style="list-style-type: none"> Komposisi substitusi agregat halus
Hasil yang diharapkan	Penggunaan campuran karet alam padat dan <i>crumb rubber</i> mampu meningkatkan reologi aspal dan kinerja	Nilai stabilitas Marshall pada metode pencampuran Complex proses lebih tinggi dari	<i>Crumb rubber</i> sangat bagus dalam kekuatan ikat sedangkan karet latek tahan terhadap kuat geser.	Penggunaan lateks karet alam pra-vulkanisir lebih direkomendasikan dan menguntungkan daripada karet padat.	Daktilitas campuran aspal dengan <i>crumb rubber</i> berkurang sedangkan untuk campuran aspal	Hasil pengujian sifat tarik menunjukkan bahwa suhu pencampuran 140°C memiliki ketahanan retak yang lebih	Penggunaan <i>Scrapped tire rubber</i> sebagai substitusi agregat halus dalam campuran beraspal

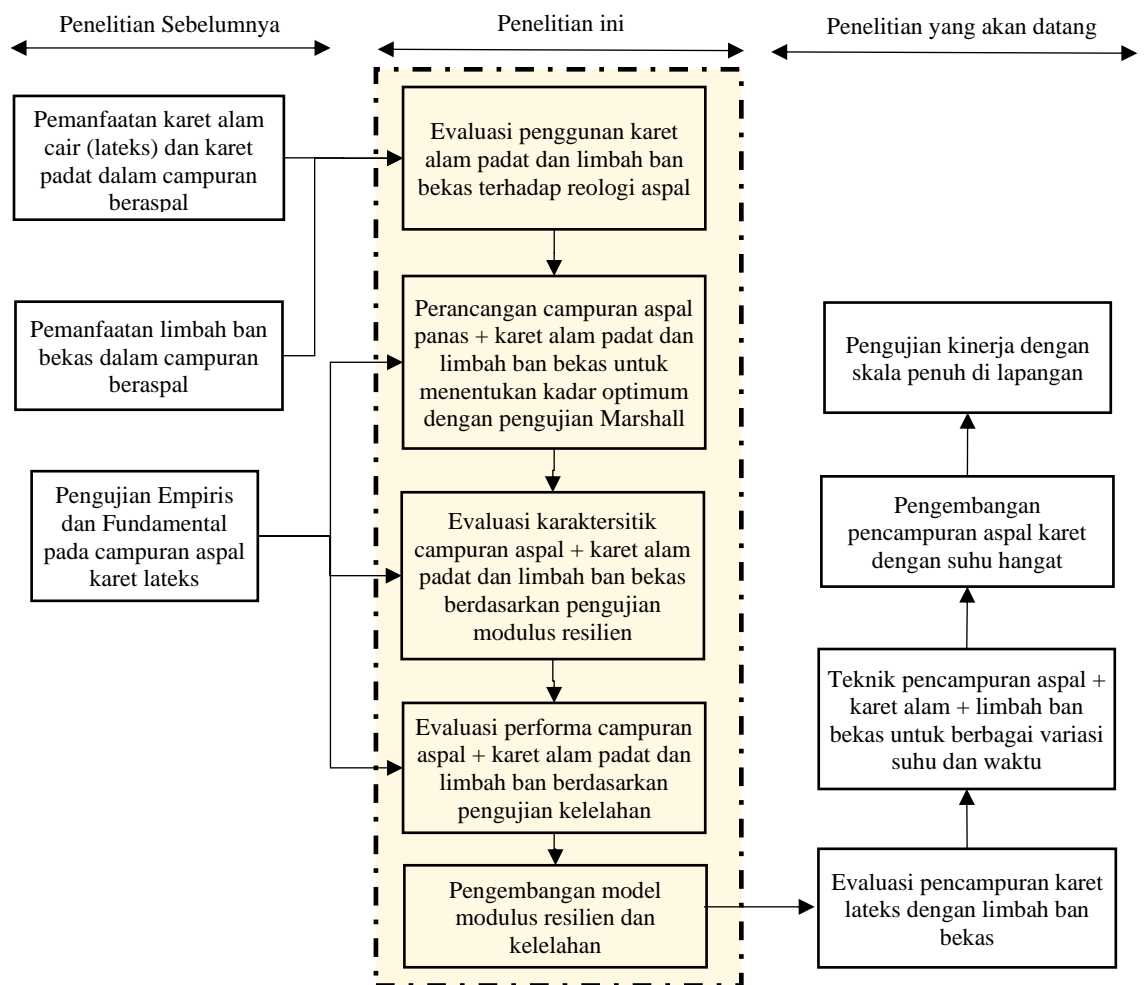
Uraian	Penelitian yang diusulkan (Aspal + Karet Alam Padat + <i>Crumb Rubber</i>)	Ismail Bakheit, et al (2019) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i>)	Sharvin Poovaneshvaran, et al (2020) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i> ; Aspal + Karet Alam Cair)	Arief Ramadhan, et al (2020) (Aspal + Karet Pravulkanisasi; Aspal + Karet Alam Padat)	Abdulnaser M Al-Sabaeei, et al (2020) (Aspal + <i>Crumb Rubber</i> ; Aspal + Karet Alam)	Suleiman Abdulrahman, et al (2021) (Aspal + Karet Alam Padat)	Gito Sugiyanto (2017) (Aspal + Karet substitusi agregat halus)
	<p>campuran beraspal panas</p> <p>Teknik dan suhu pencampuran akan mempengaruhi kinerja campuran aspal.</p> <p>Dapat dibuat model mekanistik campuran usulan</p>	<p>pada metode pencampuran dry dan wet proses.</p> <p>Kedalaman alur (<i>rut depth</i>) untuk metode Complex proses lebih rendah dari dry dan wet proses.</p>			<p>dengan natural rubber bertambah.</p> <p>Ketahanan rutting bertambah seiringan dengan peningkatan kadar <i>crumb rubber</i>, sedangkan ketahanan rutting untuk campuran aspal dengan natural rubber mengalami peningkatan sampai kadar 4%.</p>	<p>tinggi dibandingkan dengan Suhu pencampuran 180°C.</p>	<p>panas memiliki hasil yang memuaskan. Hasil pengujian Marshall untuk parameter VIM dan Flow lebih kecil dari campuran usulan jika dibandingkan dengan campuran normal.</p>

