

**STUDI ANALISIS PERKERASAN SEMI LENTUR JALAN
(SEMI FLEXIBLE PAVEMENT) AKIBAT PEMBEBANAN
DINAMIS BERBASIS *FINITE ELEMENT***

(Skripsi)

Oleh:

**RAHMAT SUMINTO
1715011030**



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

STUDI ANALISIS PERKERASAN SEMI LENTUR JALAN (*SEMI FLEXIBLE PAVEMENT*) AKIBAT PEMBEBANAN DINAMIS BERBASIS *FINITE ELEMENT*

Oleh

RAHMAT SUMINTO

Semi Flexible Pavement merupakan perkerasan yang memadukan kedua jenis perkerasan lentur dan perkerasan kaku. Seiring perkembangan zaman dan bertambahnya populasi yang berdampak pada volume kepadatan mobilitas kendaraan semakin bertambah. Akibatnya, kerusakan jalan sering dijumpai karena terjadinya regangan akibat pembebanan dinamis lalu lintas. Analisis Elemen Hingga (*Finite Elemen Analysis*) merupakan pendekatan numerik yang mendekati keakuratan struktural. Tujuan Penelitian untuk menganalisis regangan serta membandingkan dengan hasil eksperimental, menganalisis ketahanan deformasi, menentukan pembebanan untuk muatan sumbu terberat (MST) serta menghitung jumlah kendaraan maksimum yang diperoleh dari faktor nilai *fatigue cracking* (retak lelah). Metode penelitian dilakukan dengan analisis numerik menggunakan *Abaqus 6.14*. Hasil penelitian menunjukkan analisis perkerasan semi lentur hampir menyerupai eksperimental dengan persentase selisih <10%. Untuk ketahanan deformasi, perkerasan semi lentur memiliki waktu yang lebih baik daripada perkerasan lentur. Perkerasan semi lentur dengan beban 0,7 MPa memiliki ketahanan terhadap beban lalu lintas yang lebih baik, dengan nilai *fatigue cracking* sebesar 110.521 ESAL.

Kata Kunci: semi lentur, regangan, deformasi, *fatigue cracking*.

ABSTRACT

ANALYSIS STUDY OF ROAD SEMI-FLEXIBLE PAVEMENT DUE TO LOADING DYNAMIC BASED ON FINITE ELEMENT

By

RAHMAT SUMINTO

Semi Flexible Pavement is a pavement that combines both types of flexible pavement and rigid pavement. Along with the times and increasing population which has an impact on the volume of density of vehicle mobility is increasing. As a result, road damage is often encountered due to strain due to dynamic traffic loading. Finite Element Analysis is a numerical approach that approaches structural accuracy. The research objectives were to analyze strain and compare with experimental results, analyze deformation resistance, determine the loading for the heaviest axle load (MST) and calculate the maximum number of vehicles obtained from the fatigue cracking factor. The research method was carried out by numerical analysis using Abaqus 6.14. The results showed that the semi-flexible pavement analysis almost resembled the experimental one with a percentage difference of <10%. For deformation resistance, semi-flexible pavement has a better time than flexible pavement. Semi-flexible pavement with a load of 0.7 MPa has better resistance to traffic loads, with a fatigue cracking value of 110,521 ESAL.

Keywords: semi flexible, strain, deformation, fatigue cracking.

**STUDI ANALISIS PERKERASAN SEMI LENTUR JALAN
(SEMI FLEXIBLE PAVEMENT) AKIBAT PEMBEBANAN
DINAMIS BERBASIS FINITE ELEMENT**

Oleh

RAHMAT SUMINTO

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Skripsi

: **STUDI ANALISIS PERKERASAN SEMI LENTUR
JALAN (SEMI FLEXIBLE PAVEMENT) AKIBAT
PEMBEBANAN DINAMIS BERBASIS
FINITE ELEMENT**

Nama Mahasiswa

: **Rahmat Suminto**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **1715011030**

Program Studi


: **S1 Teknik Sipil**

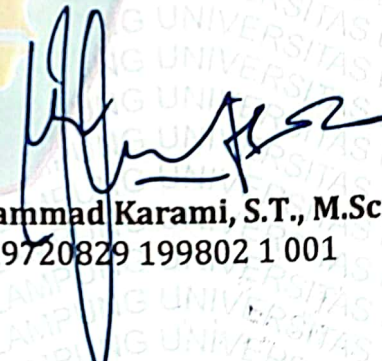
Fakultas

: **Teknik**



1. **Komisi Pembimbing**


Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T.
NIP 19721026 200003 1 001


Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP 19720829 199802 1 001

2. **Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil**

3. **Ketua Jurusan Teknik Sipil**


Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP 19720829 199802 1 001


Ir. Laksmi Irianti, M.T.
NIP 19620408 198903 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T..

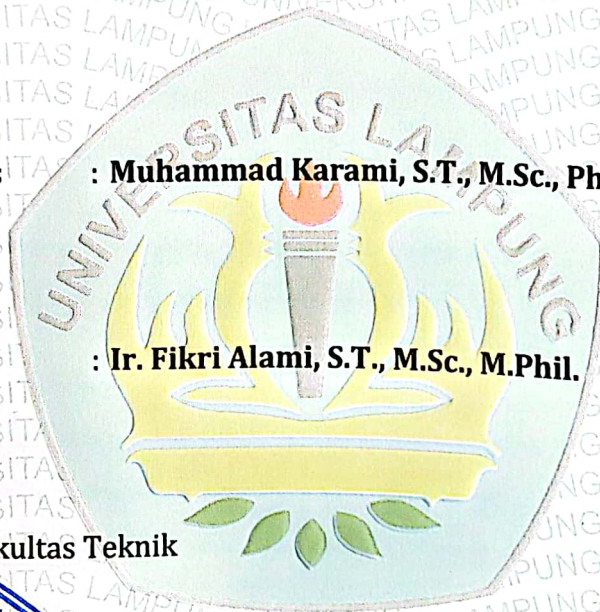
Sekretaris : Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D.

Anggota : Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil.

2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. J
NIP. 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 03 Mei 2023



[Handwritten signatures of the examiners and dean]

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : **Rahmat Suminto**

NPM : 1715011030

Prodi/Jurusan : S1/Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

Judul : Studi Analisis Perkerasan Semi Lentur Jalan (*Semi Flexible Pavement*) Akibat Pembebanan Dinamis Berbasis *Finite Element*

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar karya saya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang telah ditetapkan. Ide penelitian didapat dari Pembimbing I, oleh karena itu baik atas data penelitian berada pada Saya dan Pembimbing I, Bapak Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T.

Apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang berlaku.

Bandar Lampung, 03 Mei 2023

Pembuat Pernyataan,



Rahmat Suminto

RIWAYAT HIDUP



Rahmat Suminto, lahir di Bandar Lampung, 03 Mei 1998, yang merupakan anak keempat dari empat bersaudara pasangan dari Bapak Sahun Wargono dan Ibu Sumini. Penulis menempuh pendidikan dimulai dari pendidikan Sekolah Dasar (SD) di SD Negeri 2 Gunung Terang (2005-2011), lalu Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 22 Bandar Lampung (2011-2014), dan Sekolah Menengah Atas (SMA) diselesaikan di SMA Negeri 9 Bandar Lampung (2014-2017). Ketika duduk di bangku Sekolah Menengah Atas, penulis aktif dan fokus pada ekstrakurikuler Karya Ilmiah Remaja (KIR).

Pada tahun 2017, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif di organisasi kemahasiswaan Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung (HIMATEKS), penulis tercatat sebagai Anggota Departemen Penelitian dan Pengembangan (2018/2019), serta Kepala Departemen Penelitian dan Pengembangan (2019/2020). Penulis juga pernah menjadi Ketua Pelaksana Webinar 6th Civil Brings Revolution Tingkat Nasional yang diselenggarakan oleh Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) Tahun 2020. Pada tahun 2020 juga penulis melaksanakan kegiatan Kerja Praktik di Proyek Pembangunan Gedung B Rumah Sakit Graha Husada Bandar Lampung selama tiga

bulan. Tahun 2021, Penulis melaksanakan kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode I di Desa/Kelurahan Gunung Terang, Kecamatan Langkapura, Kota Bandar Lampung.

Selama masa perkuliahan, penulis diberikan kesempatan menjadi Asisten Praktikum Mata Kuliah Mekanika Fluida di Universitas Lampung pada tahun 2020. Pada tahun 2021 penulis melakukan penelitian pada bidang struktur dan transportasi dengan melakukan penelitian tentang Studi Analisis Perkerasan Semi Lentur Jalan Akibat Beban Dinamis dengan program elemen hingga Abaqus 6.14 di bawah bimbingan bapak Dr. Eng Mohd. Isneini, S.T., M.T. dan Bapak Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”

- QS Al-Baqarah Ayat 286 -

“Jangan menyerah. Hal memalukan bukanlah ketika kau jatuh, tetapi ketika kau tidak mau bangkit lagi.”

- Midorima Shintarou, tokoh Anime Kuroko no Basuke -

“Jangan pernah biarkan kesombongan menjadi prinsip pemandumu. Biarkan pencapaianmu berbicara untukmu.”

- Morgan Freeman -

“Jurang bisa merusak tanah kita, tapi tidak dengan kemauan besi kita.”

