



Imam Aschuri

Aspal Modifikasi dengan Limbah Plastik dan Kinerjanya



ASPAL MODIFIKASI DENGAN LIMBAH PLASTIK DAN KINERJANYA

Oleh:
Imam Aschuri

Cetakan 1, 2019

Hak Cipta dilindungi undang-undang
©2019, Penerbit Itenas

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit

Hak Cipta pada Penerbit Itenas, 2019

Aspal Modifikasi dengan Limbah Plastik dan Kinerjanya / Oleh [Imam Aschuri](#).-
Cet. 1.-

Bandung: Penerbit Itenas, 2019.
85 hlm.; 25,7 cm.

1. Tajuk Subjek.
I. Imam Aschuri II. Judul

625.761

ISBN: 978-602-53531-5-4

Penerbit Itenas,
Jl. PKH. Mustopha No.23 Bandung
Telp.: +62 22 7272215, Fax: +62 22 7202892
Email: penerbit@itenas.ac.id

KATA PENGANTAR



Segala puji bagi Allah yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang telah memberikan kesempatan dan kemampuan, sehingga buku “Aspal Modifikasi dengan Limbah Plastik dan Kinerjanya” sebagai bagian bahan ajar Mata Kuliah Material Perkerasan Jalan dapat diselesaikan. Buku ini dapat memberikan gambaran, pengetahuan dan pemahaman kepada masyarakat akademik tentang permasalahan limbah plastik yang ada di Indonesia, pemanfaatan limbah plastik, khususnya tipe HDPE (High Density Polyethylene) sebagai bahan tambah pada aspal modifikasi, sifat-sifat aspal modifikasi, kinerja pemanfaatan aspal modifikasi pada campuran beraspal di laboratorium. Penyusunan Buku ini merupakan hasil penelitian yang dibiayai oleh Kemenristekdikti melalui hibah penelitian dengan skema Hibah Kompetensi.

Besar harapan kami, buku ini dapat memberikan pengetahuan dan juga menjadi salah satu acuan dalam penerapan teknologi campuran beraspal menggunakan limbah plastik. Buku ini juga diharapkan dapat menambah wawasan baru dan memperluas cakrawala bahwa limbah plastik masih dapat memberikan manfaat jika dikelola dengan baik.

Akhir kata kami menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang bekerjasama dan membantu sehingga buku ini terwujud dan juga penulis menyadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu tanggapan, komentar, kritik, saran dan klarifikasi dari pembaca akan semakin memperkuat dan menyempurnakan buku ini serta menambah khazanah dalam pemanfaatan limbah plastik. Semoga buku ini dapat bermanfaat dalam pengembangan aspal modifikasi menggunakan limbah sebagai salah satu upaya dalam pengembangan infrastruktur yang berkelanjutan ke depan

Bandung, Februari 2019

Imam Aschuri

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR NOTASI	vii
1 PENDAHULUAN	1
1.1. Overview Kondisi Jaringan Jalan di Indonesia	1
1.2 Permasalahan Konstruksi Jalan dan Limbah Plastik.....	2
1.3 Potensial Limbah Plastik untuk Konstruksi Jalan.....	4
2 ASPAL MODIFIKASI	7
2.1 Pendahuluan	7
2.2 Bitumen Modifikasi	7
2.3 Jenis-jenis Bahan Modifikasi	10
2.3.1. Polimer	12
2.3.2. <i>Filler</i>	15
2.3.3. Bitumen Alami.....	16
2.3.4. Fiber	17
2.4 Penggunaan Material Limbah pada Konstruksi jalan di Indonesia	17
2.5 Hubungan Sifat Aspal dengan Kinerja Campuran	19
3 KARAKTERISTIK CAMPURAN BERASPAL	21
3.1 Karakteristik Campuran Beraspal	21
3.2 Modulus Kekakuan dari Campuran Beraspal	23
3.2.1. Perkiraan Kekakuan Campuran	24
3.2.2. Metode Pengujian Laboratorium	28
3.3 Deformasi Permanen	31
3.3.1. Mekanisme Deformasi Permanen	31
3.3.2. Faktor-faktor yang mempengaruhi Deformasi Permanen	33
3.3.3. Metode Evaluasi untuk Menilai Deformasi Permanen	38
3.4 Umur Kelelahan (<i>fatigue life</i>)	41
3.4.1. Mekanisme retakan	40
3.4.2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Retak Akibat Kelelahan	42
3.4.3. Penilaian Umur Kelelahan di Laboratorium	47
3.5 Durabilitas Campuran	53
3.5.1. Kepekaan Terhadap Air	53
3.6 Percobaan Cantabro untuk Memprediksi Nilai Disintegrasi Campuran ..	55

4 KARAKTERISTIK MATERIAL PERKERASAN JALAN	57
4.1 Karakteristik Agregat	57
4.2 Karakteristik Aspal	57
4.2.1. Penetrasi	58
4.2.2. Titik Lembek	60
4.2.3 Daktilitas	62
4.2.4 Berat Jenis	63
4.2.5 Viskositas Kinematik	64
4.2.6 Kehilangan Berat dengan RTFOT	65
5.2.7 Penetrasi setelah Kehilangan Berat	66
5 KINERJA CAMPURAN BERASPAL	70
5.1 Marshall Test	70
5.2. Indirect Tensile Strength.....	73
5.3 Indirect Tensile Stiffness Modulus	74
5.3.1 Pendahuluan	74
5.3.2 Metodologi	76
5.3.3 Hasil dan Pembahasan	77
5.4 Durabilitas Campuran Beraspal	79
5.4.1 Metodologi Pengujian	80
5.4.2 Persiapan Sample untuk Pungujian Durabilitas	80
5.4.3 Kerentanan Terhadap Pengaruh Air Berdasarkan Stabilitas Marshall	80
5.4.4 Kerentanan Terhadap Pengaruh Air Menggunakan ITSM	81
5.4.5 Disintegrasi Campuran dengan Uji Cantabro	81
5.4.6 Hasil dan Diskusi	82
5.4.7 Data dan Diskusi Disintegrasi Campuran Cantabro	85

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Contoh Tipikal Kendaraan dan Kondisi Jalan di Ruas Jalan Nasional	2
Gambar 2.1.	Kebutuhan Campuran modifikasi pada tempat yang bermasalah dan memiliki intensitas lalu lintas yang tinggi	8
Gambar 2.2.	Korelasi utama antara titik lembek polimer modifikasi bitumen dan kandungan polimer	13
Gambar 3.1.	Konstruksi perkerasan lentur	21
Gambar 3.2.	Nomogram untuk memprediksi kekakuan campuran	26
Gambar 3.3.	Peralatan uji modulus Kekakuan Tegangan Tak Langsung	29
Gambar 3.4.	Hubungan Temperatur dengan Poisson's Ratio (μ)	30
Gambar 3.5.	Bidang alur hasil densifikasi	32
Gambar 3.6.	Bidang alur hasil plastic flow	33
Gambar 3.7.	Tegangan dan tekanan pada permukaan akibat lalu lintas	34
Gambar 3.8.	Kehilangan VIM akibat kompaksi kedua karena lalu lintas	34
Gambar 3.9.	Pengaruh kandungan bitumen pada sifat-sifat campuran	35
Gambar 3.10	Pengaruh bentuk agregat pada sifat-sifat campuran	37
Gambar 3.11	Kekakuan campuran sebagai fungsi dari temperatur atau waktu pembebangan	38
Gambar 3.12	Permulaan dan perkembangan retak	41
Gambar 3.13	Nomogram untuk memprediksi kelelahan laboratorium	44
Gambar 3.14	Contoh pola pembebangan	45
Gambar 3.15	Pengaruh temperatur pada kekakuan dan tegangan tarik	47
Gambar 3.16	Perilaku kelelahan dibawah pengaruh cara tegangan terkontrol	49
Gambar 3.17	Diagram kelelahan untuk cara tegangan terkontrol	49
Gambar 3.18	Perilaku kelelahan pada pengaruh cara tegangan terkontrol	50
Gambar 3.19	Diagram kelelahan pada cara tegangan terkontrol	51
Gambar 4.1	Hubungan Angka penetrasi dengan kadar plastik	59
Gambar 4.2	Hubungan PI dengan kadar plastik	60
Gambar 4.3	Hubungan Titik lembek dengan kadar plastik	61
Gambar 4.4	Hubungan Daktilitas dengan kadar plastik	62
Gambar 4.5	Hubungan Berat Jenis dengan kadar plastik	63
Gambar 4.6	Hubungan viskositas kinematik dengan kadar plastik	64
Gambar 4.7	Hubungan kehilangan berat dengan kadar plastik	65
Gambar 4.8	Hubungan angka penetrasi setelah kehilangan berat dengan kadar plastik	67
Gambar 5.1	Nilai VIM pada Aspal Modifikasi	70
Gambar 5.2	Nilai VMA pada Aspal Modifikasi	71
Gambar 5.3	Nilai VFA pada Aspal Modifikasi	71
Gambar 5.4	Nilai Flow pada Aspal Modifikasi	72
Gambar 5.5	Nilai Stabilitas pada Aspal Modifikasi	72
Gambar 5.6	Grafik ITS pada Aspal Modifikasi	73
Gambar 5.7.	Tegangan kritis dan regangan kritis pada perkerasan lentur	75

Gambar 5.8.	Penyebaran Beban pada Lapisan Perkerasan (a) Material 1 dengan Modulus Kekakuan Rendah (b) Material 2 dengan Modulus Kekakuan Tinggi	76
Gambar 5.9	Pengaruh uji temperatur pada Modulus Kekuan	78
Gambar 5.10	Hubungan antara Modulus Kekakuan Bitumen dan Modulus Kekakuan Campuran	79
Gambar 5.12	Perubahan Modulus Kekakuan Campuran dalam Perendaman dengan suhu 25°C	84
Gambar 5.13	Perubahan Modulus Kekakuan Campuran yang didapatkan dalam Perendaman dengan suhu 25°C	84
Gambar 5.14	Contoh benda uji sebelum dan setelah pengujian Cantabro	85
Gambar 5.15	Perubahan dalam kehilangan Cantabro dengan peningkatan jumlah rotasi	85

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Kondisi Jaringan Jalan di Indonesia pada Tahun 2002 (diluar toll roads)	1
Tabel 2.1 Jenis-jenis umum dan contoh-contoh dari bahan modifikasi	11
Tabel 2.2 Kesimpulan dari keuntungan potensial menggunakan bahan modifikasi .	12
Tabel 2.3 Klasifikasi jenis-jenis polimer	13
Tabel 2.4 Jenis utama dari sisa daur ulang yang digunakan pada konstruksi perkerasan di Indonesia	18
Tabel 2.5 Matriks Hubungan Sifat Aspal dengan Kinerja Campuran	20
Tabel 3.1 Persyaratan jalur kendaraan untuk kondisi lalu lintas yang berbeda	40
Tabel 3.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi kekakuan dan kelelahan pada campuran beton aspal	43
Tabel 3.3 Pengaruh bentuk gelombang pada umur kelelahan	46
Tabel 3.4 Kesimpulan dari beberapa faktor yang mempengaruhi tegangan terkontrol	52
Tabel 3.5 Definisi dari perpotongan campuran.....	53
Tabel 3.6 Rangkuman dari <i>moisture susceptibility test methods</i>	55
Tabel 4.1 Berat Jenis Agregat Kasar	57
Tabel 4.2 Berat Jenis Agregat Halus dan <i>Filler</i>	57
Tabel 4.3 Tabel Penetrasi	58
Tabel 4.5 Titik Lembek	61
Tabel 4.6 Daktilitas	62
Tabel 4.7 Berat Jenis	63
Tabel 4.8 Viskositas kinematik.....	64
Tabel 4.9 Kehilangan berat setelah RTFOT	65
Tabel 4.10 Penetrasi setelah Kehilangan Berat RTFOT	66
Tabel 5.1 Rangkuman dari Modulus Kekakuan Rata-Rata pada Campuran Beraspal	77
Tabel 5.2 Rincian dan Stabilitas Kerentanan Terhadap Kelembaban	82
Tabel 5.3 Perubahan Modulus Kekakuan Campuran dalam perendaman	83
Tabel 5.4 Perubahan Modulus Kekakuan Campuran yang dalam perendaman	83
Tabel 5.5 Analisis regresi antara hari perendaman days soaking (DS) dan Retained Mix Stiffnes (RMS)	85

DAFTAR NOTASI

AASHO	American Association of State Highway Officials
AC	Asphalt Concrete
ACM	Asphalt Concrete using Modified Bitumen
ACR30	Asphalt Concrete containing RAP 30%
ACR60	Asphalt Concrete containing RAP 60%
ACUM	Asphalt Concrete using Unmodified Bitumen
AIV	Aggregate Impact Value
ASTM	American Standard for Testing and Materials
BISAR	Bitumen Stress Analysis in Roads
BS EN	British Standard or Euro Norm
BSI	British Standard Institution
CKE	California Kerosene Equivalent
DBM	Dense Bitumen Macadam
DGH	Directorate General of Highways
EBA	Ethylene Butyl Acrylate
EMA	Ethylene Methyl Acrylate
EPDM	Ethylene-propylene-Diene Terpolymer
EPDM	Ethylene-Propylene-Diene Terpolymer
EVA	Ethylene Vinyl Acetate
EVA	Ethylene-Vinyl-Acetate
FA	Fly Ash
FHWA	Federal Highway Administration
HD	Highway Design
HDPE	high-density polyethylene
HL	Hydrated Lime
HMA	Hot Mix Asphalt
HRA	Hot Rolled Asphalt
IIR	Isobutene-Isoprene Copolymer
ITFT	Indirect Tensile Fatigue Test
ITSM	Indirect Tensile Stiffness Modulus
LDPE	Low-Density Polyethylene
LVDT	linier variable displacement transducers
MMAT	Mean Monthly Air Temperature
MMPT	Monthly Mean Pavement Temperature
MQ	Marshall Quotient
MS	Marshall Stability
NAT	Nottingham Asphalt Tester
NCHRP	National Cooperation Highway Research Program
NI	Northern Ireland
PBD	Polybutadiene

PE	Polyethylene
Pen	Penetration
PI	Penetration Index
PLI	Particle Loss Index
PP	Polypropylene
PRMS	Percentage of Retained Mix Stiffness
PS	Permanent Strain
PSR	Permanent Strain Rate
PVC	Polyvinylchloride
R&B	Ring and Ball
RAB	Refined Asphalt Buton
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RD	Rut Depth
RDP	Rut Depth Prediction
RLAT	Repeated Load Axial Test
RLAT	Repeated Load Axial Test
RN	Road Note
SBR	Styrene-Butadiene Rubber
SBS	Styrene-Butadiene-Block Copolymer
SD	Deviation Standard
SEBS	Styrene-Ethylene-Butadiene-Styrene Block Copolymer
SHW	Specification for Highway Works
SIS	Styrene-Isoprene-Styrene Block Copolymer
SMA	Stone Mastic Asphalt
SP	Softening Point
STR	Scrapped Tire Rubber
TAI	The Asphalt Institute
TFV	Ten Percent Fine Value
TLA	Trinidad Lake Asphalt
TR	Tracking Rate
TRB	Transport Research Boar
TRL	Transport Research Laboratory
TRRL	Transport and Road Research Laboratory
UK	United Kingdom
USA	United State of America
Va	Air Void
VEROAD	Visco-Elastic. Road Analysis Delft
VMA	Void in Mix Aggregate
WB	World Bank
W-MAAT	Weighted-Mean Annual Air Temperature
WT	Wheel Tracking
WTR	Wheel Tracking Rate

x

1 PENDAHULUAN

1.1. Overview Kondisi Jaringan Jalan di Indonesia

Jalan merupakan infrastruktur yang sangat penting untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi suatu negara, meningkatkan aksesibilitas untuk pengembangan wilayah dan kelancaran distribusi barang dan jasa serta penanggulangan bencana alam. Hal ini sesuai dengan visi Kementerian Pekerjaan Umum yaitu Tersedianya infrastruktur Pekerjaan Umum dan Permukiman yang andal untuk mendukung Indonesia Sejahtera 2025 dan memiliki misi yang salah satunya yaitu meningkatkan aksesibilitas dan mobilitas wilayah dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat dengan penyediaan jaringan jalan yang andal, terpadu dan berkelanjutan, dimana salah satu dari sasaran yang ingin dicapai adalah meningkatnya kuantitas dan kualitas penggunaan jalan melalui preservasi dan peningkatan kapasitas jalan. Hal ini ditunjukkan kondisi jaringan jalan di Indonesia seperti pada **Tabel 1.1**.

Tabel 1.1. Kondisi Jaringan Jalan di Indonesia pada Tahun 2017

Status Jalan	Panjang (Km)	Kemantapan Jalan (%)	Kewenangan
Jalan Nasional	47.000 (Non Toll Road)	89,91	Pemerintah Pusat
	950 (Toll Road)		
Jalan Propinsi	46.500	70,99	Pemerintah Propinsi
Jalan Kabupaten	389400	57,01	Pemerintah Kabupaten/Kota
Total	483.700		

Sumber: Direktorat Preservasi, Dirjen Binamarga, PUPR 2017

Indonesia memiliki jaringan jalan terpanjang di ASEAN yang terdiri atas 9,9% jalan nasional, 9,6% jalan provinsi, dan 80,5% jalan kabupaten. Pada Tabel 1 menunjukkan bahwa jalan nasional melayani jaringan jalan arteri primer dan secara umum dalam kondisi baik, sedangkan jalan provinsi dan kabupaten sebagian besar dalam kondisi rusak yang memberatkan jaringan jalan secara keseluruhan.

Hasil studi dari Dikun (2003) menunjukkan bahwa faktor penyebab utama kerusakan jalan di Indonesia diakibatkan oleh beban lalu-lintas berat dan padat seperti terlihat pada **Gambar 1**; kondisi lingkungan seperti temperatur dan banjir; dan alokasi biaya perawatan jalan sangat terbatas. Dampak dari kondisi tersebut mengakibatkan biaya pengguna jalan makin tinggi, kemacetan, harga satuan material/barang meningkat dan pengembangan ekonomi terhambat.

Studi terdahulu juga menunjukkan bahwa komposisi kendaraan berat dibanding dari jumlah total trafik di jalan-jalan utama seperti di jalan nasional dan propinsi dapat mencapai 50%. Dampak beban kendaraan berat tersebut, pengaruh air dan temperatur pada perkerasan jalan yang

suhunya mencapai hampir 55°C mengakibatkan struktur perkerasan jalan mengalami kerusakan, terutama jenis kerusakannya adalah permanent deformation (Dardak et al, 1992).



Gambar 1.1. Contoh Tipikal Kendaraan dan Kondisi Jalan di Ruas Jalan Nasional

1.2. Permasalahan Konstruksi Jalan dan Limbah Plastik

Akhir-akhir ini pemerintah direpotkan dengan urusan infrastruktur jalan yang dikeluhkan oleh banyak pihak karena selalu rusak, bahkan permasalahan ini menjadi berita utama atau headline di media cetak dan televisi. Jalan rusak merupakan faktor utama dari ketidaklancaran distribusi barang dan manusia yang mempunyai dampak harga-harga aneka komoditas naik dan terhambatnya pertumbuhan ekonomi nasional, bahkan prosentase kecelakaan lalu lintas akibat jalan rusak juga meningkat.

Hasil survei dan kajian yang dilakukan Departemen Pekerjaan Umum menunjukkan bahwa penyebab utama dari kerusakan jalan adalah beban muatan kendaraan yang tak terkendali dan banjir, hampir 44% kerusakan jalan akibat pengaruh air, khususnya kerusakan jalan di jalur Pantai Utara Jawa (Pantura) dan Jalur Lintas Timur Sumatera (Jalintim). Dengan kondisi seperti itu, Departemen Pekerjaan Umum memperkirakan biaya perbaikan jalan sedikitnya dibutuhkan Rp. 10 Triliun.

Tak hanya di berbagai daerah, jalan rusak juga terjadi di jalan-jalan protokol di Jakarta. Seperti Jalan Yos Sudarso, Jakarta Utara, yang merupakan jalur utama menuju ke Pelabuhan Tanjungpriok. Kondisi ini bukan hanya mengganggu pengguna jalan, tapi sudah meresahkan dunia usaha dan membuat pengusaha mengeluh, contohnya pengusaha sudah rugi Rp 2,4 miliar per hari sebab waktu tempuh jauh lebih lama.

Permasalahan kerusakan jalan nasional sepertinya tidak pernah selesai setiap tahun. Berdasarkan kondisi tersebut, kemudian timbul pertanyaan berikutnya, apakah kondisi seperti ini dapat dikatakan **sustainable**? Khususnya di bidang material perkerasan jalan.

Aspal adalah bahan pengikat di campuran beraspal dan merupakan faktor utama yang mempengaruhi kinerja campuran beraspal (Robert et.al, 1996; Woodside et.al, 2001). Salah satu cara mengurangi atau mencegah terjadinya kerusakan dini pada perkerasan jalan akibat beban muatan kendaraan berlebih dan pengaruh air seperti banjir adalah dengan memperbaiki/menaikkan mutu material perkerasan jalan seperti aspal sebagai bahan pengikat dan agregat. Cara yang sering digunakan untuk menaikkan mutu aspal adalah dengan menambah bahan aditif, salah satunya seperti polimer atau yang dikenal dengan aspal modifikasi. Sampai saat ini, Indonesia masih mengimport aspal modifikasi dengan polimer dari luar negeri, sehingga biaya produksi campuran beraspal untuk perkerasan jalan menjadi tinggi. Hal ini akan membebani anggaran pembiayaan negara, khususnya untuk pengembangan sistem transportasi darat di Indonesia.

Penggunaan plastik di Indonesia setiap tahunnya meningkat sekitar 2 juta ton pertahun. Hasil studi oleh Teknik Lingkungan ITB pada tahun 2005 menunjukkan bahwa limbah plastik yang dihasilkan oleh penduduk Jakarta kurang lebih 8% dari 6000 ton sampah. Apabila sebagian jenis limbah plastik dapat digunakan sebagai bahan aditif untuk meningkatkan mutu aspal dan substitusi agregat, maka pemanfaatan limbah plastik pada perkerasan jalan merupakan cara yang inovatif untuk pengembangan material perkerasan jalan yang murah dan menanggulangi permasalahan limbah/masalah lingkungan.

Studi terdahulu menunjukkan bahwa pemanfaatan plastik 1,5% s.d 4% sebagai bahan aditif untuk modifikasi aspal (*polymer modified bitumen*) dapat meningkatkan mutu aspal dan campuran beraspal, seperti kepekaan aspal terhadap suhu menjadi rendah, ketahanan terhadap pengaruh air menjadi tinggi, ketahanan terhadap deformasi dan retak dini juga meningkat (Aschuri, 2007; Ali, 1996; Panda, 2002; Palit, 2004).

Dari keberhasilan hasil studi sebelumnya, maka perlu dilakukan studi laboratorium terhadap durabilitas dan kinerja campuran beraspal dengan memanfaatkan limbah plastik sebagai bahan aditif dan aplikasinya di lapangan pada ruas jalan yang muatan kendaraannya berat dan padat di daerah yang banjir.

1.3. Potensial Limbah Plastik untuk Konstruksi Jalan

Limbah plastik ini cukup potensial untuk diteliti, mengingat produksinya yang cukup tinggi dan pemanfaatannya yang masih sangat terbatas khususnya di bidang pengembangan material perkerasan jalan

Untuk menanggulangi permasalahan konstruksi jalan akibat muatan kendaraan berlebih dan permasalahan lingkungan dengan biaya lebih murah, dapat memanfaatkan limbah plastik untuk

meningkatkan mutu aspal, durabilitas dan kinerja campuran beraspal serta aplikasi di lapangan sebagai upaya menanggulangi permasalahan muatan kendaraan berlebih dan permasalahan lingkungan dengan biaya lebih murah.

Hampir 90% jenis perkerasan jalan di Indonesia menggunakan campuran beraspal atau *flexible pavement*. Kerusakan jalan di Indonesia tidak saja disebabkan oleh tingginya volume dan tonase lalu lintas tetapi juga disebabkan oleh pengaruh air serta penuaan aspal yang diakibatkan oleh faktor lingkungan; cuaca dan temperatur. Kerusakan dini yang disebabkan oleh kombinasi beban lalu lintas dengan faktor lingkungan dapat berupa alur, gelombang, deformasi plastis dan retak. Untuk menanggulangi atau meminimasi potensi kerusakan dini sebelum umur pelayanan jalan dicapai, maka perlu dilakukan beberapa usaha yang salah satunya adalah meningkatkan mutu aspal yang digunakan. Sementara itu, aspal dengan mutu tinggi untuk kebutuhan konstruksi jalan seperti penggunaan aspal yang telah dimodifikasi dengan polimer masih tergantung dari luar negeri yang tentunya mengakibatkan biaya aspalnya menjadi lebih mahal.

Melihat kenyataan ini, maka upaya lain yang dapat dilakukan adalah mereduksi penggunaan aspal mutu tinggi yang selalu diimpor dari luar negeri dengan pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan aditif aspal tanpa mengurangi kekuatan/kinerja campuran beraspal atau bahkan meningkatkan kinerja campuran beraspal. Saat ini telah banyak dipasarkan bahan-bahan tambahan yang dapat meningkatkan kinerja campuran beraspal. Akan tetapi masalahnya adalah harga bahan-bahan ini yang relatif masih mahal dibandingkan dengan harga aspalnya sendiri, sehingga tidak banyak digunakan oleh penyedia konstruksi. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya pencarian bahan alternatif yang murah untuk memodifikasi aspal.

Limbah rumah tangga dan industri yang dapat digunakan sebagai bahan tambahan campuran beraspal dan sebagai bahan *additive* aspal adalah limbah plastik yang bersifat lebih kaku pada saat temperatur tinggi dan lebih lunak pada saat temperatur rendah dibandingkan aspal.

Salah satu upaya pencarian bahan pengganti bahan tambahan pada aspal seperti polimer yang sering digunakan pada saat ini. Pemilihan limbah plastik sebagai bahan yang akan diteliti didasarkan atas hasil penelitian-penelitian sebelumnya yang menunjukkan perbaikan mutu aspal dan kinerja campuran beraspal. Berdasarkan uraian tersebut di atas, maka manfaat (out come) penggunaan limbah plastic sebagai modifier antara lain adalah :

- Untuk mendapatkan material alternatif yang dapat digunakan untuk meningkatkan mutu aspal dan kinerja campuran beraspal.
- Menunjang program pembangunan berwawasan lingkungan, yaitu dengan memanfaatkan kembali limbah rumah tangga atau industri, dalam hal ini limbah plastik yang sampai saat ini belum termanfaatkan dengan baik khususnya di bidang konstruksi jalan
- Memberikan alternatif pemecahan masalah ketergantungan aspal mutu tinggi dari luar negeri dan biayanya masih relatif mahal.