Berdasarkan Tabel 1.4, terdapat persamaan dan perbedaan dari peneliti terdahulu terkait dengan topik aspal karet terhadap penelitian yang diusulkan. Penemuan ataupun pengembangan merupakan unsur keterbaruan yang dapat bermanfaat bagi bidang ilmu pengetahuan khususnya bidang perkerasan lentur jalan. Melihat dari Tabel 1.4, maka terdapat beberapa keterbaruan yaitu:

- 1) Penggunaan bahan campuran antara **karet alam padat berbentuk cacahan dan limbah ban bekas sebagai bahan modifikasi aspal dan substitusi agregat halus** mampu memberikan dampak positif terhadap **parameter Marshall dan mekanistik** sehingga dapat mengurangi pemakaian bahan yang tak terbarukan.
- 2) Terdapat **usulan komposisi yang baru antara campuran karet alam padat dan limbah ban bekas terhadap campuran beraspal panas** yang mengacu pada Spesifikasi Aspal Karet No. 04/SE/M.2019.
- 3) Kadar campuran karet terhadap aspal diusulkan sebesar **7% dan 10% sebagai substitusi terhadap berat aspal** dimana Pedoman Aspal Karet No. 04/SE/M.2019 hanya merekomendasikan 5 – 7% sebagai bahan tambahan.
- 4) Pengujian laboratorium yang telah banyak dilakukan menggunakan pengujian empiris yaitu Marshall Test, namun dalam penelitian ini menggunakan **pengujian fundamental yaitu *dynamic shear rheometer (DSR)*, modulus resilien, dan ketahanan kelelahan**, karena masih sedikit informasi mengenai kinerja dari campuran aspal karet.
- 5) Teknik pencampuran aspal, karet dan agregat mengkombinasikan metode peneliti terdahulu yaitu **dengan cara pembuatan aspal karet terlebih dahulu dengan suhu pencampuran 175°C dan waktu pencampuran 30 menit**, kemudian baru dicampurkan dengan agregat yang dipanaskan secara terpisah.
- 6) **Pengembangan model modulus kekakuan aspal dan modulus resilien** untuk campuran beraspal panas yang mengandung karet alam padat dan limbah ban bekas sebagai dasar dalam penentuan kinerja campuran beraspal.
- 7) **Pengembangan model kelelahan campuran beraspal panas** yang mengandung karet alam padat dan limbah ban bekas dalam menentukan umur perkerasan.