- Belerick, Karakter Hero Mobile Legends -

“Prove to your failure and the past that you can success and be better in the future.”

- Rahmat Suminto -

PERSEMBAHAN

Kuucapkan Syukur atas Karunia-Mu Dan Dengan Segala Kerendahan Hati, ku persembahkan karya tulis ini kepada Allah SWT. Serta Kupersembahkan karya Kecilku ini untuk orang-orang yang aku sayangi

Bapak dan Ibuku

Orang Tuaku atas segala pengorbanan yang tak terbalaskan, do'a, kesabaran, keikhlasan, cinta dan kasih sayang yang tidak ada putusnya

Kakakku Tersayang

Untuk ketiga kakakku yang memotivasiku dalam menyelesaikan tugas dan kewajibanku ini

Dosen Teknik Sipil

Yang selalu membimbing, mengajarkan, memberikan saran serta saran baik secara akademis maupun non akademis

Sahabat-sahabatku

Yang selalu membantu, memberikan semangat, mendukung menuju keberhasilan, selalu ada, serta berbagi cerita suka duka dalam berkeluh kesah

Keluarga Besar Teknik Sipil 2017

Yang selalu memberi semangat, dukungan dalam proses yang sangat panjang, dan selalu berdiri Bersama dalam suka dan duka

SANWACANA

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah, serta inayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Studi Analisis Perkerasan Semi lentur Jalan (*Semi Flexible Pavement*) Akibat Pembebanan Dinamis Berbasis *Finite Element*” dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Allah SWT dengan segala kuasa-Nya pemberi rahmat, hidayah dan ampunan bagi hamba-Nya termasuk penulis. Terimakasih ya Allah, semoga semua hal yang telah penulis lakukan dan kerjakan bernilai ibadah dan mendapat pahala dari-Mu. Aamiin ya Rabb.
2. Kedua orang tua, Ayah dan Ibu tercinta, Sahun Wargono dan Sumini. Terima kasih atas segala doa, cinta dan kasih sayang, dukungan moral dan materil, yang selalu diberikan yang tidak akan mampu penulis balas segala jasa dan kebaikannya sampai kapanpun. Semoga Allah SWT selalu memberikan perlindungan, kesehatan, kasih sayang, umur panjang dan keberkahan sebagai balasan atas segala jasa dan kebaikan Ayah dan Ibu tercinta.
3. Saudara kandungku dan kakak iparku, Atik Haryani, Leli Kurnia Sari, Guno Wiarti, Nizar Kian, Dwi Septiantoro, dan Edwin Trio Anggoro, terima kasih

atas doa, bimbingan dan kepercayaan dan dengan sabar memberikan semangat baik moral maupun materil dalam menyelesaikan skripsi ini.

4. Aku sendiri, terima kasih sudah bertahan, berjuang dan bersabar dalam menjalani kehidupan dan menyelesaikan skripsi.
5. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
6. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
7. Bapak Dr. Eng. Mohd. Isnaeni, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing pertama penulis. Terima kasih atas ilmu, masukan, ide serta saran yang sangat membangun terutama dalam proses menyelesaikan skripsi ini, terima kasih juga atas kebaikan serta segala pengertian dan kesabaran selama proses menyusun tulisan ini. Semoga segala kebaikan bapak akan selalu membawa keberkahan bagi bapak dan Keluarga.
8. Bapak Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung serta dosen pembimbing kedua penulis. Terima kasih atas ilmu, masukan, ide serta saran yang sangat membangun terutama dalam proses menyelesaikan skripsi ini, terima kasih juga atas kebaikan serta segala pengertian dan kesabaran selama proses menyusun tulisan ini. Semoga segala kebaikan ibu akan selalu membawa keberkahan bagi Ibu dan Keluarga.
9. Bapak Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil. selaku dosen penguji yang selalu mampu memberikan pengetahuan baru, masukan, serta kritik dan saran yang sangat bermanfaat baik dalam proses perkuliahan maupun dalam proses

penyusunan skripsi ini. Semoga segala kebaikan bapak akan selalu membawa keberkahan bagi Bapak dan Keluarga.

10. Seluruh dosen Prodi S1 Teknik Sipil atas semua bekal ilmu pengetahuan yang telah diberikan. Serta staf akademisi.
11. Rekan seperjuangan, Nina Santi Adiestia, Rizky Maymun, I Gusti Putu Indra atas kerjasama dan rasa saling menguatkan selama proses penelitian.
12. Bang Ridho Surahman dan Mr. Mabood, terima kasih atas bimbingan dan bantuannya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penelitian ini.
13. Keluarga Teknik Sipil angkatan 2017 yang telah sama-sama berjuang, maaf tidak bisa menyebutkan satu-persatu. Terima kasih atas segalanya selama 5 tahun masa kuliah ini. Semoga kita semua akan selalu diberikan kemudahan serta kesuksesan dalam berkarir nanti.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan. Karenanya, penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Bandar Lampung, Mei 2023

RAHMAT SUMINTO

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	xxi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang dan Masalah.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	4
1.3 Manfaat Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Sistematika Penulisan.....	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Perkerasan Semi-Lentur.....	8
2.2 Tegangan dan Regangan.....	9
2.2.1 Hubungan Tegangan dan Regangan.....	11
2.3 Beban Dinamis dan Beban Siklik.....	12
2.4 Metode Elemen Hingga.....	13
2.5 Abaqus CAE.....	15
2.6 Parameter Material.....	17
2.6.1 Material Perkerasan <i>Semi-flexible</i> <i>dan Perkerasan Lentur AC-WC</i>	18
2.6.2 Modulus Elastisitas.....	18
2.6.3 <i>Poisson's Ratio</i>	19
2.7 Pemodelan Metode Elemen Hingga.....	20
2.7.1 Model Perkerasan <i>Semi-flexible</i> , AC-WC.....	

	dan <i>Roller Compactor</i>	20
2.8	Analisis Abaqus.....	21
	2.8.1 <i>Preprocessing</i>	21
	2.8.2 Simulasi (<i>Abaqus Standard</i> dan <i>Abaqus Explicit</i>).....	24
	2.8.3 <i>Post Processing (Abaqus/CAE)</i>	24
2.9	Ketahanan Deformasi (<i>Creep</i>).....	25
2.10	Pengaruh Beban Terhadap Perkerasan.....	25
	2.10.1 Muatan Sumbu Terberat (MST).....	27
	2.10.2 Beban Sumbu Standar Kumulatif (<i>Standard Axle Load</i>).....	28
	2.10.3 Faktor Ekuivalen Beban (VDF).....	29
	2.10.4 Umur Rencana.....	30
	2.10.5 Analisis Kerusakan Perkerasan.....	31
III.	METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1	Rancangan penelitian.....	33
3.2	Bahan Penelitian.....	33
3.3	Langkah-langkah Pemodelan Menggunakan Abaqus CAE.....	34
	3.3.1 <i>Part Module</i>	36
	3.3.2 <i>Property Module</i>	38
	3.3.3 <i>Assembly Module</i>	39
	3.3.4 <i>Step Module</i>	40
	3.3.5 <i>Interaction Module</i>	41
	3.3.6 <i>Load Module</i>	41
	3.3.7 <i>Mesh Module</i>	43
	3.3.8 <i>Job Module</i>	44
3.4	Analisis Ketahanan Deformasi (<i>Creep</i>), Penentuan Beban Untuk Muatan Sumbu Terberat dan Perhitungan Nilai <i>Fatigue Cracking</i>	45
3.5	Diagram Alir Penelitian.....	46

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	48
4.1 Pengaruh Beban Terhadap Regangan Model Perkerasan Semi Lentur.....	48
4.1.1 Pembebanan 0,7 MPa.....	50
4.1.2 Pembebanan 0,6 MPa.....	67
4.1.3 Pembebanan 0,5 MPa.....	83
4.2 Pengaruh Beban Terhadap Regangan Model AC-WC.....	101
4.2.1 Pembebanan 0,7 MPa.....	102
4.2.2 Pembebanan 0,6 MPa.....	118
4.2.3 Pembebanan 0,5 MPa.....	134
4.3 Perbandingan Regangan Perkerasan Semi Lentur dan AC-WC.....	153
4.3.1 Perbandingan regangan pada pembebanan 0,7 MPa.....	154
4.3.2 Perbandingan regangan pada pembebanan 0,6 MPa.....	157
4.3.3 Perbandingan regangan pada pembebanan 0,5 MPa.....	161
4.4 Hasil Ketahanan Deformasi.....	164
4.5 Menentukan Pembebanan untuk Muatan Sumbu Terberat.....	172
4.6 Perhitungan Nilai Retak Lelah (<i>Fatigue Cracking</i>).....	175
4.7 Perhitungan Jumlah Kendaraan Maksimum.....	175
V. PENUTUP	178
5.1 Kesimpulan.....	178
5.2 Saran.....	180