Sehingga dampaknya adalah sebagai berikut:

- Diperkirakan perkerasan jalan akan menjadi lebih tahan terhadap beban lalu lintas berat dan padat serta tahan terhadap pengaruh air dibandingkan dengan perkerasan jalan konvensional
- Menghasilkan aspal modifikasi yang lebih murah karena memanfaatkan limbah plastik yang harganya lebih murah dibandingkan import polimer.
- Menghasilkan campuran beraspal yang berwawasan lingkungan dan mengembangkan material perkerasan yang berkesinambungan (*sustainability in road pavement material*).

2 ASPAL MODIFIKASI

2.1. Pendahuluan

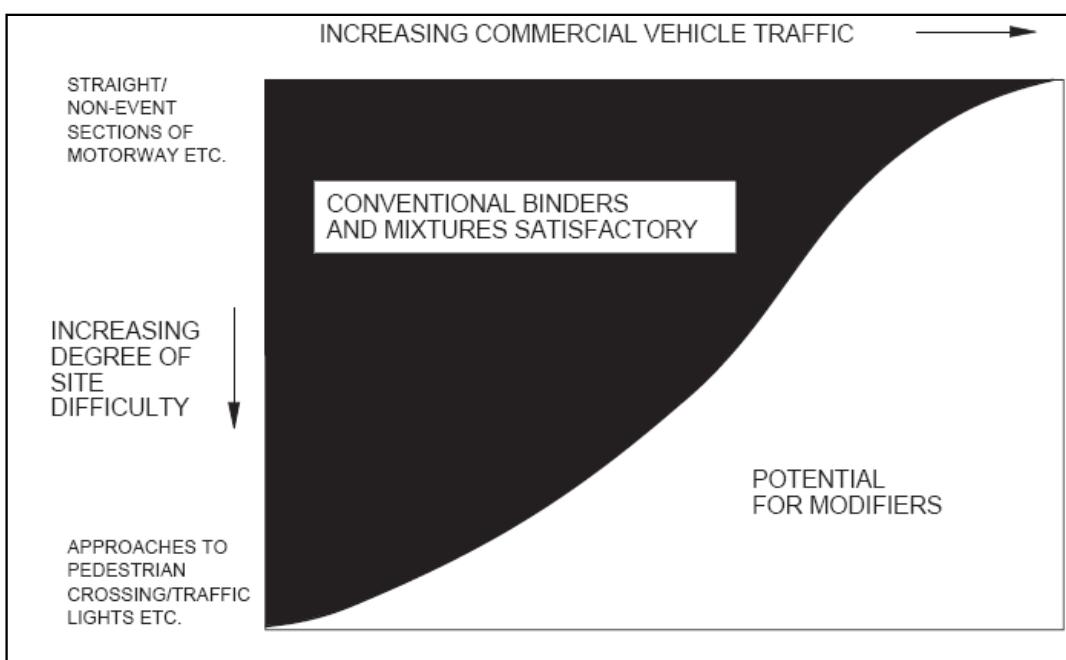
Aspal merupakan bahan yang viscoelastik dimana sangat tergantung pada temperatur, apabila temperatur rendah akan bersifat semi padat dan sebaliknya pada temperatur tinggi akan berupa cair. Penggunaan aspal sebagai material perkerasan jalan pada lokasi yang mempunyai temperatur yang tinggi seperti Indonesia, maka diperlukan aspal yang mempunyai sifat kepekaan terhadap temperatur yang rendah, sehingga perkerasan tidak mudah menjadi lunak pada temperatur tinggi yang pada akhirnya dapat menyebabkan terjadinya kerusakan berupa permanen deformasi.

Masalah ini dapat ditanggulangi dengan memodifikasi aspal dengan menaikkan titik lembek dan Indeks Penetrasi serta modulus kekakuan (*stiffness modulus*) yang cukup untuk menaggulangi permasalahan tersebut. Bab ini adalah tinjauan pustaka yang berkaitan dengan modifikasi bitumen, dan memprediksi sifat-sifat dari campuran beraspal.

2.2. Bitumen Modifikasi

Bitumen yang dimodifikasi pada dasarnya adalah sebuah campuran dari aspal penetrasi dan beberapa jenis bahan aditif. Bitumen ini dapat memberikan manfaat yang sangat nyata terhadap konstruksi jalan dan pada saat pemeliharaannya. Ada beberapa alasan mengapa bitumen ini menjadi sangat populer (Roberts et al, 1996):

- Meningkatnya tuntutan pada perkerasan jalan – volume lalu lintas, beban dan tekanan ban meningkat dengan besar yang menyebabkan meningkatnya bekas roda (*rutting*) dan retak (*cracking*) pada jalan. **Gambar 2.1** menunjukkan bahwa bitumen yang dimodifikasi kemungkinan diperlukan pada kondisi-kondisi tersebut.
- Memenuhi kebutuhan spesifikasi aspal yang tinggi sebagai bahan pengikat seperti *Superpave* – yang dikembangkan di tahun 1990 dan memerlukan bitumen untuk mendapatkan persyaratan kekakuan pada temperatur tinggi maupun pada temperatur rendah. Pada daerah yang memiliki kondisi iklim yang ekstrim, tidak akan mungkin dilakukan tanpa modifikasi bahan pengikat bitumen.
- Masalah lingkungan hidup dan ekonomi – kedua hal ini mendorong terjadinya pemakaian ulang material limbah dan produk-produk hasil industri seperti ban-ban, sirap atap, kaca dan abu. Biasanya industri-industri menggunakan bahan aditif pada *Hot Mix Asphalt* (HMA) ketika ingin mendapatkan keuntungan dari produk terakhir tanpa menciptakan kerusakan terhadap lingkungan.
- Keinginan agen publik untuk menggunakan bahan *aditif asphalt - modified* bitumen biasanya mengeluarkan dana yang lebih besar tapi seharusnya dapat memberikan pelayanan umur rencana yang lebih panjang dengan pemeliharaan yang lebih kecil.



Gambar 2.1. Kebutuhan campuran modifikasi pada tempat yang bermasalah dan memiliki intensitas lalu lintas yang tinggi (HD 37/99, 1999)

Ketika *modifiers* dicampur atau ditambahkan pada bitumen, bahan-bahan dari bitumen modifikasi tergantung pada beberapa komponen, yaitu sebagai berikut:

- Sifat-sifat dari bahan modifikasi.
- Karakteristik bitumen.
- Keadaan pencampuran.
- Kesesuaian bahan modifikasi dengan bitumen.

Beberapa karakteristik bahan modifikasi yang harus dimiliki ketika dicampur dengan bitumen (Whiteczak, 1990):

- Mempertahankan sifatnya selama dalam tempat penyimpanan dan ketika digunakan.
- Mampu untuk diproses dengan peralatan yang sederhana.
- Tetap stabil secara fisik dan kimia selama di tempat penyimpanan dan ketika digunakan.
- Mencapai viskositas yang melapisi pada suhu normal ketika digunakan.

Berdasarkan gambaran ekonomi dan pelaksanaannya, bahan modifikasi yang ideal yang digunakan dalam campuran bitumen seharusnya (Denning et al., 1981; Roberts et al., 1996; HD 37/99, 1999):

- Siap digunakan.
- Tahan pada saat suhu pencampuran bitumen.
- Dapat dicampur dengan bitumen.

- Meningkatkan ketahanan pada suhu tinggi di jalan raya tanpa mengakibatkan bitumen menjadi terlalu kental pada suhu pencampuran dan penghamparan atau terlalu kaku dan rapuh pada suhu rendah.
- Memiliki harga yang sangat kompetitif.
- Mengurangi kelemahan terhadap suhu pada interval suhu ketika digunakan.
- Menyediakan penyebaran beban yang merata untuk tebal lapisan perkerasan yang digunakan.
- Meningkatkan kemampuan untuk dicampur, mengurangi resiko dari kompaksi (pemadatan) yang buruk.
- Memiliki kekakuan yang tinggi pada penggunaan pada suhu yang tinggi sehingga mengurangi alur (rutting) dan penggeseran (shoving).
- Memiliki kekakuan yang rendah dan pelemasan sifat-sifat bahan yang cepat pada saat penggunaan pada suhu yang rendah sehingga mengurangi retak akibat suhu yang panas.
- Meningkatkan sifat adhesi diantara bitumen dan agregat ketika lembab sehingga mengurangi kemungkinan terbelah.

2.3. Jenis-jenis Bahan Modifikasi

Istilah bahan modifikasi didefinisikan oleh Haas et al (1982) sebagai berikut: “sebuah material yang ditambahkan dan atau dicampurkan dengan bitumen sebelum produksi pencampuran dilakukan; atau ketika aspal yang sudah tua ikut terlibat sebagai daur ulang, untuk meningkatkan atau mengembalikan sifat-sifat dari aspal yang sudah tua”.

Ada berbagai macam jenis bahan aditif bitumen, atau bahan modifikasi yang didapatkan secara umum. **Tabel 2.1** memperlihatkan daftar jenis-jenis umum yang utama dari bahan modifikasi dan memberikan contoh-contoh dari masing-masing jenis. Kebanyakan biasanya digunakan hanya mampu untuk meningkatkan beberapa sifat sehingga pilihan harus berdasarkan pada tujuan yang spesifik karena penambahan bahan modifikasi dalam bitumen secara otomatis tidak akan meningkatkan performa dari campuran. **Tabel 2.2** adalah pedoman untuk memilih jenis bahan modifikasi yang paling baik.

**Tabel 2.1 Jenis-jenis umum dan contoh-contoh dari bahan modifikasi
(Green,1998, Terrel, et al 1988)**

Jenis bahan modifikasi umum	Contoh
Polimer thermoset	Resin epoksi, Resin polyurethane, Resin acrylic, Resin phenolic
Karet thermoplas	Karet alami (getah), Karet tervulkanisir (seperti ban), Styrene-butadiene-styrene block copolymer (SBS), Styrene-butadiene rubber (SBR), Ethylene-propylene-diene terpolymer (EPDM), Isobutene-isoprene copolymer (IIR), Karet nitrile; Karet butyl, Styrene-isoprene-styrene block copolymer (SIS), Styrene-ethylene-butadiene-styrene block, copolymer (SEBS), Polybutadiene (PBD);Polyisoprene
Kristalisasi polimer thermoplas	Ethylene vinyl acetate (EVA)’ Ethylene methyl acrylate (EMA), Ethylene butyl acrylate (EBA), Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), Polyvinylchloride (PVC) Polystyrene

Jenis bahan modifikasi umum	Contoh
Bahan modifikasi dan bahan perpanjang kimiawi	Senyawa organo-metallic (seperti batu kawi), Sulfur; Lignin
Fiber	Selulosa, Magnesium-alumina silikat, Kaca, Asbes, Polyester; Polipropilen
Bahan pengisi	Karbon hitam, Pengisi mineral (Fly Ash), Crusher fines, kapur, Semen Portland
Perantara adhesi	Amines, Amides
Oksidan	Garam Magenese
Antioksidan	Amines, Fenol, Senyawa organo-zinc/organo-lead, Garam Kalsium, Karbon
Aspal alami	Aspal Danau Trinidad, Gilsoline, Aspal Batu Buton

Tabel 2.2. Kesimpulan dari keuntungan potensial menggunakan bahan modifikasi (HD 37/99, 1999)

Bahan Penguji	Catatan	Peningkatan			<i>Moisture Damage</i>	<i>Recycling Difficulty</i>	<i>Cost Addition</i>	<i>Environmental Consideration</i>
		Deformasi permanen	Retak akibat kelelahan	Retak akibat suhu				
Bahan Pengisi	2	Beberapa			Beberapa	Beberapa	Rendah	<i>Dust Suppression needed</i>
Fiber	2		Beberapa		Ya	Beberapa	Rendah	<i>Fine material hazardous</i>
Bitumen Alami	1,2	Ya			Beberapa	Rendah	Sedang	<i>Possibility of leaching should be considered</i>
Bahan modifikasi kimawi	1,2	Beberapa			Beberapa	Sedang	Sedang	<i>Harmful when uncured</i>
Polimer	1,2	Ya	Ya	Ya	Ya	Tinggi	Tinggi	
Thermoplastic Plastomers	1,2	Ya	Beberapa	Beberapa	Ya	Beberapa	Sedang / Tinggi	<i>Degradation if overheated</i>
Thermoplastic Elastomers	1,2	Ya	Ya	Ya	Ya	Beberapa	Sedang - Tinggi	<i>Degradation if overheated</i>
<i>Reclaimed Rubber</i>	2	Beberapa	Ya	Ya			Tinggi	<i>Use of waste material</i>

Catatan:

1. Ketika deformasi permanen ditingkatkan, campuran kemungkinan didesain untuk memiliki kandungan bahan pengikat yang besar, dengan keuntungan dari peningkatan daya tahan terhadap kelelahan, retak akibat suhu, penuaan dan kerusakan akibat lembab.
2. Pada kelompok yang sama, ada interval yang jauh antara komposisi bahan modifikasi dan keuntungan dari performa. Perbedaan yang umum antara plastomers dan elastomer berkisar dengan baik sebagai proses inovasi

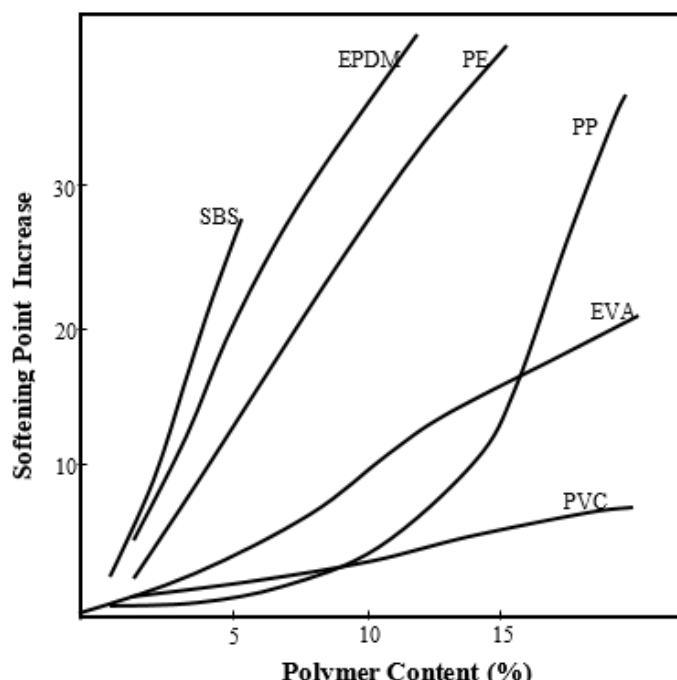
2.3.1. Polimer

Polimer yang digunakan pada bitumen modifikasi dapat diklasifikasikan berdasarkan sifat fisiknya seperti sifat panas dan deformasi. Berdasarkan sifat panasnya, sebuah polimer dapat diklasifikasikan baik sebagai thermoplas maupun thermoset. Polimer dapat diklasifikasikan sebagai elastomer atau plastomer tergantung pada sifat deformasinya. Klasifikasi dari jeni-jenis polimer yang digunakan sebagai bahan pengikat dapat dibagi menjadi 5 kelompok seperti terlihat pada **Tabel 2.3**.

Tabel 2.3 Klasifikasi jenis-jenis polimer (Nicholls, 1998; Becker et al, 2001)

Kelompok Polimer	Polimer
Thermoplas	Polyethylenes; Polypropylene (PP); Polyvinylchloride (PVC); Ethylene vinyl acetate (EVA); Ethylene methyl acrylate (EMA)
Karet alami dan sintetis	Karet alami; Polybutadiene (PBD);Polyisoprene; Crush Rubber tire; Styrene-butadiene rubber (SBR)
Karet Thermoplas	Styrene-butadiene-styrene block copolymer (SBS)
Thermoset	Ethylene-propylene-diene terpolymer (EPDM); Ethylene-propylene-diene terpolymer (EPDM)
Sistem Campuran	Most systems used include SBS

Sebuah polimer biasanya mempengaruhi karakteristik bahan pengikat dengan meleburkan ke bentuk komponen fraksi-fraksi dari bitumen. Kebanyakan polimer secara fisik dipisahkan menjadi bitumen yang memiliki molekul rantai panjang polimer yang menciptakan matriks hubungan dari polimer melalui bitumen. Matriks dari molekul rantai panjang pada polimer yang ditambahkan akan memodifikasi sifat-sifat fisik dari bahan pengikat aspal seperti pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2. Korelasi utama antara titik lembek polimer modifikasi bitumen dan kandungan polimer (Giavarini, 1994)

Penambahan polimer seperti SBS, EVA, LDPE, HDPE, EPDM, APP dan EMA dapat mempengaruhi sifat rheology dari campuran bitumen-polimer (Giavarini, 1994; Chen *et. al.*,

2002; Bonemazzi *et al.*, 1996 and Yousefi, 2004). Banyak penelitian melaporkan bahwa penambahan polimer pada bitumen dapat meningkatkan karakteristik dari campuran bitumen seperti mengurangi sensitivitas terhadap suhu, meningkatkan kemampuan elastis pada suhu yang tinggi, mengurangi kekakuan kompleks yang timbul secara perlahan-lahan pada suhu yang rendah, meningkatkan stabilitas campuran, meningkatkan ketahanan terhadap deformasi pada suhu yang tinggi dan meningkatkan ketahanan terhadap retak akibat suhu yang rendah.

Bagaimanapun juga, seharusnya diketahui bahwa penambahan polimer pada bitumen tidak otomatis langsung dapat memberikan jaminan akan mempertinggi kemampuan mekanis dari campuran aspal (Airey, 2004). Aspek-aspek seperti karakteristik polimer karakteristik bitumen, kondisi pencampuran dan kesesuaian polimer dengan bitumen memberikan efek yang signifikan pada sifat-sifat campuran seperti alur dan kelelahan performa.

Tidak banyak studi yang telah melaporkan penggunaan bahan daur ulang plastic sebagai bahan aditif untuk membuat bitumen modifikasi polimer. Zoorob dan Suparma (2000) melaporkan bahwa plastic daur ulang seperti polypropylene (PP) dan low-density polyethylene (LDPE) dapat digunakan menjadi campuran bitumen konvensional pada perkerasan jalan. Plastik daur ulang ini memiliki durabilitas dan umur kelelahan yang tinggi dibandingkan dengan campuran secara konvensional.

Panda dan Mazumdar (2002) menginvestigasi kegunaan dari polyethylene (LDPE) yang didapat dari kantong polyethylene pada bitumen campuran beton aspal. Material polyethylene (PE) yang digunakan kembali dengan mudah dicampur dengan bitumen konvensional dan hasilnya menunjukkan penyebaran yang seragam dari polimer pada bahan pengikat. Mereka melaporkan bahwa stabilitas Marshal, kekuatan meregang, umur kelelahan dan modulus elastisitas dari campuran bitumen ditingkatkan dengan penambahan 2.5% s.d. 5% PE secara berturut-turut.

Penggunaan dari limbah high-density polyethylene (HDPE) sebagai bahan aditif untuk modifikasi bitumen pada campuran aspal beton telah dikaji oleh Hinisioglu dan Agar (2003). Hasilnya menunjukkan bahwa 4% limbah HDPE pada bitumen modifikasi memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi tetap dalam kaitan dengan stabilitas yang tinggi dan hasil bagi Marshall dibandingkan campuran konvensional.

2.3.2. *Filler*

Filler adalah salah satu komponen utama dari campuran beraspal. Ada beberapa jumlah filler-filler mineral yang digunakan sebagai bahan aditif termasuk crushed fines, lime, Semen Portland, pozzolan (fly ash), karbon hitam dan sulfur. Adapun hal-hal yang dilakukan oleh filler (Roberts *et al.*, 1996):

- Mengisi rongga sehingga mengurangi kandungan optimum bitumen.
- Mendapatkan spesifikasi untuk gradasi agregat.
- Meningkatkan stabilitas.
- Memperbaiki kaitan antara bahan pegikat dan agregat.

Banyak penelitian melakukan kajian tentang penggunaan filler sebagai bahan modifikasi pada campuran bitumen (Al-Suhaibani *et al.*, 1992; Tayabeli *et al.*, 1998 dan Aljassar *et al.* 2004). Jumlah penggunaan filler dan karakteristiknya adalah faktor utama yang memberikan efek

terhadap sifat-sifat mekanis dari campuran bitumen seperti Stabilitas Marshall, modulus elastisitas, kekuatan tarik yang tidak langsung dan ketahanan terhadap alur (Al-Suhaibani, 1992; Aljassar et al. 2004).

Mohammad (2000) melaporkan bahwa hydrated lime dikenal untuk meningkatkan ketahanan durabilitas seperti pengaruh air, tetapi banyak juga kasus menunjukkan peningkatan kekakuan campuran. Efek dari jumlah pozzolan yang ditambahkan pada sifat-sifat bitumen-pozzolan dan kinerja dari campuran beraspal telah dikaji oleh Qudais (1999). Hasil test menunjukkan bahwa dengan menambahkan jumlah pozzolan maka akan mengurangi kerusakan akibat air. Stabilitas campuran beraspal meningkatkan seiring dengan meningkatnya kandungan pozzolan pada batas tertentu, setelah itu menurun.

Ada dua alas an untuk menjelaskan efek stabilitas dari filler. Pertama adalah filler sebagai material halus yang mengisi rongga diantara partikel agregat, sehingga meningkatkan kepadatan dan kekuatan dari campuran yang padat. Alasan kedua adalah ketika partikel tertahan pada bitumen sehingga membentuk mastik. Partikel penahan filler menyerap bitumen sehingga meningkatkan viskositas dari bahan pengikat dan kekerasan dari campuran (Rao et al, 1973).

2.3.3. Bitumen Alami

Contoh-contoh dari bitumen alami biasanya digunakan sebagai bahan modifikasi pada campuran aspal adalah Gilsonite dan Trinidad Lake Asphalt (TLA). Gilsonite sangat keras pada suhu lingkungan berkaitan dengan titik lembek yang tinggi dan nilai penetrasi yang rendah. Penetrasi dari Gilsonite adalah diantara 0 to 3 pada suhu 25°C dengan titik lembek cincin dan bola antara 121°C sampai 177°C (Crossley, 2000).

Gilsonite akan meningkatkan viskositas dari campuran bitumen, ketahanan *rutting* pada suhu tinggi dan meningkatkan stabilitas Marshal. Bagaimanapun juga, Gilsonite juga berhasil pada campuran dengan viskositas tinggi dengan suhu pelaksanaan yang rendah (Buton, 1992). Harun et al (1995) memberikan berbagai macam percobaan untuk mengkaji penambahan dari Gilsonite pada campuran bitumen yang dibandingkan terhadap bitumen yang tidak dimodifikasi di Kuala Lumpur, Malaysia.

Trinidad Lake Asphalt adalah bahan pengikat bitumen tertua pada penggunaan biasa yang berasal dari lapisan endapan di bagian Selatan dari Trinidad. Trinidad Lake Asphalt (TLA) memiliki interval penetrasi dari 3 – 10 pada 25°C dan titik lembek pada interval dari 93 -97°C. TLA biasanya digunakan pada konstruksi untuk lokasi tegangan tinggi seperti perempatan dan akses ke pojok tol (Roberts et al, 1991).

Ada lapisan endapan yang besar dari bitumen alami di Indonesia yang berlokasi di Pulau Buton, provinsi Sulawesi Timur. Disebut Asphalt Buton (Asbuton), ada dua jenis yang dapat digunakan (i) aspal batu yang memiliki lokasi di area Kabungka yang umumnya terdiri dari aspal keras dan (ii) Aspal alami yang lebih lembek dari daerah Lawele (Alberta. 1989). Material Kabungka memiliki interval penetrasi dari 0-5 pada suhu 25°C. Kandungan aspalnya tinggi dan kandungan maltene yang lebih rendah dari aspal petroleum. Material Lawele memiliki penetrasi diatas 200 (Alberta, 1989).

Studi perbandingan antara campuran beton aspal yang mengandung bitumen alami Lawele dan Kabungka mempertimbangkan stabilitas Marshall, modulus elastisitas dan ketahanan terhadap deformasi (Siswosoebroto et al, 2005). Hasilnya menunjukkan bahwa bitumen alami Lawele lebih baik dari Kabungka. Affandi (2001) mengevaluasi kinerja dari beton aspal dan campuran Stone Mastic Asphalt (SMA) yang mengandung Refined Asphalt Buton (RAB).

2.3.4. Fiber

Fiber telah digunakan untuk memperbaiki kinerja dari campuran bitumen dalam bentuk kekuatan, kekerasan atau ketahanan terhadap deformasi dan retak pada suhu rendah (Roberts et al 1991; Echols 1989; Kim et al 1999). Fiber juga dapat meningkatkan kandungan optimum bitumen sehingga memperbaiki durabilitas (Robert et al, 1996). Jenis utama fiber digunakan dalam campuran bitumen dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

Tidak semua fiber dapat memperbaiki sifat dari campuran (Freeman et al, 1985). Sebagai contoh, fiber katun dapat terdegradasi dan tidak memiliki penguatan jangka panjang; kawat logam berkarat dengan penetrasi dari air; asbestos adalah sebuah fiber kaca yang memiliki resiko kesehatan. Pemadatan mungkin akan sulit dilakukan dengan beberapa campuran bitumen kaitannya dengan pantulan dari campuran ketika digulung (Roberts et al, 1991).

Akulut (1999) mengkaji kegunaan dari fiber selulosa pada SMA yang menggunakan tiga jenis fiber yaitu. Fiber lepas A; fiber lepas B dan fiber butiran dan penambahan fiber selulosa pada SMA menghasilkan kinerja yang lebih baik.

2.4. Penggunaan Material Limbah Pada Konstruksi Jalan Di Indonesia

Sejak Indonesia mengalami krisis ekonomi di tahun 1997, tidak terdapat anggaran yang cukup untuk mengatur dan mengembangkan infrastruktur jalan. Tiap provinsi harus mengoptimalkan anggarannya untuk perawatan dan pengembangan. Strategi-strategi telah diusulkan untuk mencari alternatif untuk meningkatkan kinerja jalan dengan biaya yang rendah, seperti konstruksi menerus / bertahap untuk perbaikan jalan, memutuskan prioritas rutin dan perawatan secara periodik, penggunaan dari material limbah sebagai aditif untuk memperbaiki kinerjanya.

Beberapa peneliti telah melakukan studi tentang pemanfaatan material daur ulang pada perkerasan jalan. Jenis yang dominan dari material limbah yang telah dilakukan pengkajian dapat dilihat pada **Tabel 2.4**.

Tabel 2.4 Jenis utama dari sisa daur ulang yang digunakan pada konstruksi perkerasan di Indonesia (Setiadji, 2005)

Jenis material daur ulang	Produksi
Fly Ash	5 million tonnes/annum
Scrapped Tire Rubber (STR)	85 million units
Coconut Shell Ash and Coconut Fibre	3.5 million tonnes/annum
Sugar Mill Residue Ash	100,000 tonnes/annum
Oil Palm Shell Ash	1.5 million tonnes/annum
Marble Ash	-
Others (resin, rice husk, steel slag, nickel slag)	-

Kusumawati dan Siswosoebroto (2001) telah mengkaji terhadap beton aspal yang menggunakan Scrapped Tire Rubber (STR) sebagai bahan modifikasi. Hasilnya memperlihatkan bahwa penambahan STR pada bitumen tidak secara signifikan mengubah kandungan optimum bitumen dan sifat rheology dari bitumen modifikasi seperti penetrasi dan titik lembek. Kegunaan STR adalah mampu memperbaiki durabilitas dari beton aspal. Penggunaan dari STR dan lateks alami telah dikakan pengkajian oleh Iriansyah et al (1995). Sentosa et al (2001) mempertimbangkan penggunaan dari abu kulit minyak palem dan kapur pada rasio yang bermacam-macam di aspal panas. Abu kulit minyak palem dapat mengurangi deformasi permanent tetapi tidak memperbaiki sifat-sifat durabilitas.