- 8) Dapat diperoleh informasi **mengenai kadar optimum campuran karet** berdasarkan hasil pengujian laboratorium.

Gambar 1.2. merupakan road map penelitian yang dibuat dengan mengkaji penelitian sebelumnya berdasarkan hasil studi literatur sebelumnya. Pada penelitian ini difokuskan pada evaluasi penggunaan karet alam padat dan limbah ban bekas terhadap kinerja campuran aspal panas. Agar penelitian ini dapat sempurna, maka diperlukan penelitian lanjutan (yang akan datang) dalam melengkapi informasi dan data mengenai campuran aspal karet.



Gambar 1.2. Road map penelitian

1.9. Sistematika Penulisan

Usulan penelitian ini memiliki tahapan penulisan yang diuraikan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisikan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, dan keterbaruan dari penelitian yang diusulkan.

BAB II STUDI LITERATUR

Berisikan kajian teori yang diperoleh dari hasil telaah pustaka yang berhubungan dengan topik penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Berisikan metode dan langkah penelitian untuk mencapai tujuan yang diinginkan.

BAB IV PERILAKU FISIK DAN REOLOGI ASPAL YANG MENGGUNAKAN KARET ALAM PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS

Berisikan uraian hasil pengujian mengenai karakteristik fisik dan reologi aspal.

BAB V KARAKTERISTIK MARSHALL CAMPURAN BERASPAL PANAS AC-WC YANG MENGGUNAKAN KARET ALAM PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS

Berisikan mengenai hasil pengujian Marshall yang menggunakan karet alam padat dan limbah ban bekas.

BAB VI MODULUS RESILIEN CAMPURAN BERASPAL YANG MENGGUNAKAN KARET ALAM PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS

Berisikan mengenai hasil pengujian modulus resilien yang menggunakan karet alam padat dan limbah ban bekas.

BAB VII KETAHANAN KELELAHAN (FATIGUE) CAMPURAN BERASPAL PANAS YANG MENGGUNAKAN KARET ALAM PADAT DAN LIMBAH BAN BEKAS

Berisikan mengenai hasil pengujian fatigue yang menggunakan karet alam padat dan limbah ban bekas.

BAB VIII KESIMPULAN DAN SARAN

Berisikan uraian kesimpulan dan saran dari hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulrahman, S., Hainin, M. R., Satar, M. K. I. M., Hassan, N. A., & Usman, A. (2021). Mechanical performance and global warming potential of unaged warm cup lump modified asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126653.
- Al-Sabaei, A. M., Agus Mustofa, B., Sutanto, M. H., Sunarjono, S., & Bala, N. (2020). Aging and Rheological Properties of Latex and Crumb Rubber Modified Bitumen Using Dynamic Shear Rheometer. *Journal of Engineering & Technological Sciences*, 52(3).
- Al Qadi, A. N., Alhasanat, M. B., & Haddad, M. (2016). Effect of crumb rubber as coarse and fine aggregates on the properties of asphalt concrete. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(3), 558-564.
- Ansari, A. H., Jakarni, F. M., Muniandy, R., Hassim, S., & Elahi, Z. (2021). Natural rubber as a renewable and sustainable bio-modifier for pavement applications: A review. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125727.
- Ayuni, G. N., & Fitriyah, D. (2019). Penerapan Metode Regresi Linear Untuk Prediksi Penjualan Properti pada PT XYZ. *Jurnal telematika*, 14(2), 79-86.
- Bakheit, I., & Xiaoming, H. (2019). Modification of the dry method for mixing crumb rubber modifier with aggregate and asphalt based on the binder mix design. *Construction and Building Materials*, 220, 278-284.
- Bethary, R. T., & Intari, D. E. (2021). MODULUS RESILIEN CAMPURAN BERASPAL MODIFIKASI POLIMER AC-WC MENGGUNAKAN FILLER GYPSUM. *Jurnal Transportasi*, 21(3), 165–172-165–172.
- Bethary, R. T., Subagio, B. S., Rahman, H., & Suaryana, N. (2020). Development of asphalt mix modulus resilien model using slag materials and reclaimed asphalt pavement. *GEOMATE Journal*, 19(73), 1-7.
- Brunton, J. M. (1983). *Developments in the analytical design of asphalt pavements using computers*. University of Nottingham,
- Caroles, L. (2021). *HUBUNGAN NILAI MODULUS KEKAKUAN PADA ALAT MARSHALL TEST TERHADAP ALAT LIGHT WEIGHT DEFLECTOMETER (LWD) LABORATORIUM*. Universitas Hasanuddin,
- Chen, T., Ma, T., Huang, X., Guan, Y., Zhang, Z., & Tang, F. (2019). The performance of hot-recycling asphalt binder containing crumb rubber modified asphalt based on physiochemical and rheological measurements. *Construction and Building Materials*, 226, 83-93.
- Chen, Z., Pei, J., Wang, T., & Amirkhanian, S. (2019). High temperature rheological characteristics of activated crumb rubber modified asphalts. *Construction and Building Materials*, 194, 122-131.