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Hubungan tegangan dan regangan akibat beban berulang	11
Gambar 2.2. Struktur bidang dalam bentuk sembarang.....	14
Gambar 2.3 Detail <i>mesh</i> pada struktur sembarang.....	14
Gambar 2.4 Macam-Macam Model Elemen	16
Gambar 2.5. <i>Three dimensional solid element</i>	21
Gambar 3.1. Membuka program <i>Abaqus</i> CAE.....	35
Gambar 3.2. Tampilan awal <i>Abaqus</i> CAE.....	35
Gambar 3.3. Memodelkan <i>part Semiflexible</i>	36
Gambar 3.4. Memodelkan <i>part AC-WC</i>	37
Gambar 3.5. Memodelkan <i>part Base A</i>	37
Gambar 3.6. Memodelkan <i>part Roller Compactor</i>	38
Gambar 3.7. Hasil pemodelan setelah <i>part</i> disatukan.....	40
Gambar 3.8. Hasil <i>interaction</i> pada model <i>semiflexible</i> dan AC-WC.....	41
Gambar 3.9. Hasil perletakan	42
Gambar 3.10. Hasil input pembebanan pada <i>module load</i>	43
Gambar 3.11. <i>Mesh</i> pada model <i>semiflexible</i>	44
Gambar 3.12. Hasil Regangan pada model <i>Semiflexible</i>	45
Gambar 3.13. Diagram Alir Penelitian.....	47
Gambar 4.1. Hasil Pemodelan Perkerasan.....	48
Gambar 4.2. Ilustrasi 1 periode gelombang saat pengujian dinamis.....	49

Gambar 4.3. Daerah masing-masing tinjauan regangan.....	50
Gambar 4.4. Panjang gelombang untuk pembebanan 0,7 MPa pada Perkerasan Semi Lentur.....	51
Gambar 4.5. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang pertama perkerasan semi lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,7 MPa.....	52
Gambar 4.6. Letak beban pada regangan maksimum gelombang pertama perkerasan semi lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,7 MPa..._	52
Gambar 4.7. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang kedua perkerasan semi lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,7 MPa.....	53
Gambar 4.8. Letak beban pada regangan maksimum gelombang kedua perkerasan semi lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,7 MPa..._	53
Gambar 4.9. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang ketiga perkerasan semi lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,7 MPa.....	54
Gambar 4.10. Letak beban pada regangan maksimum gelombang ketiga perkerasan semi lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,7 MPa..._	54
Gambar 4.11. Daerah regangan maksimum gelombang pertama perkerasan semi lentur pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	56
Gambar 4.12. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama perkerasan semi lentur (<i>bottom strain</i>) dengan pembebanan 0,7 MPa.....	56

Gambar 4.13. Daerah regangan maksimum gelombang kedua perkerasan semi lentur pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	57
Gambar 4.14. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua perkerasan semi lentur (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	57
Gambar 4.15. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga perkerasan semi lentur pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	58
Gambar 4.16. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga perkerasan semi lentur (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	58
Gambar 4.17. Daerah regangan maksimum gelombang pertama perkerasan semi lentur pada lapisan perkerasan bagian tengah (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	60
Gambar 4.18. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama perkerasan semi lentur (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	60
Gambar 4.19. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan semi lenur bagian tengah (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	61
Gambar 4.20. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua perkerasan semi lentur (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	61
Gambar 4.21. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada lapisan perkerasan semi lentur bagian tengah (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	62

Gambar 4.22. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga perkerasan semi lentur (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	62
Gambar 4.23. Daerah regangan maksimum gelombang pertama pada lapisan perkerasan semi lentur bagian atas (<i>top strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	63
Gambar 4.24. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama perkerasan semi lentur (<i>top strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	64
Gambar 4.25. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan semi lentur bagian atas (<i>top strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	64
Gambar 4.26. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua perkerasan semi lentur (<i>top strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	65
Gambar 4.27. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada lapisan perkerasan semi lentur bagian atas (<i>top strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	65
Gambar 4.28. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga perkerasan semi lentur (<i>top strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	66
Gambar 4.29. Panjang gelombang untuk pembebanan 0,6 MPa pada perkerasan semi lentur.....	67
Gambar 4.30. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang pertama perkerasan semi lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,6 MPa.....	68
Gambar 4.31. Letak beban pada regangan maksimum gelombang pertama perkerasan semi lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,6 MPa....	69

Gambar 4.32. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang kedua perkerasan semi lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,6 MPa	69
Gambar 4.33. Letak beban pada regangan maksimum gelombang kedua perkerasan semi lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,6 MPa....	70
Gambar 4.34. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang ketiga perkerasan semi lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,6 MPa	70
Gambar 4.35. Letak beban pada regangan maksimum gelombang ketiga perkerasan semi lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,6 MPa....	71
Gambar 4.36. Daerah regangan maksimum gelombang pertama lapisan perkerasan semi lentur bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	72
Gambar 4.37. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama perkerasan semi lentur (<i>bottom strain</i>) dengan pembebanan 0,6 MPa	73
Gambar 4.38. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan semi lentur bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	74
Gambar 4.39. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua perkerasan semi lentur (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,6 MPa	74
Gambar 4.40. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada lapisan perkerasan semi lentur bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	75
Gambar 4.41. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga perkerasan semi lentur (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,6 MPa	75

- Gambar 4.42. Daerah regangan maksimum gelombang pertama pada perkerasan semi lentur bagian tengah (*middle strain*) pembebanan 0,6 MPa.....76
- Gambar 4.43. Kondisi beban *wheel load* saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama semi lentur (*middle strain*) pembebanan 0,6 MPa.....77
- Gambar 4.44. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan semi lentur bagian tengah (*middle strain*) pembebanan 0,6 MPa.....78
- Gambar 4.45. Kondisi beban *wheel load* saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua semi lentur (*middle strain*) pembebanan 0,6 MPa.....78
- Gambar 4.46. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada lapisan perkerasan semi lentur bagian tengah (*middle strain*) pembebanan 0,6 MPa.....78
- Gambar 4.47. Kondisi beban *wheel load* saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga semi lentur (*middle strain*) pembebanan 0,6 MPa...79
- Gambar 4.48. Daerah regangan maksimum gelombang pertama pada lapisan perkerasan semi lentur bagian atas (*top strain*) pembebanan 0,6 MPa.....80
- Gambar 4.49. Kondisi beban *wheel load* saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama (*top strain*) semi lentur pembebanan 0,6 MPa.....80
- Gambar 4.50. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan semi lentur bagian atas (*top strain*) pembebanan 0,6 MPa.....81
- Gambar 4.51. Kondisi beban *wheel load* saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua (*top strain*) semi lentur pembebanan 0,6 MPa.....81
- Gambar 4.52. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada lapisan perkerasan bagian atas (*top strain*) semi lentur pembebanan 0,6 MPa.....82
- Gambar 4.53. Kondisi beban *wheel load* saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga (*top strain*) semi lentur pembebanan 0,6 MPa.....83

Gambar 4.54. Panjang gelombang untuk pembebanan 0,5 MPa pada perkerasan semi lentur.....	84
Gambar 4.55. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang pertama semi lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,5 MPa.....	85
Gambar 4.56. Letak beban pada regangan maksimum gelombang pertama semi lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,5 MPa.....	85
Gambar 4.57. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang kedua daerah <i>bottom strain</i> semi lentur dengan pembebanan 0,5 MPa.....	86
Gambar 4.58. Letak beban pada regangan maksimum gelombang kedua semi lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,5 MPa.....	86
Gambar 4.59. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang ketiga daerah <i>bottom strain</i> semi lentur dengan pembebanan 0,5 MPa.....	87
Gambar 4.60. Letak beban pada regangan maksimum gelombang ketiga semi lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,5 MPa.....	87
Gambar 4.61. Daerah regangan maksimum gelombang pertama pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa.....	89
Gambar 4.62. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama semi lentur (<i>bottom strain</i>) dengan pembebanan 0,5 MPa.....	89
Gambar 4.63. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa.....	90

Gambar 4.64. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua (<i>bottom strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa	90
Gambar 4.65. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa	91
Gambar 4.66. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga (<i>bottom strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa	91
Gambar 4.67. Daerah regangan maksimum gelombang pertama pada lapisan perkerasan bagian tengah (<i>middle strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa	92
Gambar 4.68. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama (<i>middle strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa	93
Gambar 4.69. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan bagian tengah (<i>middle strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa	93
Gambar 4.70. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua (<i>middle strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa	94
Gambar 4.71. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada lapisan perkerasan bagian tengah (<i>middle strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa	94
Gambar 4.72. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga (<i>middle strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa	95
Gambar 4.73. Daerah regangan maksimum gelombang pertama pada lapisan perkerasan bagian atas (<i>top strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa	96

Gambar 4.74. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama (<i>top strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa.....	96
Gambar 4.75. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan bagian atas (<i>top strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa.....	97
Gambar 4.76. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua (<i>top strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa.....	97
Gambar 4.77. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada lapisan perkerasan bagian atas (<i>top strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa.....	98
Gambar 4.78. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga (<i>top strain</i>) semi lentur pembebanan 0,5 MPa.....	98
Gambar 4.79. Perbandingan regangan maksimum terhadap pembebanan pada perkerasan semi lentur.....	100
Gambar 4.80. Pengaruh perbedaan pembebanan terhadap nilai regangan daerah <i>strain gauge</i> perkerasan semi lentur.....	101
Gambar 4.81. Panjang gelombang untuk pembebanan 0,7 MPa pada perkerasan lentur AC-WC.....	102
Gambar 4.82. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang pertama perkerasan lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,7 MPa.....	103
Gambar 4.83. Letak beban pada regangan maksimum gelombang pertama perkerasan lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,7 MPa.....	104
Gambar 4.84. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang kedua perkerasan lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,7 MPa.....	104