Penggunaan dari filler dari sisa material seperti marble ash, steel slag, fly ash dan oil palm shell ash pada campuran bitumen telah diteliti oleh Pratomo (2001) dan Kadir (2004). Abu marmer ditemukan untuk meningkatkan stabilitas dari campuran bitumen yang lebih baik dari campuran yang mengandung fly ash, steel slag dan oil palm shell ash.

Tidak banyak studi tentang plastik bekas seperti kantong plastik, botol susu dan pembungkus makanan yang diteliti oleh peneliti Indonesia. Pertumbuhan plastik bekas meningkat secara signifikan selama lebih dari 5 tahun di Indonesia karena pola hidup di kota yang berkembang berubah dari organic menjadi lebih sering menggunakan plastik, kertas dan material yang terbungkus. Hanya sebagian kecil dari plastik bekas yang dapat didaur ulang.

2.5. Hubungan Sifat Aspal dengan Kinerja Campuran

Kerusakan pada lapis permukaan jalan dapat disebabkan oleh kombinasi faktor-faktor seperti lalu lintas, lingkungan, rencana awal dan kualitas pekerjaan. Dari keempat faktor ini, lalu lintas, lingkungan dan interaksi antara keduanya merupakan penyebab utama kerusakan pada lapis permukaan tersebut (Turki et al. 1993). Sebagai contoh, kerusakan berupa alur (rutting) dan retak buaya adalah jenis kerusakan yang disebabkan oleh lalu lintas. Sedangkan jenis kerusakan yang disebabkan oleh lingkungan atau yang bukan disebabkan oleh pengaruh lalu lintas adalah retak melintang dan retak memanjang pada permukaan lapis beraspal.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh TRL di daerah tropis menunjukkan bahwa model kegagalan campuran beraspal di daerah ini berbeda dengan model kegagalan yang biasanya terjadi di daerah sub-tropis. Perbedaan ini menunjukkan bahwa iklim sangat mempengaruhi kinerja campuran beraspal (RN 31, 1993).

Akibat panas yang tinggi, pengerasan aspal akibat penuaan lebih cepat terjadi di daerah yang beriklim tropis dari pada di daerah sub-tropis. Pengerasan ini terutama terjadi pada permukaan lapisan beraspal yang terekspos langsung terhadap lingkungan sehingga aspal tersebut kehilangan atau berkurang daya ikatnya. Oleh sebab itu keretakan pada lapis permukaan beraspal di daerah tropis akan terjadi dengan cepat sebelum retak di daerah lain terjadi. (RN 31, 1993; Rolt et al. 1986).

Penuaan aspal adalah proses yang alami yang tidak dapat dihindari. Untuk meminimumkan dampak penuaan aspal yang terjadi pada kinerja perkerasan maka aspal yang digunakan harus memiliki daya tahan yang baik. Aspal minyak konvensional yang biasanya digunakan sebagai bahan pengikat pada campuran beraspal umumnya tidak memiliki daya tahan yang tinggi terhadap pengaruh lingkungan, terlebih lagi terhadap kombinasinya dengan beban lalu lintas. Untuk itu, sifat asli dari aspal konvensional ini kadangkala perlu dimodifikasi untuk mendapatkan sifat yang lebih baik.

Tujuan modifikasi aspal adalah untuk mendapatkan aspal dengan sifat yang lebih baik sehingga tahan lama bila digunakan untuk campuran beraspal. Sifat-sifat reologi dari aspal yang akan dimodifikasi sangat tergantung pada untuk apa aspal itu akan digunakan (Shell, 1990). **Tabel 2.5** di bawah ini dikembangkan oleh Australian Road Research, (Oliver, 1999) dapat digunakan untuk menentukan sifat aspal yang mana yang harus dimodifikasi agar aspal yang dihasilkan memiliki sifat yang sesuai dengan tujuan yang akan dicapai.

Tabel 2.5. Matriks Hubungan Sifat Aspal dengan Kinerja Campuran

Sifat Aspal	Kinerja Campuran									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Duktilitas	X		X		X					
PI. Tinggi		X	X							
Daya kerut	X	X	X	X						
Kekakuan		X						X	X	
Kelekanan	X		X	X			X		X	X
Kekentalan	X	X	X	X	X	X	X		X	X
Keseragaman	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Keawetan	X		X	X	X					
Titiklempek		X				X				
Daya tahan terhadap oli				X	X			X		

Sumber : (Oliver, 1999)

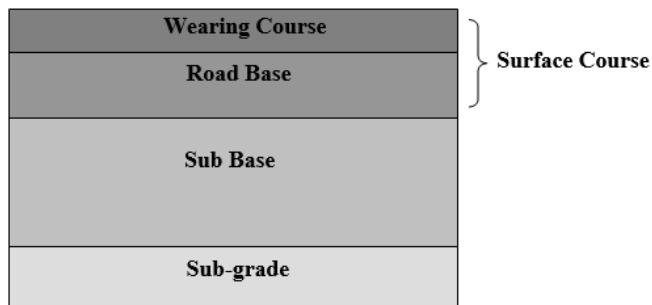
Keterangan:

- | | |
|---------------------------------------|------------------------------|
| A Mengurangi retak | F Mengurangi penyerapan |
| B Kekakuan / daya tahan terhadap alur | G <i>Bonding layer</i> |
| C Daya tahan terhadap fatique | H Mengurangi tebal lapisan |
| D Memperkuat ikatan aggregate | I Menaikkan tensile strength |
| E Memperpanjang umur pelayanan | J Kekedapan terhadap air |

3 KARAKTERISTIK CAMPURAN BERASPAL

3.1. Karakteristik Campuran Beraspal

Perkerasan lentur terdiri dari 3 lapisan utama misalnya lapis permukaan (Surface Course), lapis pondasi atas (Road Base), dan lapisan pondasi bawah (Subbase) sebagaimana yang terlihat pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Konstruksi perkerasan lentur

Lapisan permukaan adalah lapisan yang paling kritis dalam struktur perkerasan lentur karena terjadi kontak langsung dengan beban lalu lintas dan pada umumnya terdiri dari material dengan kualitas tertinggi. Lapisan permukaan terbagi atas lapisan aus dan lapisan pondasi.

Lapisan aus adalah lapisan yang kontak langsung dengan beban lalu lintas dan harus memenuhi persyaratan termasuk tahanan slip (kekesatan), deformasi dan tahanan alur. Tujuan utama dari lapis pondasi adalah untuk mendistribusikan beban lalu lintas ke dasar jalan dan menyediakan bentuk permukaan yang baik untuk lapisan aus. Lapisan permukaan yang ideal sebaiknya memenuhi karakteristik-karakteristik berikut (Roberts et al., 1996; HD37/99, 1999):

- Tahan terhadap deformasi – perkerasan jalan sebaiknya tidak menyimpang atau berdeformasi akibat beban lalu lintas terutama pada lapisan permukaan karena:
 - Permukaan jalan semakin panas dan bitumen menjadi semakin lebih lembek dari lapisan di bawahnya;
 - Tekanan yang dialirkan oleh lalu lintas adalah yang terbesar pada permukaan.
- Tahan terhadap kelelahan – perkerasan jalan sebaiknya tidak retak ketika diberi beban yang berulang-ulang dari waktu ke waktu. Retak akibat kelelahan dari perkerasan jalan disebabkan oleh faktor-faktor kombinasi:
 - Temperatur;
 - Beban lalu lintas yang berulang-ulang dan tegangan yang terjadi, dan
 - Bahan pengikat yang rusak karena pengaruh umur
- Kepakaan yang rendah terhadap temperatur – perkerasan jalan sebaiknya tidak retak dan berdeformasi ketika berkaitan dengan pengaruh temperatur lingkungan yang rendah dan temperatur yang tinggi.

- Durabilitas – perkerasan jalan sebaiknya menyediakan kemampuan untuk menahan perubahan pada sifat-sifatnya yang disebabkan oleh pengaruh lingkungan seperti hujan, terik matahari, pencairan es, oksidasi perubahan temperatur dan juga oleh pencemaran. Durabilitas perkerasan jalan berhubungan dengan rongga udara sebaik tebal lapisan bahan pengikat aspal disekitar partikel masing-masing agregat.
 - Tahan terhadap kelembaban – penetrasi bitumen pada perkerasan jalan sebaiknya tidak menurun pada saat air masukkedalam campuran. Tahanan terhadap kelembaban berhubungan dengan rongga udara pada mineral agregat dan sifat-sifat kimiawi.
 - Tahan terhadap slip – material perkerasan jalan yang diletakkan pada lapis permukaan sebaiknya menyediakan pergeseran yang cukup ketika kontak dengan ban kendaraan. Tahanan terhadap slip yang rendah pada umumnya berhubungan dengan karakteristik agregat atau kadar bahan pengikat aspal yang tinggi.
 - Kemudahan dalam pelaksanaan – perkerasan jalan harus mampu dihamparkan dan dipadatkan dengan usaha yang layak. Kemudahan dalam pelaksanaan pada umumnya berhubungan dengan tekstur/bentuk/ukuran/gradasi agregat, isi dan viskositas dari bahan pangikat aspal pada saat pencampuran dan temperatur yang terjadi.

Karakteristik-karakteristik ini sering terjadi saling tolak belakang. Sebagai contohnya, DGH (1992) spesifikasi Indonesia dikembangkan untuk menyelesaikan masalah dari retak awal akibat peningkatan isi bitumen pada campuran aspal. Namun, hal ini menciptakan masalah baru dari kegagalan awal dengan alur plastis. Temperatur yang tinggi dan beban as roda yang tinggi menghasilkan lingkungan yang perlu pengakajian yang tepat untuk persyaratan campuran dengan keseimbangan total dari sifat-sifat yang sulit untuk dimiliki (RN 31, 1993).

Dua mekanisme kegagalan structural untuk perkerasan lentur pada negara tropis seperti Indonesia adalah deformasi dan retak awal. Temperatur yang tinggi mengurangi kekakuan campuran, membuat perkerasan jalan lebih mudah untuk berdeformasi. Bitumen akan mengalami oksidasi dan pengerasan secara cepat, oleh karena itu lapis permukaan menjadi lebih rapuh dan biasanya terjadi retak pada awal pelapisan permukaan (Rott et al, 1986).

3.2. Modulus Kekakuan dari Campuran Beraspal

Campuran bitumen bersifat visco-elastis yaitu sifat-sifat mekaniknya tergantung pada waktu dibebani dan temperatur ketika menerima beban. Ada dua kategori dari kekakuan campuran yaitu kekakuan elastic dalam kondisi temperatur yang rendah atau pembebahan yang cepat, dan kekakuan yang viscous pada temperatur yang tinggi atau pembebahan yang lama.

Modulus efektif adalah rasio dari tegangan pada temperatur tertentu dan waktu pembebahan dan biasanya berkaitan dengan kekakuan (Whiteoak, 1990):

Ada beberapa jenis modulus kekakuan dari campuran bitumen yang umumnya digunakan pada desain perkerasan:

- Modulus kekakuan pegas (S_{mix})
 - Modulus kekakuan kompleks dinamis (S_{mix}^*)
 - Modulus kekakuan dinamis ($|S_{mix}^*|$)

Perbedaan antara modulus kekakuan pegas dan modulus kekakuan kompleks adalah disebabkan oleh perbedaan dari kondisi pengujian seperti jenis dan waktu pembebahan, periode sisa pembebahan dan bentuk percobaan. Modulus pegas adalah modulus elastic yang digunakan dengan teori elastisitas dan berdasarkan pada tegangan sisa pada pengulangan beban.

Modulus kompleks adalah salah satu dari banyak metode untuk menerangkan hubungan tegangan-tekanan dari material kental elastis (Huang, 1993).

Modulus kekakuan dari campuran bitumen dapat digunakan untuk menghitung tegangan kritis pada struktur perkerasan jalan. Selain itu juga dapat digunakan untuk mengkaji ketahanan dari material terhadap deformasi.

Pada umumnya material perkerasan jalan bersifat tidak elastic tapi mengalami deformasi permanen setelah tiap aplikasi pembebanan. Namun, jika bebannya kecil dibandingkan dengan material yang kuat dan dilakukan secara berulang-ulang kali, deformasi akibat pengulangan beban dapat diperbaiki dan proporsional terhadap beban dan dapat dianggap sebagai elastis (Huang, 1993).

Modulus kekakuan dari sebuah campuran dapat ditentukan dengan dua pendekatan:

- Memprediksi modulus kekakuan dari sifat-sifat fisik dan mekanik dari campuran dengan menggunakan korelasi yang tersedia.
 - Mengukur modulus kekakuan dari campuran dengan pengujian di laboratorium.

3.2.1. Perkiraan Kekakuan Campuran

Metode perkiraan untuk menentukan modulus kekakuan campuran telah diusulkan dengan berbagai macam metode. Nijboer (1957) mengusulkan penggunaan dari rasio stabilitas- Marshall flow sebagai sutau fungsi dari modulus kekakuan sebagai berikut:

djmana:

S adalah modulus kekakuan campuran dalam kg/cm^2

Stabilitas Marshall dalam kg

Flow dalam mm.

Hubungan tersebut biasanya digunakan pada temperatur yang tinggi (Heukelom dan Klomp 1964) dan McLeod (1967) memodifikasinya dengan menggunakan satuan Inggris:

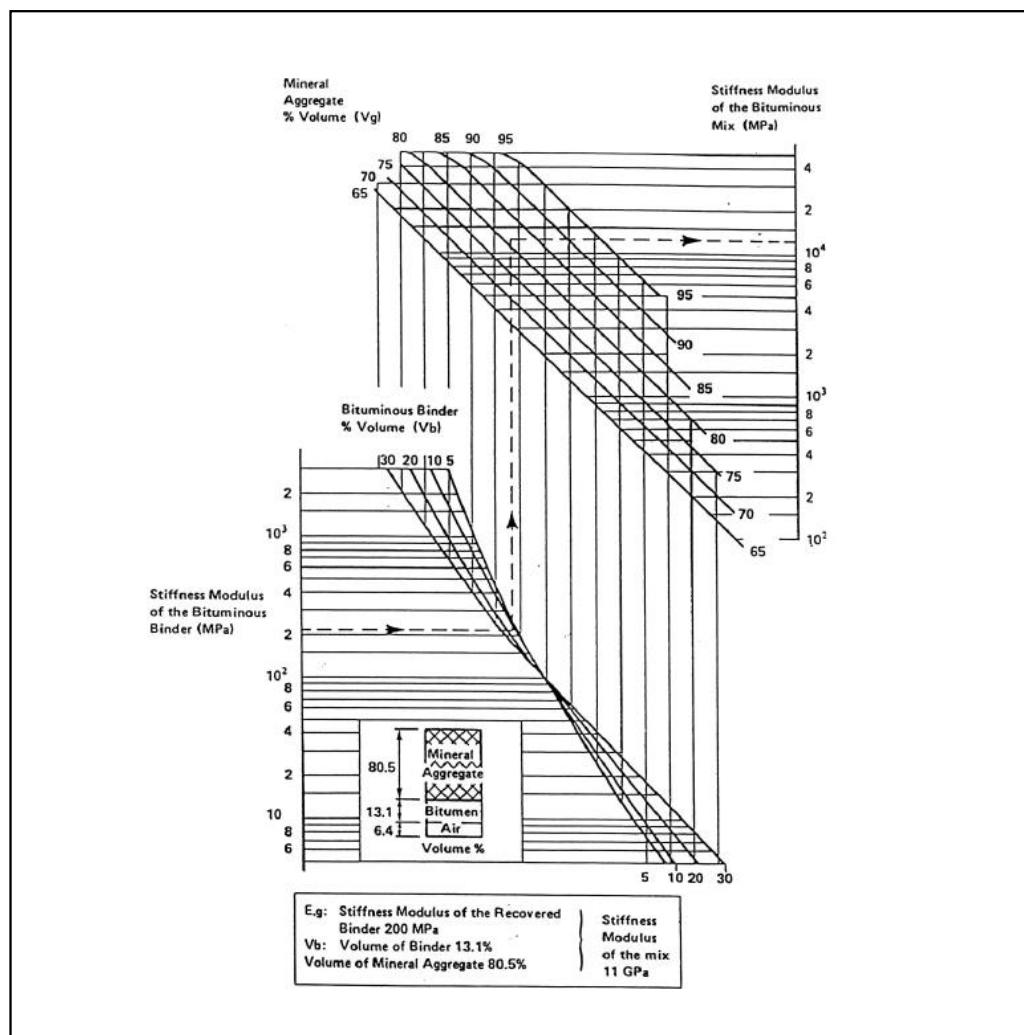
djmana:

S modulus kekakuan dalam pounds/inch²

Stabilitas Marshall dalam pounds and Flow in inches.

Metode Nomogram Shell yang dikembangkan oleh Van der Poel (1954). Istilah modulus kekakuan umumnya digunakan oleh Shell sebagai pengganti dari modulus dinamis. Dua nomogram digunakan untuk memperkirakan modulus kekakuan dari campuran. Nomogram yang pertama menentukan modulus kekakuan dari bitumen berdasarkan temperatur, waktu pembebanan dan karakteristik dari bitumen dalam campuran.

Nomogram yang kedua menentukan kekakuan dari campuran bitumen berdasarkan modulus kekakuan dari bitumen, persentase dari bitumen dan persentase dari agregat sebagaimana yang terlihat pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2. Nomogram untuk memprediksi kekakuan campuran (Bonnaure et al, 1977)

Heukelom dan Klomp (1964) mengembangkan hubungan antara kekakuan bitumen dengan kekakuan campuran berdasarkan konsentrasi volume dari agregat. Rumusnya adalah sebagai berikut:

dengan:

Sb adalah modulus kekakuan dari bitumen ($Sb \geq 10 \text{ MPa}$).

$$n = 0.83 * \log (40000 \text{ Mpa} / S_b).$$

C_v ' adalah konsentrasi volume agregat pada campuran bitumen setelah dikoreksi.

Jika kandungan pori kurang dari 3%, rumus 2.13 tidak dapat digunakan.

C_v didapatkan dari:

dengan:

Va adalah persentase volume agregat.

Vb adalah persentase volume dari bitumen.

Konsentrasi volume dikoreksi untuk penggunaan kandungan rongga yang lebih besar dari 3% (Van Draat et al, 1965):

$$C_v' = C_v / [0.97 + 0.01 * (100 - (V_a + V_b))] \dots \dots \dots (3.6)$$

Modulus kekakuan dari Rumus 2.12 biasanya cocok dengan modulus kekakuan yang didapatkan dari uji lentur di laboratorium (Ullidtz, 1987).

Brown dan Brunton (1992) mengembangkan rumusan-rumusan tersebut untuk menentukan modulus kekakuan dari campuran bitumen (S_{mix}). Metode ini dikenal sebagai metode Universitas Nottingham dan berdasar kepada modulus kekakuan dari bitumen yang telah diperbaiki ($S_{b,r}$) dan rongga pada campuran agregat (VMA):

$$S_{mix} = S_{b,r} \left(1 + \frac{257.5 - 2.5xVMA}{n(VMA - 3)} \right)^n \quad \dots \dots \dots \quad (3.7)$$

$$n = 0.83 \log \left(\frac{4x10^4}{S_{b,r}} \right)$$

Metode ini digunakan jika modulus kekakuan dari bitumen tidak kurang dari 5 MPa; Void in Mix Aggregate (VMA) berkisar antara 12% - 30% dan minimum Voids in Mix (VIM) adalah 3%.

3.2.2. Metode Pengujian Laboratorium

Metode utama laboratorium digunakan untuk menentukan modulus kekakuan dari campuran bitumen adalah:

- Pengujian Tekanan Triaksial.
 - Pengujian Kelenturan Balok.
 - Pengujian Tegangan Tak Langsung.

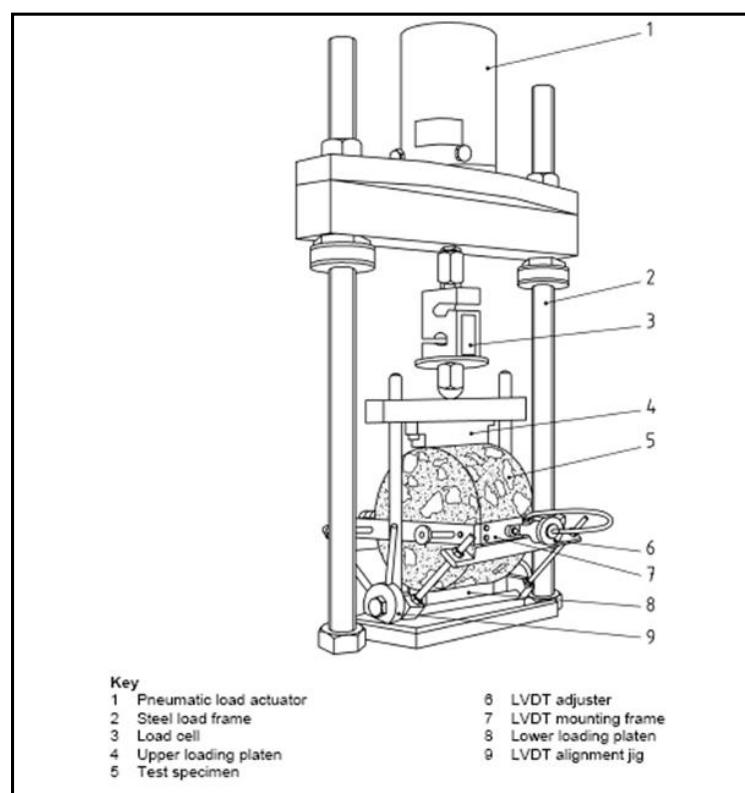
Baladi dan Haricandran (1989) melakukan studi perbandingan antara modulus kekakuan dari campuran aspal menggunakan metode pengujian laboratorium termasuk pengujian *tri-axial*;

cyclic flexural test; pengujian Marshall; pengujian tegangan tak langsung dan uji perlahan-lahan (creep test). Hasilnya memperlihatkan bahwa sifat-sifat material didapatkan dari uji yang berbeda yang berbeda secara substansial dan uji tegangan tak langsung adalah yang paling menjanjikan. Namun hasil ini juga tidak konsisten.

Schmidt (1972) mengemukakan penggunaan dari uji tegangan tak langsung pada pembebanan yang berulang adalah untuk menentukan modulus kekakuan dari spesimen campuran beraspal. Beberapa peneliti melaporkan fungsi dari penggunaan uji tegangan tak langsung untuk menentukan modulus kekakuan (Wallace dan Monismith, 1980; NCHRP 14, 1998):

- Pengujinya relative mudah dan cepat.
- Jenis spesimen dan peralatan bias digunakan untuk pengujian lain.
- Hasil yang bervariasi lebih rendah dibandingkan metode uji yang lain.
- Uji ini dapat memperoleh informasi tentang kekuatan tegangan, karakteristik kelelahan dan karakteristik deformasi permanen.
- Sebuah spesimen dapat diuji dengan diameter yang bermacam-macam dan hasilnya dapat digunakan untuk menentukan apakah sampel homogen atau tidak.

Sistem uji tegangan tak langsung termasuk peralatan beban tegangan tak langsung, peralatan pengukuran deformasi dan sistem pencatatan data. Beban getar tekanan yang berulang-ulang dilakukan melalui bidang beban pada spesimen silinder. Beban dinamis ini menyebabkan masing-masing sisi dari sumbu horizontal spesimen seperti pada **Gambar 3.3**. Spesimen yang deformasi dinamis melalui tegak lurus bidang horizontal. Deformasi ini dicatat penghantar pada digunakan pada pengujian ini mempunyai ukuran yang sama dengan spesimen pada Marshall.



Gambar 3.3. Peralatan uji Modulus Kekakuan Tegangan Tak Langsung (BS EN 12697-26: 2004)

Dari beban dinamis P dan menghasilkan deformasi horizontal, modulus kekakuan dihitung dengan (BS EN 12697-26:2004):

dimana S_{mix} = modulus kekakuan.

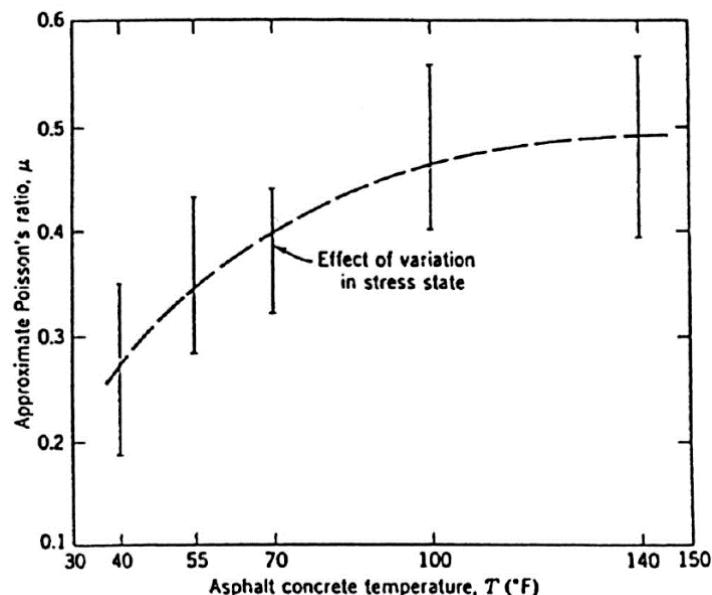
ϵ = deformasi horizontal sementara.

P = kekuatan tekanan pada spesimen.

h = tebal spesimen.

μ = Poisson' ratio.

Poisson ratio μ didefinisikan sebagai rasio dari tegangan lateral terhadap sumbu tegangan. Nilai poisson ratio dari campuran beaspal tergantung temperatur uji dengan nilai antara 0.2 untuk temperatur rendah sampai 0.5 untuk temperatur tinggi seperti pada **Gambar III.4**



Gambar 3.4. Hubungan temperatur dengan Poisson's Ratio (μ) (Nair et al 1972)

Poisson ratio pada desain perkerasan biasanya diasumsikan karena memiliki pengaruh yang kecil terhadap reaksi perkerasan (Huang, 1993). Poisson ratio (μ) yang biasa digunakan untuk material bitumen adalah $\mu = 0.35$. Rumus 2.17 bisa dijabarkan sebagai berikut:

Rumus ini digunakan untuk mengukur modulus kekakuan dari campuran bitumen dengan metode Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) menggunakan Nottingham Asphalt Tester (NAT).

3.3. Deformasi Permanen

Deformasi tetap adalah bentuk umum dari kegagalan perkerasan terutama pada iklim tropis panas seperti Indonesia, ketika permukaan dari perkerasan jalan mencapai suhu 60°C atau lebih besar. Kondisi ini juga tingkat kegagalan struktur perkerasan jalan makin tinggi dengan tingkat lalu lintas yang tinggi.