- Cheng, H., Sun, L., Wang, Y., & Chen, X. (2021). Effects of actual loading waveforms on the fatigue behaviours of asphalt mixtures. *International Journal of Fatigue*, 151, 106386.
- Fithra, H. (2017). Hubungan Antara Konsistensi Perancangan, Pelaksanaan dan Pengendalian Mutu Aspal Beton Terhadap Penurunan Kinerja Jalan. In: SEFA BUMI PERSADA.
- Francken, L. (1998). *Bituminous binders and mixes*: CRC Press.
- F. Gong, W. Lin, Z. Chen, T. Shen, C. Hu. High Temperature Rheological Properties of Crumb Rubber Composite Modified Asphalt, Sustainability, Vol. 14, No. 15, 8999, 2022.
- Guo, F., Zhang, J., Pei, J., Zhou, B., Falchetto, A. C., & Hu, Z. (2020). Investigating the interaction behavior between asphalt binder and rubber in rubber asphalt by molecular dynamics simulation. *Construction and Building Materials*, 252, 118956.
- Harnaeni, S. R. (2021). *Pendekatan Kinerja Mekanistik pada Campuran Aspal Menuju Long Life Pavement*. UNS (Sebelas Maret University),
- Hasan, M. A., & Tarefder, R. A. (2018). Development of temperature zone map for mechanistic empirical (ME) pavement design. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(1), 99-111.
- Hasan, M. M., Rahman, A. A., & Tarefder, R. A. (2020). Investigation of accuracy of pavement mechanistic empirical prediction performance by incorporating Level 1 inputs. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(2), 259-268.
- Hassan, N. A., Almusawi, A. A. A., Mahmud, M. Z. H., Abdullah, N. A. M., Shukry, N. A. M., Mashros, N., ... & Yusoff, N. I. M. (2019). Engineering properties of crumb rubber modified dense-graded asphalt mixtures using dry process. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 220, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.
- Hu, M., Sun, G., Sun, D., Lu, T., Ma, J., & Deng, Y. (2021). Accelerated weathering simulation on rheological properties and chemical structure of high viscosity modified asphalt: A temperature acceleration effect analysis. *Construction and Building Materials*, 268, 121120.
- Huang, S.-C., & Di Benedetto, H. (2015). *Advances in asphalt materials: Road and pavement construction*.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (Vol. 2): Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Hunter, R. N., Self, A., Read, J., & Hobson, E. (2015). *The shell bitumen handbook* (Vol. 514): Ice Publishing London, UK:.
- Jitsangiam, P., Nusit, K., Phenrat, T., Kumlai, S., & Pra-ai, S. (2021). An examination of natural rubber modified asphalt: Effects of rubber latex contents based on macro-and micro-observation analyses. *Construction and Building Materials*, 289, 123158.

