

PENDEKATAN KINERJA MEKANISTIK PADA CAMPURAN ASPAL MENUJU *LONG LIFE PAVEMENT*

DISERTASI

Disusun untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan Mencapai Gelar Doktor
Program Studi Teknik Sipil



Oleh
SENJA RUM HARNAENI
T751608005

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SEBELAS MARET
SURAKARTA

2021






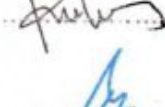
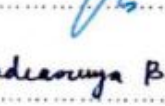

commit to user

PENDEKATAN KINERJA MEKANISTIK PADA CAMPURAN ASPAL MENUJU *LONG LIFE PAVEMENT*

DISERTASI

Oleh
SENJA RUM HARNAENI
T751608005

Tim Penguji

Jabatan	Nama	Tanda Tangan
Ketua	Prof. Dr. Agus Kristiyanto, M.Pd. NIP. 196511281990031001	
Sekretaris	Dr. Techn. Ir. Sholihin As'ad, M.T. NIP. 196710011997021001	
Anggota Penguji	Ir. Ary Setyawan, M.Sc., Ph.D. NIP. 196612041995121001	
	Dr. F. Pungky Pramesti, S.T., M.T. NIP. 197304292000032001	
	Dr. Ir. Arif Budiarto, M.T. NIP. 196304161997021001	
	Prof. Stefanus Adi Kristiawan, M.Sc., Ph.D. NIP. 196905011995121001	
	Prof. Yusep Muslih Purwana, S.T., M.T., Ph.D. NIP. 196807021995021001	
	Prof. Ir. Indrasurya B. Mochtar, M.Sc., Ph.D. NIP. 195304081976031002	

**Telah dipertahankan di depan penguji pada sidang Ujian Tertutup
dan dinyatakan telah memenuhi syarat
pada tanggal 27 Januari 2021.**

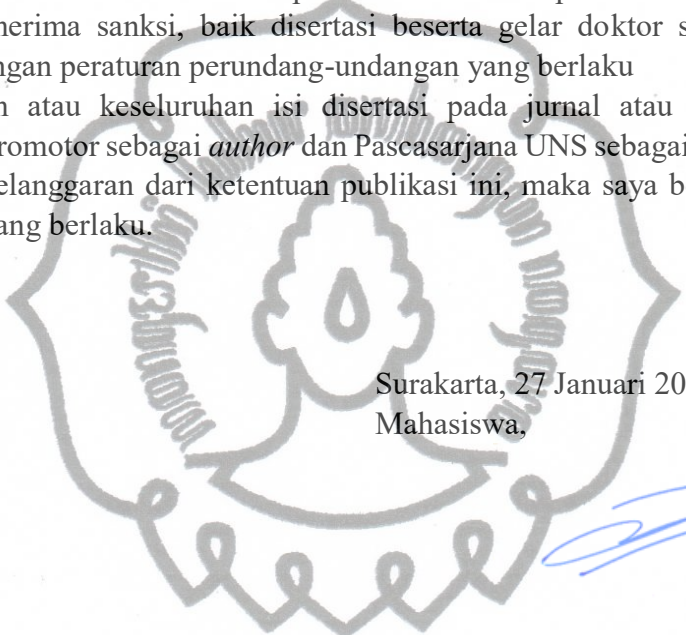
Mengetahui
Rektor
Universitas Sebelas Maret Surakarta


Prof. Dr. Jamal Wiwoho, S.H., M.Hum.
NIP. 196111081987021001

PERNYATAAN KEASLIAN DAN PERSYARATAN PUBLIKASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

1. Disertasi yang berjudul: “Pendekatan Kinerja Mekanistik pada Campuran Aspal Menuju *Long Life Pavement*” ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik, serta tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang tertulis dengan acuan yang disebutkan sumbernya, baik dalam naskah karangan dan daftar pustaka. Apabila ternyata di dalam naskah disertasi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiasi, maka saya bersedia menerima sanksi, baik disertasi beserta gelar doktor saya dibatalkan serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku
2. Publikasi sebagian atau keseluruhan isi disertasi pada jurnal atau forum ilmiah harus menyertakan tim promotor sebagai *author* dan Pascasarjana UNS sebagai institusinya. Apabila saya melakukan pelanggaran dari ketentuan publikasi ini, maka saya bersedia mendapatkan sanksi akademik yang berlaku.