Jumlah kendaraan yang besar dan proporsi truk berat yang besar, akan memberikan deformasi tetap yang lebih besar pula. Deformasi biasanya ditemukan pada jalur kendaraan yang mengangkut beban yang besar, kendaraan yang bergerak lambat, seperti persimpangan lampu lalu lintas dan di kawasan industri.

3.3.1. Mekanisme Deformasi Permanen

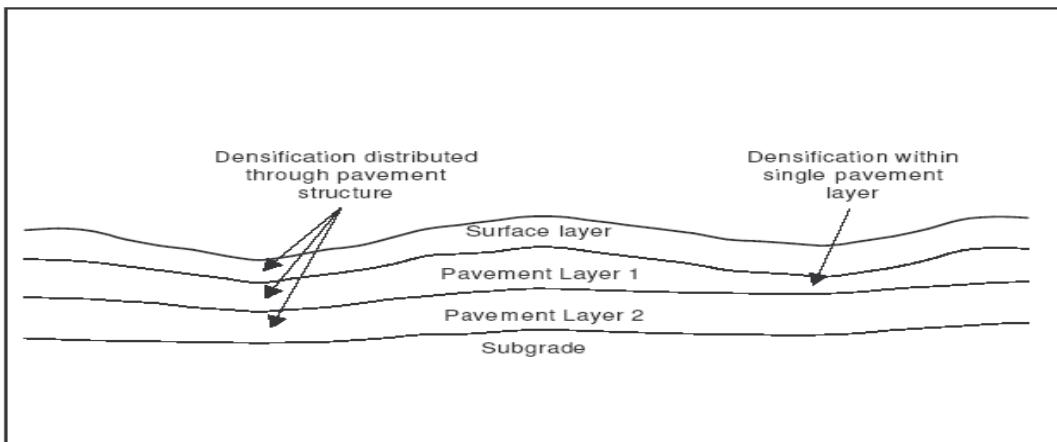
Deformasi tetap dari perkerasan jalan berkembang secara bertahap dengan jumlah aplikasi beban lalu lintas. Hal ini biasanya terjadi pada jalur kendaraan sebagai penurunan longitudinal oleh lengkung kecil pada masing-masing ujungnya. Hal ini muncul dari kombinasi densifikasi (penurunan volume dan menyebabkan kenaikan berat jenis) dan deformasi geser.

Studi yang dilakukan oleh AASHO Road Test (Highway Research Board, 1962) dan studi uji lintasan dilaporkan oleh Hofstra dan Klomp (1972) memperlihatkan bahwa deformasi geser lebih diwaspadai dibandingkan dengan akibat densifikasi yang merupakan mekanisme awal deformasi tetap. Einseman dan Hilmer (1987) melanjutkan studi tentang pengaruh jumlah kendaraan yang melewati bidang permukaan pada papan uji roda kendaraan. Hasilnya memperlihatkan bahwa ada 2 tingkatan dari mekanisme deformasi tetap pada campuran beraspal:

Tingkat 1 – awal mulanya densifikasi. Menurut Paterson (1987), densifikasi adalah perubahan volume material sebagai hasil dari partikel yang semakin padat dan kadang-kadang mengalami penurunan dari partikel menjadi ukuran yang lebih kecil. Alur yang terjadi akibat densifikasi biasanya lebar dan seragam pada arah horizontal dengan pengaruh nerat yang kadang-kadang muncul pada permukaan, seperti pada ilustrasi dalam **Gambar 2.10**.

Kadar densifikasi sangat tergantung pada spesifikasi kompaksi selama masa konstruksi. Oleh karena itu, spesifikasi pemasakan sebaiknya dipilih sesuai dengan beban yang direncanakan dan jenis perkerasan. Kegagalan mencapai kompaksi yang direncanakan selama masa konstruksi akan menghasilkan peningkatan dari densifikasi dibawah lalu lintas, yang kebanyakan muncul pada awal umur rencana dari perkerasan.

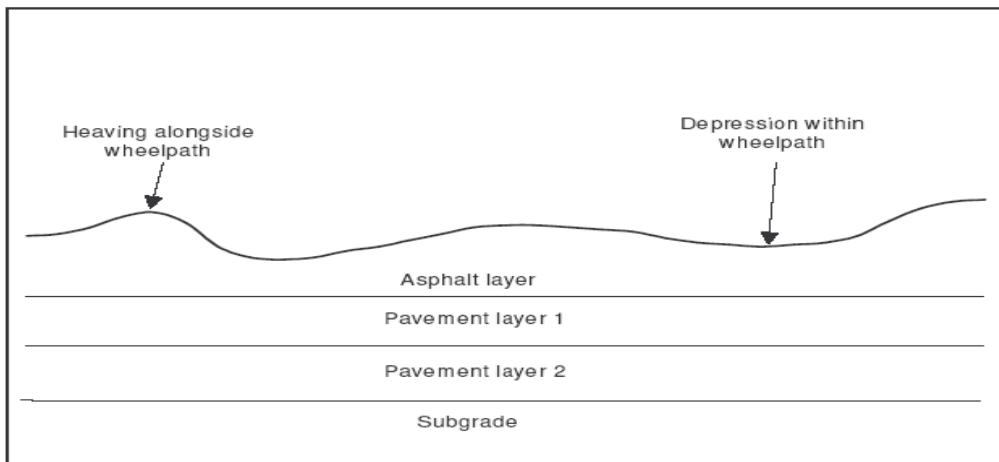
Sangat penting untuk dicatat bahwa untuk nilai kedalaman alur yang sama, deformasi dari perkerasan akan terdapat pada satu per satu lapisan yang lemah atau didistribusikan melalui kedalaman perkerasan seperti pada ilustrasi **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5. Bidang alur hasil densifikasi (Kennemeyer, 2003)

Tingkat 2 – setelah tingkat awal, volume dibawah roda kendaraan akan turun sampai kira-kira sama dengan kenaikan volume pada zona batasan lengkungan. Hal ini mengindikasikan bahwa kompaksi yang terjadi dibawah lalu lintas telah lengkap dan alur yang akan terjadi disebabkan oleh perpindahan dengan volume yang konstan (plastic flow) seperti pada **Gambar 3.6**.

Plastic flow terjadi ketika tegangan geser yang disebabkan oleh lalu lintas mencapai sifat kekuatan pada lapisan-lapisan perkerasan (Paterson, 1987). Hal ini mengakibatkan kehilangan friksi internal antar partikel agregat (Roberts, Kandhal dan Brown, 1996). Fase ini dipertimbangkan sebagai perwakilan dari keadaan deformasi untuk bagian yang paling besar dari umur perkerasan.



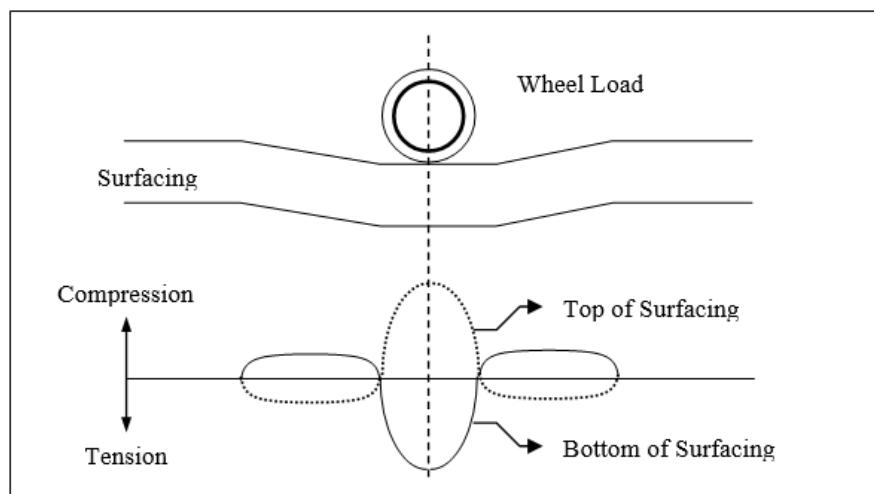
Gambar 3.6. Bidang alur hasil plastic flow (Kennemeyer, 2003)

3.3.2. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Deformasi Permanen

Kekuatan deformasi dari campuran bitumen dipengaruhi oleh variabel-variabel seperti jenis dan gradasi agregat, pengaruh bitumen, sifat-sifat volume campuran, kualitas konstruksi, volume lalu lintas dan iklim.

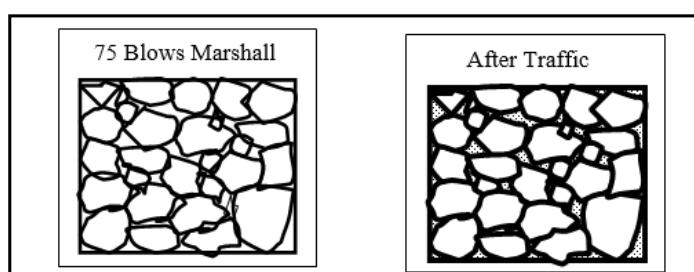
Beban lalu lintas adalah kombinasi dari besar dan volume dari beban. Lalu lintas mengalirkan tegangan pada struktur perkerasan yang harus ditahan, dan menentukan kualitas material yang

diperlukan sebaik keadaan lalu lintasnya. Sangat penting untuk mencatat bahwa beberapa beban atau tekanan ban yang berlebihan untuk perkerasan tidak dirancang untuk menyebabkan tegangan melalui kekuatan geser dari amterial dan juga plastic flow, hasilnya adalah kegagalan awal dari lapisan yang terlihat pada **Gambar 3.7**.



Gambar 3.7 Tegangan dan tekanan pada permukaan akibat lalu lintas

Kompaksi pada saat konstruksi / setelah konstruksi bergantung pada densifikasi selama proses konstruksi dari lapisan perkerasan. Berat jenis yang didapatkan akibat kompaksi adalah 35, 50 atau bahkan 75 pukulan pada masing-masing lapisan luar dari spesimen uji laboratorium yang lebih kecil dari yang terdapat pada jalur lintasan dari jalan yang mendapatkan beban lalu lintas yang besar. Berat jenis in-situ akhir kemungkinan sebesar 3% atau bahkan 4% lebih besar dari 75 pukulan berat jenis Marshall seperti pada **Gambar 3.8**. (Sterling dan Zamhari, 1997).

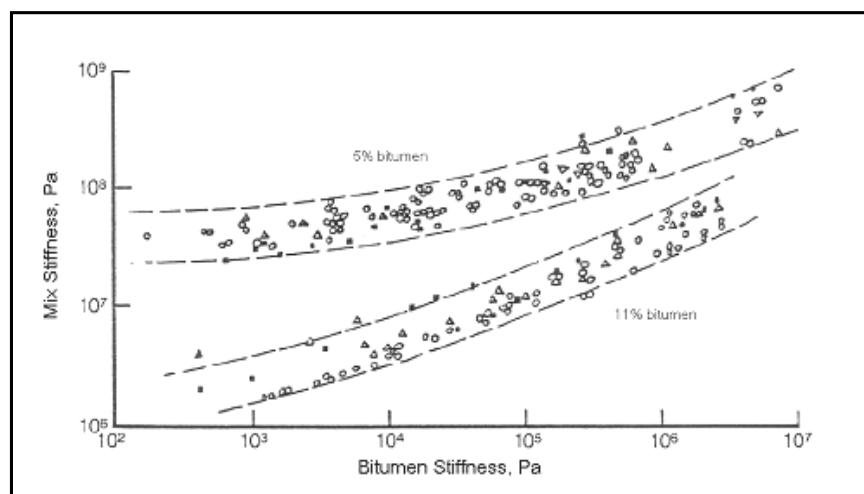


Gambar 3.8. Kehilangan VIM akibat kompaksi kedua karena lalu lintas
(Sterling dan Zamhari, 1997)

Berkaitan dengan tahanan deformasi, campuran beraspal sebaiknya mengandung bahan pengikat yang cukup untuk mendapatkan kohesi dan kompaksi yang seimbang, tanpa resiko yang tidak semestinya terhadap deformasi plastis yang diakibatkan oleh pengaruh lalu lintas dan temperatur seperti pada **Gambar 3.9**.

Kandungan dan tingkatan bitumen mempengaruhi deformasi permanen. Whiteoak (1990) menyimpulkan bahwa perawatan besarnya nilai S_{mix} ketika S_{bit} mengalami penurunan adalah karakteristik yang diperlukan untuk tahanan jangka waktu yang lama terhadap deformasi permanen. Hofstra dan Klomp (1972) mengatakan bahwa campuran beraspal menggunakan

kekakuan bitumen dan kandungan bahan pengikat yang rendah akan lebih sulit didapatkan pada deformasi permanen.



Gambar 3.9. Pengaruh kandungan bitumen pada sifat-sifat campuran (Hills, 1973)

Persen rongga udara dengan campuran bitumen akan mempengaruhi perlakunya. Makin besar rongga udara, maka akan makin tahan campuran tersebut terhadap deformasi. Tapi seiring dengan peningkatan prosentase udara, peningkatan kekakuan bahan pengikat akan terjadi, yang akan mengurangi kelelahan dari aspal.

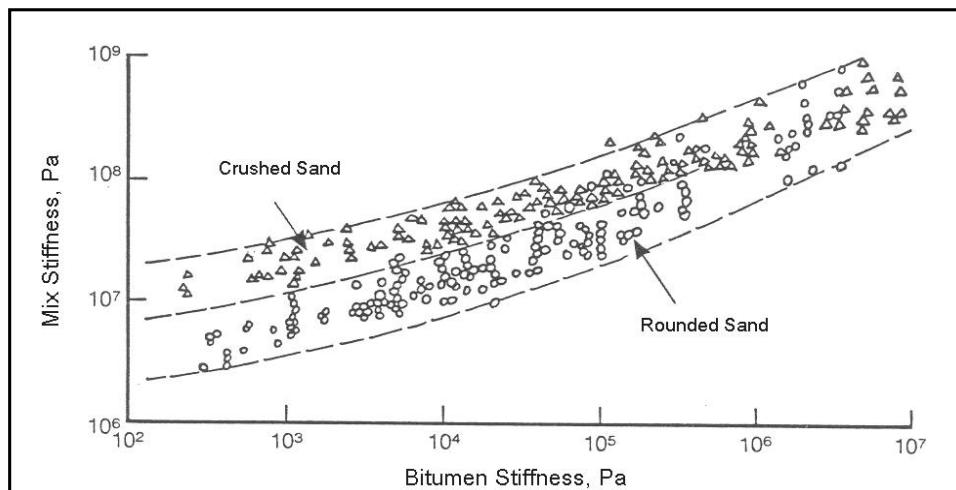
Jika kandungan rongga udara terlalu rendah, campuran aspal menjadi tidak stabil, sehingga mempengaruhi plastic flow dari lapisan ketika mengalami beban lalu lintas yang berat, beban yang lambat bergerak atau temperatur tinggi maksimum. Sterling dan Zamhari (1997) melaporkan bahwa 3% atau 4% pori udara akan hilang selama proses kompaksi yang disebabkan oleh lalu lintas. Jika desain awal adalah untuk 4 atau 5%, sisa VIM akan turun dari 1% atau 2% dan jalan akan rusak akibat plastic flow.

Berdasarkan Road Note 31 (TRL, 1994) banyak studi memperlihatkan bahwa minimum pori udara setelah diberi beban lalu lintas seharusnya mencapai 3% untuk menghindari plastic flow, tapi kurang dari 5% untuk menjaga kekakuan dari bahan pengikat (pada kondisi tropis) ke batas minimum.

Tahanan terhadap deformasi permanen tergantung ketika interaksi antar partikel lapisan agregat ke bentuk struktur mekanik saling kunci. Makin besar saling kunci antar partikel dalam campuran, maka akan semakin tahan terhadap deformasi. Bentuk dan kekasaran sangat penting. Semakin besar kandungan batuan maka semakin kecil deformasinya, tapi akan semakin sulit untuk dikompaksi. Whiteoak (1990) menunjukkan bahwa agregat halus meningkatkan kekakuan dari campuran dan memberikan tahanan yang kuat terhadap deformasi permanen, seperti pada **Gambar 3.10.**

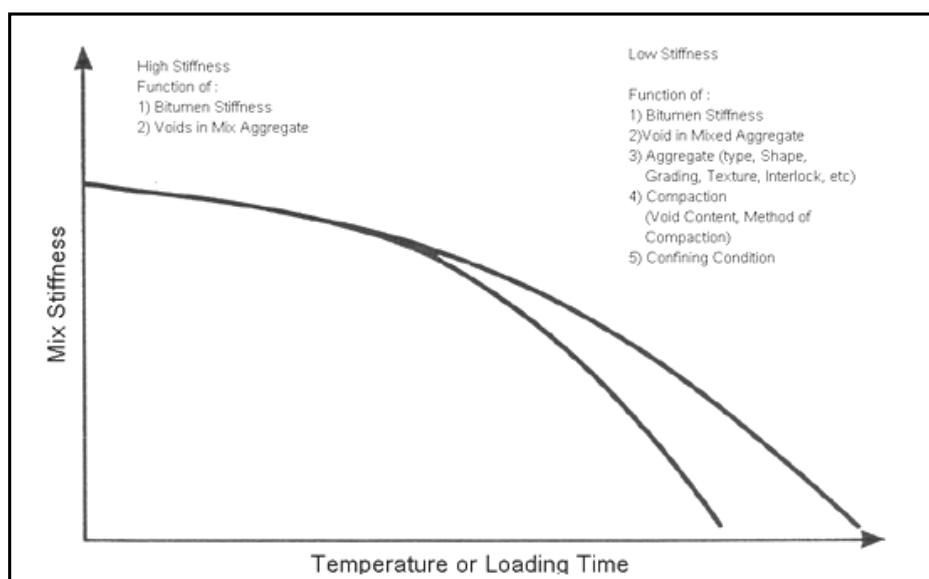
Ketergantungan pada sifat-sifat campuran pada waktu pembebanan dan temperatur adalah berhubungan dengan perubahan pada sifat-sifat reologik dari bahan pengikat. Faktor dominan

adalah ketergantungan viskositas yang besar pada temperatur. Dari uji simulasi dan pengalaman umum, diketahui bahwa tahanan terhadap deformasi dari material campuran berkurang dengan cepat seiring dengan meningkatnya temperatur dan waktu pembebahan seperti pada Gambar II.13, terutama jika temperatur lingkungan mendekati atau melebihi titik lembek dari penggunaan bahan pengikat. Makin besar temperatur maka semakin besar deformasi untuk waktu pembebahan yang sama. Pengaruh perubahan temperatur dan waktu pembebahan mempengaruhi kekakuan bitumen sehingga mengubah kekakuan dalam campuran.



Gambar 3.10. Pengaruh bentuk agregat pada sifat-sifat campuran (Hills, 1973)

Peningkatan kandungan kelembaban dengan masuknya air melalui lapisan perkerasan yang retak akan menurunkan kekuatan geser dari lapisan butiran perkerasan yang ketika mengalami tegangan yg berlebih akibat lalu lintas, akan menyebabkan kegagalan geser pada lapisan-lapisan dan pada akhirnya meningkatkan deformasi.



Gambar 3.11. Kekakuan campuran sebagai fungsi dari temperatur atau waktu pembebahan (Brown, 1988)

3.3.3. Metode Evaluasi Untuk Menilai Deformasi Permanen

Ada beberapa metode yang berbeda untuk menilai deformasi permanen. Zhang et al, (2002) mengklasifikasikannya menjadi tiga kelompok yaitu uji fundamental, hubungan empiris desain campuran dan uji simulasi.

Sebuah contoh dari uji fundamental adalah Repeated Load Axial Test (RLAT). Pada standar uji RLAT, sampel diberikan getaran tegangan aksial tiap 1-2 durasi dan magnitud 100kPa, terpisah selang 1-2 periode. Durasi pengujian adalah sejam atau 1800 getaran. Hasil tegangan aksial diawasi dan dicatat dengan linier variable displacement transducers (LVDT) yang dipasang diametris.

Metode pengujian ini diatur dalam BS DD 226: 1996 dan telah memiliki keunggulan seperti yang dilaporkan oleh Nunn (1997). Keuntungannya adalah bahwa cara ini mudah, memiliki peralatan praktik dan penggunaan yang tidak mahal. Pengujian spesimen dapat dipotong pada bagian tengah jalan atau disediakan di laboratorium. Kerugiannya adalah bahwa hasil yang didapatkan belum dikorelasikan dengan deformasi di lapangan dan pengujian ini tidak membatasi tekanan disekitar spesimen selama proses pengujian.

Contoh dari metode empiris adalah stabilitas Marshall dan uji aliran yang terdapat pada BS EN12697-34: 2004. Campuran dapat dievaluasi dengan nilai kekakuan empiris menggunakan hasil bagi Marshall seperti rasio antara stabilitas dan aliran. Nilai yang tinggi memperlihatkan campuran yang kaku yang lebih tahan terhadap deformasi permanen (Robert et al, 1996; Whiteoak, 1990). Keuntungan dan kerugian metode ini telah dijelaskan oleh Brown et al (2001). Keuntungan utama dari uji ini adalah peralatan yang umum didapatkan. Kerugiannya adalah bahwa tidak dapat mengukur deformasi permanen pada campuran.

Pengujian jalur kendaraan adalah contoh dari uji simulasi. Pengujian ini awalnya dilakukan pada tahun 1951 dimana peralatan pencobaan jalur roda kendaraan ini digunakan untuk mempelajari penggundulan lapisan akibat pengaruh kombinasi dari air dan kendaraan yang bergerak. The TRRL mengembangkan uji jalur kendaraan ini pada tahun 1977 untuk mensimulasikan alur in-service dari aspal panas.

Uji jalur kendaraan ini terdiri dari sebuah roda kendaraan yang diberi beban tertentu atau mengalami kontak dengan memberikan tekanan dari arah belakang dan kedepan pada beberapa jumlah putaran per menit. Kedalaman jalur dicata pada titik tengah dari panjang pada periode waktu tertentu. Prosedurnya dijelaskan pada BS 598-110, 1998. Parameter yang digunakan untuk menilai performanya adalah Tracking Rate (TR) dan total kedalaman alur. Tracking Rate dalam mm/hour (TR) untuk paling sedikit 8 pembacaan, didapatkan dari:

$$T_R = 3.6 \{r_n - r_{(n-3)}\} + 1.2 \{r_{(n-1)} - r_{(n-2)}\} \quad \dots \quad (3.10)$$

dengan:

- n adalah total bacaan yang didapatkan setelah interval 5 menit untuk 45 menit, tidak termasuk bacaan awal.

r_i adalah pengukuran interval perpindahan pada saat pembacaan, dalam millimeter (mm).

Highway Agency (2004) memperkenalkan spesifikasi performa untuk lapisan aus HRA pada kalimat 943 bahwa tingkatan alur yang diperlukan dan total kedalaman alur dinilai menggunakan uji jalur kendaraan pada 45 dan atau 60°C . Persyaratan jalur kendaraan dibagi menjadi 2 klasifikasi seperti pada Tabel II.7.

**Tabel 3.1. Persyaratan jalur kendaraan untuk kondisi lalu lintas yang berbeda
(Clause 943 Series NG 900, Highway Agency, 2004)**

Kelas	Deskripsi	Temperatur pengujian (°C)	Rut Rate (mm/hr)	Total Rut Depth (mm)
1	<i>Moderate to heavily stressed site requiring high rut resistance</i>	45	<2.0	<4.0
2	<i>Very heavily stressed sites requiring very high rut resistance</i>	60	<5.0	<7.0

3.4. Umur Kelelahan (*Fatigue Life*)

Pell (1973) mendefinisikan kelelahan sebagai “fenomena dari retak akibat pengulangan atau naik turunnya tegangan memiliki nilai maksimum yang umumnya lebih kecil dari kekuatan tegangan dari material”.

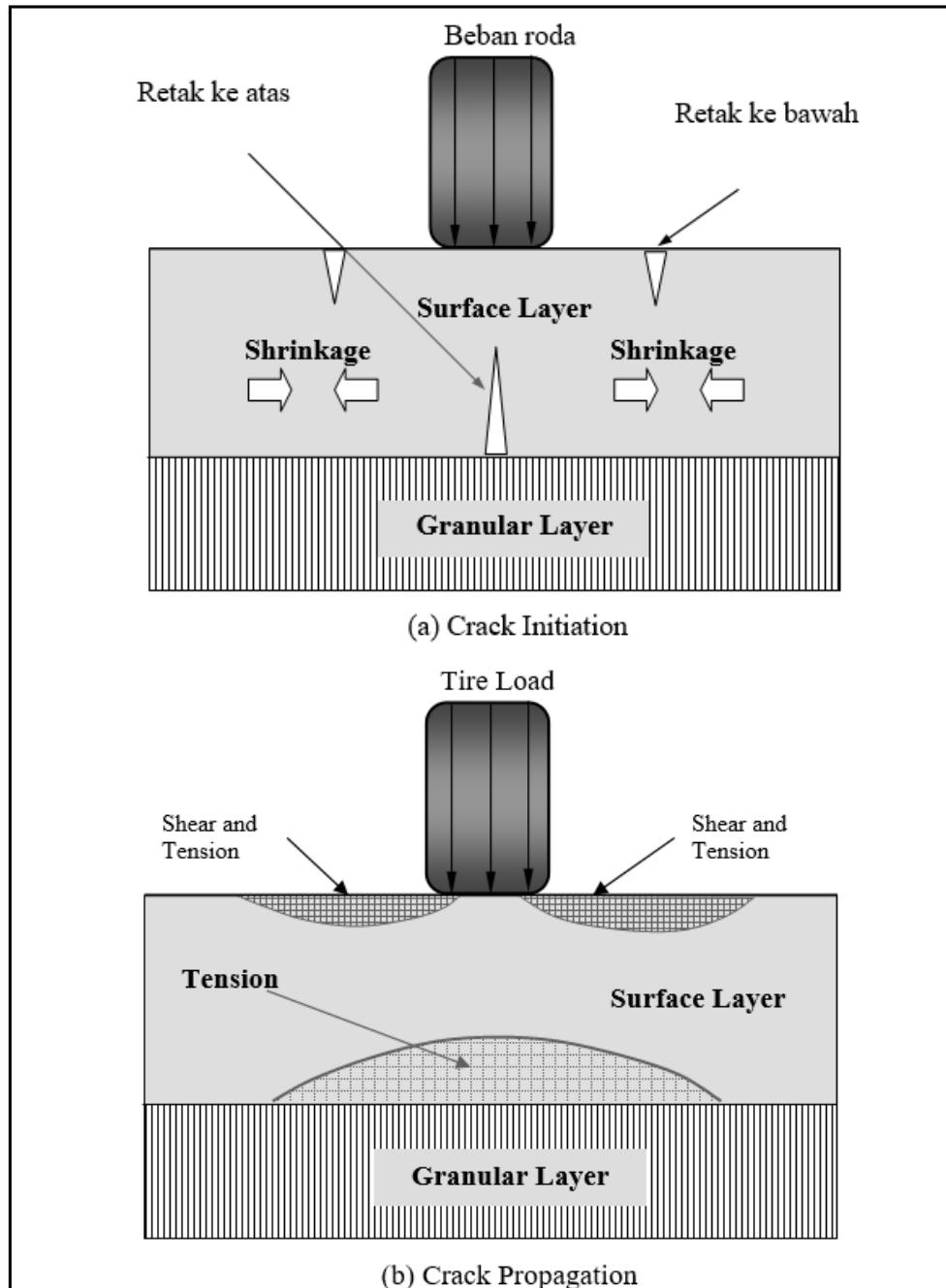
Tahanan terhadap kelelahan dari campuran aspal umumnya didefinisikan sebagai kemampuan untuk merespon pengulangan beban lalu lintas pada kondisi lingkungan yang berlaku tanpa retak yang signifikan atau kegagalan awal.