- Joshi, A. Patted, M. Archana, M. Amarnath. Determining the rheological properties of asphalt binder using dynamic shear rheometer (DSR) for selected pavement stretches, *International Journal of Research in Engineering and Technology* Vol. 11, 192-196, 2013.
- Kocak, S., & Kutay, M. (2020). Fatigue performance assessment of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using viscoelastic continuum damage analysis and AASHTOWare pavement ME design. *Construction and Building Materials*, 248, 118658.
- Lagos-Varas, M., Movilla-Quesada, D., Arenas, J., Raposeiras, A., Castro-Fresno, D., Calzada-Pérez, M., . . . Maturana, J. (2019). Study of the mechanical behavior of asphalt mixtures using fractional rheology to model their viscoelasticity. *Construction and Building Materials*, 200, 124-134.
- Li, F., Yang, Y., & Wang, L. (2020). Evaluation of physicochemical interaction between asphalt binder and mineral filler through interfacial adsorbed film thickness. *Construction and Building Materials*, 252, 119135.
- Li, Q. J., Wang, K. C., Yang, G., Zhan, J. Y., & Qiu, Y. (2019). Data needs and implementation of the Pavement ME Design. *Transportmetrica A: Transport Science*, 15(1), 135-164.
- Lv, S., Hu, L., Xia, C., Wang, X., Cabrera, M. B., Guo, S., & Chen, J. (2020). Development of fatigue damage model of asphalt mixtures based on small-scale accelerated pavement test. *Construction and Building Materials*, 260, 119930.
- Mallick, R. B., & El-Korchi, T. (2008). *Pavement engineering: principles and practice*: CRC Press.
- M. Khan, S. Kabir, M. A. Alhussain, F. F. Almansoor. Asphalt design using recycled plastic and crumb-rubber waste for sustainable pavement construction, *Procedia Engineering* Vol. 145, 1557-1564, 2016.
- Montoya, M. A., & Haddock, J. E. (2019). Estimating asphalt mixture volumetric properties using seemingly unrelated regression equations approaches. *Construction and Building Materials*, 225, 829-837.
- Paotong, P., Jaritngam, S., & Taneerananon, P. (2020). Use of Natural Rubber Latex (NRL) in Improving Properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Engineering Journal*, 24(2), 53-62.
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). *Pavement design and materials*: John Wiley & Sons.
- Poovaneshvaran, S., Hasan, M. R. M., & Jaya, R. P. (2020). Impacts of recycled crumb rubber powder and natural rubber latex on the modified asphalt rheological behaviour, bonding, and resistance to shear. *Construction and Building Materials*, 234, 117357.
- Prastanto, H., Firdaus, Y., Puspitasari, S., Ramadhan, A., & Falaah, A. F. (2019). *Study of physical characteristic of rubberized hot mix asphalt based on*