Surakarta, 27 Januari 2021
Mahasiswa,



Senja Rum Harnaeni
T751608005

RINGKASAN DISERTASI

Sejak tahun 2013, pendekatan desain pada perkerasan lentur di Indonesia mengalami perubahan, dari pendekatan empiris beralih ke pendekatan mekanistik. Namun demikian, asumsi yang digunakan pada pendekatan mekanistik ini masih menggunakan asumsi elastik, dan bukan viskoelastik, sehingga perlu dilakukan suatu evaluasi. Berdasarkan pada realita tersebut, maka studi ini dilakukan, yang bertujuan untuk mengevaluasi apakah penggunaan asumsi sifat elastik pada pendekatan metode mekanistik pada desain perkerasan lentur, sesuai dengan jenis struktur dan tipikal perkerasan yang digunakan di Indonesia, mengacu Manual Perkerasan Jalan 2017, yang selama ini dilakukan di Indonesia sudah tepat. Selain itu penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan korelasi antara sifat elastik dan viskoelastik, dalam bentuk faktor konversi. Penggunaan faktor konversi ini diharapkan bisa menjadi referensi dalam desain perkerasan lentur di Indonesia.

Pendekatan empiris adalah pendekatan yang berbasis pada pengujian atau pengalaman yang dilakukan secara berulang-ulang, sehingga akhirnya diperoleh persamaan empiris yang dapat digunakan sebagai sarana untuk menghubungkan antara fenomena yang diamati dengan luaran. Sedangkan pendekatan mekanistik adalah pendekatan yang dikembangkan berdasarkan pada fenomena sifat-sifat tegangan dan regangan pada struktur perkerasan, yang diakibatkan oleh beban lalu lintas dan pengaruh kondisi lingkungan sekitar.

Sifat elastik adalah suatu sifat dari suatu material, yang ketika diberikan beban akan berubah bentuk, dan ketika beban itu dilepas material akan kembali ke bentuk semula. Sedangkan sifat *viscous* adalah sifat dari suatu material yang berupa cairan kental yang bisa mengalir. Sementara itu material aspal bukan bersifat elastik saja, melainkan gabungan antara *viscous* dan elastik atau merupakan viskoelastik, yang akan berperilaku elastik pada suhu rendah dan pembebanan cepat, serta berperilaku *viscous* pada suhu tinggi dan pembebanan lama.

Cara untuk menilai apakah pendekatan tersebut di atas tepat atau tidak tepat, adalah dengan melakukan evaluasi sifat elastik dan viskoelastik tersebut terhadap respon dari struktur perkerasan lentur. Metode yang digunakan untuk mengetahui sifat elastik dan viskoelastik dari campuran beraspal, berdasarkan hasil pengujian *dynamic modulus* di laboratorium, adalah dengan pendekatan simulasi terhadap dua jenis model fisik, dengan Metode Elemen Hingga dan dengan bantuan *software ABAQUS* serta *KENPAVE*. Model simulasi elemen hingga pertama yang diuji adalah model struktur perkerasan lentur, yakni berupa replika dari sebuah segmen perkerasan lentur, berukuran panjang 3,5 m, lebar 3,5 m, dan tinggi 3,0 m. Sedangkan model simulasi elemen hingga yang kedua adalah berupa spesimen dari lapisan permukaan, yang dalam hal ini adalah AC-WC dan HRS-WC.

Jenis campuran beraspal yang digunakan adalah *Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC)* dan *Hot Rolled Sheet-Wearing Course (HRS-WC)*, dengan alasan kedua jenis campuran beraspal ini sering digunakan di Indonesia dan keduanya memiliki perbedaan tipe gradasi, yakni AC-WC bergradasi menerus sedangkan HRS-WC bergradasi senjang. Desain kedua jenis campuran beraspal ini mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2010. Sedangkan pengujian *dynamic*

modulus dilakukan dengan menggunakan variasi suhu, yakni: 15°C, 25°C, 35°C, dan 45°C, yang dianggap mewakili suhu perkerasan di Indonesia yang beriklim tropis.

Hasil studi menunjukkan bahwa terdapat perbedaan respon antara asumsi elastik dan asumsi viskoelastik pada model struktur perkerasan lentur, yang dimodelkan dengan metode elemen hingga. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa respon perkerasan lentur dengan asumsi campuran beraspal bersifat viskoelastik lebih besar daripada asumsi campuran beraspal bersifat elastik, untuk seluruh variabel yang ditinjau. Hasil pemodelan specimen campuran beraspal juga menunjukkan bahwa *strain* yang diperoleh dengan asumsi viskoelastik, lebih mendekati hasil pengujian riil di laboratorium daripada asumsi elastik. Dengan demikian maka penggunaan asumsi sifat elastik pada pendekatan metode mekanistik pada desain perkerasan lentur, yang selama ini dilakukan di Indonesia tidak tepat.

Model elemen hingga viskoelastik linier seri Prony 8-term mampu secara akurat menggambarkan perilaku bahan campuran beraspal AC-WC, sedangkan seri Prony 7-term untuk campuran beraspal HRS-WC. Hasil analisis umur *fatigue*, umur *rutting*, dan sisa umur layan konstruksi perkerasan lentur dengan pengasumsian campuran aspal bersifat elastik lebih lama daripada pengasumsian viskoelastik, sehingga pengasumsian viskoelastik akan lebih realistis jika digunakan pada desain perkerasan lentur. *Strain* yang dihasilkan pada pengasumsian viskoelastik lebih besar daripada pengasumsian elastik. Dengan menggunakan nilai *strain* yang besar dalam desain perkerasan lentur, akan menghasilkan kebutuhan tebal lapisan perkerasan lentur serta persyaratan material/nilai modulus yang lebih besar, sehingga bisa diperoleh sisa umur layan yang lebih panjang serta dihasilkan *long life pavement* yang lebih lama. Rekomendasi pada penelitian ini adalah dengan menambahkan faktor konversi (v) sebesar 0,285 (untuk campuran aspal AC-WC) dan 0,368 (untuk campuran aspal HRS-WC) pada input nilai modulus elastisitas pada Manual Desain Perkerasan (2017).