Gambar 4.85. Letak beban pada regangan maksimum gelombang kedua perkerasan lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,7 MPa.....	105
Gambar 4.86. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang ketiga perkerasan lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,7 MPa.....	105
Gambar 4.87. Letak beban pada regangan maksimum gelombang ketiga perkerasan lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,7 MPa.....	106
Gambar 4.88. Daerah regangan maksimum gelombang pertama perkerasan lentur pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	107
Gambar 4.89. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama perkerasan lentur (<i>bottom strain</i>) dengan pembebanan 0,7 MPa.....	108
Gambar 4.90. Daerah regangan maksimum gelombang kedua perkerasan lentur pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	108
Gambar 4.91. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua perkerasan lentur (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	109
Gambar 4.92. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga perkerasan lentur pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	110
Gambar 4.93. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga perkerasan lentur (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	110

Gambar 4.94. Daerah regangan maksimum gelombang pertama perkerasan lentur pada lapisan perkerasan bagian tengah (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	111
Gambar 4.95. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama perkerasan lentur (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	112
Gambar 4.96. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan lentur bagian tengah (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	112
Gambar 4.97. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua perkerasan lentur (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	113
Gambar 4.98. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada lapisan perkerasan lentur bagian tengah (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	113
Gambar 4.99. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga perkerasan lentur (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	114
Gambar 4.100. Daerah regangan maksimum gelombang pertama pada lapisan perkerasan lentur bagian atas (<i>top strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	115
Gambar 4.101. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama perkerasan lentur (<i>top strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	115
Gambar 4.102. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan lentur bagian atas (<i>top strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	116
Gambar 4.103. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua perkerasan lentur (<i>top strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	116

Gambar 4.104. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada lapisan perkerasan lentur bagian atas (<i>top strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	117
Gambar 4.105. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga perkerasan lentur (<i>top strain</i>) pembebanan 0,7 MPa.....	117
Gambar 4.106. Panjang gelombang untuk pembebanan 0,6 MPa pada perkerasan lentur AC-WC.....	119
Gambar 4.107. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang pertama perkerasan lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,6 MPa.....	120
Gambar 4.108. Letak beban pada regangan maksimum gelombang pertama perkerasan lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,6 MPa.....	120
Gambar 4.109. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang kedua perkerasan lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,6 MPa.....	121
Gambar 4.110. Letak beban pada regangan maksimum gelombang kedua perkerasan lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,6 MPa.....	121
Gambar 4.111. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang ketiga perkerasan lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,6 MPa.....	122
Gambar 4.112. Letak beban pada regangan maksimum gelombang ketiga perkerasan lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,6 MPa.....	122
Gambar 4.113. Daerah regangan maksimum gelombang pertama perkerasan lentur pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	124

Gambar 4.114. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama perkerasan lentur (<i>bottom strain</i>) dengan pembebanan 0,6 MPa.....	124
Gambar 4.115. Daerah regangan maksimum gelombang kedua perkerasan lentur pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	125
Gambar 4.116. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua perkerasan lentur (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	125
Gambar 4.117. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga perkerasan lentur pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	126
Gambar 4.118. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga perkerasan lentur (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	126
Gambar 4.119. Daerah regangan maksimum gelombang pertama perkerasan lentur pada lapisan perkerasan bagian tengah (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	127
Gambar 4.120. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama perkerasan lentur (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	128
Gambar 4.121. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan lenur bagian tengah (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	128
Gambar 4.122. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua perkerasan lentur (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	129

Gambar 4.123. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada lapisan perkerasan lentur bagian tengah (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	129
Gambar 4.124. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga perkerasan lentur (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	130
Gambar 4.125. Daerah regangan maksimum gelombang pertama pada lapisan perkerasan lentur bagian atas (<i>top strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	131
Gambar 4.126. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama perkerasan lentur (<i>top strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	131
Gambar 4.127. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan lentur bagian atas (<i>top strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	132
Gambar 4.128. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua perkerasan lentur (<i>top strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	132
Gambar 4.129. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada lapisan perkerasan lentur bagian atas (<i>top strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	133
Gambar 4.130. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga perkerasan lentur (<i>top strain</i>) pembebanan 0,6 MPa.....	133
Gambar 4.131. Panjang gelombang untuk pembebanan 0,5 MPa pada perkerasan lentur AC-WC.....	135
Gambar 4.132. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang pertama perkerasan lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,5 MPa.....	136

Gambar 4.133. Letak beban pada regangan maksimum gelombang pertama perkerasan lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,5 MPa.....	136
Gambar 4.134. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang kedua perkerasan lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,5 MPa.....	137
Gambar 4.135. Letak beban pada regangan maksimum gelombang kedua perkerasan lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,5 MPa.....	137
Gambar 4.136. Titik pengambilan regangan maksimum pada tinjauan <i>strain gauge</i> gelombang ketiga perkerasan lentur daerah <i>bottom strain</i> dengan pembebanan 0,5 MPa.....	138
Gambar 4.137. Letak beban pada regangan maksimum gelombang ketiga perkerasan lentur pada daerah <i>strain gauge</i> dengan pembebanan 0,5 MPa.....	139
Gambar 4.138. Daerah regangan maksimum gelombang pertama perkerasan lentur pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	140
Gambar 4.139. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama perkerasan lentur (<i>bottom strain</i>) dengan pembebanan 0,5 MPa.....	141
Gambar 4.140. Daerah regangan maksimum gelombang kedua perkerasan lentur pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	141
Gambar 4.141. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua perkerasan lentur (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	142

Gambar 4.142. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga perkerasan lentur pada lapisan perkerasan bagian bawah (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	143
Gambar 4.143. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga perkerasan lentur (<i>bottom strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	143
Gambar 4.144. Daerah regangan maksimum gelombang pertama perkerasan lentur pada pembebanan 0,5 MPa.....	144
Gambar 4.145. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama perkerasan lentur (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	145
Gambar 4.146. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan lentur bagian tengah (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	145
Gambar 4.147. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua perkerasan lentur (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	146
Gambar 4.148. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada lapisan perkerasan lentur bagian tengah (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	146
Gambar 4.149. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga perkerasan lentur (<i>middle strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	147
Gambar 4.150. Daerah regangan maksimum gelombang pertama pada lapisan perkerasan lentur bagian atas (<i>top strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	148
Gambar 4.151. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang pertama perkerasan lentur (<i>top strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	148

Gambar 4.152. Daerah regangan maksimum gelombang kedua pada lapisan perkerasan lentur bagian atas (<i>top strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	149
Gambar 4.153. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang kedua perkerasan lentur (<i>top strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	149
Gambar 4.154. Daerah regangan maksimum gelombang ketiga pada perkerasan lentur bagian atas (<i>top strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	150
Gambar 4.155. Kondisi beban <i>wheel load</i> saat terjadi regangan maksimum pada gelombang ketiga perkerasan lentur (<i>top strain</i>) pembebanan 0,5 MPa.....	150
Gambar 4.156. Perbandingan regangan maksimum terhadap pembebanan pada perkerasan lentur AC-WC.....	152
Gambar 4.157. Pengaruh perbedaan pembebanan terhadap nilai regangan daerah <i>strain gauge</i> perkerasan lentur AC-WC.....	153
Gambar 4.158. Hasil diagram kondisi regangan maksimum pada perkerasan semi lentur dengan beban 0,7 MPa.....	154
Gambar 4.159. Hasil diagram kondisi regangan maksimum pada perkerasan lentur AC-WC dengan beban 0,7 MPa.....	155
Gambar 4.160. Perbandingan hasil regangan pada pembebanan 0,7 MPa pada daerah <i>strain gauge</i> selama 60 detik.....	156
Gambar 4.161. Perbandingan hasil regangan pada pembebanan 0,7 MPa pada daerah <i>strain gauge</i> selama 60 detik.....	156
Gambar 4.162. Hasil diagram kondisi regangan maksimum pada perkerasan semi lentur dengan beban 0,6 MPa.....	158
Gambar 4.163. Hasil diagram kondisi regangan maksimum pada perkerasan lentur AC-WC dengan beban 0,6 MPa.....	158