Kerusakan pada perkerasan aspal akibat tegangan yang berulang-ulang dan tekanan akibat beban lalu lintas dan faktor lingkungan dapat berkembang menjadi retak akibat kelelahan yang dipertimbangkan sebagai mekanisme kesulitan primer.

3.4.1. Mekanisme Retakan

Bentuk kelelahan digunakan untuk mengartikan kelelahan tegangan lebih baik dari kelelahan geser pada teknik perkerasan. Retak akibat kelelahan muncul pada tegangan tinggi atau pada lokasi dengan konsentrasi tegangan yang tinggi pada lapisan aspal. Pada lokasi tempat terjadinya pengulangan tegangan tinggi, retak kecil mulai terlihat. Tegangan tarik meningkat dan menyebabkan pengembangan retak yang besar.

Majidzadeh et al. (1971) mengemukakan 3 proses untuk menjelaskan umur kelelahan dari campuran aspal seperti kerusakan awal, kegagalan akhir dan perkembangannya. Proses retak akibat kelelahan dideskripsikan sebagai proses sederhana 2 fase seperti proses retak awal yang diikuti dengan perkembangan retakan seperti pada **Gambar 3.12**.



Gambar 3.12. Permulaan dan perkembangan retak

Beban pengulangan jalur kendaraan menyebabkan tegangan tarik dan geser yang muncul pada permukaan atau dekat dari permukaan dan tegangan tarik yang umum pada bagian bawah lapisan aspal. Setelah akumulasi kerusakan akibat kelelahan melewati kapasitas tahanan kelelahan dari lapisan aspal, permulaan retak berkembang dan retakan menjadi lebih berkembang. Perkembangannya memunculkan penyusutan lapisan aspal dan tegangan tarik yang disebabkan oleh penurunan temperatur.

Ditemukan bahwa kegagalan akibat kelelahan yang terjadi di WesTrack di Nevada, Amerika berasal dari lapisan bawah ke lapisan permukaan, meratakan studi lebih lanjut dari prediksi retak dari lapisan bawah ini.

Nunn (1989) melaporkan bahwa mekanisme perkembangan dari refleksi retakan umumnya dimulai dari permukaan jalan dan berkembang ke bawah untuk mendapatkan retak yang telah terjadi. Namun, celah yang terjadi akibat retak pada jalan memperlihatkan bahwa kebanyakan retakan dimulai dari atas lapisan permukaan (Sterling dan Zamhari, 1997). Kejadian tersebut sudah diverifikasi pada lokasi-lokasi sebagai berikut: UK, Africa, Arabia dan Indonesia.

3.4.2. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Retak Akibat Kelelahan

Pengaruh interaktif dari variabel campuran, lingkungan (temperatur), kondisi pembebanan dan kompaksi adalah faktor-faktor utama yang mempengaruhi kelelahan pada perkerasan. Deacon (1965) dan Epps (1968) melakukan penelitian untuk mengidentifikasi faktor-faktor pada desain perkerasan yang mempengaruhi kelelahan dan meminimalisasi retak akibat kelelahan.

Finn dan Epps (1980) mengindikasikan kemungkinan penyebab terjadinya retak akibat kelelahan sebagai penurunan dari segi struktural, rongga udara yang berlebihan, perubahan sifat dari aspal karena pengaruh waktu, gradasi agregat, potongan, perhitungan konstruksi dan drainase. **Tabel 3.2** menyimpulkan pengaruh dari variabel campuran yang dipilih pada respon kelelahan (Pell dan Cooper, 1975 ; Monismith, 1981).

Tabel 3.2. Faktor-faktor yang mempengaruhi kekakuan dan kelelahan pada campuran beton aspal (Pell dan Cooper, 1975 ; Monismith, 1981)

Faktor	Perubahan dalam faktor	Pengaruh perubahan pada faktor		
		Kekakuan	Umur kelelahan (controlled stress mode)	Fatigue life (controlled strain mode)
Viskositas Bitumen	Meningkat	Meningkat	Meningkat	Menurun
Kandungan Bitumen	Meningkat	Meningkat ¹	Meningkat ¹	Meningkat ²
Gradasi Agregat	Open to dense	Meningkat	Meningkat	Menurun ³
Rongga Udara	Menurun	Meningkat	Meningkat	Meningkat ³

Catatan:

1. Mencapai optimum pada tingkatan yang lebih tinggi yang diperlukan untuk stabilitas.
2. Tidak ada data yang penting. Kondisi konflik dari peningkatan kekakuan dan penurunan tegangan bitumen membuat spekulatif ini.
3. Tidak ada data yang penting.

Pengaruh dari parameter campuran dapat dijelaskan oleh hubungan umum untuk prediksi performa kelelahan yang dikembangkan oleh Shell (Bonnaure et al 1980) sebagaimana yang terlihat pada **Gambar III.13**. Mereka menganalisis faktor-faktor yang utama yang diperlukan untuk memprediksi performa kelelahan dari campuran bitumen sebagai berikut:

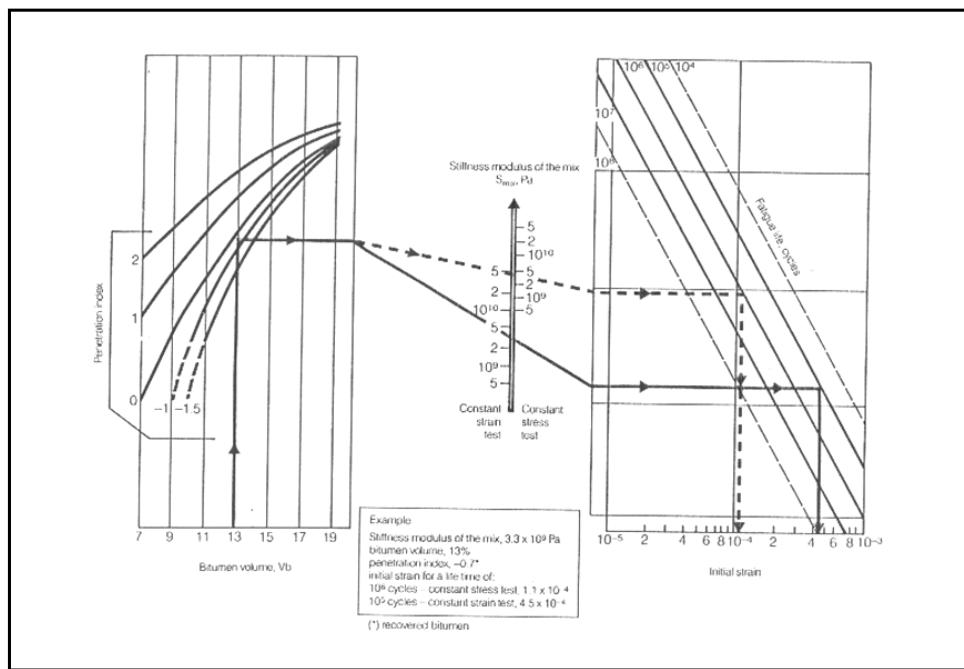
1. Volume kandungan bahan pengikat dari campuran (V_b) dihitung dari:

$$V_b = (100 - V_v) \frac{(M_b / G_b)}{(M_b / G_b) + (M_a / G_a)} \dots \dots \dots \quad (3.11)$$

dengan:

V_v = kandungan rongga (%); M_a , M_b = persentase agregat dan kandungan bahan pengikat dalam satuan massa; dan G_a , G_b = berat jenis agregat dan bahan pengikat.

2. Indeks penetrasi bitumen.
3. Modulus kekakuan campuran.
4. Tingkatan tegangan awal.



Gambar 3.13. Nomogram untuk memprediksi kelelahan laboratorium (Bonnaure et al 1980)

Pengaruh dari meningkatnya kandungan bahan pengikat meningkat ke nilai optimum adalah untuk meningkatkan kekakuan dan umur kelelahan. Namun, kekakuan menurun sebagaimana kandungan bahan pengikat meningkat di luar optimum. Menurut banyak penulis, jenis dan kandungan bahan pengikat memiliki pengaruh yang kuat terhadap hasil kelelahan (Pell dan Cooper, 1975; Brennan, 1990 dan Epps, 1972).

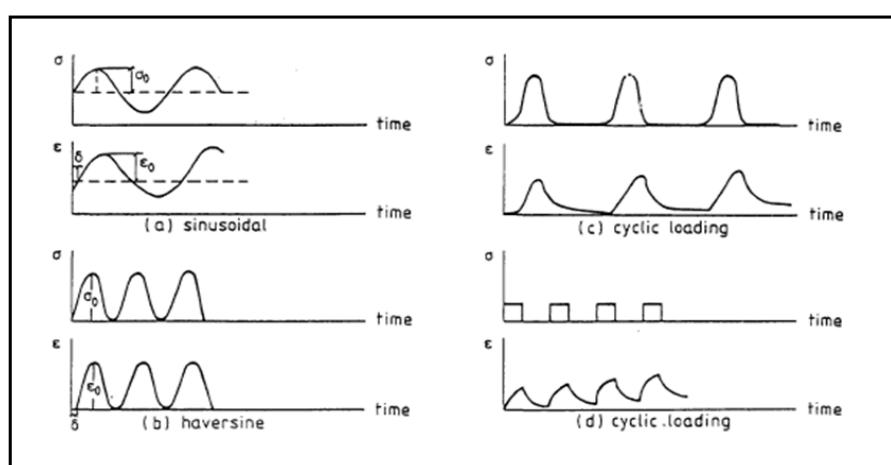
Kandungan pori adalah variabel penting dan Rumus 2.20 menunjukkan bahwa kandungan pori mempengaruhi V_b . Hasil umur kelelahan lebih baik dan kurang tersebar ketika kandungan pori berkurang (Bazin, 1967). Harvey dan Tsai (1996) menunjukkan bahwa kandungan pori-udara dan kandungan aspal memberikan pengaruh yang penting terhadap performa kelelahan. Mereka mengambil kesimpulan bahwa umur kelelahan meningkat dengan kandungan rongga udara yang lebih kecil dan kandungan aspal yang besar. Mengurangi rongga dengan kompaksi yang baik meningkatkan performa kelelahan dengan meningkatkan persentase volume dari bahan pengikat dan mengurangi tegangan dengan meningkatkan kekakuan.

Bentuk dari agregat diketahui tidak untuk mempengaruhi kekuatan kelelahan (Pell et al, 1968; Brennan et al 1990). Kepadatan agregat dan sifat-sifat tetap mempengaruhi tahanan kelelahan (Kim et al 1992). Yamin et al (2002) mempelajari tahanan kelelahan menggunakan gradasi

agregat yang bermacam-macam dan hasilnya menunjukkan bahwa gradasi agregat mempengaruhi kandungan pori dan kekakuan tahanan kekakuan.

Penambahan filler meningkatkan kekakuan sehingga mengurangi tegangan dibawah kondisi tegangan yang terkendali; meningkatkan umur kelelahan. Namun penambahan filler tidak mengubah posisi dari tegangan-kekakuan selain mengubah persentase volume dari bahan pengikat. Filler berfungsi sebagai bagian dari matriks keseluruhan agregat.

Variabel pembebahan dan lingkungan memiliki dampak langsung dan tak langsung. Dampak langsung mencakup bentuk dan durasi dari getaran beban yang digunakan di laboratorium dan uji temperatur. **Gambar 3.14.** menunjukkan berbagai macam pola pembebahan seperti bentuk gelombang sinusoidal, haversine, kotak dan segitiga dengan atau tanpa periode senggang pada pengujian di laboratorium untuk mensimulasikan getaran beban lalu lintas di lapangan. Bentuk yang paling umum digunakan adalah bentuk sinusoidal dan gelombang haversine pada karakteristik dan perkembangan dari prediksi model umur kelelahan.



Gambar 3.14. Contoh pola pembebahan (Said, 1988)

Raithby dan Ramshow (1972) mengkaji pengaruh dari sejarah pembebahan dari performa kelelahan dari aspal panas dan ditemukan bahwa pola pembebahan mempengaruhi umur kelelahan dari campuran sebagaimana yang terlihat pada **Tabel 3.3.**

Tabel 3.3. Pengaruh bentuk gelombang pada umur kelelahan (Raithby and Ramshow 1972)

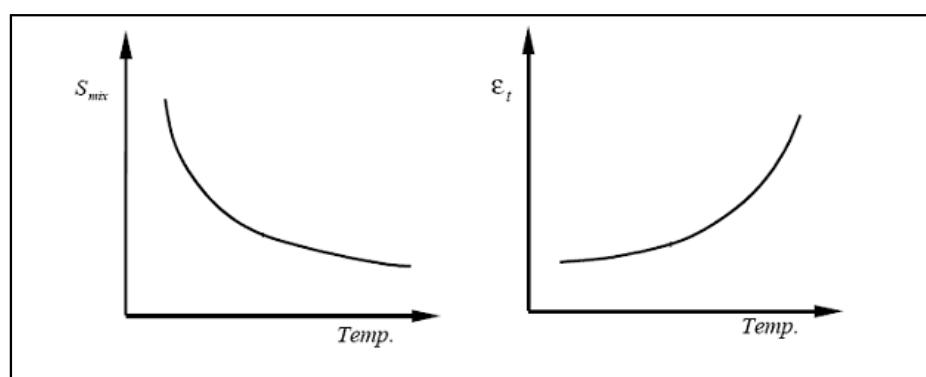
Waveform	Temp (°C)	Stress Amp (MN/m ²)	Initial Strain Amp.	Fatigue Life (Cycles)	Relative Life
	25	± 0.33 (48 psi)	17x10 ⁴	24,690	0.42
	25		12x10 ⁴	58,950	1.0
	25		0.67x10 ⁴	85,570	1.45

Penemuan mereka menunjukkan bagaimana umur kelelahan dipengaruhi oleh periode senggang dan ditemukan bahwa periode senggang tersebut mempengaruhi kekakuan dinamis. Ketika periode senggang diperhitungkan, kekakuan dinamis menurun secara cepat pada awalnya,

sebagaimana tanpa perhitungan periode senggang, kemudian perubahan kekakuan menjadi lebih berangsur-angsur lebih baik daripada pada kasus tanpa memperhitungkan periode senggang.

Bonnaure et al (1982) melaporkan bahwa pengaruh dari periode senggang pada beban tegangan-terkontrol menghasilkan peningkatan yang besar pada umur kelelahan daripada tegangan beban yang terkontrol. Pada umumnya, umur kelelahan meningkat dengan berkurangnya rasio periode pembebanan terhadap periode senggang.

Umur kelelahan tergantung pada temperatur. Hal ini terjadi karena bitumen sangat sensitif terhadap temperatur. Modulus kekakuan dari campuran aspal dipengaruhi oleh waktu dan temperatur pembebanan (TRB, 1975). Ketika temperatur $<0^{\circ}\text{C}$ dan $> 40^{\circ}\text{C}$, akan menyebabkan penurunan modulus kekakuan dari penghamparan bitumen jalan (Croney, 1991), kemudian perubahan kekakuan mempengaruhi performa kelelahan dari campuran bitumen, seperti pada **Gambar 3.15**.



Gambar 3.15. Pengaruh temperatur pada kekakuan dan tegangan tarik

Epps (1969) membandingkan performa kelelahan dari spesimen yang diperoleh dari perkerasan yang ditujukan pada beban lalu lintas aktual terhadap spesimen laboratorium dari komposisi yang sama. Beliau menyimpulkan bahwa pengaruh umur kekakuan dari campuran di lapangan meningkatkan umur kelelahan menjadi lebih luas untuk mengimbangi pengaruh besar dari kandungan rongga udara in-situ dan kerusakan akibat lalu lintas. Namun, sebaiknya dititikberatkan bahwa kekakuan aspal sehubungan dengan umurnya biasanya mengurangi kemampuannya untuk mencegah retakan (karena peningkatan getas) pada temperatur yang dingin.

3.4.3. Penilaian Umur Kelelahan Di Laboratorium

Penilaian dari umur kelelahan biasanya melibatkan pengujian dari spesimen di laboratorium. Spesimen dari campuran bitumen dipersiapkan dan diletakkan pada peralatan pembebanan berulang yang cocok. Setelah itu dilakukan aplikasi berulang dari getaran tegangan atau tingkatan tegangan sampai kegagalan kelelahan tercapai, baik dengan retak sempurna atau dengan reduksi yang penting pada kekakuan dari material.

Sebaiknya dilakukan pencatatan bahwa umur kelelahan dari campuran bitumen diperoleh pada uji laboratorium tidak sama dengan yang terjadi pada perkerasan aktual jalan dimana beban lalu

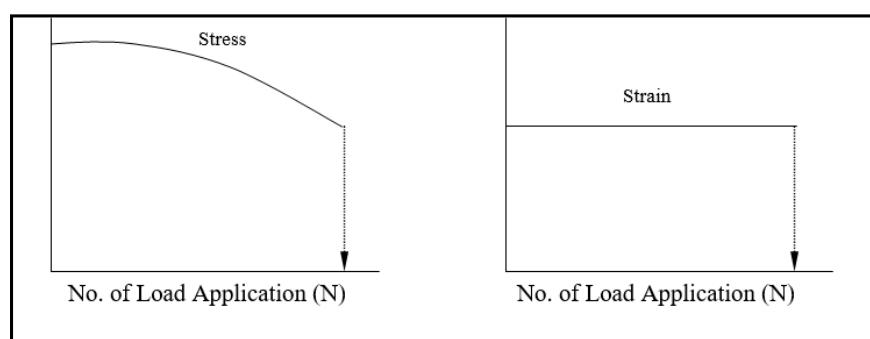
lintas memberikan dampak yang lebih kecil daripada beban spesimen yang diterima pada uji kelelahan di laboratorium (Whiteoak, 1990).

Metode yang bermacam-macam telah dikembangkan untuk pengujian kelelahan. Ada 3 jenis utama yang berbeda seperti uji tekuk atau lentur pada bahan uji spesimen kotak sebagai balok pendukung sederhana (2; 3 dan 4 points), uji tarik - tekan (langsung dan tak langsung) dan pengujian geser (Di Benedetto dan De La Roche, 1998).

Uji tekuk dilakukan untuk mewakili kekuatan pengulangan tekuk yang disebabkan oleh lintasan kendaran pada perkerasan, sementara uji tegangan mewakili kekuatan tegangan pada bagian dasar perkerasan, uji geser dan tekuk diperhitungkan sebagai kekuatan geser pada lapisan permukaan perkerasan (Assi, 1981).

Pada uji laboratorium, respon kelelahan ditunjukkan sebagai fungsi dari jenis pembebahan (Pells, 1978). Ada 2 kategori dasar dari pengujian seperti tekanan terkontrol dan tegangan terkontrol. Sangat penting untuk membedakan antara kedua kategori pembebahan tersebut dari pengujian kelelahan.

Semua pembebanan terdiri dari pengulangan beban dengan durasi yang pendek untuk mensimulasi kondisi pembebanan lalu lintas. Pada uji tegangan terkontrol, amplitudo tegangan nominal diatur secara konstan melalui umur retakan. Cara tegangan terkontrol terlihat pada Gambar II.19 untuk pembebanan sederhana. Tegangan atau beban pada cara tegangan terkontrol perlahan-lahan menurun seiring dengan meningkatnya jumlah pengulangan sejak spesimen perlahan-lahan mengalami kerusakan, dengan beban yang kurang untuk memproduksi deformasi yang sama. Cara pembebanan tegangan terkontrol mensimulasikan kondisi dalam ketipisan (<50mm tebal) perkerasan aspal (Moniminist dan Deacon, 1969).

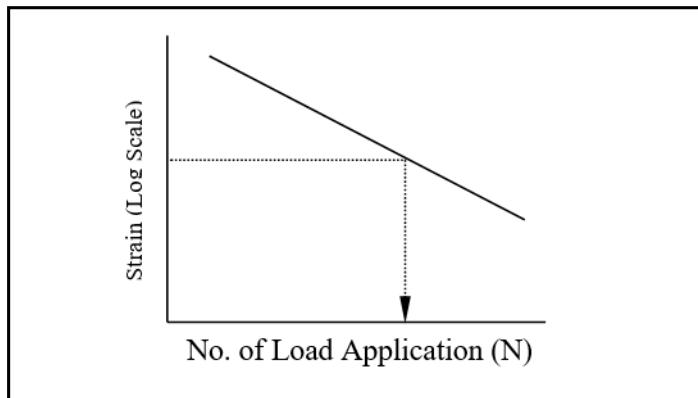


Gambar 3.16. Perilaku kelelahan dibawah pengaruh cara tegangan terkontrol

Umur kelelahan dari campuran bitumen diperoleh dengan melakukan puji pengulangan beban pada cara tegangan terkontrol. Data-data yang ada digambarkan pada bagian-bagian penggambaran seperti pada **Gambar 3.17.** hubungan antara tegangan (ε) dan umur kelelahan (N_f) diekspresikan sebagai:

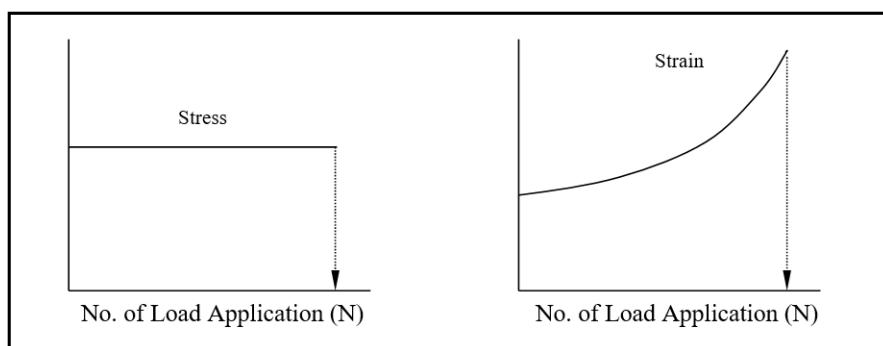
dengan:

- N_f = Jumlah aplikasi pembebanan sampai gagal.
- k_1 = Konstanta tergantung karakteristik campuran.
- ε = Tegangan yang terjadi.
- n_1 = Konstanta regresi (kemiringan tikungan).



Gambar 3.17. Diagram kelelahan untuk cara tegangan terkontrol

Pada pembebanan cara tegangan terkontrol, amplitudo tekanan diatur pada tingkatan yang sama sebagai kekuatan awal. Seiring dengan aplikasi pengulangan dari tekanan, amplitudo tegangan meningkat sampai mencapai dua kali lebih besar dari amplitudo awal ketika kekakuan lentur dikurangi menjadi setengah dari kekakuan lentur. Hal ini merupakan sebuah kegagalan. Namun, ada retakan yang tidak tetap pada spesimen. Cara tegangan terkontrol untuk pembebanan sederhana ditunjukkan pada **Gambar 3.18**.



Gambar 3.18. Perilaku kelelahan pada pengaruh cara tegangan terkontrol

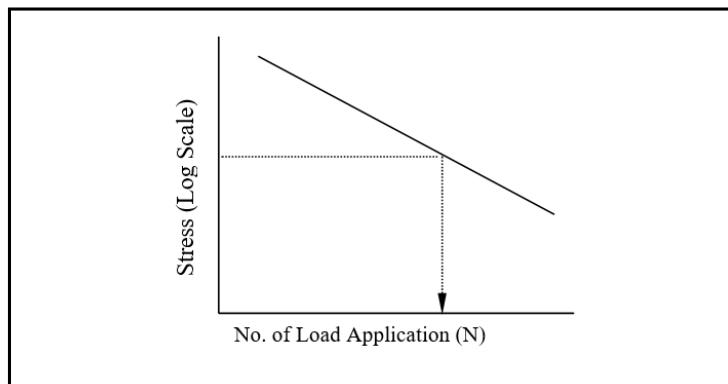
Diagram kelelahan didapatkan dengan menunjukkan uji pengulangan beban yang sederhana pada cara tegangan terkontrol pada tingkatan tegangan yang berbeda dan menentukan umur kelelahan yang cocok sebagaimana yang terlihat pada **Gambar 3.19**. Hubungan antara tegangan (σ) dan umur kelelahan (N_f) diekspresikan sebagai berikut:

$$N_f = k_2 \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{n_2} \quad \dots \dots \dots \quad (3.13)$$

dengan:

- N_f = Jumlah aplikasi pembebanan sampai mencapai kegagalan
- k_2 = Konstanta tergantung karakteristik pencampuran

σ = Tegangan yang diterapkan
 n_2 = Konstanta regresi (kemiringan tikungan)



Gambar 3.19. Diagram kelelahan pada cara tegangan terkontrol

Tegangan tarik maksimum dibuktikan sebagai kriteria retak kelelahan dari pengujian yang berbeda-beda pada campuran yang berbeda (Pell dan Cooper, 1975). Hasil dari cara tegangan terkontrol dikonversi menjadi tegangan dan tegangan di plot berlawanan dengan jumlah kegagalan. Hubungan antara jumlah putaran sampai mencapai kegagalan dan tegangan tarik maksimum sebagaimana:

$$N_f = k \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^n \quad \dots \dots \dots \quad (3.14)$$

dengan:

N_f = Jumlah aplikasi pembebanan sampai mencapai kegagalan.

k = Konstanta tergantung pada karakteristik campuran.

ε = Tegangan tarik maksimum.

n = Konstanta regresi (kemiringan tikungan).

Pada pengujian tegangan terkontrol, kekakuan campuran akan menentukan tingkatan tegangan dan kemudian umur kelelahan campuran. Campuran aspal dengan kekakuan lentur yang lebih besar memiliki umur kelelahan yang lebih lama (Pell 1978). Cara pembebanan ini mewakili respons dalam tebal perkerasan ($>100\text{mm}$).

Campuran bitumen dengan bahan pengikat yang kaku dibawah pengaruh cara tegangan terkontrol telah menunjukkan umur kelelahan yang lebih lama dan kemiringan yang rata pada hubungan tegangan-tekanan dari bagaimana pengujian pengulangan lentur dilakukan menggunakan 2 atau 4 titik tekuk (Epps and Monismith 1969; Pell dan Cooper 1975).

Akan ada perbedaan yang jelas pada hasil pengujian kelelahan antara tegangan terkontrol tergantung pada faktor-faktor yang disimpulkan pada **Tabel 3.4**.

Tabel 3.4. Kesimpulan dari beberapa faktor yang mempengaruhi tegangan terkontrol. (Rao et al 1990).