PRAKATA

Asalamualaikum wr.wb.

Alhamdulillahirobbil'alamin puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Swt., yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, karena atas perkenanNya draft disertasi dengan judul **PENDEKATAN KINERJA MEKANISTIK PADA CAMPURAN ASPAL MENUJU *LONG LIFE PAVEMENT*** ini dapat diajukan pada Tahap Ujian Tertutup . Disertasi ini sebagai salah satu syarat untuk mencapai Gelar Doktor Program Studi Teknik Sipil, Program Studi Doktor Ilmu Teknik Sipil Fakultas Teknik UNS.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya disampaikan kepada Bapak Ir. Ary Setyawan, M.Sc., Ph.D. selaku Promotor, Ibu Dr. F. Pungky Pramesti, S.T., M.T. selaku Ko-Promotor I, Bapak Dr. Ir. Arif Budiarto, M.T. selaku Ko-Promotor II, Bapak Prof. Yusep Muslih Purwana, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Prof. Ir. Indrasurya B. Mochtar, M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan bimbingan, arahan, ilmu dan dukungan moril sehingga disertasi ini bisa selesai. Semoga Allah SWT membalasnya dengan kebaikan yang banyak.

Penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih kepada beberapa pihak:

1. Bapak Prof. Dr. Jamal Wiwoho, S.H., M.Hum., Rektor Universitas Sebelas Maret.
2. Bapak Prof. Drs. Sutarno, M.Sc., Ph.D., Direktur Pasca Sarjana Universitas Sebelas Maret.
3. Bapak Prof. Dr. Agus Kristiyanto, M.Pd., Wakil Direktur I Pasca Sarjana Universitas Sebelas Maret.
4. Bapak Dr. techn. Ir. Sholihin As'ad, M.T., dekan Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret.
5. Bapak Prof. Stefanus Adi Kristiawan, M.Sc., Ph.D., Kepala Program Studi Doktor Ilmu Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret.
6. Bapak Dr. Senot Sangadji, S.T., M.T. atas ilmu, bimbingan, dan masukannya.
7. Seluruh Bapak dan Ibu dosen pengajar beserta karyawan di Program Studi Doktor Ilmu Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret.
8. Bapak Prof. Dr. Sofyan Anif, M.Si., Rektor Universitas Muhammadiyah Surakarta.
9. Bapak Ir. Sri Sunarjono, M.T, Ph.D., I.P.M., Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta.
10. Bapak Dr. Mochamad Solikin, S.T., M.T., Kepala Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta.

commit to user

11. Bapak dan Ibu dosen beserta karyawan Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta.
12. Bapak Dr. Waluyo Adi Siswanto atas ilmu, bimbingan, dan arahannya.
13. Bapak Dr. Suyitno atas ilmu dan bimbingannya.
14. Bapak Ali Rofiki, S.T., M.T. atas ilmu dan pencerahannya.
15. Ibu Dr. Fajar Sri Handayani, S.T., M.T., serta semua rekan mahasiswa Program Studi Doktor Ilmu Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret.
16. AKBP Gunawan S.Si., Muhammad Rizky Dirgantara, Muhammad Galaxy Andromeda dan Muhammad Garuda Nusantara Al Kautsar atas motivasi, semangat, doa, dan dukungannya.
17. Almarhum Bapak Soewarso, Ibu Dalinah, mbak Dewi Anna Iwayanti, dik Yeyen Widhar Astuti, dik Yan Floranti, serta semua keponakanku sayang atas doa dan dukungannya.
18. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan bantuan serta dukungan moril maupun materiil yang tak ternilai.

Semoga Allah SWT memberikan kemuliaan kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian disertasi ini. Kritik, saran, dan masukan sangat penulis harapkan untuk perbaikan disertasi ini. Semoga disertasi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan semua pihak, khususnya dalam bidang ilmu Teknik Sipil.

Wasalamualaikum wr.wb.