Gambar 4.164. Perbandingan hasil regangan pada pembebanan 0,6 MPa pada daerah <i>strain gauge</i> selama 60 detik.....	160
Gambar 4.165. Perbandingan regangan maksimum seluruh lapisan perkerasan pada pembebanan 0,6 MPa.....	160
Gambar 4.166. Hasil diagram kondisi regangan maksimum pada perkerasan semi lentur dengan beban 0,5 MPa.....	162
Gambar 4.167. Hasil diagram kondisi regangan maksimum pada perkerasan lentur AC-WC dengan beban 0,5 MPa.....	162
Gambar 4.168. Perbandingan hasil regangan pada pembebanan 0,5 MPa pada daerah <i>strain gauge</i> selama 60 detik.....	164
Gambar 4.169. Perbandingan regangan maksimum seluruh lapisan perkerasan pada pembebanan 0,5 MPa.....	164
Gambar 4.170. Ketahanan deformasi sampel semi lentur dengan pembebanan 0,7 MPa.....	166
Gambar 4.171. Ketahanan deformasi sampel semi lentur dengan pembebanan 0,6 MPa.....	167
Gambar 4.172. Ketahanan deformasi sampel semi lentur dengan pembebanan 0,5 MPa.....	168
Gambar 4.173. Ketahanan deformasi sampel lentur AC-WC dengan pembebanan 0,7 MPa.....	169
Gambar 4.174. Ketahanan deformasi sampel lentur AC-WC dengan pembebanan 0,6 MPa.....	170
Gambar 4.175. Ketahanan deformasi sampel lentur AC-WC dengan pembebanan 0,5 MPa.....	171

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Satuan yang digunakan dalam proses penginputan data.....	17
Tabel 2.2. Kepadatan masing-masing model perkerasan semi lentur dan perkerasan lentur AC-WC.....	18
Tabel 2.3. Modulus elastisitas masing-masing material.....	19
Tabel 2.4. <i>Poisson's ratio</i> pada masing-masing material.....	20
Tabel 2.5. Beban maksimum setiap jenis konfigurasi sumbu.....	26
Tabel 2.6. Faktor pertumbuhan lalu lintas (i) minimum untuk desain.....	29
Tabel 2.7. Nilai VDF masing-masing kendaraan.....	30
Tabel 2.8. Umur rencana perkerasan jalan baru.....	31
Tabel 3.1. Spesifikasi material pemodelan.....	34
Tabel 4.1. Nilai regangan daerah <i>strain gauge</i> pada sampel semi lentur dengan beban 0,7 MPa.....	55
Tabel 4.2. Besar regangan maksimum masing-masing gelombang pada lapisan bawah (<i>bottom strain</i>) perkerasan semi lentur 0,7 MPa.....	59
Tabel 4.3. Besar regangan maksimum masing-masing gelombang lapisan semi lentur 0,7 MPa bagian tengah (<i>middle strain</i>).....	63
Tabel 4.4. Besar regangan maksimum masing-masing lapisan semi lentur 0,7 MPa.....	66
Tabel 4.5. Nilai regangan daerah <i>strain gauge</i> pada sampel semi lentur dengan beban 0,6 MPa.....	71

Tabel 4.6. Besar regangan maksimum masing-masing gelombang pada lapisan semi lentur 0,6 MPa bagian bawah (<i>bottom strain</i>).....	76
Tabel 4.7. Besar regangan maksimum masing-masing gelombang pada lapisan semi lentur 0,6 MPa bagian tengah (<i>middle strain</i>).....	79
Tabel 4.8. Besar regangan maksimum masing-masing lapisan semi lentur dengan pembebanan 0,6 MPa	83
Tabel 4.9. Nilai regangan daerah <i>strain gauge</i> pada sampel semi lentur dengan beban 0,5 MPa	88
Tabel 4.10. Besar regangan maksimum masing-masing gelombang pada lapisan semi lentur 0,5 MPa bagian bawah (<i>bottom strain</i>).....	92
Tabel 4.11. Besar regangan maksimum masing-masing gelombang pada lapisan semi lentur 0,5 MPa bagian tengah (<i>middle strain</i>).....	95
Tabel 4.12. Besar regangan maksimum masing-masing lapisan semi lentur 0,5 MPa	99
Tabel 4.13. Nilai regangan maksimum tiap gelombang pada masing- masing pembebanan semi lentur.....	99
Tabel 4.14. Nilai regangan daerah <i>strain gauge</i> pada sampel lentur AC-WC dengan beban 0,7 MPa.....	106
Tabel 4.15. Besar regangan maksimum masing-masing gelombang lapisan bawah (<i>bottom strain</i>) perkerasan lentur 0,7 MPa.....	111
Tabel 4.16. Besar regangan maksimum masing-masing gelombang pada lapisan lentur 0,7 MPa bagian tengah (<i>middle strain</i>).....	114
Tabel 4.17. Besar regangan maksimum masing-masing lapisan perkerasan lentur 0,7 MPa.....	118

Tabel 4.18. Nilai regangan lapisan bawah pada sampel lentur AC-WC dengan beban 0,6 MPa daerah <i>strain gauge</i>	123
Tabel 4.19. Besar regangan maksimum masing-masing gelombang pada lapisan bawah (<i>bottom strain</i>) perkerasan lentur 0,6 MPa.....	127
Tabel 4.20. Besar regangan maksimum masing-masing gelombang pada lapisan lentur 0,6 MPa bagian tengah (<i>middle strain</i>).....	130
Tabel 4.21. Besar regangan maksimum masing-masing lapisan perkerasan lentur 0,6 MPa.....	134
Tabel 4.22. Nilai regangan lapisan bawah pada sampel lentur AC-WC dengan beban 0,5 MPa daerah <i>strain gauge</i>	139
Tabel 4.23. Besar regangan maksimum masing-masing gelombang pada lapisan bawah (<i>bottom strain</i>) perkerasan lentur 0,5 MPa.....	144
Tabel 4.24. Besar regangan maksimum masing-masing gelombang pada perkerasan lentur 0,5 MPa bagian tengah (<i>middle strain</i>).....	147
Tabel 4.25. Besar regangan maksimum masing-masing lapisan perkerasan lentur 0,5 MPa.....	151
Tabel 4.26. Nilai regangan maksimum tiap gelombang pada masing- masing pembebanan lentur AC-WC.....	151
Tabel 4.27. Perbandingan regangan maksimum pada tinjauan daerah <i>strain gauge</i> dengan hasil eksperimental pada pembebanan 0,7 MPa.....	157
Tabel 4.28. Perbandingan regangan maksimum pada tinjauan daerah <i>strain gauge</i> dengan hasil eksperimental pada pembebanan 0,6 MPa.....	161
Tabel 4.29. Perbandingan regangan maksimum pada tinjauan daerah <i>strain gauge</i> dengan hasil eksperimental pada pembebanan 0,5 MPa.....	165
Tabel 4.30. Hasil ketahanan deformasi masing-masing sampel.....	171

Tabel 4.31. Beban maksimum setiap jenis konfigurasi as gandar.....	172
Tabel 4.32. Jenis Kendaraan <i>Single Axle Dual Wheel</i> dan masing-masing nilai VDF.....	176
Tabel 4.33. Jumlah maksimum masing-masing jenis kendaraan.....	177

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang dan Masalah

Jalan merupakan salah satu sarana transportasi yang memiliki peranan besar dalam perkembangan kemajuan suatu daerah. Adanya jalan sebagai sarana perhubungan diharapkan dapat memenuhi kebutuhan masyarakat dalam melakukan segala aktivitas dalam berbagai sektor. Untuk memudahkan aksesibilitas maupun mobilitas barang dan jasa, maka perlu adanya struktur perkerasan jalan yang baik.

Aspal beton (*Asphaltic Concrete*) sebagai bahan yang baik untuk struktur perkerasan jalan telah banyak digunakan dalam pembuatan jalan. Hal ini disebabkan aspal beton memiliki kelebihan dibandingkan bahan-bahan lainnya. Kemampuan aspal beton dalam menahan dan mendukung beban berat kendaraan serta memiliki ketahanan yang baik terhadap cuaca. Kekuatan utama dari aspal beton adalah keadaan butir agregat yang saling mengikat serta *filler* sebagai mortar.

Perkembangan teknologi dan inovasi pada struktur perkerasan jalan telah terlihat dengan dikembangkannya suatu jenis perkerasan yang disebut *Semi Flexible Pavement*. *Semi Flexible Pavement* merupakan suatu jenis perkerasan

semi lentur yang memadukan kedua jenis perkerasan yaitu perkerasan lentur (*flexible pavement*) dan perkerasan kaku (*rigid pavement*).

Seiring dengan perkembangan zaman dan bertambahnya populasi manusia yang berdampak pada volume kepadatan mobilitas kendaraan semakin bertambah. Akibatnya, beberapa kerusakan jalan sering dijumpai karena terjadinya tegangan dan regangan akibat pembebanan dinamis lalu lintas yang berulang secara berlebihan (*overloaded*). Menurut Widodo (2001) beban dinamis merupakan beban yang intensitasnya berubah-ubah berdasarkan fungsi waktu, sehingga dapat dikatakan besarnya beban merupakan fungsi waktu. Secara sederhana dinamis dapat diartikan sebagai variasi atau perubahan terhadap waktu dalam konteks gaya yang bekerja (eksitasi) pada struktur. Beban dinamis dapat berupa variasi besarnya (*magnitude*), arahnya (*direction*) atau posisinya (*point of application*) berubah terhadap waktu.

Menurut Zazir (1994), beban kendaraan seringkali dianggap beban statis di setiap perhitungan tebal perkerasan. Padahal, nyatanya kendaraan bergerak secara dinamis. Oleh karena itu, pengetahuan akan analisis perkerasan pada jalan berbahan beton aspal sangatlah penting untuk menghindari terjadinya kesalahan struktural yang diperoleh dari hasil pengujian eksperimental di laboratorium.