<i>Variabel</i>	<i>Controlled Stress</i>	<i>Controlled Strain</i>
<i>Ketebalan lapisan AC</i>	<i>Comparatively thick bituminous-bound layers</i>	<i>Thin bituminous-bound layer</i>
<i>Definisi kegagalan; number of cycles</i>	<i>Well- defined since specimen fractures</i>	<i>Arbitrary as the test is stopped when the load level has been reduced to some proportion of its initial value e.g. 50%</i>
<i>Scatter in fatigue test data</i>	<i>Less scatter</i>	<i>More scatter</i>
<i>Required number of specimens</i>	<i>Smaller</i>	<i>Larger</i>
<i>Simulation of long term influences</i>	<i>Long-term influences such as aging lead to increased stiffness and presumably increased fatigue life</i>	<i>Long-term influences leading to stiffness increase will lead to reduced fatigue life</i>
<i>Magnitude of fatigue life, N</i>	<i>Generally shorter life</i>	<i>Generally longer life</i>
<i>Effect of mixture variables</i>	<i>More sensitive</i>	<i>Less sensitive</i>
<i>Rate of energy dissipation</i>	<i>Faster</i>	<i>Slower</i>
<i>Rate of crack propagation</i>	<i>Faster than occurs in situ</i>	<i>More representative of in-situ conditions</i>
<i>Beneficial effects of rest periods</i>	<i>Greater beneficial effect</i>	<i>Less beneficial effect</i>

3.6. Durabilitas Campuran

Durabilitas campuran bitumen didefinisikan sebagai ketahanan terhadap cuaca dan dampak kasar dari lalu lintas (Epps et al, 2000). Definisi ini termasuk perubahan pada sifat-sifat campuran yang dihasilkan dari perkerasan aspal yang disebabkan oleh kontak dengan udara, degradasi atau disintegrasi dari agregat yang disebabkan oleh lalu lintas atau pengaruh lingkungan dan pengaruh air.

Uji spesimen dilakukan terhadap kondisi lingkungan dan sifat-sifat yang berhubungan dengan beban atau kekuatan lingkungan yang diukur sebelum dan setelah proses pemeliharaan. Ada 2 proses utama dapat dilakukan pada penelitian ini adalah kelemahan kelembaban untuk menilai pengaruh kerusakan dari air dan uji Cantabro untuk menilai disintegrasi campuran seiring dengan kehilangan sifat kohesi/adhesi.

3.6.1. Kepakaan Terhadap air

Tujuan dari pengujian kepekaan terhadap air adalah untuk menentukan pengaruh air pada agregat / daya ikat bitumen. *Stripping* didefinisikan sebagai menurunnya daya lekat antara agregat dan bahan pengikat dan umumnya disebabkan oleh lalu lintas, air, dan temperatur *in-service* yang tinggi.

Stripping adalah sulit untuk dikenali pada perkerasan hot mix asphalt (HMA) karena penampilan lapisan permukaan dapat berupa bentuk yang bermacam-macam seperti alur, penggeseran dan retakan (Robert et al, 1991). **Tabel 3.5.** menunjukkan beberapa definisi *stripping*.

Tabel 3.5. Definisi dari perpotongan campuran

Sumber	Definisi
Asphalt Institute (1974)	Breaking of the adhesive bond between the aggregate surface and binder
Tunnicliff et al (1981)	Displacement of asphalt cement film from aggregate surfaces by water caused by conditions under which the aggregate surface is more easily wetted by water than by bitumen
Kennedy et al (1984)	The physical separation of the asphalt cement from the aggregate produced by the loss of adhesion between the bitumen and the aggregate, which is primarily due to the action of water or water vapour
National Centre for Asphalt Technology (Robert et al 1991)	Weakening or eventual loss of the adhesive bond usually in the presence of moisture between the aggregate surface and binder in a HMA pavement or mixture
White et al (1999)	Loss of the adhesive bond between the bitumen and the aggregate surface
Hunter et al (2002)	Loss of integrity of a HMA mix through weakening of the bond between the aggregate and the binder

PMSL (1983) melaporkan bahwa banyak faktor yang menyebabkan *stripping*, yaitu mineral agregat dan komposisi kimiawi, sejarah pembentukan agregat, sifat-sifat bitumen, modifikasi bitumen selama proses penyimpanan dan penanganan, interaksi agregat / bitumen / bahan aditif, kandungan campuran kelembaban, temperatur dan waktu perawatan campuran, kandungan bitumen, iklim dan kualitas konstruksi.

Taylor dan Khosla (1983) menyimpulkan bahwa ada 4 mekanisme utama yang dapat dipertanggungjawabkan untuk *stripping* seperti detasement, displacement, emulsifikasi spontan dan tekanan pori. Detasemen adalah perpisahan dari lapisan bitumen dari permukaan agregat akibat lapisan air yang tipis tanpa perusakan yang jelas pada lapisan (Majidzadeh dan Brovold 1968). Hal ini tergantung pada ikatan antara bitumen dan agregat.

Displacement berbeda dari detasemen karena melibatkan displacement dari bitumen pada permukaan agregat melalui patahan pada lapisan bitumen (Yoon et al, 1988; Fromm 1974). Sumber dari rusaknya ikatan tersebut diakibatkan oleh pelapisan yang tidak terjadi dengan baik pada permukaan agregat, sehingga lapisan terpisah dengan agregat yang tajam dibagian ujung, lubang kecil pada lapisan aspal karena pelapisan bahan pengikat pada agregat yang tidak baik.

Emulsifikasi spontan adalah emulsi yang terbalik dari tetesan air pada bitumen. Fromm (1974) mendemonstarsikan bagaimana bentuk emulsi dan formasi emulsi merembes pada lapisan bawah, sehingga daya ikat akan rusak. Fromm (1974) mengobservasi bahwa emulsi spontan muncul ketika lapisan aspal terendam air dan tingkatan emulsifikasi tergantung pada aspal alami dan pengaruh adanya bahan aditif.

Perkembangan tekanan air pori yang terperangkap dapat menyebabkan kerusakan. Aplikasi beban lalu lintas yang berulang akan menyebabkan kerusakan yang lebih buruk akan berlanjut akibat tekanan air pori dari lapisan aspal dari permukaan agregat atau dapat menyebabkan retak kecil berlanjut pada aspal mastic.

Metode pengujian telah dikembangkan untuk memprediksikan stripping campuran beraspal dilaboratorium seperti terlihat pada **Tabel 3.6**.

Tabel 3.6. Rangkuman dari *moisture susceptibility test methods*
(Collop et al, 2004 and Robert et al, 1996)

Metode pengujian	Metode pengujian	Metode pengujian
Freeze-thaw pedestal test (FTPT)	23°C untuk 3 hari diikuti oleh -12°C untuk 15h, 23°C untuk 45 min dan 49°C untuk 9h	Cracking of specimen over a fulcrum
Immersion compression test	49°C untuk 4hari atau 60°C untuk 24h, 23°C untuk 4h	Compressive strength
Marshall stability test	Vacuum treatment under water at 0°C to 1°C, 60°C for 48h	Marshall Stability
Duriez test	18°C for 7 days	Unconfined compression test at 18°C and 1 mm/s
Lottman procedure	Distilled water at partial vacuum of 600mmHg for 30min, atmospheric pressure for 30min, -18°C to -12°C for 15h, 60°C for 24 h	Indirect tensile strength and stiffness
Tunnicliff and Root procedure	Distilled water at partial vacuum of 508mmHg until 55 – 80% saturation, 60°C for 24h.	Indirect stiffness
Modified Lottman procedure	Distilled water at partial vacuum of 508mmHg until 60 – 80% saturation, -18°C to -12°C for 15h, 60°C for 24h.	Indirect tensile strength and stiffness
Bitutest protocol	Partial vacuum of 510mmHg at 20°C for 30min, saturation at 60°C for 6h, 5°C for 16h.	NAT ITSM testing at 20°C
Immersion wheel-tracking test	Submerged in water at 40°C.	Wheel tracking at 25 cycles/min
Hamburg wheel tracing device	Submerged in water at 50°C	Wheel tracking at 50 passes/min
Environmental Conditioning System(ECS)	Water at partial vacuum of 254mmHg or 508mmHg for 30min, 3 hot cycles at 60°C for 6h, one freeze at -18°C for 6h.	Resilient modulus (stiffness) and permeability at 25°C.
Saturation Ageing Tensile Stiffness (SATS)	Distilled water at partial vacuum of 68kPa for 30, saturation at a pressure 2.1 MPa, 85°C for 65h.	ITSM testing at 20°C
Static Immersion	Conditioned in water bath at 60°C for 24h	Marshall Stability

3.7. Percobaan Cantabro Untuk Memprediksi Nilai Disintegrasi Campuran

Metode Cantabro pada awalnya dikembangkan di Spanyol (Ruiz, Alberalo, Perez dan Sanchez, 1990) dan sekarang menjadi *European Standard* (BS EN 12697-17, 1996). Metode ini pada awalnya dikembangkan untuk memprediksi ketahanan terhadap partikel yang hilang akibat abrasi dan pengaruh untuk aspal berpori (Porous Asphalt). Metode ini juga mungkin dapat digunakan untuk mengukur durabilitas untuk tipe-tipe campuran beraspal (Woodside and Woodward, 1997). Metode ini dulunya digunakan untuk membandingkan durabilitas dari bitumen modifikasi biasa dan bitumen modifikasi polimer pada campuran porous asphalt (Perez-Jimenez and Gordillo, 1990; Subagio et al 2005).

Perez-Jimenez dan Calzada (1989) memperkirakan kepekaan campuran beraspal terhadap air dengan membandingkan campuran kering dengan campuran yang terendam dalam air. Metode mereka mengeliminasi agregat halus dan filler pada uji sample dan metode ini mengizinkan taksiran nilai dari daya rekat bahan pengikat agregat, yang sangat sensitif terhadap partikel yang lebih halus.

4 KARAKTERISTIK MATERIAL PERKERASAN JALAN

4.1. Karakteristik Aggregat

Pada tahapan pertama adalah penentuan sifat-sifat material aggregat yang akan digunakan pada penelitian. Pengujian properti agregat dapat dilihat pada **Tabel 4.1.** dan **Tabel 4.2.** di bawah ini.

Tabel 4.1. Berat Jenis Agregat Kasar

Jenis Pengujian	Ukuran Saringan			
	½	¾	No. 4	No. 8
Berat Jenis (<i>bulk</i>)	2.554	2.566	2.517	2.585
Berat Jenis Permukaan Jenuh	2.621	2.634	2.586	2.659
Berat Jenis Semu (<i>apparent</i>)	2.738	2.753	2.703	2.791
Penyerapan (<i>absorption</i>)	2.630	2.644	2.735	2.851
Berat Jenis Efektif	2.646	2.659	2.610	2.688

Tabel 4.2. Berat Jenis Agregat Halus dan *Filler*

Jenis Pengujian	Ukuran Saringan					
	No. 16	No. 30	No. 40	No. 50	No. 100	No. 200
Berat Jenis (<i>bulk</i>)	2.553	2.503	2.513	2.499	2.411	2.292
Berat Jenis Permukaan Jenuh	2.616	2.577	2.587	2.560	2.480	2.360
Berat Jenis Semu (<i>apparent</i>)	2.727	2.705	2.713	2.661	2.591	2.458
Penyerapan (<i>absorption</i>)	2.501	2.987	2.944	2.438	2.881	2.944
Berat Jenis Efektif	2.640	2.604	2.613	2.580	2.501	2.375
Berat Jenis <i>Filler</i>	2.599					

4.2. Karakteristik Aspal

Analisis data yang dilakukan merupakan hasil – hasil dari penelitian sifat fisik campuran bitumen dengan plastik. Semua hasil penelitian akan dibandingkan dengan aspal murni pen 60/80 dan syarat Binamarga – Departemen Pekerjaan Umum.

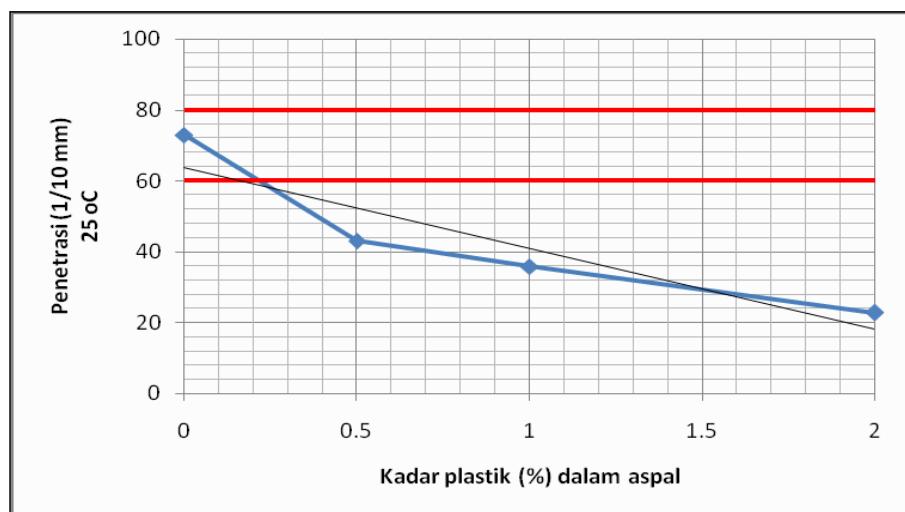
4.2.1. Penetrasi

Nilai penetrasi merupakan dalamnya jarum dengan ukuran tertentu pada suhu tertentu, dan beban tertentu masuk kedalam aspal (dalam satuan 0,1 mm). Penetrasi yang dilakukan divariasikan terhadap suhu 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C. Hasil pengujian penetrasi dapat dilihat pada **Tabel 4.3.**

Tabel IV.3 Tabel penetrasi

Penetrasi pada suhu 25 °C				
No Cawan	Persen (%) tambahan plastik terhadap aspal pen 60/80			
	0	0,5	1	2
I	74	41,6	37,6	24,2
II	71,8	44,6	34,2	21,4
Σ	145,8	86,2	71,8	45,6
Rata-rata	72,9	43,1	35,9	22,8
Penetrasi pada suhu 30 °C				
No Cawan	Persen (%) tambahan plastik terhadap aspal pen 60/80			
	0,5	1	2	
I	94,2	65,6	41,6	
II	98,2	62,2	37,8	
Σ	192,4	127,8	79,4	
Rata-rata	96,2	63,9	39,7	
Penetrasi pada suhu 35 °C				
No Cawan	Persen (%) tambahan plastik terhadap aspal pen 60/80			
	0,5	1	2	
I	123,4	105,6	60,4	
II	132,8	108,8	65,4	
Σ	256,2	214,4	125,8	
Rata-rata	128,1	107,2	62,9	
Penetrasi pada suhu 40 °C				
No Cawan	Persen (%) tambahan 46lastic terhadap aspal pen 60/80			
	0,5	1	2	
I	174,8	137,6	103,2	
II	173,2	141,8	100,2	
Σ	348	279,4	203,4	
Rata-rata	174	139,7	101,7	

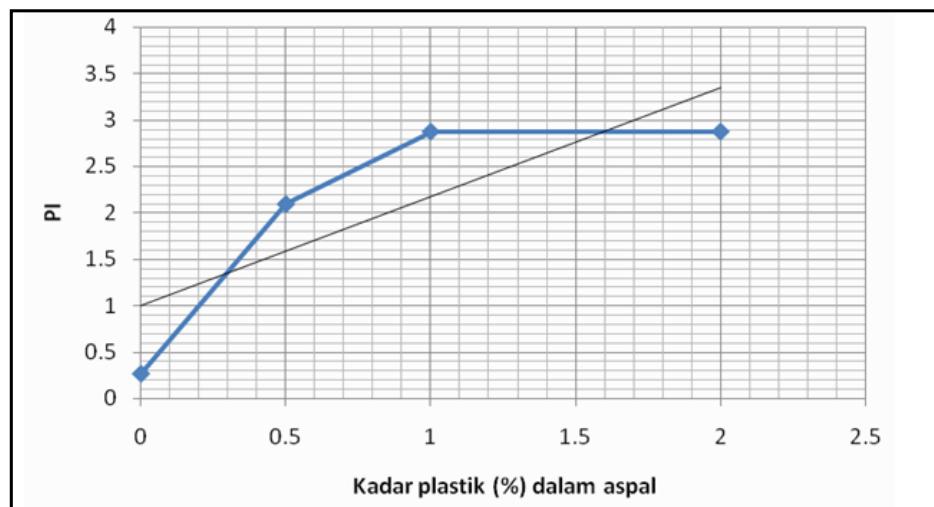
Untuk mengetahui pengaruh penambahan 46lastic ke dalam bitumen murni terhadap pengujian penetrasi pada suhu 25 °C dapat dilihat pada **Gambar 4.1**.



Gambar 4.1. Hubungan angka penetrasi dengan kadar plastik.

Dari **Gambar 4.1.** terlihat bahwa penambahan plastik kedalam aspal (bitumen) memiliki pengaruh besar terhadap nilai penetrasi aspal. Perubahan nilai penetrasi yang terjadi cenderung turun, penurunan terbesar terjadi pada pembahan plastik sebesar 2 %. Hal ini terjadi karena plastik yang termasuk dalam polimer jenis HDPE merupakan bahan yang memiliki sifat mekanik yield strength yang tinggi, yaitu mampu menahan beban yang berat namun tetap elastis. Sifat plastik yield strength yang tinggi yang membuat campuran aspal (bitumen) plastik menjadi lebih rendah nilai pentrasinya. Adapun batas standar pengujian aspal pen 60/80 untuk pemeriksaan penetrasi menurut SNI adalah minimal 60mm dan maksimal 80 mm.

Nilai penetrasi sangat menentukan dalam pengukuran nilai PI (*penetration index*). PI adalah parameter yang digunakan dalam menentukan kepekaan aspal terhadap temperatur, sehingga umur aspal untuk menjadi retak/mengeras dapat ditentukan. Nilai PI dapat terlihat pada **Gambar 4.2.**



Gambar 4.2 Hubungan PI dengan kadar plastik.

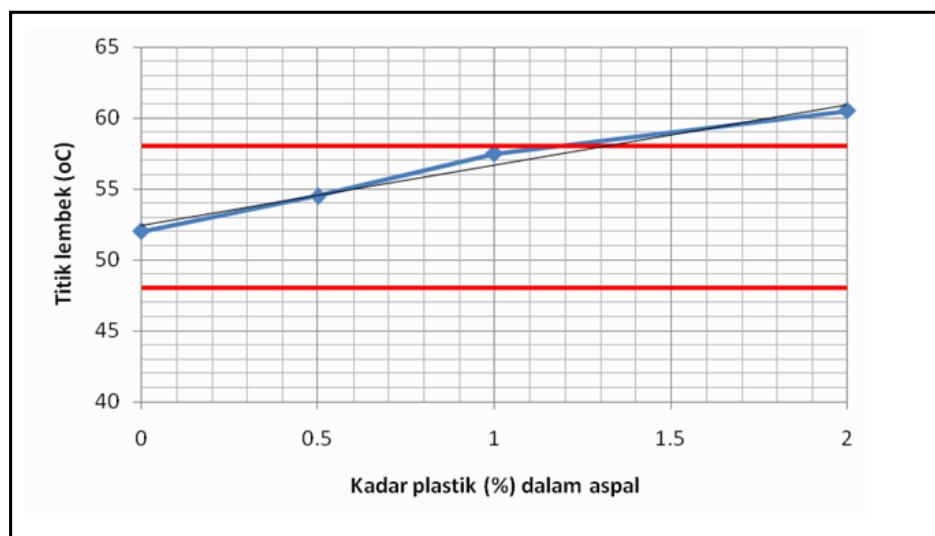
4.2.2 Titik Lembek

Titik lembek adalah suhu pada saat bola baja, dengan berat tertentu, mendesak turun suatu lapisan aspal yang tertahan dalam cincin berukuran tertentu, sehingga aspal tersebut menyentuh plat dasar yang terletak dibawah cincin pada ketinggian 25.4 mm, sebagai akibat kecepatan pemanasan tertentu. Hasil pengujian titik lembek dapat dilihat pada **Tabel 4.5**.

Tabel 4.5 Titik Lembek

Titik Lembek				
Sampel	Persen (%) tambahan plastik terhadap aspal pen 60/80			
	0	0.5	1	2
I	52	55	57	60
II	52	54	58	61
Σ	104	109	115	121
Rata-rata	52	54.5	57.5	60.5

Untuk mengetahui pengaruh penambahan plastik ke dalam bitumen murni terhadap pengujian titik lembek dapat dilihat pada **Gambar 4.3**.



Gambar 3.3 Hubungan titik lembek dengan kadar plastik.

Dari **Gambar 4.3** terlihat bahwa penambahan plastik kedalam aspal (bitumen) memiliki pengaruh besar terhadap nilai titik lembek. Perubahan nilai titik lembek yang terjadi cenderung naik, kenaikan terbesar terjadi pada pembahan plastik sebesar 2 %. Hal ini terjadi karena plastik mempunyai sifat *High Temperatur Resistance*, sehingga tahan panas sampai suhu 120 °C. Sifat *High Temperatur Resistance* pada plastik yang membuat campuran aspal (bitumen) plastik menjadi tinggi titik lembeknya. Semakin banyak kadar plastik yang ditambahkan kedalam aspal maka titik lembeknya semakin tinggi. Adapun batas standar pengujian aspal pen 60/80 untuk pemeriksaan titik lembek menurut SNI adalah minimal 48 °C dan maksimal 58 °C.

4.2.3. Daktilitas

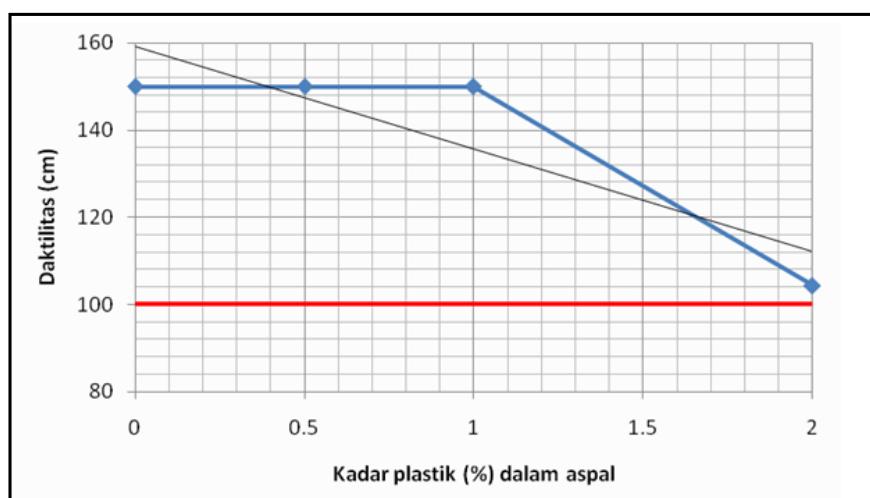
Daktilitas adalah nilai keelastisitasan aspal, yang diukur dari jarak terpanjang, apabila antara dua cetakan berisi bitumen padat yang ditarik sebelum putus pada suhu 25 °C dengan kecepatan 50 mm/menit. Hasil pengujian daktilitas dapat dilihat pada **Tabel 4.6**.

Tabel 4.6 Daktilitas

Sampel	Persen (%) tambahan plastik terhadap aspal pen 60/80			
	0	0.5	1	2
I	150	150	150	104.3

Untuk mengetahui pengaruh penambahan plastik ke dalam bitumen murni terhadap pengujian daktilitas dapat dilihat pada gambar 4.3.

Dari **Gambar 4.4** terlihat bahwa penambahan plastik kedalam aspal (bitumen) memiliki pengaruh besar terhadap nilai daktilitas. Perubahan nilai daktilitas yang terjadi cenderung turun, penurunan terbesar terjadi pada pembahan plastik sebesar 2 %. Hal ini terjadi karena plastik mempunyai sifat *Excellent Dimension Stability*, yaitu mampu dibentuk dan tidak akan mengalami perubahan bentuk setelah selesai dibentuk. Semakin banyak kadar plastik yang ditambahkan kedalam aspal maka Daktilitasnya semakin rendah. Adapun batas standar pengujian aspal pen 60/80 untuk pemeriksaan daktilitas menurut SNI adalah minimal 100 cm.



Gambar 4.4 Hubungan daktilitas dengan kadar plastik.

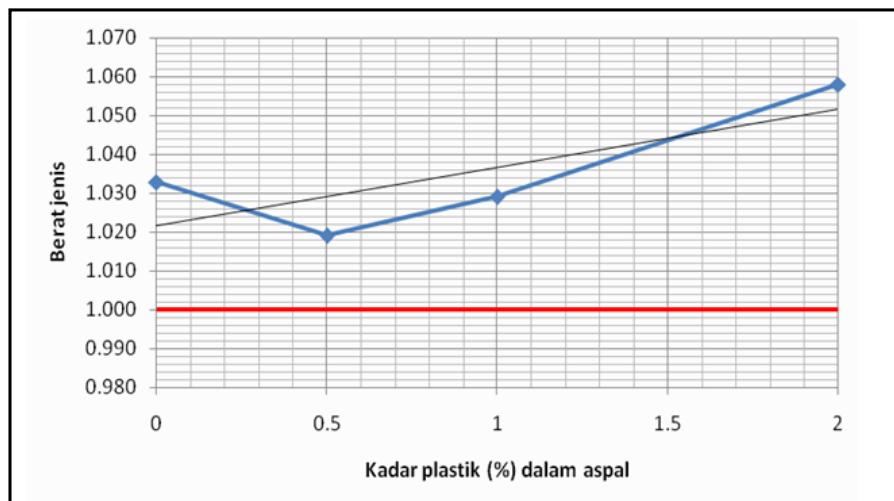
4.2.4. Berat Jenis

Pengujian berat jenis dimaksudkan untuk menentukan berat jenis aspal dengan pignometer. Berat jenis aspal adalah perbandingan antara berat aspal dan air suling dengan isi yang sama pada suhu tertentu. Hasil pengujian Berat jenis dapat dilihat pada **Tabel 4.7**.

Tabel 4.7 Berat Jenis

Persen (%) tambahan plastik terhadap aspal pen 60/80			
0	0.5	1	2
1.033	1.019	1.029	1.058

Untuk mengetahui pengaruh penambahan plastik ke dalam bitumen murni terhadap pengujian daktilitas dapat dilihat pada **Gambar 4.5**.

**Gambar 4.5 Hubungan berat jenis dengan kadar plastik.**

Dari **Gambar 4.5** terlihat bahwa penambahan plastik kedalam aspal (bitumen) memiliki pengaruh besar terhadap nilai berat jenis. Perubahan nilai berat jenis yang terjadi cenderung naik berdasarkan kadar plastik, tetapi pada penambahan plastik sebesar 0.5% dan 1 % dari berat aspal berat jenis campuran berada dibawah berat jenis aspal murni sedangkan penambahan plastik sebesar 2% ke atas menyebabkan berat jenisnya lebih besar dari pada berat jenis aspal murni. Berat jenis plastik sendiri adalah 0.96 g/cm^3 , sedangkan batas standar pengujian aspal pen 60/80 untuk pemeriksaan berat jenis menurut SNI adalah minimal 1.