Surakarta, 27 Januari 2021

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN DAN PERSYARATAN PUBLIKASI	iii
RINGKASAN DISERTASI	iv
PRAKATA	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
DAFTAR PUBLIKASI	xix
 BAB I. PENDAHULUAN	 1
A. Latar Belakang Masalah	1
B. Kebaruan Penelitian	7
C. Rumusan Masalah	10
D. Tujuan Penelitian	10
E. Manfaat Penelitian	11
F. Lingkup dan Batasan Penelitian	12
 BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	 14
A. Landasan Teori	14
1. Metode Desain Perkerasan Lentur	14
2. Desain Perkerasan Lentur secara Mekanistik di Indonesia : Manual Desain Perkerasan (MDP) 2017...	14
a. Model Perkerasan	15
b. Prosedur Desain Perkerasan	16
3. <i>Long Life Pavement</i>	18
4. Reologi dan Viskoelastisitas	18
a. Reologi	18
b. Viskoelastisitas	19
B. Kerangka Berpikir	19
C. Hipotesis Penelitian	20

BAB III.	PERENCANAAN PENELITIAN	21
	A. Perencanaan dan Pelaksanaan Penelitian	21
	B. Perencanaan Benda Uji	25
	C. Bahan dan Peralatan Penelitian	26
	D. Tempat dan Waktu Penelitian	27
BAB IV.	MIX DESIGN CAMPURAN ASPAL AC-WC DAN HRS-WC	28
	A. Campuran beraspal <i>Asphalt Concrete Wearing Course</i> (AC-WC) dan <i>Hot Rolled Sheet Wearing Course</i> (HRS-WC)	28
	1. Amplop Gradasi <i>Asphalt Concrete Wearing</i> <i>Course (AC-WC)</i>	29
	2. Amplop Gradasi <i>Hot Rolled Sheet Wearing</i> <i>Course (HRS-WC)</i>	30
	B. Pengujian Bahan Campuran Aspal	30
	1. Pengujian Aspal	30
	2. Pengujian Agregat	31
	C. Perencanaan Komposisi Agregat dalam Campuran (<i>Mix Design</i>)	31
	1. <i>Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)</i>	32
	2. <i>Hot Rolled Sheet Wearing Course (HRS-WC)</i>	32
	3. Perbandingan Komposisi Agregat dalam Campuran (<i>Mix Design</i>) <i>Asphalt Concrete Wearing Course</i> (AC-WC)	33
	D. Kadar Aspal Optimum (KAO) dan <i>Marshall</i> <i>Properties</i> Campuran Aspal	34
	1. Kadar Aspal Optimum (KAO) Campuran Aspal	34
	a. <i>Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)</i>	34
	b. <i>Hot Rolled Sheet Wearing Course (HRS-WC)</i>	37
	2. <i>Marshall Properties</i> Campuran Aspal	41
BAB V.	MODULUS DINAMIK DAN <i>MASTER CURVE</i> CAMPURAN ASPAL AC-WC DAN HRS-WC	43
	A. Pengujian Modulus Dinamik (<i>Dynamic Modulus</i>)	43
	B. Modulus kompleks (<i>Complex Modulus</i>), Modulus dinamik (<i>Dynamic Modulus</i>) dan Sudut fase (<i>Phase Angle</i>)	45
	1. Modulus Dinamik	48
	2. Sudut Fase/ <i>phase angle</i> (δ)	49
	C. <i>Master Curve</i> Modulus Dinamik (<i>Master Curve</i> <i>of Dynamic Modulus</i>)	51

BAB VI.	PENENTUAN KOEFISIEN <i>PRONY</i> MELALUI PEMODELAN VISKOELASTIK LINIER PADA PERKERASAN LENTUR	58
A.	Teori Viskoelastik Linier (<i>Linear Viscoelastic Theory</i>)...	58
B.	Analogi Mekanik (<i>Mechanical analogs</i>)/Model Mekanik	58
1.	Model <i>Maxwell</i>	59
2.	Model <i>Kelvin</i> /Model <i>Voight</i>	60
3.	<i>Standard Linear Solid (SLS) Model/Three-element Model</i>	61
4.	<i>Generalized Maxwell Model/Model Wiechert</i>	62
C.	Validasi Pemodelan Benda Uji.....	64
1.	Check Kecukupan Benda Uji dengan Unjuk Kerja Statistik <i>One way Anova</i>	64
2.	Check untuk Mendeteksi terhadap Pengaruh Signifikan antara Suhu dan Frekuensi Pembebanan terhadap Nilai Modulus Dinamik maupun Phase Angle Campuran Aspal AC-WC dan HRS-WC Dengan Unjuk Kerja Statistik <i>Two way Anova</i> Dengan Interaksi.....	68
D.	Koefisien <i>Prony (Prony coefficient/Prony series)</i>	77
BAB VII.	SIMULASI ELEMEN HINGGA PERKERASAN LENTUR DAN SPECIMEN CAMPURAN ASPAL AC-WC DAN HRS-WC	79
A.	Metode Elemen Hingga	79
B.	<i>Software ABAQUS</i>	81
C.	Simulasi Elemen Hingga Perkerasan Lentur dan Specimen Campuran Aspal	82
1.	Spesifikasi Model	82
2.	Spesifikasi Pembebanan	86
D.	Simulasi Elemen Hingga Elastik dan Viskoelastik Perkerasan Lentur	86
E.	Simulasi Elemen Hingga Elastik dan Viskoelastik Specimen Campuran Aspal	92