Analisis Elemen Hingga (*Finite Elemen Analysis*) merupakan pendekatan secara *numeric* yang menyediakan alat yang bisa mendekati tingkat keakuratan struktural. Beberapa *software* analisis elemen hingga yang tersedia seperti *Abaqus*, *Ansys*, *Hypermesh* dan *software* lainnya dapat digunakan untuk

membuktikan analisa struktur yang sangat efektif apabila dibandingkan dengan analisis eksperimental. Studi analisis ini menyajikan analisis perkerasan semi lentur atau semi lentur *pavement* dengan menggunakan metode elemen hingga *Abaqus 6.14*.

Kerusakan yang terjadi pada perkerasan jalan salah satunya adalah deformasi. Menurut Thom (2008), salah satu prinsip dasar perkerasan adalah pada setiap lapisan perkerasan harus mampu menahan agar tidak terjadi deformasi. Deformasi adalah salah satu jenis kerusakan pada perkerasan yang diakibatkan oleh repetisi atau pengulangan beban lalu lintas berat pada kondisi temperature yang tinggi. Sedangkan menurut Christiady (2007), deformasi merupakan perubahan permukaan jalan dari profil jalan aslinya yang merupakan kerusakan penting karena memengaruhi kualitas kenyamanan lalu lintas.

Pada kondisi perkerasan jalan, beban standar sumbu tunggal 8,16 ton masih jadi perbandingan tingkat kerusakan jalan di Indonesia. Adanya regangan yang diakibatkan oleh beban roda kendaraan terhadap perkerasan jalan menyebabkan terjadinya kemerosotan pada struktur perkerasan, yang dalam hal ini terjadi kelelahan retak dan kelelahan alur. Alur diperoleh dari respon perkerasan terhadap regangan tekan pada lapis tanah dasar, sedangkan retak diperoleh dari respon perkerasan terhadap regangan tarik pada perkerasan.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis perilaku regangan pada perkerasan semi lentur dan perkerasan lentur AC-WC berdasarkan beban dinamis yang diukur pada hasil eksperimental.
2. Menganalisis ketahanan deformasi pada perkerasan dengan data regangan yang diperoleh dari hasil analisis menggunakan *Abaqus* 6.14.
3. Menganalisis pengaruh beban pada kendaraan yang melintasi perkerasan jalan serta beban maksimum yang digunakan untuk Muatan Sumbu Terberat (MST) dan regangan terhadap kerusakan kelelahan (*fatigue cracking*).

1.3. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Memberikan ilmu pengetahuan dan menambah wawasan mengenai analisis tegangan dan regangan pada beban dinamis yang terjadi pada perkerasan semi lentur melalui pemodelan FEA dan dapat mengaplikasikannya pada kondisi di lapangan.
2. Menjadikan informasi pertimbangan dalam penggunaan *Software* dalam menyelesaikan penelitian yang dapat meningkatkan aspek efisiensi pekerjaan.

1.4. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini diberikan beberapa batasan agar penelitian dapat lebih fokus dan terarah sehingga hasil yang didapatkan lebih efektif. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bahan analisis menggunakan data sekunder dari hasil eksperimental yang telah dilakukan oleh Pratama (2022) yang berjudul “Studi Eksperimental Tegangan dan Regangan Perkerasan Semi Lentur (*Semi Flexible Pavement*) Akibat Pembebanan Dinamis.”
2. Penelitian berfokus pada hasil regangan akibat beban dinamis pada perkerasan semi lentur dengan jumlah sampel benda uji sebanyak 3 buah dan masing-masing sampel berdimensi 300 mm x 300 mm x 50 mm dan masing-masing sampel diuji dengan beban dinamis sebesar 0.7, 0.6 dan 0.5 MPa, model benda uji perkerasan lentur AC-WC dengan jumlah sampel benda uji sebanyak 3 buah berdimensi 300 mm x 300 mm x 50 mm dan masing-masing sampel diuji dengan beban dinamis sebesar 0.7, 0.6 dan 0.5 MPa , perkerasan lentur AC-WC digunakan untuk membandingkan hasil regangan dengan perkerasan semi lentur.
3. Standar dan input parameter perkerasan jalan mengacu pada *Asphalt Institute*, AASHTO serta *Emerging Researching Ageing* (ERA) tahun 2013, Manual Desain Perkerasan Jalan Tahun 2013 serta jurnal yang dibuat oleh Mahmud, et al (2011) yang berjudul “*Development of Cement-Bitumen Composites for Semi Flexible Pavement Surfacing.*”

4. Pemodelan terhadap benda *roller compactor* pada pengujian eksperimental dimodelkan berbentuk seperti ban atau tabung dengan dimensi serta parameter yang sama dengan pengujian eksperimental.
5. Pemodelan perkerasan semi lentur serta perkerasan lentur AC-WC sebagai pembandingan menggunakan metode elemen hingga dengan *Software Abaqus 6.14* (2014).

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan oleh penulis dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini terdiri dari latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian, hipotesis, batasan masalah serta sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan landasan teori dari beberapa literatur yang mendukung pembahasan tentang studi kasus yang diambil, yaitu analisis hasil regangan yang diakibatkan oleh beban dinamis yang berulang dengan berbasis simulasi metode *numeric* elemen hingga (*finite element method*) yaitu *Abaqus*. Selanjutnya, literatur tentang ketahanan deformasi, penentuan beban maksimum untuk muatan sumbu terberat, serta perhitungan nilai *fatigue cracking*.

BAB III : METODE PENELITIAN

Terdiri dari penjelasan-penjelasan yang berhubungan dengan rancangan penelitian, penetapan pemodelan, bahan penelitian yang

menguraikan parameter model yang digunakan serta alur penelitian.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan mengenai hasil penelitian yang diperoleh dari hasil simulasi dengan *Software*, lalu mengkaji hasil analisis terhadap kondisi di lapangan.

BAB V : PENUTUP

Terdiri dari hal-hal yang dapat disimpulkan dan saran-saran yang disampaikan berdasarkan hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan referensi-referensi yang digunakan dalam menyusun tugas akhir ini.

LAMPIRAN

Berisikan data-data serta gambar dari penelitian dengan analisis numerik.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perkerasan Semi Lentur (*Semi Flexible Pavement*)

Perkerasan semi lentur dikembangkan pertama kali di Perancis pada tahun 1960-an oleh perusahaan konstruksi Jean Lefebvre Enterprises yang pada awalnya dikenal dengan nama *grouted macadam*, sebagai alternatif untuk menghemat biaya dari *Portland Cement Concrete* atau PCC (Roffe, 1989). Perkerasan semi lentur dibuat dengan konsep *Open Graded Asphalt* (OGA) dengan gradasi sangat terbuka dan mengisinya dengan *groute* semen (*cementitious grout*) yang telah terseleksi. Hasil dari perpaduan tersebut dinamakan *grouted macadam*, menggabungkan fleksibilitas dari aspal serta kekakuan beton. Sehingga *grouted macadam* mengkombinasikan kualitas baik dari perkerasan beton dan perkerasan aspal, yaitu fleksibilitas serta kebebasan dari sambungan yang merupakan karakteristik aspal dan daya dukung beban tetap yang tinggi serta ketahanan keausan yang dimiliki oleh beton (Setyawan, 2005).

Penelitian di Jepang yang telah dilakukan oleh Nakanishi (2001) menyatakan bahwa Jepang telah menerapkan perkerasan semi lentur di beberapa tempat pada jalan-jalan di lokasi khusus seperti tempat penyeberangan jalan raya, pintu tol, terminal bus, pemberhentian bus, serta

pelabuhan penyeberangan kapal laut. Perkerasan semi lentur mempunyai beberapa keunggulan dibandingkan dengan perkerasan lainnya, yaitu :

1. Lebih nyaman,
2. Tidak menimbulkan efek yang menyerap cahaya
3. Tahan terhadap kelelahan
4. Tahan terhadap keausan akibat roda kendaraan.

2.2 Tegangan dan Regangan

Tegangan dan regangan dinamis yang ditimbulkan oleh beban roda kendaraan memiliki pengaruh yang besar terhadap kerusakan lapisan perkerasan jalan. Menurut Iremonger (1990), tegangan merupakan suatu ukuran intensitas pembebanan yang dinyatakan oleh gaya dan dibagi oleh luas di tempat gaya tersebut bekerja. Terdapat dua macam gaya yang bekerja pada benda untuk menghasilkan tegangan, yaitu :

1. Gaya permukaan (*surface forces*) merupakan gaya yang bekerja pada suatu permukaan dari benda, contohnya adalah gaya pelat yang di rol.
2. Gaya benda (*body forces*) merupakan gaya yang bekerja pada setiap elemen dari benda tersebut. Contohnya adalah gaya sentrifugal.