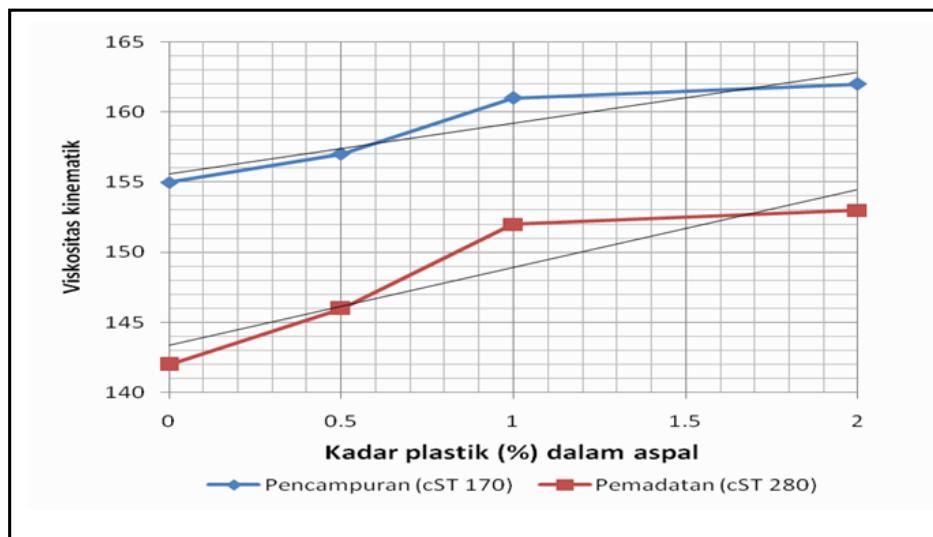
4.2.5. Viskositas Kinematik

Pengujian viskositas kinematik dimaksudkan untuk mengetahui besarnya suhu pemanasan dan pemanasan aspal. Suhu pemanasan adalah pada saat viskositas aspal mencapai 170 CSt sedangkan suhu pemanasan adalah pada saat viskositas aspal mencapai 280 CSt. Hasil pengujian viskositas kinematik dapat dilihat pada **Tabel 4.8**.

Tabel 4.8 Viskositas Kinematik

Pekerjaan	Suhu (°C)			
	Persen (%) tambahan plastik terhadap aspal pen 60/80			
	0	0.5	1	2
Pencampuran (170 cST)	155	157	161	162
Pemanasan (280 cST)	142	146	152	153

Untuk mengetahui pengaruh penambahan plastik ke dalam bitumen murni terhadap pengujian viskositas kinematik dapat dilihat pada **Gambar 4.6**.



Gambar 4.6 Hubungan viskositas kinematik dengan kadar plastik.

Dari **Gambar IV.6** terlihat bahwa penambahan plastik kedalam aspal (bitumen) memiliki pengaruh besar terhadap nilai viskositas kinematik (suhu pencampuran dan suhu pemanasan). Perubahan nilai yang terjadi cenderung naik berdasarkan kadar plastik, hal ini dapat terjadi karena plastik mempunyai sifat *Excellent Dimension Stability* dan juga sifat *High Temperatur Resistance* sehingga campuran aspal plastik menjadi lebih sulit dicairkan dan juga memiliki kekentalan yang tinggi.

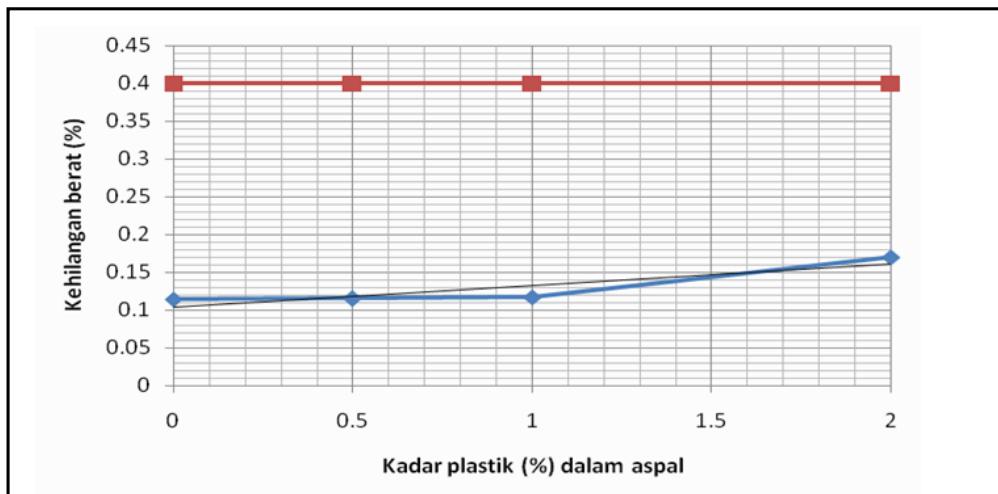
4.2.6. Kehilangan Berat dengan RTFOT

Pengujian kehilangan berat yang dimaksudkan untuk mengetahui penurunan berat aspal padat dengan cara pemanasan dan tebal tertentu, yang dinyatakan dalam persen berat semula. Hasil pengujian viskositas kinematik dapat dilihat pada **Tabel 4.9**.

Tabel 4.9 Kehilangan Berat setelah RTFOT

Sampel	Kehilangan Berat Aspal RTFOT (%)			
	Persen (%) tambahan plastik terhadap aspal pen 60/80			
	0	0.5	1	2
I	0.1135	0.1146	0.1163	0.185
II	0.1147	0.116	0.1179	0.1544
Σ	0.2282	0.2306	0.2342	0.3394
Rata-rata	0.1141	0.1153	0.1171	0.1697

Untuk mengetahui pengaruh penambahan plastik ke dalam bitumen murni terhadap pengujian viskositas kinematik dapat dilihat pada **Gambar 4.7**.



Gambar 4.7 Hubungan kehilangan berat dengan kadar plastik.

Dari **Gambar IV.7** terlihat bahwa penambahan plastik kedalam aspal (bitumen) memiliki pengaruh besar terhadap nilai kehilangan berat. Kehilangan berat yang terjadi dikarenakan adanya zat-zat yang masih bias menguap sewaktu pemasangan terjadi baik yang berasal dari aspal ataupun dari plastik. Kehilangan berat juga dapat dipengaruhi oleh sering atau lamanya pemanasan yang dilakukan sebelum pengujian dilakukan. Sebaiknya benda uji yang digunakan dalam percobaan kehilangan berat harus dalam keadaan baru dicampur. Batas standar pengujian aspal pen 60/80 untuk pemeriksaan kehilangan berat menurut SNI adalah minimal 0.4 % dari berat semula.

4.2.7. Penetrasi Setelah Kehilangan Berat

Pengujian penetrasi setelah kehilangan berat dimaksudkan untuk mengetahui nilai penetrasi aspal padat setelah mengalami kehilangan berat akibat pemanasan dan tebal tertentu. Hasil pengujian penetrasi setelah kehilangan berat dapat dilihat pada **Tabel 4.10**.

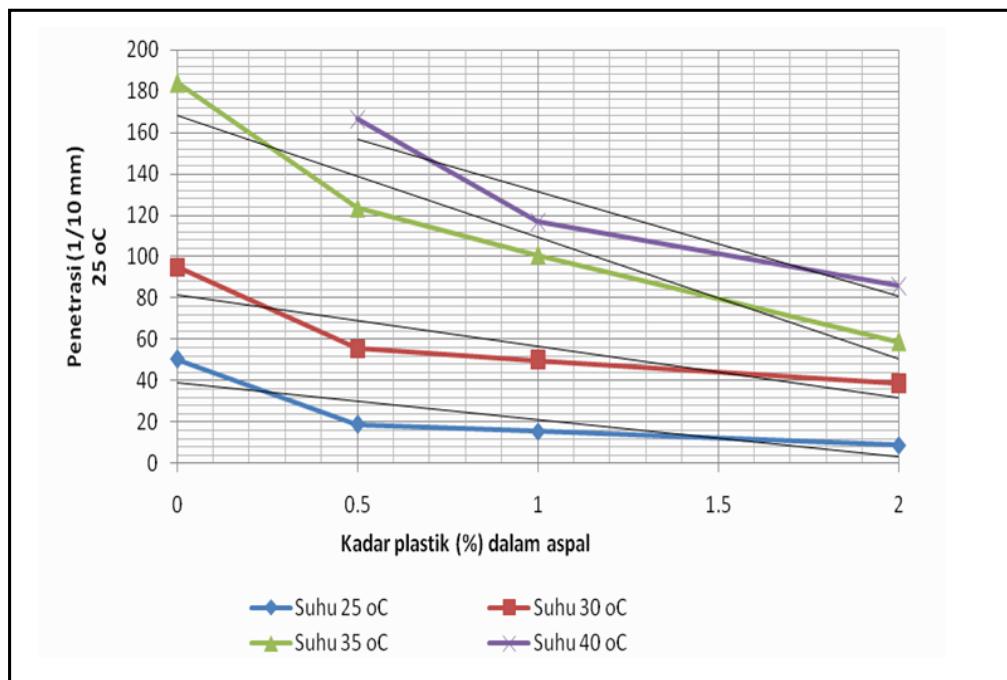
Tabel 4.10 Penetrasi Setelah Kehilangan Berat RTFOT

Suhu (°C)	Penetrasi Setelah Kehilangan Berat			
	Persen (%) tambahan plastik terhadap aspal pen 60/80			
	0	0.5	1	2
25	50.4	18.8	15.4	8.8
30	95	55.6	49.6	38.4
35	184	123.4	100.8	58.8
40	-	166.6	116.8	85.8

Dari **Tabel 4.8** terlihat bahwa penambahan plastik kedalam aspal (bitumen) memiliki pengaruh besar terhadap nilai penetrasi aspal. Perubahan nilai penetrasi yang terjadi cenderung turun, penurunan terbesar terjadi pada pembahan plastik sebesar 2 %. Penetrasi setelah kehilangan berat mempunyai nilai yang lebih kecil bila dibandingkan dengan nilai penetrasi sebelum kehilangan berat dengan kadar penambahan plastik yang sama. Hal ini disebabkan karena seringnya benda uji mengalami pemanasan dalam suhu tinggi dalam waktu yang lama sehingga setelah benda uji dingin maka benda uji semakin keras. Batas standar pengujian aspal pen 60/80 untuk

pemeriksaan penetrasi setelah kehilangan berat menurut SNI adalah minimal 75% dari penetrasi sebelum kehilangan berat.

Untuk mengetahui pengaruh penambahan plastik ke dalam bitumen murni terhadap pengujian pemeriksaan penetrasi setelah kehilangan berat dapat dilihat pada **Gambar 4.8**.



Gambar 4.8 Hubungan angka penetrasi setelah kehilangan berat dengan kadar plastik.

5 KINERJA DAN DURABILITAS CAMPURAN BERASPAL

TAI (1985) mengemukakan tujuh sifat yang harus dipunyai campuran beraspal sebagai lapis perkerasan, yaitu:

1. Stabilitas
2. Keawetan
3. Kelenturan
4. Ketahanan terhadap lelah (fatigue)
5. Kemudahan pelaksanaan
6. Kekesatan permukaan
7. Kedap air

Stabilitas adalah kemampuan campuran beraspal untuk menahan deformasi akibat beban lalu lintas. Perkerasan yang tidak stabil ditandai dengan timbulnya alur atau deformasi plastis dan gelombang.

Keawetan campuran beraspal menunjukkan kemampuan campuran untuk menahan pengaruh buruk dari lingkungan dan iklim (udara, air dan temperatur). Pengaruh ini lazim dikenal sebagai efek penuaan aspal yang antara lain meliputi oksidasi dan penguapan fraksi ringan dari aspal.

Perkerasan dapat melendut secara permanen karena pemanasan lapisan perkerasan oleh lalu lintas, dan atau akibat penurunan bahan jalan akibat proses pemampatan badan jalan (konsolidasi). Kelenturan campuran adalah kemampuan campuran untuk mengakomodasikan lendutan permanen dalam batas-batas tertentu tanpa mengalami retak.

Beban berulang dari roda kendaraan yang melintasi perkerasan akan menimbulkan lendutan berulang pada lapisan campuran beraspal. Ketahanan campuran beraspal terhadap lelah adalah kemampuan lapisan beraspal untuk menahan lendutan akibat beban berulang sehingga tidak terlalu cepat mengalami keretakan.

Lapis permukaan dituntut pula untuk mempunyai kekesatan yang cukup tinggi. Hal ini penting untuk menjamin keselamatan pemakai jalan terutama pada kondisi basah.

Air dan udara akan mempercepat proses penuaan aspal. Disamping itu air dapat menimbulkan efek pengelupasan film aspal dari permukaan agregat (stripping). Oleh sebab itu kekedapan lapis beraspal diperlukan untuk semaksimum mungkin mencegah lolosnya air dan kontak langsung aspal dengan udara. Sifat kedap terhadap air tidak disyaratkan untuk lapis aspal porus dimana pada campuran beraspal jenis ini sifat lolos air sengaja dibuat sehingga lapis air dapat dengan segera diserap dan dialirkan melalui tubuh lapisan yang bersangkutan.

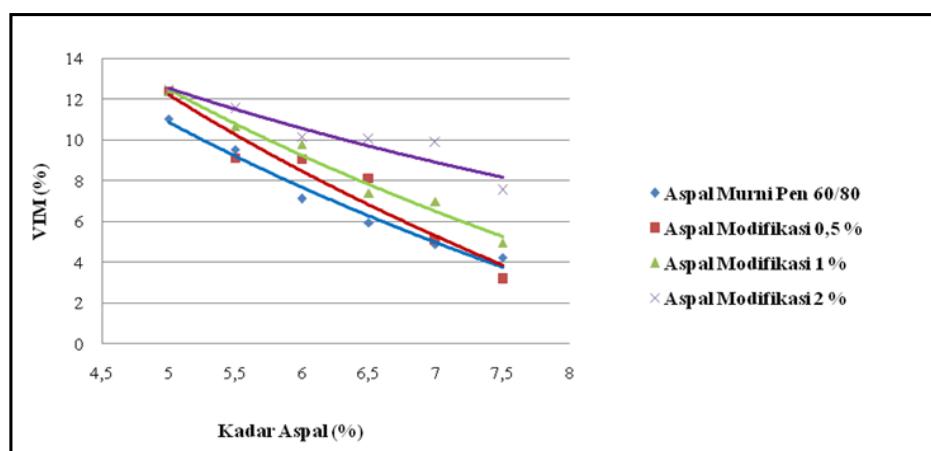
Tuntutan terhadap kemudahan pelaksanaan (workability) sangat ditekankan terutama pada proses penghamparan dan pemanasan. Campuran yang di laboratorium menunjukkan stabilitas yang tinggi bukan mungkin di lapangan ternyata sulit dihampar dan atau dipadatkan. Kesulitan pencampuran jarang terjadi bila agregat cukup kering dan bahan pengikat (binder) yang digunakan mempunyai viskositas pencampuran yang dapat dicapai pada suhu yang wajar.

Proses pemenuhan ketujuh sifat tersebut di atas tidak selalu sejalan antara satu dengan yang lainnya. Misalnya, sifat keawetan menuntut lapis film aspal yang tebal padahal volume aspal yang tinggi dapat menurunkan stabilitas campuran. Untuk itu, diperlukan suatu perencanaan campuran agar campuran beraspal yang dihasilkan secara ekonomis dapat memenuhi ketujuh sifat penting tersebut secara berimbang.

Kinerja campuran beraspal biasanya dihubungkan dengan stabilitas dan kekuatan campuran beraspal. Stabilitas adalah kemampuan campuran beraspal untuk menahan deformasi akibat beban lalu lintas. Perkerasan yang tidak stabil ditandai dengan timbulnya alur atau deformasi plastis dan gelombang.

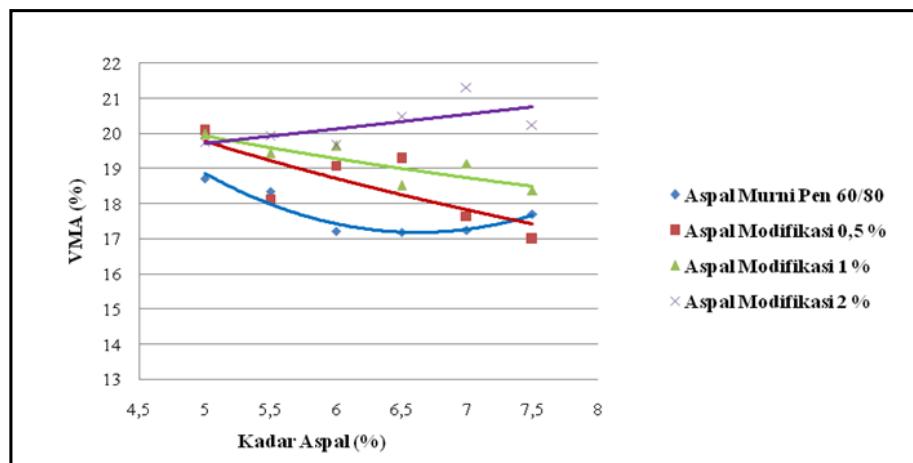
5.1. Marshall Test

Analisis hasil uji Marshall terdiri dari analisis hasil parameter Marshall pada campuran Laston AC-WC dengan menggunakan plastik HDPE 0%, 0,5%, 1% dan 2% terhadap berat aspal.



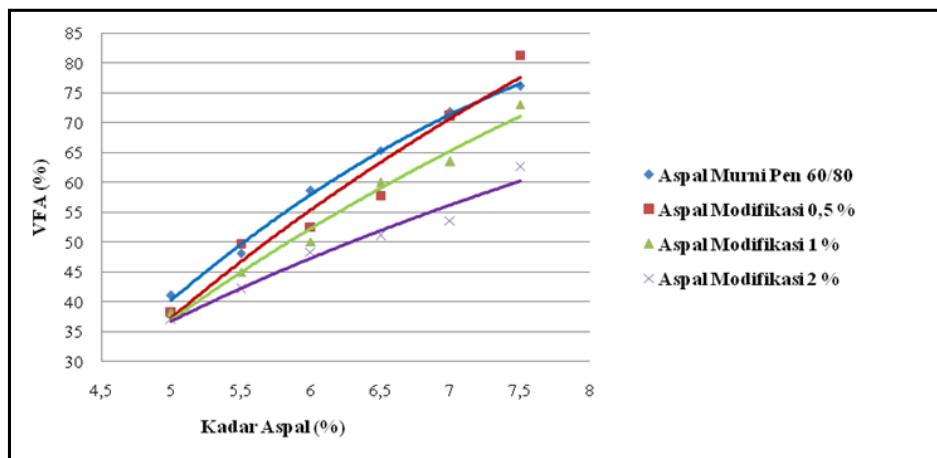
Gambar 5.1. Nilai VIM Pada Aspal Modifikasi

Pada **Gambar 5.1** di atas dapat dilihat bahwa nilai VIM pada campuran aspal modifikasi cenderung lebih besar dengan bertambahnya kadar plastik HDPE, kemungkinan karena campuran beton aspal yang menggunakan aspal modifikasi memiliki pori udara lebih besar. Besarnya pori udara yang terdapat pada campuran aspal modifikasi dipengaruhi oleh plastik yang kurang baik mengisi rongga agregat.



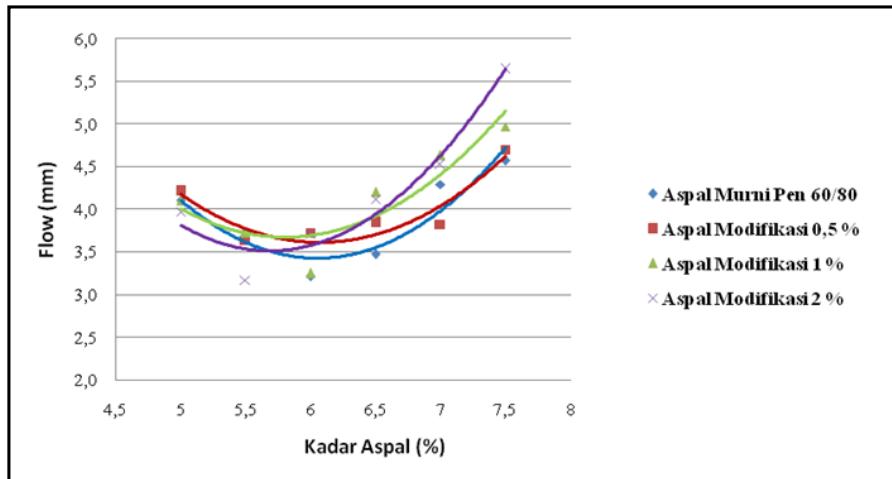
Gambar 5.2. Nilai VMA Pada Aspal Modifikasi

Nilai VMA pada aspal modifikasi semakin meningkat dengan bertambahnya kadar plastik HDPE yang digunakan dalam campuran seperti terlihat pada **Gambar V.2**, hal ini dimungkinkan terlalu banyak plastik yang terdapat pada aspal sehingga rongga campuran menjadi lebih besar.



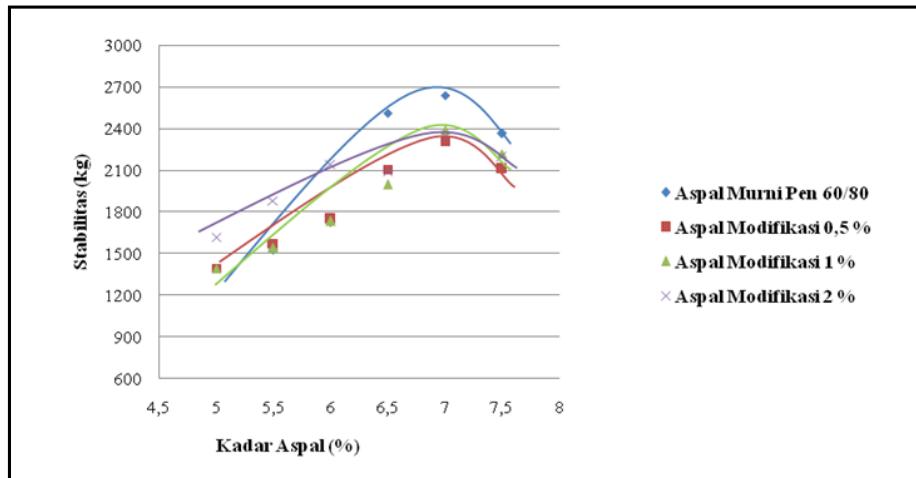
Gambar 5.3. Nilai VFA Pada Aspal Modifikasi

Gambar 5.3. menunjukkan bahwa nilai VFA pada campuran modifikasi lebih kecil daripada aspal tanpa modifikasi. Kecilnya nilai VFA pada campuran modifikasi dipengaruhi jumlah plastik yang banyak, sehingga aspal yang dimodifikasi hanya sedikit yang dapat mengisi pori agregat campuran.



Gambar 5.4. Nilai Flow Pada Aspal Modifikasi

Nilai Flow (keleahan) pada campuran aspal modifikasi meningkat dengan bertambahnya persen plastik yang dicampur ke dalam aspal, hal ini dikarenakan bertambah tebalnya selimut aspal pada campuran.

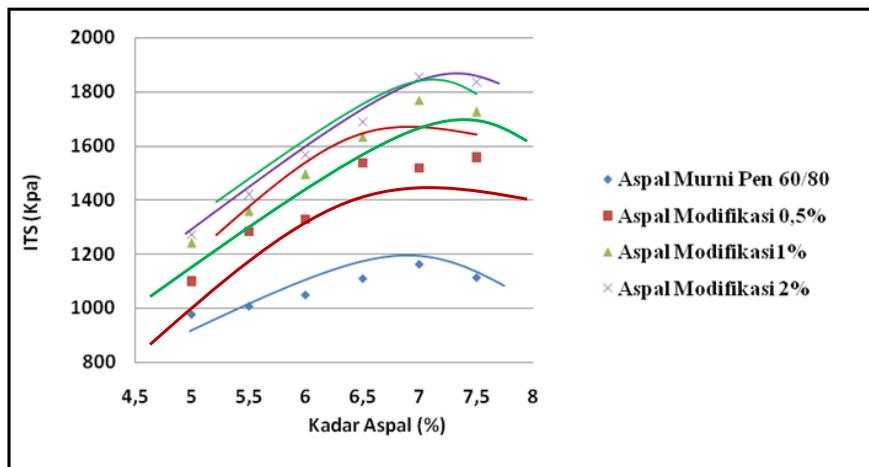


Gambar 5.5. Nilai Stabilitas Pada Aspal Modifikasi

Gambar 5.5. menunjukkan bahwa nilai stabilitas pada campuran aspal modifikasi cenderung meningkat dengan bertambahnya kadar aspal. Untuk nilai stabilitas campuran aspal yang menggunakan plastik 0,5%; 1% dan 2% lebih kecil dibandingkan dengan campuran yang tidak menggunakan plastik, hal ini dikarenakan campuran beton aspal dengan menggunakan plastik modifikasi punya rongga dan pori lebih besar sehingga nilai stabilitasnya menjadi kecil.

5.2. Indirect Tensile Strength (ITS)

Hasil uji *Indirect Tensile Strength* (ITS) untuk beton aspal yang menggunakan limbah plastik dapat dilihat pada Gambar 13 yang menunjukkan bahwa nilai ITS pada setiap jenis campuran beton aspal bertambah besar dengan meningkatnya kadar aspal, begitu juga dengan nilai ITS pada setiap jenis variasi penambahan kadar plastik semakin meningkatkan nilai ITS campuran beton aspal.