- various dosage of natural rubber latex and solid rubber*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Rahman, H., & Zega, R. T. (2018). Analisis Kesesuaian Model Modulus Aspal dan Campuran Laston Lapis Aus untuk Aspal Modifikasi Asbuton Murni. *J. Tek. Sipil ITB*, 25(1), 71-80.
- Ramadhan, A., Puspitasari, S., Prastanto, H., Falaah, A. F., Maspanger, D. R., Andriani, W., . . . Firdaus, Y. (2020). *Development of Rubberized Asphalt Technology Based on Asphalt Cement (AC Pen 60) and Fresh Natural Rubber in Indonesia*. Paper presented at the Macromolecular Symposia.
- Ramdhani, F., Rahman, H., & Subagio, B. S. (2021). *Mechanistic Rheological Evaluation of Asbuton Modified Asphalt on Modulus resilien of Asphalt*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.
- R. N. Hunter, A. Self, J. Read, E. Hobson, The shell bitumen handbook. Shell Bitumen London, UK:, 2015.
- R. T. Bethary B. S. Subagio. Rheological characteristics of reclaimed asphalt pavement (RAP) evaluation using reclamite rejuvenating material, in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, Vol. 739, No. 1, 012006: IOP Publishing.
- Rodezno, M. C., & Kaloush, K. E. (2009). Comparison of asphalt rubber and conventional mixture properties: considerations for mechanistic–empirical pavement design guide implementation. *Transportation research record*, 2126(1), 132-141.
- Rodríguez-Fernández, I., Baheri, F. T., Cavalli, M. C., Poulikakos, L. D., & Bueno, M. (2020). Microstructure analysis and mechanical performance of crumb rubber modified asphalt concrete using the dry process. *Construction and Building Materials*, 259, 119662.
- Sentosa, L., Subagio, B. S., Rahman, H., & Yamin, R. A. (2020). MODULUS RESILIEN OF WARM MIX ASPHALT (WMA) USING ASBUTON AND SYNTHETIC ZEOLITE ADDITIVES. *GEOMATE Journal*, 19(75), 107-114.
- Setyawan, A., Nugroho, S. K., Irsyad, A. M., Mutaqo, H. F., Ramadhan, P., Sumarsono, A., & Pramesti, F. P. (2018, March). The use of Crumb Rubber as Substitute of Fine Aggregate for Hot Asphalt Mixture using Polymer Modified Bitumen. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 333, No. 1, p. 012093). IOP Publishing.
- Setyoko, A. T., & Lukiawan, R. (2019). *Pengembangan Standardisasi Karet Alam Sebagai Bahan Baku Aspal Karet dan Produk Aspal Karet*. Paper presented at the Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Standardisasi.
- Singh, A. K., & Sahoo, J. P. (2020). Analysis and design of two layered flexible pavement systems: A new mechanistic approach. *Computers and Geotechnics*, 117, 103238.

- Siswanto, H. (2019). *Effect of latex to minimize the use of asphalt in asphalt concrete wearing course*. Paper presented at the Materials Science Forum.
- Souliman, M. I., & Eifert, A. (2016). Mechanistic and economical characteristics of asphalt rubber mixtures. *Advances in Civil Engineering*, 2016.
- Sugiyanto, G. (2017). Marshall test characteristics of asphalt concrete mixture with scrapped tire rubber as a fine aggregate. *Jurnal Teknologi*, 79(2).
- Tahami, S. A., Mirhosseini, A. F., Dessouky, S., Mork, H., & Kavussi, A. (2019). The use of high content of fine crumb rubber in asphalt mixes using dry process. *Construction and Building Materials*, 222, 643-653.
- Tang, N., Huang, W., & Hao, G. (2021). Effect of aging on morphology, rheology, and chemical properties of highly polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 281, 122595.
- Thom, N. (2008). *Principles of pavement engineering*: Thomas Telford London.
- Venudharan, V., Biligiri, K. P., & Das, N. C. (2018). Investigations on behavioral characteristics of asphalt binder with crumb rubber modification: Rheological and thermo-chemical approach. *Construction and Building Materials*, 181, 455-464.
- Wang, H., Zhan, S., Liu, G., & Xiang, J. (2019). The effects of asphalt migration on the flow number of asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 226, 442-448.
- Wang, X., Ren, J., Gu, X., Li, N., Tian, Z., & Chen, H. (2021). Investigation of the adhesive and cohesive properties of asphalt, mastic, and mortar in porous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 276, 122255.
- Wititanapanit, J., Carvajal-Munoz, J. S., & Airey, G. (2021). Performance-related and rheological characterisation of natural rubber modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 268, 121058.
- Wulandari, P. S., THESMAN, A., & Tjandra, D. (2019). Effect of Crumb Rubber as Fine Aggregate Replacement in Cold Mixture Asphalt. *Civil Engineering Dimension*, 21(2), 107-112.
- Yourong, T., Zhang, H., Cao, D., Xia, L., Du, R., Shi, Z., . . . Wang, X. (2019). Study on cohesion and adhesion of high-viscosity modified asphalt. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(4), 394-402.
- Zheng, W., Wang, H., Chen, Y., Ji, J., You, Z., & Zhang, Y. (2021). A review on compatibility between crumb rubber and asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 297, 123820.
- Zhu, J., Ahmed, A., Said, S., Dinegdae, Y., & Lu, X. (2022). Experimental analysis and predictive modelling of linear viscoelastic response of asphalt mixture under dynamic shear loading. *Construction and Building Materials*, 328, 127095.