Dengan mengasumsikan bahwa tegangan terbagi rata di seluruh penampang, kita dapat melihat bahwa resultannya harus sama dengan intensitas σ dikalikan dengan luas penampang A ., sehingga harganya dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan :

σ = Besarnya tegangan (MPa)

F = Gaya aksial (N)

A = Luas penampang (mm^2)

Persamaan ini memberikan intensitas tegangan merata pada benda yang diberi beban aksial dengan penampang sembarang. Apabila benda ini ditarik dengan gaya P , maka tegangannya adalah tegangan tarik (*tensile stress*). Apabila gayanya mempunyai arah sebaliknya, sehingga menyebabkan benda tersebut mengalami tekan, maka terjadi tegangan tekan (*compressive stress*). Karena tegangan ini mempunyai arah yang tegak lurus permukaan potongan, maka disebut tegangan normal (*normal stress*). Jadi, tegangan normal dapat berupa tegangan tarik dan tegangan tekan (Gere & Timoshenko, 1997).

Jika suatu benda ditarik atau ditekan, maka gaya P yang diterima benda mengakibatkan adanya ketegangan antarpartikel dalam material yang besarnya berbanding lurus. Perubahan tegangan partikel ini menyebabkan adanya pergeseran struktur material regangan atau himpitan yang besarnya juga berbanding lurus. Karena adanya pergeseran, maka terjadilah deformasi bentuk material misalnya perubahan panjang menjadi $L + \Delta L$ (atau $L - \Delta L$). Dimana L adalah panjang awal benda dan ΔL adalah perubahan panjang yang terjadi. Rasio perbandingan antara ΔL terhadap L inilah yang disebut strain (regangan) dan dilambangkan dengan “ ϵ ” (epsilon). Dengan demikian didapatkan rumus :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana :

ε = regangan/*strain* ($\mu\text{m}/\text{m}$ atau $\mu\varepsilon$)

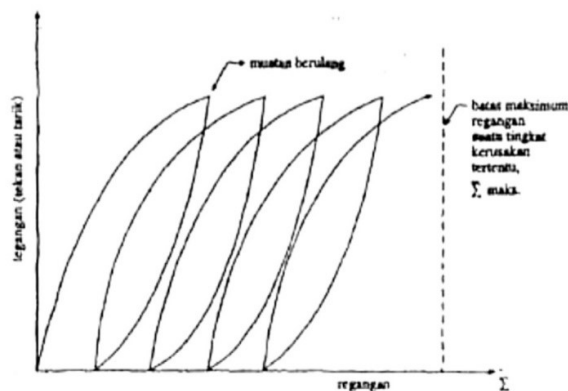
L = panjang benda mula-mula (m)

ΔL = perubahan panjang benda (μm)

Jika batang tersebut mengalami tarik, maka regangannya disebut regangan tarik (*tensile strain*), yang menunjukkan perpanjangan bahan. Jika batang tersebut mengalami tekan, maka regangannya adalah regangan tekan (*compressive strain*) dan batang tersebut memendek. Regangan tarik bertanda positif dan regangan tekan bertanda negatif. Regangan (ε) disebut regangan normal karena regangan ini berkaitan dengan tegangan normal (Gere & Timoshenko, 1997).

2.2.1. Hubungan Tegangan dan Regangan

Hubungan tegangan dan regangan yang terjadi akibat beban roda berulang diilustrasikan pada Gambar 2.1 berikut :



Gambar 2.1. Hubungan tegangan dan regangan akibat beban berulang.

Hubungan tersebut memang tidak sesuai dengan hukum Hooke dimana tegangan berbanding lurus dengan regangan, hal ini dikarenakan perkerasan lentur (*flexible pavement*) merupakan viskoelastisitas, artinya suatu aplikasi tegangan akan menimbulkan regangan senilai tertentu. Masing-masing lapis perkerasan memiliki batas regangan maksimum masing-masing dimana jika batas tersebut tercapai akan Nampak kerusakan tertentu yang nyata.

2.3 Beban Dinamis dan Beban Siklik

Beban dinamis merupakan beban yang intensitasnya berubah-ubah berdasarkan fungsi waktu, sehingga dapat dikatakan bahwa besarnya beban merupakan fungsi waktu. Secara sederhana, dinamis dapat diartikan sebagai variasi atau perubahan terhadap waktu dalam konteks gaya yang bekerja (eksitasi) pada struktur. Beban dinamis dapat berupa variasi besarnya (*magnitude*), arahnya (*direction*) atau posisinya (*point of application*) yang berubah terhadap waktu (Widodo, 2001).

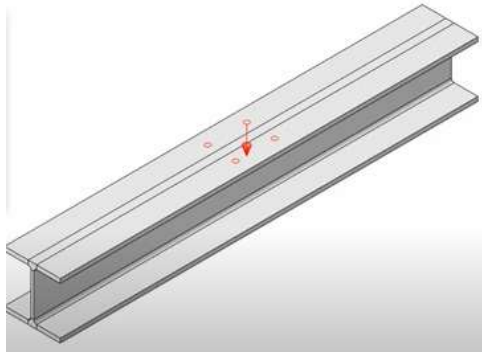
Dalam kenyataannya, kendaraan yang melintasi suatu ruas jalan menghasilkan sebuah getaran. Selanjutnya getaran tersebut menjadi salah satu faktor yang berpengaruh terhadap struktur jalan yang bergantung pada berat serta kecepatan kendaraan saat melintas. Beban kendaraan yang bergerak secara berulang menimbulkan getaran pada partikel tanah maupun perkerasan jalan, begitu pula dengan perkerasan jalan yang mengalami beban bolak balik, yang disebut beban siklik.

Beban siklik adalah beban bolak balik. Istilah pembebanan siklik menyorankan sistem pembebanan yang menunjukkan tingkat keteraturan baik dalam besarnya dan frekuensinya (Marpaung, et al. 2013). Pada struktur yang dibebani dengan beban siklik, energi yang diserap dalam satu siklus pembebanan adalah jumlah dari energi yang diserap pada saat struktur menerima beban tekan dan energi yang diserap pada saat menerima beban tarik sehingga total energi yang terdisipasi selama pembebanan siklik berlangsung merupakan luas daerah dalam loop kurva beban – defleksi.

2.4. Metode Elemen Hingga

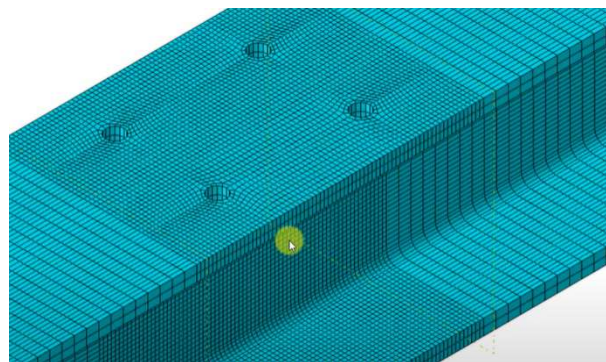
Metode Elemen Hingga (*Finite elemen Method*) merupakan suatu prosedur numerik yang digunakan untuk menyelesaikan problem matematis dan permasalahan rekayasa atau teknik dari suatu gejala fisik. *Abaqus* merupakan salah satu *software* yang digunakan dalam metode elemen hingga untuk menganalisa simulasi dari pengujian maupun pemodelan saja. *Abaqus* banyak digunakan dalam bidang ilmu ketekniksipilan karena mampu menganalisis dan mensimulasikan dengan baik kontruksi bangunan. Bila terdapat suatu struktur sembarang seperti pada Gambar 2.2 yang ingin diketahui besar tegangan dan regangan pada struktur tersebut, maka metode klasik yang akan menunjukkan bahwa masalah tersebut berupa persamaan differensial parsial, akan tetapi tidak ada penyelesaian dari jawaban tersebut karena geometri serta pembebanan yang sangat terlalu kompleks. Oleh karena itu, diperlukan solusi numerik dan salah satu solusi numerik yang memadai untuk menyelesaikan permasalahan tersebut yaitu metode elemen hingga. Akurasi dari metode ini sangat dipengaruhi oleh parameter-

parameter yang didapatkan dari hasil pengujian eksperimental di laboratorium karena parameter tersebut yang nantinya akan dimasukkan dalam analisis numerik.



Gambar 2.2. Struktur bidang dalam bentuk sembarang.

Struktur pada Gambar tersebut dapat dimodelkan dengan model elemen hingga. Pertemuan antara elemen satu dengan elemen lainnya disebut dengan istilah *node* yang berbentuk seperti titik-titik. Suatu jaringan (*mesh*) merupakan susunan yang terdiri dari *node* dan elemen.



Gambar 2.3. Detail *mesh* pada struktur sembarang.