BAB VIII.	ANALISIS SISA UMUR LAYAN PERKERASAN LENTUR MENUJU <i>LONG LIFE PAVEMENT</i>	94
A.	Perhitungan Regangan Menggunakan <i>Software KENPAVE</i>	94
B.	Perhitungan Sisa Umur Layan Menuju <i>Long Life Pavement</i>	98
1.	Analisis Lalu Lintas	98
2.	Analisis <i>Fatigue</i>	100
3.	Analisis <i>Rutting</i>	101
4.	Prediksi Sisa Umur Layan Menuju <i>Long Life Pavement</i>	105
BAB IX.	ANALISIS SIFAT ELASTIK DAN VISKOELASTIK PERKERASAN LENTUR.....	109
A.	Tinjauan Sifat Elastik dan Viskoelastik Berkaitan dengan Pengaruh Lama Pembebanan	109
B.	Tinjauan Sifat Elastik dan Viskoelastik Berkaitan dengan Pengaruh Suhu Pembebanan	111
C.	Faktor konversi (v) dari elastik menjadi viskoelastik pada perencanaan tebal perkerasan lentur secara Mekanistik di Indonesia	114
D.	Aplikasi Penggunaan Faktor Konversi (v) pada Nilai Modulus Elastisitas (E) pada Prosedur Desain Perkerasan Lentur Menggunakan Pendekatan Mekanistik Bina Marga 2017.....	115
E.	Perbandingan Metode Desain Perkerasan Lentur Secara Empiris dan Mekanistik di Indonesia	120
BAB X.	SIMPULAN DAN SARAN	123
A.	Simpulan	123
B.	Saran	124

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Rancangan Benda Uji Pengujian <i>Marshall</i> untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum <i>AC-WC</i> dan <i>HRS-WC</i> ..	25
Tabel 3.2.	Rancangan Benda Uji Pengujian <i>Marshall</i> untuk Menentukan Stabilitas, <i>Flow</i> dan <i>Marshall Quotient AC-WC</i> dan <i>HRS-WC</i>	26
Tabel 3.3.	Rancangan Benda Uji Pengujian <i>Dynamic Modulus</i>	26
Tabel 4.1.	Amplop Gradasi Agregat Gabungan untuk Campuran <i>AC-WC</i>	28
Tabel 4.2.	Ketentuan Sifat-Sifat Campuran Aspal <i>AC-WC</i>	29
Tabel 4.3.	Amplop Gradasi Agregat Gabungan untuk Campuran <i>HRS-WC</i>	29
Tabel 4.4.	Ketentuan Sifat-Sifat Campuran Aspal <i>HRS-WC</i>	30
Tabel 4.5.	Hasil Pengujian Aspal Keras Pen. 60/70	30
Tabel 4.6.	Hasil Pengujian Agregat Halus	31
Tabel 4.7.	Hasil Pengujian Agregat Kasar	31
Tabel 4.8.	Amplop Gradasi <i>AC-WC</i>	32
Tabel 4.9.	Amplop Gradasi <i>HRS-WC</i>	32
Tabel 4.10.	Amplop Gradasi <i>AC-WC</i> dan <i>HRS-WC</i>	33
Tabel 4.11.	Hasil Pengujian <i>Marshall AC-WC</i>	34
Tabel 4.12.	Hasil Pengujian <i>Marshall HRS-WC</i>	37
Tabel 4.13.	<i>Marshall Properties</i> Campuran Aspal	42
Tabel 5.1.	Hasil Pengujian Modulus Dinamik dan Sudut Fase untuk Campuran Aspal <i>AC-WC</i> dan <i>HRS-WC</i>	47
Tabel 5.2.	Modulus Dinamik Campuran Aspal <i>AC-WC</i> pada Suhu Referensi 25°C	54
Tabel 5.3.	Modulus Dinamik Campuran Aspal <i>HRS-WC</i> pada Suhu Referensi 25°C	54
Tabel 6.1.	Tabel Penolong untuk <i>Two Way Anova</i> dengan Interaksi	70
Tabel 6.2.	Tabulasi Ragam Klasifikasi <i>Two Way Anova</i> dengan Interaksi	72
Tabel 6.3.	Parameter Material Viskoelastik (<i>Prony coefficient</i>) campuran aspal <i>AC-WC</i>	78
Tabel 6.4.	Parameter Material Viskoelastik (<i>Prony coefficient</i>) campuran aspal <i>HRS-WC</i>	78
Tabel 7.1.	Hasil Analisis Sensitivitas terhadap <i>Boundary Condition</i>	83
Tabel 7.2.	Karakteristik Perkerasan Lentur untuk Simulasi Elemen Hingga	84

DAFTAR TABEL (Lanjutan)