Gambar 5.6. Grafik ITS Aspal Modifikasi

Dari hasil uji sifat reologi bitumen, Marshall dan ITS menunjukkan bahwa campuran beraspal yang menggunakan modifikasi bitumen dengan limbah plastic mempunyai kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan campuran beraspal konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa modifikasi bitumen dengan limbah plastik dapat meningkatkan kinerja campuran beraspal

5.3. Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM)

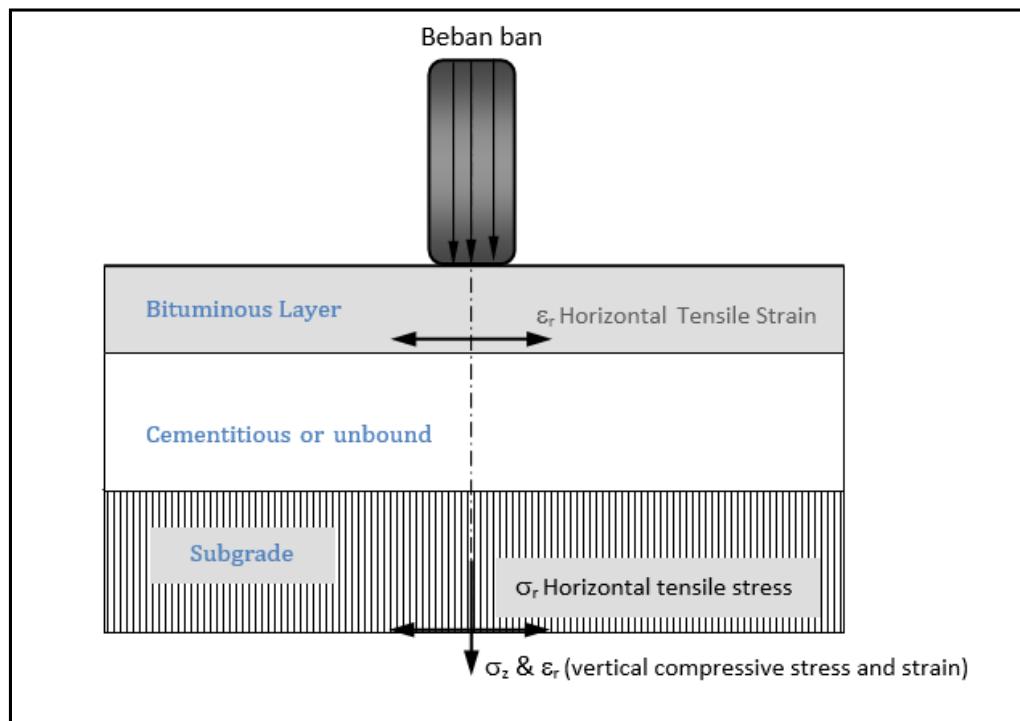
5.3.1. Pendahuluan

Pada desain perkerasan jalan, sebagian besar dari metode mekanisme desain untuk desain perkerasan lentur didasarkan pada perhitungan beban structural dari lapisan perkerasan seperti tegangan/regangan kritis seiring dengan desain pembebaran. Regangan kritis biasanya adalah regangan tarik lentur horizontal pada lapisan bawah perkerasan dan regangan tekan vertikal pada bagian atas dari tanah dasar, sebagaimana yang terlihat pada Gambar 5.7.

Penggunaan material dengan modulus kekakuan yang lebih besar pada campuran aspal mengurangi aliran regangan tarik pada bagian bawah lapisan pondasi jalan, yang menyebabkan kerusakan akibat fatik. Material ini juga mengurangi tegangan dan regangan pada tanah dasar yang menyebabkan deformasi struktural.

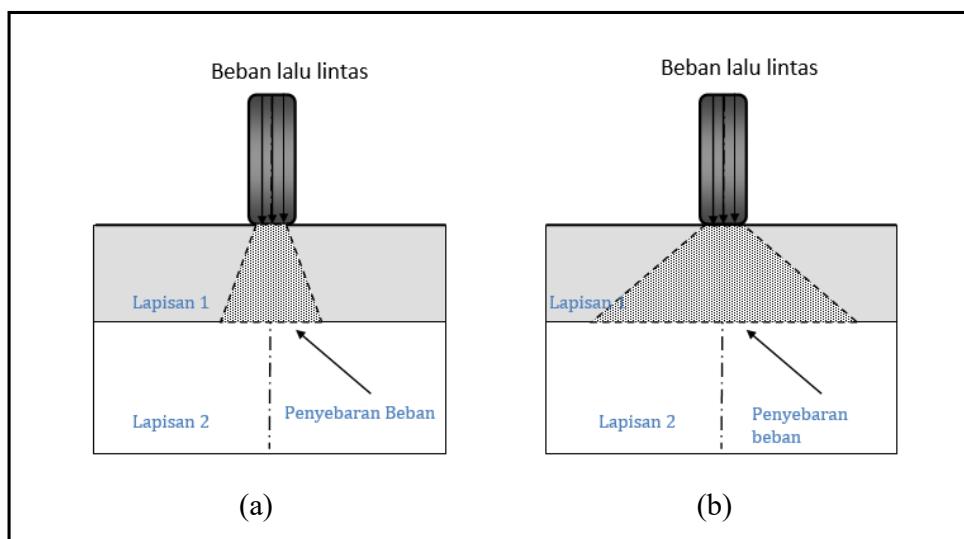
Kebanyakan program digunakan pada program-program linear *multi-layer* elastis untuk menghitung regangan/tegangan menggunakan modulus kekakuan sebagai input parameter seperti program BISAR (de Jong et al, 1979) atau program *visco-elastic multi-layer* seperti Kenlayer (Huang, 1993) dan VEROAD (Hopman, 1993).

Kekakuan campuran bitumen perlu ditetapkan untuk mengevaluasi distribusi pembebanan dan distribusi tegangan dan regangan akibat panas pada perkerasan lentur. Modulus kekakuan pada campuran beraspal digunakan sebagai indikator kualitas campuran untuk perkerasan dan pada desain campuran untuk mengevaluasi kerusakan dan kecenderungan mengeras karena umur (Epps et al, 2000).



Gambar 5.7. Tegangan kritis dan regangan kritis pada perkerasan lentur (Brown dan Brunton, 1992)

Modulus kekakuan dapat pula digunakan sebagai indikator kemampuan penyebaran beban dibawah pengaruh beban lalu lintas, sebagaimana yang terlihat pada **Gambar 5.8**. Material 1 pada **Gambar 5.8 (a)** memiliki nilai kekakuan yang lebih rendah dari Material 2 pada **Gambar 5.8 (b)**. Jika keduanya mempunyai ketebalan yang sama dan diberi beban yang sama, maka tegangan yang terjadi dibawah sisi Material 1 akan lebih besar dari Material 2. Hal ini memperlihatkan alasan mengapa material-material dengan modulus kekakuan yang lebih rendah memerlukan lapisan yang lebih tipis untuk memproduksi nilai yang diterima dari jumlah tegangan pada lapisan pondasi.



Gambar 5.8. Penyebaran Beban pada Lapisan Perkerasan (a) Material 1 dengan Modulus Kekakuan Rendah (b) Material 2 dengan Modulus Kekakuan Tinggi

5.3.2. Metodologi

5.3.2.1. Persiapan uji spesimen

Semua spesimen uji dipadatkan menggunakan peralatan kompaksi Marshall. Spesimen-spesimen tersebut menggunakan kadar aspal optimum 7.35%, baik aspal tidak modifikasi (Asphalt Concrete-Unmodified, ACUM) dan modifikasi dengan 1% plastik bekas (Asphalt Concrete, ACM)

5.3.2.2. Penentuan modulus kekakuan

Uji *Indirect Tensile Stiffness Modulus* (ITSM) berdasarkan BS EN 12697-26 (2004) digunakan untuk mengukur modulus kekakuan. Pengujian ITSM dilakukan pada suhu 20, 30 dan 40°C. ITSM (S_m) dari campuran bitumen dalam satuan MPa dihitung berdasarkan rumus berikut:

$$S_m = \frac{P(\nu + 027)}{h_c H} \quad \dots \dots \dots \quad (5.1)$$

dengan:

P = Beban Puncak (N)

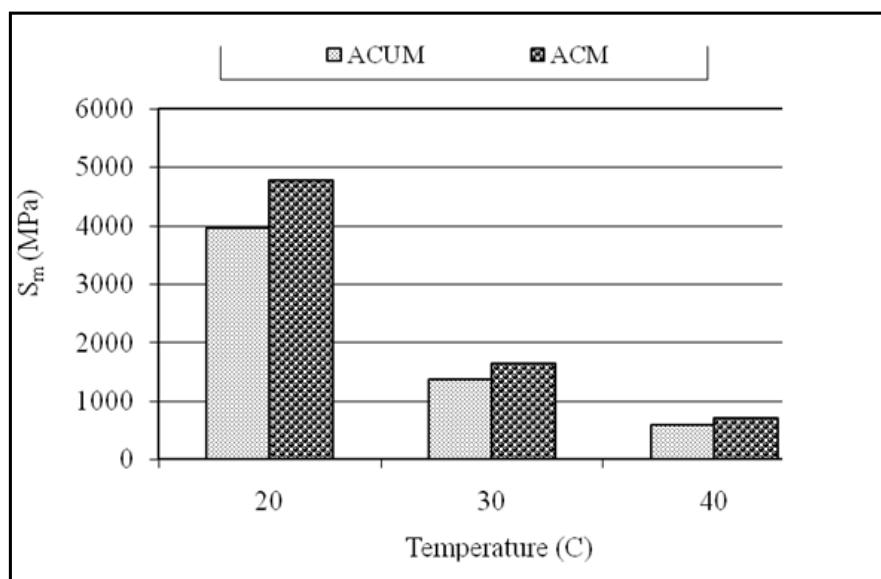
ν = Poisson's Ratio

h_c = Tinggi rata-rata dari spesimen (mm)

H = Deformasi horisontal Recovered (mm)

5.3.3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian modulus kekakuan rata-rata untuk campuran yang mengandung limbah plastik dan tanpa limbah plastik dapat dilihat pada **Tabel 5.1** dan **Gambar 5.9**. Hasilnya menunjukkan bahwa modulus kekakuan berkurang cepat seiring dengan meningkatnya temperatur dan seiring dengan hasil penelitian sebelumnya (Brown, 1988; Aschuri, 2003).



Gambar 5.9. Pengaruh uji temperatur pada Modulus Kekakuan

Tabel 5.1. Rangkuman dari Modulus Kekakuan Rata-Rata pada Campuran Beraspal

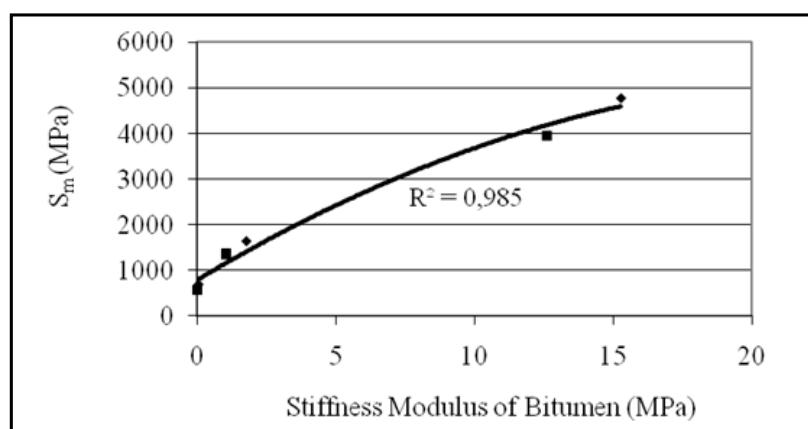
Spesimen	Modulus Kekakuan (MPa)		
	20°C	30°C	40°C
ACM	4769	1644	701
ACUM	3956	1374	586

5.3.3.1. Hubungan antara kekakuan bitumen dan Modulus Kekakuan

Gambar 5.10 menunjukkan hubungan antara modulus kekakuan bitumen dan modulus kekakuan campuran. Hubungan yang baik antara kedua modulus kekakuan bitumen (S_b) dan modulus kekakuan campuran (S_m) didapatkan dengan koefisien korelasi $R^2 = 0.985$. Formula dari hasil regresi hubungan ini dilihat di bawah ini:

$$S_m = 173,190(S_b)^{-0.9743} \quad \dots \dots \dots (5.2)$$

Hubungan ini menunjukkan bahwa modulus kekakuan campuran (S_m) meningkat seiring dengan meningkatnya modulus kekakuan bitumen (S_b).



Gambar 5.10. Hubungan antara Modulus Kekakuan Bitumen dan Modulus Kekakuan Campuran

5.4. Durabilitas Campuran beraspal

Durabilitas dari campuran beraspal sangat penting dipastikan agar mengatur keseluruhan sifat-sifat campuran beraspal. Hal ini adalah dasar dalam idealnya suatu ketahanan konstruksi jalan. Durabilitas didefinisikan sebagai kemampuan material untuk menahan perubahan pada sifat seiring dengan pengaruh lingkungan.

Faktor lingkungan yang mempengaruhi durabilitas pada campuran beraspal adalah temperatur, udara dan air, terutama pada negara tropis seperti Indonesia yang memiliki temperatur perkerasan dan intensitas hujan yang tinggi masing-masing 50°C dan >2000 mm/tahun.

Terrel et al (1990) merincikan dua mekanisme dari kerusakan jalan yang disebabkan oleh lembab (1) kehilangan kekuatan kohesi dan kekakuan lapisan bitumen dan (2) kegagalan ikatan adhesif antara agregat dan bitumen. Kegagalan daya ikat adhesif membuat reduksi yang sangat berpengaruh pada durabilitas campuran dan kemungkinan akan terjadi kegagalan prematur.

Penggunaan polimer bitumen modifikasi adalah salah satu cara untuk meningkatkan karakteristik durabilitas dari campuran beraspal. Bab ini mengevaluasi kemampuan plastik bekas HDPE untuk meningkatkan durabilitas dalam bentuk kerentanan terhadap lembab dan disintegrasi

5.4.1. Metodologi Pengujian

Ada dua jenis pengujian durabilitas yang dilakukan yaitu ketahanan terhadap kelembaban berdasarkan Stabilitas Marshall dan ITSM; dan penggunaan uji Cantabro untuk mengukur disintegrasi campuran.

5.4.2. Persiapan sample untuk pengujian durabilitas

Ada tiga jenis campuran beraspal yang dievaluasi (i) campuran biasa yang mengandung material murni dan (ii) campuran dengan aspal modifikasi menggunakan plastik bekas HDPE.

Semua benda uji dikompaksi menggunakan kompaksi Marshall dengan 75 tumbukan pada masing-masing sisi pada kandungan optimal bitumen 6%. Benda uji memiliki diameter 100 mm dan ketebalan 63 mm.

5.4.3. Kerentanan terhadap pengaruh air berdasarkan stabilitas Marshall

Tujuan dari uji kerentanan terhadap lembab adalah untuk memperkirakan kemampuan membelah dari campuran beraspal ketika terkena air. Metode Uji Stabilitas Marshall digunakan untuk mengevaluasi kerentanan campuran beraspal terhadap kelembaban. Benda uji digunakan berdasarkan tiga kondisi uji:

- Kondisi Kontrol – benda uji diletakkan pada air kamar mandi pada temperatur 60°C selama 60 menit dan stabilitas Marshall ditentukan.
- Kondisi-1 – benda uji diletakkan pada air kamar mandi pada temperatur 60°C selama 24 jam dan stabilitas Marshall ditentukan.
- Kondisi-(2) – benda uji diletakkan pada air kamar mandi pada temperatur 25°C selama 28 hari, kemudian diletakkan pada air kamar mandi dengan temperatur 60°C selama 60 menit dan stabilitas Marshall ditentukan.

Stabilitas Marshall yang didapatkan adalah rasio dari stabilitas Marshall pada benda uji biasa yang tidak dalam kondisi apapun. Persyaratan yang diperlukan adalah bahwa Stabilitas yang diperlukan minimal berada pada kondisi kontrol 75% sebagaimana rekomendasi dari spesifikasi Indonesia.

5.4.4. Pengujian Kerentanan terhadap pengaruh air menggunakan ITSM

Kekakuan yang didapatkan adalah rasio kekakuan campuran benda uji dalam kekakuan campuran biasa setelah pencelupan. Ada dua jenis sampel yang dievaluasi:

- Kondisi Kontrol – benda uji diletakkan kedalam ruang kabinet dan berada dalam kondisi 20°C selama 24 jam sebelum pengujian ITSM.
- Kondisi Terendam – benda uji diletakkan dalam air kamar mandi dengan temperatur 25°C dan kekakuan campuran ditentukan setiap 7 hari sampai 28 hari. Setiap benda uji dikeringkan dan dikondisikan dalam temperatur 20°C selama 24 jam sebelum pengujian.

5.4.5. Disintegrasi campuran dengan uji Cantabro

Uji Cantabro digunakan untuk disintegrasi campuran. Berat awal masing-masing benda uji dicatat sebelum diletakkan dalam mesin Los Angeles tanpa bola baja. Persentase kehilangan dicatat setiap waktu untuk total 500 putaran.

5.4.6. Hasil dan Diskusi

5.4.6.1. Hasil dan diskusi uji ketahanan terhadap pengaruh air

Rincian hasil uji ketahanan terhadap pengaruh air didapat menggunakan metode uji stabilitas Marshall yang diberikan dalam **Tabel 5.2** dan **Gambar 5.11**. Campuran dipersiapkan menggunakan aspal modifikasi memiliki ketahanan yang lebih baik dari campuran biasa terhadap ketahanan akan kemungkinan kegagalan struktur perkerasan.

Tabel 5.2. Rincian data Stabilitas Kerentanan Terhadap Kelembaban

Komposisi Campuran	Stabilitas (kN)		Stabilitas yang didapatkan (%)
	Unconditioned	Conditioned (1)	
ACUM	8.9	7.5	83.5
ACM	10.1	9.2	90.4
Komposisi Campuran	Stabilitas (kN)		Stabilitas yang didapatkan (%)
	Unconditioned	Conditioned (2)	
ACUM	8.9	7.0	78.4
ACM	10.1	8.3	81.9

Catatan : Kondisi (1) : Benda uji terendam pada suhu 60°C selama sehari

Kondisi (2): Benda uji terendam pada suhu 25°C selama 28 hari

Persentase stabilitas yang didapatkan untuk semua campuran memiliki angka yang lebih besar dari 75% yang direkomendasikan oleh spesifikasi Indonesia. Hasil pada benda uji kondisi -(1) (terendam dalam suhu 60°C selama sehari) dan kondisi-(2) (terendam dalam suhu 25°C selama 28 hari) menunjukkan nilai yang sama yaitu di atas 75%.

Tabel 5.3 dan **Gambar 5.12** merupakan hasil uji ITSM. Hal ini mengindikasikan bahwa modulus kekakuan cenderung berkurang karena perendaman. Penelitian sebelumnya mengindikasikan bahwa kerusakan campuran akibat pengaruh air dapat timbul ketika kekakuan campuran yang didapatkan dibawah angka 70% sampai 75% (Stuart, 1990).

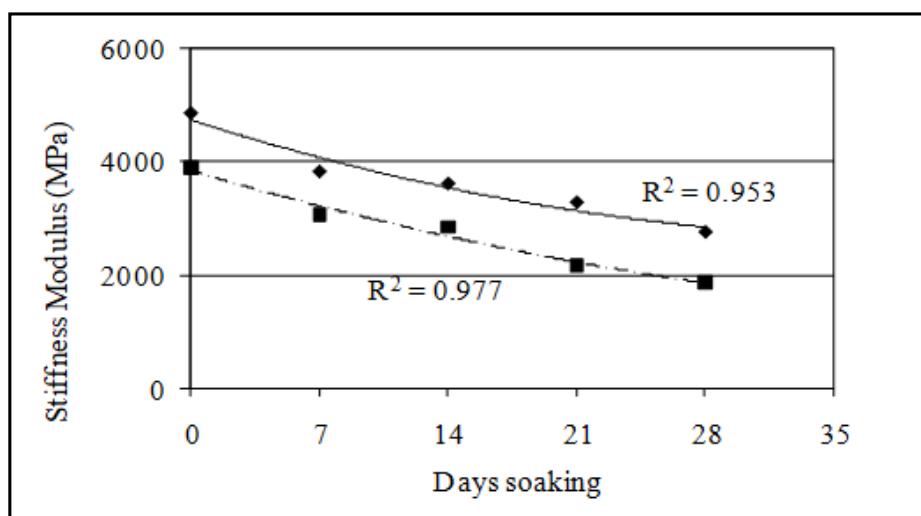
Tabel 5.5 dan **Gambar 5.12** menunjukkan hubungan antara kekakuan campuran yang didapatkan dengan jumlah hari perendaman. **Gambar 5.12** menunjukkan bahwa kekakuan campuran yang didapatkan berkurang karena perendaman. Hasilnya menunjukkan tingkatan yang sama terhadap uji stabilitas Marshall yang didapatkan.

Tabel 5.3. Perubahan Modulus Kekakuan Campuran dalam perendaman

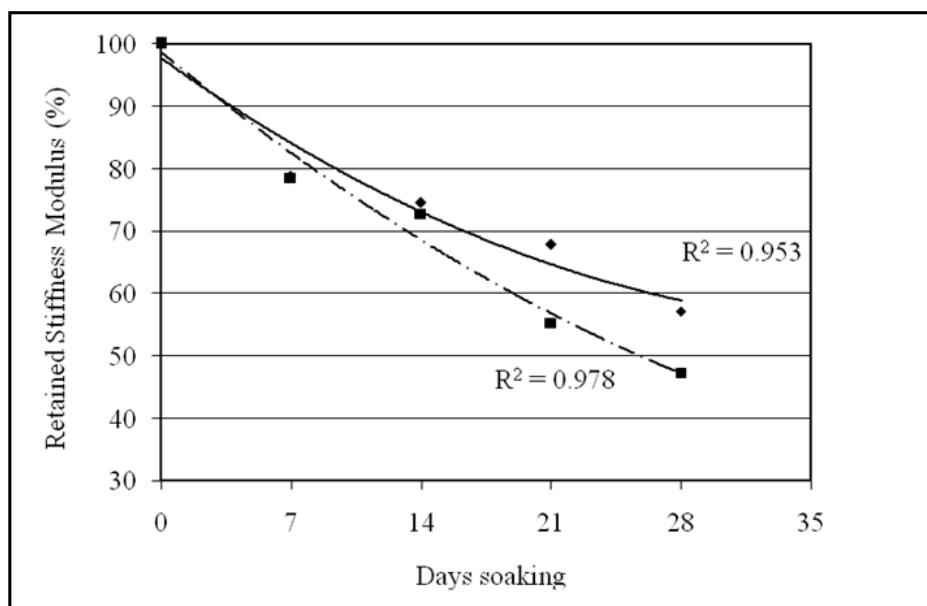
Hari Perendaman	Modulus Kekakuan (MPa)	
	ACUM	ACM
0	3890	4839.
7	3053	3819
14	2832	3608
21	2149	3281
28	1838	2762

Tabel 5.4. Perubahan Modulus Kekakuan Campuran yang didapatkan dalam perendaman

Hari perendaman	Kekakuan Campuran yang didapatkan (%)	
	ACUM	ACM
0	100	100
7	78.5	78.9
14	72.8	74.6
21	55.3	67.8
28	47.3	57.1



Gambar 5.12. Perubahan Modulus Kekakuan Campuran dalam perendaman dengan suhu 25°C



Gambar 5.13. Perubahan Kekakuan Campuran yang didapatkan dalam perendaman dengan suhu 25°C

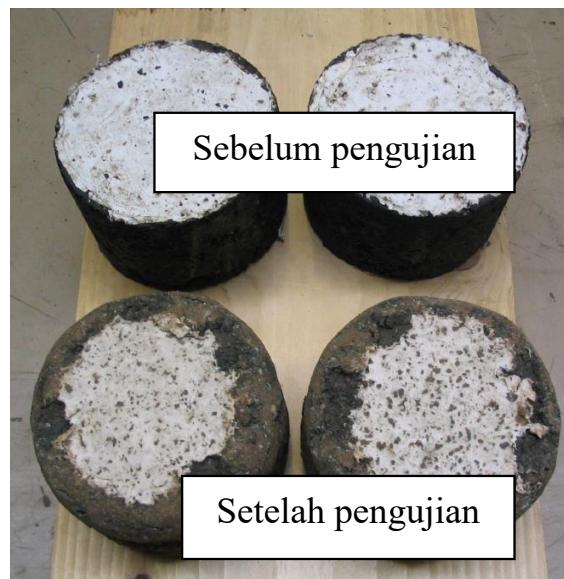
Tabel 5.5. Analisis regresi antara hari perendaman *days soaking* (DS) dan *Retained Mix Stiffness* (RMS)

Komposisi Campuran	Rumus Regresi	R ²
ACUM	RMS = 0.0221(DS) ² - 2.458 (DS) + 98.669	0.977
ACM	RMS = 0.0267(DS) ² - 2.133(DS) + 97.680	0.953

5.4.6.2. Data dan diskusi disintergrasi campuran Cantabro

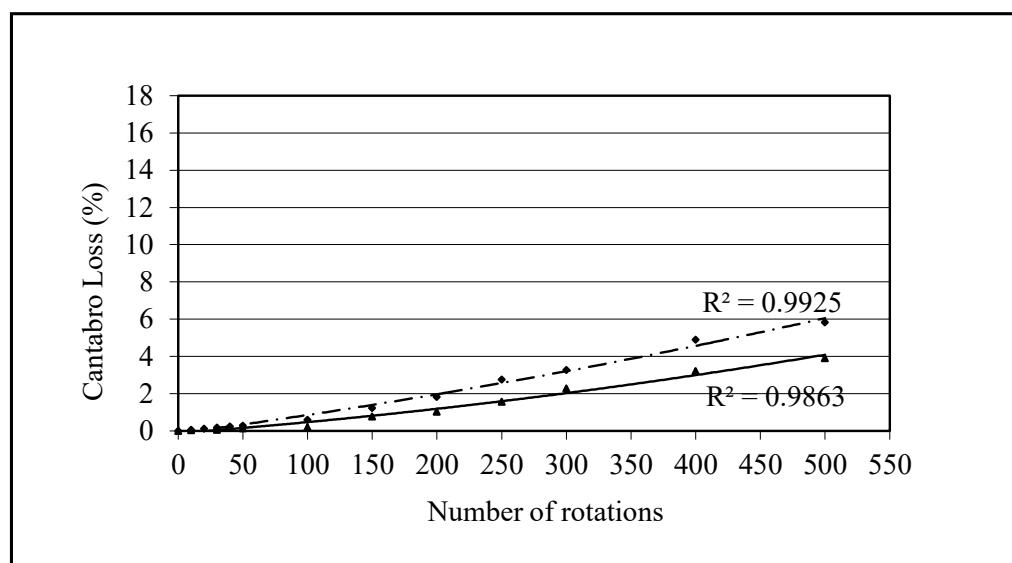
Contoh benda uji sebelum dan setelah pengujian Cantabro terlihat pada Gambar V.14. Gambar V.15 menunjukkan perubahan kehilangan dalam 500 rotasi. Hal ini menunjukkan bahwa campuran yang dipersiapkan dengan aspal modifikasi memiliki kehilangan Cantabro yang lebih rendah dari campuran lain. Namun, seharusnya dapat ditandai bahwa semua campuran memiliki

nilai kehilangan Cantabro setelah 500 putaran yaitu 5.83%, dan 3.91% untuk masing-masing ACUM dan ACM.



Gambar 5.14. Contoh benda uji sebelum dan setelah pengujian Cantabro

Gambar 5.15, menyediakan tingkatan dari yang paling rendah sampai paling tinggi dalam bentuk kehilangan partikel atau disintegrasi dan sangat jelas menunjukkan bahwa penggunaan aspal modifikasi dapat meningkatkan durabilitas campuran.



Gambar 5.15. Perubahan dalam kehilangan Cantabro dengan peningkatan jumlah rotasi

Particle Loss Index (PLI) Cantabro adalah persentase kehilangan Cantabro setelah 300 rotasi dari mesin Los Angeles. Campuran menggunakan aspal modifikasi yang memiliki nilai PLI yang paling rendah mengindikasikan bahwa penggunaan plastik bekas HDPE sebagai pemodifikasi aspal yang meningkatkan durabilitas campuran dalam bentuk peningkatan partikel yang hilang atau disintegrasi.