Tabel 8.1.	Karakteristik Perkerasan Lentur untuk Perhitungan Respon Perkerasan Lentur.....	96
Tabel 8.2.	<i>Horizontal Tensile Strain</i> dan <i>Vertical Compressive Strain</i> pada Perkerasan Lentur dengan Lapisan Permukaan berupa Campuran Aspal AC-WC dan HRS-WC	97
Tabel 8.3.	Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas (R) selama 20 Tahun	99
Tabel 8.4.	Hasil Perhitungan CESA	100
Tabel 8.5.	Jumlah Repetisi Beban saat Mencapai <i>Fatigue</i> dan <i>Rutting</i> antara Elastik dan Viskoelastik pada Campuran Aspal AC-WC dan HRS-WC Akibat Pengaruh Suhu Pembebanan.....	102
Tabel 8.6.	Hasil Perhitungan Sisa Umur Layan Konstruksi Perkerasan Lentur dengan Pengasumsian Campuran Aspal Bersifat Elastik dan Viskoelastik pada Suhu Pembebanan 25°C dan 41°C	106
Tabel 9.1.	Karakteristik Perkerasan Lentur yang Digunakan untuk Perhitungan.....	116
Tabel 9.2.	Nilai Regangan dan Jumlah Repetisi Beban yang Digunakan untuk Perhitungan.....	117
Tabel 9.3.	Penyesuaian Umur Layan yang Sama dengan Menyesuaikan Nilai Modulus Elastisitas (E) Pada Ketebalan Lapisan Perkerasan yang Sama	118
Tabel 9.4.	Penyesuaian Umur Layan yang Sama dengan Menyesuaikan Nilai Tebal Lapisan Perkerasan Pada Modulus Elastisitas (E) yang Sama.....	119
Tabel 9.5.	Perbandingan antara Metode Desain Perkerasan Lentur Secara Empiris maupun Secara Mekanistik di Indonesia	121

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Latar Belakang Penelitian	6
Gambar 1.2.	Kebaruan Penelitian	8
Gambar 2.1.	Tipikal Sistem Perkerasan	16
Gambar 2.2.	Prosedur Desain Perkerasan Lentur Menggunakan Pendekatan Mekanistik	17
Gambar 3.1.	Rencana Penelitian	22
Gambar 3.2.	Bagan Alir Pelaksanaan Penelitian	23
Gambar 4.1.	Perbandingan Gradasi Gabungan antara AC-WC dan HRS-WC	33
Gambar 4.2.	Hubungan kadar aspal dengan stabilitas AC-WC	34
Gambar 4.3.	Hubungan Kadar Aspal dengan <i>flow</i> AC-WC	35
Gambar 4.4.	Hubungan Kadar Aspal dengan <i>VIM</i> AC-WC	35
Gambar 4.5.	Hubungan Kadar Aspal dengan <i>VMA</i> AC-WC	35
Gambar 4.6.	Hubungan Kadar Aspal dengan <i>VFWA</i> AC-WC	36
Gambar 4.7.	Hubungan Kadar Aspal dengan <i>MQ</i> AC-WC	36
Gambar 4.8.	Kadar Aspal optimum AC-WC	37
Gambar 4.9.	Hubungan Kadar Aspal dengan Stabilitas HRS-WC	38
Gambar 4.10.	Hubungan Kadar Aspal dengan <i>flow</i> HRS-WC	38
Gambar 4.11.	Hubungan Kadar Aspal dengan <i>VIM</i> HRS-WC	39
Gambar 4.12.	Hubungan Kadar Aspal dengan <i>VMA</i> HRS-WC	39
Gambar 4.13.	Hubungan Kadar Aspal dengan <i>VFWA</i> HRS-WC	39
Gambar 4.14.	Hubungan Kadar Aspal dengan <i>MQ</i> HRS-WC	40
Gambar 4.15.	Kadar Aspal Optimum HRS-WC	40
Gambar 4.16.	Pengujian <i>Marshall</i>	41
Gambar 4.17.	Benda Uji untuk Pengujian <i>Marshall</i>	42
Gambar 5.1.	Benda Uji untuk Pengujian Modulus Dinamik	44
Gambar 5.2.	Pengujian Modulus Dinamik	44
Gambar 5.3.	Tipikal Hasil Pengujian Modulus Dinamik pada Campuran Aspal AC-WC dan HRS-WC	48
Gambar 5.4.	Efek Suhu dan Frekuensi terhadap Modulus Dinamik pada Campuran Aspal AC-WC	49
Gambar 5.5.	Efek Suhu dan Frekuensi terhadap Modulus Dinamik pada Campuran Aspal HRS-WC	49

DAFTAR GAMBAR (Lanjutan)

Gambar 5.6.	Ilustrasi Sudut Fase	50
Gambar 5.7.	Efek Suhu dan Frekuensi terhadap Sudut Fase pada Campuran Aspal AC-WC	51
Gambar 5.8.	Efek Suhu dan Frekuensi terhadap Sudut Fase pada Campuran Aspal HRS-WC	51
Gambar 5.9.	<i>Dynamic Modulus Master Curve</i> Campuran Aspal AC-WC pada Suhu Referensi 25°C	55
Gambar 5.10.	<i>Dynamic Modulus Master Curve</i> Campuran Aspal HRS-WC pada Suhu Referensi 25°C	56
Gambar 5.11.	Perbandingan <i>Dynamic Modulus Master Curve</i> Campuran Aspal AC-WC dan HRS-WC pada Suhu Referensi 25°C	57
Gambar 6.1.	(a) Representasi Skema Pegas (elastik) (b) Representasi Skema <i>Dashpot</i> (<i>viscous</i>)	59
Gambar 6.2.	Model <i>Maxwell</i>	59
Gambar 6.3.	Model <i>Kelvin</i>	60
Gambar 6.4.	Model <i>SLS</i>	61
Gambar 6.5.	<i>Generalized Maxwell Model</i>	63
Gambar 6.6.	Hasil Uji Statistik <i>One Way Anova</i> terhadap Data Nilai Modulus Dinamik Campuran Aspal AC-WC	66
Gambar 6.7.	Hasil Uji Statistik <i>One Way Anova</i> terhadap Data Nilai Modulus Dinamik Campuran Aspal HRS-WC	66
Gambar 6.8.	Hasil Uji Statistik <i>One Way Anova</i> terhadap Data Nilai <i>Phase Angle</i> Campuran Aspal AC-WC	67
Gambar 6.9.	Hasil Uji Statistik <i>One Way Anova</i> terhadap Data Nilai <i>Phase Angle</i> Campuran Aspal HRS-WC	67
Gambar 6.10.	Hasil Uji Statistik <i>Two Way Anova</i> dengan Interaksi terhadap Data Nilai Modulus Dinamik Campuran Aspal AC-WC	73
Gambar 6.11.	Hasil Uji Statistik <i>Two Way Anova</i> dengan Interaksi terhadap Data Nilai Modulus Dinamik Campuran Aspal HRS-WC	74
Gambar 6.12.	Hasil Uji Statistik <i>Two Way Anova</i> dengan Interaksi terhadap Data Nilai <i>Phase Angle</i> Campuran Aspal AC-WC	75
Gambar 6.13.	Hasil Uji Statistik <i>Two Way Anova</i> dengan Interaksi terhadap Data Nilai <i>Phase Angle</i> Campuran Aspal HRS-WC	76
Gambar 6.14	Tampilan <i>Software Prony 2012 TU Delft</i>	77

DAFTAR GAMBAR (Lanjutan)

Gambar 7.1.	Tampilan Awal <i>Software ABAQUS</i>	81
Gambar 7.2.	Komponen-Komponen Jendela Utama pada <i>Software ABAQUS</i>	82
Gambar 7.3.	Model Perkerasan Lentur untuk Lapisan Permukaan dengan Campuran Aspal AC-WC dan HRS-WC	85
Gambar 7.4.	Model Specimen Campuran Aspal AC-WC dan HRS-WC	85
Gambar 7.5.	<i>Mesh</i> pada (a) Model Perkerasan Lentur dan (b) Model Specimen Campuran Beraspal	86
Gambar 7.6.	(a) Sumbu Standar Ekuivalen di Indonesia (b) Pembebanan di Bidang Kontak antara Roda Kendaraan dengan Permukaan Jalan (c) Pembebanan pada Model Specimen Campuran Beraspal	87
Gambar 7.7.	Pembebanan <i>Haversine</i> pada (a) Model Perkerasan Lentur dan (b) Model Specimen Campuran Beraspal	88
Gambar 7.8.	Tipikal Hubungan antara (a) <i>Stress-Time</i> , (b) <i>Strain-Time</i> dan (c) <i>Deflection-Time</i> dari Simulasi Elemen Hingga pada Konstruksi Perkerasan Lentur	89
Gambar 7.9.	Perbandingan <i>Horizontal Tensile Strain</i> Struktur Perkerasan Lentur dengan Lapisan Permukaan Berupa Campuran Beraspal AC-WC dan HRS-WC Sampai pada 0,02 Detik Pertama	90
Gambar 7.10.	Perbandingan <i>Vertical Compressive Strain</i> Struktur Perkerasan Lentur dengan Lapisan Permukaan Berupa Campuran Beraspal AC-WC dan HRS-WC Sampai pada 0,02 Detik Pertama	90
Gambar 7.11.	Perbandingan <i>Vertical Stress</i> Struktur Perkerasan Lentur dengan Lapisan Permukaan Berupa Campuran Beraspal AC-WC dan HRS-WC Sampai Pada 0,02 Detik Pertama	91
Gambar 7.12.	Perbandingan Defleksi Struktur Perkerasan Lentur dengan Lapisan Permukaan Berupa Campuran Beraspal AC-WC dan HRS-WC Sampai pada 0,02 Detik Pertama	91
Gambar 7.13.	Perbandingan <i>Strain</i> Model Simulasi Elemen Hingga dan Specimen Campuran Beraspal Uji Laboratorium	92

DAFTAR GAMBAR (Lanjutan)

Gambar 8.1.	Tampilan Utama Program <i>KENPAVE</i>	95
Gambar 8.2.	Beban Standar di Indonesia	95
Gambar 8.3.	Konstruksi Perkerasan Lentur untuk Perhitungan Respon Perkerasan Lentur	96
Gambar 8.4.	Perbandingan Umur <i>Fatigue</i> antara Elastik dan Viskoelastik pada Campuran Beraspal AC-WC dan HRS-WC Akibat Pengaruh Suhu Pembebanan	104
Gambar 8.5.	Perbandingan Umur <i>Rutting</i> antara Elastik dan Viskoelastik pada Campuran Beraspal AC-WC dan HRS-WC Akibat Pengaruh Suhu Pembebanan	105
Gambar 9.1.	Perbandingan <i>horizontal Tensile Strain</i> antara Elastik dan Viskoelastik pada Campuran Beraspal AC-WC dan HRS-WC Akibat Pengaruh Waktu Pembebanan	110
Gambar 9.2.	Perbandingan <i>Vertical Compressive Strain</i> antara Elastik dan Viskoelastik pada Campuran Aspal AC-WC dan HRS-WC Akibat Pengaruh Waktu Pembebanan	111
Gambar 9.3.	Perbandingan <i>Horizontal Tensile Strain</i> antara Elastik dan Viskoelastik pada Campuran Beraspal AC-WC dan HRS-WC Akibat Pengaruh Suhu Pembebanan	112
Gambar 9.4.	Perbandingan <i>Vertical Compressive Strain</i> antara Elastik dan Viskoelastik pada Campuran Beraspal AC-WC dan HRS-WC Akibat Pengaruh Suhu Pembebanan	113
Gambar 9.5.	Rekomendasi Hasil Penelitian Berupa Penambahan Faktor Konversi (ν) pada Nilai Modulus Elastisitas (E) pada Prosedur Desain Perkerasan Lentur Menggunakan Pendekatan Mekanistik Bina Marga 2017	115
Gambar 9.6.	Konstruksi Perkerasan Lentur yang Digunakan untuk Perhitungan	116
Gambar 9.7.	Ilustrasi Penyesuaian Umur Layan yang Sama dengan Menyesuaikan Nilai Modulus Elastisitas (E) Pada Ketebalan Lapisan Perkerasan yang Sama	119
Gambar 9.8.	Ilustrasi Penyesuaian Umur Layan yang Sama dengan Menyesuaikan Nilai Tebal Lapisan Perkerasan Pada Modulus Elastisitas (E) yang Sama	120

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Naskah Publikasi
- Lampiran 2. Sertifikat Pemakalah *International Conference* dan *Certificate of Acceptance*
- Lampiran 3. Permohonan Data
- Lampiran 4. Hasil Pengujian Modulus Dinamik
- Lampiran 5. Gambar Pengujian Aspal dan Agregat
- Lampiran 6. Gambar Pengujian *Marshall*
- Lampiran 7. Gambar Pengujian Modulus Dinamik



DAFTAR PUBLIKASI

1. **“A Preliminary Study: Mechanistic Approach in Pavement Design To Accommodate Climate Change”**. doi : [10.1088/1755-1315/129/1/012037](https://doi.org/10.1088/1755-1315/129/1/012037), url: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/129/1/012037>. Proceeding Terindex Scopus, IOP Conference Series : Earth and Environmental Science, Tahun 2018, Volume 129. Judul Proceeding : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 129 (2018) 012037, ISSN : 1755 – 1315
2. **“The Effect of Temperature Changes at Mechanistic Performance of Hotmix Asphalt as Wearing Course with Different Type Gradation”**. doi : 10.1063/1.5042946, url : <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5042946>. Proceeding Terindex Scopus : AIP (American Institute of Physics) ISBN: 0094-249X/E-ISSN: 1551-7616. Nama Proceeding : Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Technology, and Industrial Application (ICETIA) 2017. Tahun Proceeding : 2018. Volume : 1977. ISBN : 978-0-7354-1687-1.
3. **“The Influence of Vehicle Speed Changes at Mechanistic Performance of Asphalt Mixture”**. doi : <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819504003>, url : https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/54/mateconf_icrmce2018_04003/mateconf_icrmce2018_04003.html. Proceeding Terindex Scopus : MATEC. Judul Proceeding : MATEC Web of Conferences Volume 195 (2018). Nama Proceeding : The 4th International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering (ICRMCE 2018).
4. **“Study on Structural Performance of Asphalt Concrete and Hot Rolled Sheet through Viscoelastic Characterization”**. Jurnal Materials : MDPI, Volume 13, issue 5 (March-1 2020) , No. 1133, doi : 10.3390/ma 13051133, url : <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/5/1133>. Terindeks Science Citation index Expanded atau Web of Science impact factor 2,972. Terindeks scopus Q2.