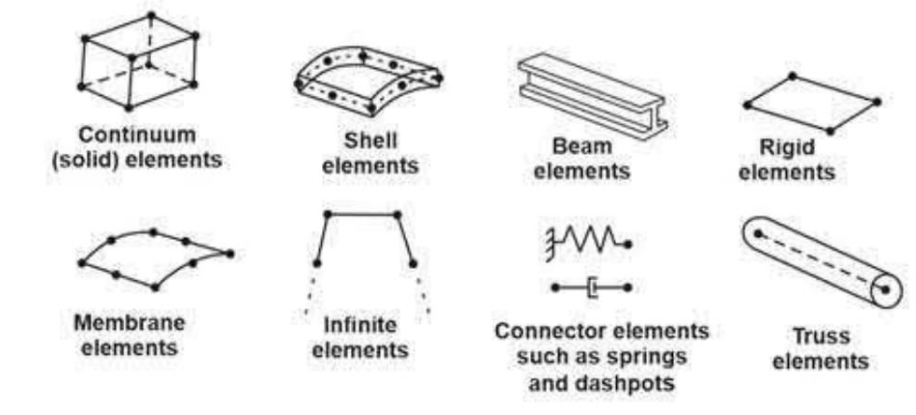
Abaqus dalam metode elemen hingga mempunyai 3 (tiga) modul antara lain sebagai berikut :

1. *Abaqus Explicit*, merupakan modul *Abaqus* yang digunakan dalam metode elemen hingga untuk benda yang lebih dinamis.
2. *Abaqus standard*, merupakan salah satu modul elemen hingga untuk keperluan umum, modul ini menyediakan kemampuan untuk menganalisis berbagai masalah termasuk nonstruktural.
3. *Abaqus CAE*, yaitu modul analisis yang lebih komplit, dengan ruang lingkup *Abaqus* untuk memodelkan, mengelola, memonitor analisa *Abaqus* serta memvisualisasikan hasilnya (*Simulia*). Pada penelitian kali ini, modul elemen hingga yang digunakan adalah *Abaqus CAE* versi *Abaqus 6.14*.

2.5. *Abaqus CAE*

Abaqus merupakan perangkat lunak untuk simulasi numerik berdasarkan metode elemen hingga yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi mulai dari pemodelan struktur teknik sipil yang dapat diverifikasi dengan hasil pengujian laboratorium. Kemampuan program *Abaqus* ini tidak lagi diragukan karena mampu untuk melakukan meshing dengan akurat dengan berbagai pilihan model elemen agar dapat semakin mendekati dengan kondisi sebenarnya serta mampu melakukan analisis dinamik dan *cyclic loading*. *Abaqus* memberikan solusi berbagai persamaan konstitutif untuk menyelesaikan permasalahan nonlinier sehingga memudahkan pengguna untuk memilih solusi yang tepat untuk model yang akan dianalisis.

Dalam permodelan, *Abaqus* memberikan banyak pilihan model yang dapat digunakan. Pengguna dapat memilih model sesuai dengan geometri, material, perilaku benda uji yang akan dimodelkan. Gambar 2.4 menunjukkan beberapa bentuk model yang dapat dipilih secara langsung dengan menggunakan program *Abaqus*.



Gambar 2.4 Macam-Macam Model Elemen (Sumber: Hibbit, 2006)

Sebelum memulai pemodelan dengan *Abaqus*, perlu ditentukan sistem unit yang digunakan agar memiliki sistem unit yang konsisten. *Abaqus* tidak memiliki konfigurasi unit, namun data inputlah yang menentukan unit. Tidak perlu menyertakan nama atau label pada unit ketika memasukkan data dalam *Abaqus*, semua input data harus ditentukan dengan unit yang konsisten. Menurut Systemes (2014), beberapa sistem umum dari unit yang konsisten ditunjukkan pada Tabel berikut.

Tabel 2.1. Satuan yang digunakan dalam proses penginputan data (Systemes, 2014)

<i>Quantity</i>	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
<i>Length</i>	M	Mm	Ft	In
<i>Force</i>	N	N	Lbf	Lbf
<i>Mass</i>	Kg	tonne (10 ³ kg)	Slug	lbf s ² /in
<i>Time</i>	S	S	S	S
<i>Stress</i>	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
<i>Energy</i>	J	mJ (10 ⁻³) J	ft lbf	in lbf
<i>Density</i>	Kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Pada penelitian ini, sistem unit SI sangat disarankan untuk digunakan. Jika menggunakan Satuan Internasional (SI) harus memerhatikan unit kepadatan, karena banyak dijumpai kerapatan yang diberikan dalam buku tentang sifat material dikalikan akselerasi karena gaya gravitasi.

2.6. Parameter Material

Dalam melaksanakan pemodelan, terdapat beberapa parameter material yang digunakan dalam mendefinisikan masing-masing komposisi penyusunnya, seperti material perkerasan semi lentur, perkerasan lentur dengan *Asphalt Concrete Wearing Coarse (AC-WC)*, mortar semen, *subbase* dan *roller compactor* sebagai pemberi beban dinamis. Dalam penelitian ini, penulis membahas material yang sesuai dengan sampel uji penelitian laboratorium dan sudah tervalidasi dengan hasil eksperimental. Berikut diuraikan seperti di bawah ini.

2.6.1. Material Perkerasan Semi Lentur dan Perkerasan Lentur AC-WC

Perkerasan semi lentur serta perkerasan lentur AC-WC didefinisikan sebagai material isotropik sebagai analisis nonlinier. Dalam pengujian eksperimental, kepadatan yang didapat pada perkerasan semi lentur disajikan dalam Tabel berikut.

Tabel 2.2. Kepadatan masing-masing model perkerasan semi lentur dan perkerasan lentur AC-WC

Sampel	Kepadatan (<i>Density</i>)	
	Kg/m ³	Tonne/mm ³
SF-1	2624,4	2,6244 e-9
SF-2	2624,9	2,6249 e-9
SF-3	2669,1	2,6691 e-9
ACWC1	2262,6	2,2626 e-9
ACWC2	2244,0	2,2440 e-9
ACWC3	2252,0	2,2520 e-9

2.6.2. Modulus Elastisitas

Hampir semua bahan elastis, artinya dapat kembali ke bentuk aslinya setelah diregangkan atau ditekan. Modulus elastisitas adalah perbandingan antara tegangan dan regangan suatu benda. Modulus elastisitas biasa disebut juga Modulus Young dan dilambangkan dengan E. Untuk mengetahui nilai modulus elastisitas dapat menggunakan Persamaan 2.1 sebagai berikut :

$$0E = \tau/\epsilon \dots\dots\dots(3)$$

dengan:

E = Modulus elastisitas (MPa),

T = Tegangan (MPa), dan τ

ε = Regangan.

Adapun parameter modulus elastisitas yang diperlukan dalam pemodelan perkerasan semi lentur dan perkerasan lentur AC-WC disajikan dalam Tabel 2.3 sebagai berikut.

Tabel 2.3. Modulus elastisitas masing-masing material

Material	Modulus Elastisitas (MPa)
Perkerasan semi lentur	14524 (Mahmud, 2011)
Perkerasan lentur <i>AC-WC</i>	5000 (<i>Asphalt Institute, AASHTO & ERA 2013</i>)
<i>Base (Rocks Materials)</i>	824 (<i>Asphalt Institute, AASHTO & ERA 2013</i>)
<i>Roller compactor (steel)</i>	200000 (Nalarita, 2020)

2.6.3. *Poisson's Ratio*

Poisson's ratio merupakan salah satu parameter dalam menganalisis elastisitas sistem perkerasan jalan. Perbandingan *poisson* digambarkan sebagai rasio garis melintang sampai regangan bujur dari suatu spesimen yang dibebani. Untuk nilai *poisson's ratio* dapat dilihat pada Tabel 2.4 berdasarkan jenis bahan perkerasannya.

Tabel 2.4. *Poisson's ratio* pada masing-masing material

Material	Nilai μ
Perkerasan semi lentur	0,30 (Mahmud, 2011)
Perkerasan lentur <i>AC-WC</i>	0,35 (<i>Asphalt Institute</i> , AASHTO & ERA 2013)
<i>Base (Rocks Materials)</i>	824 (<i>Asphalt Institute</i> , AASHTO & ERA 2013)
<i>Roller compactor (steel)</i>	0,30 (Nalarita, 2020)

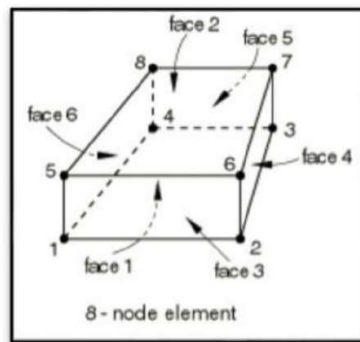
2.7. Pemodelan Elemen Hingga

Dalam pemodelan dengan metode elemen hingga menggunakan *Abaqus*, terdapat beberapa parameter yang harus diperhatikan, diantaranya sifat material, geometri yang sesuai serta pemilihan solusi untuk menyelesaikan masalah. Konsistensi *Software* dalam pengembangan perangkat lunak memberikan kemajuan serta ketepatan dalam pemodelan material, geometri dan pemodelan pembebanan, sehingga hasil yang diperoleh mendekati hasil nyata di lapangan. Dalam pemodelannya, *Abaqus* memberikan banyak pilihan model yang banyak digunakan. Penggunaanya dapat memilih model sesuai dengan material, geometri serta perilaku benda uji yang dimodelkan (Systemes, 2014).

2.7.1. Model Perkerasan Semi lentur, AC-WC dan *Roller Compactor*

Dalam pemodelannya, beton polos dimodelkan sebagai *three-dimensional solid part/continuum element*. Penggunaan *three-dimensional model* akan memberikan kemungkinan untuk

menggunakan kondisi batas yang lebih kompleks dan diharapkan mendekati kondisi actual sebenarnya dari benda uji. Tipe elemen ini memiliki 8 titik dengan 3 derajat kebebasan pada tiap titiknya dan translasinya pada arah x, y dan z. Elemen ini mampu melakukan deformasi, retak pada tiga arah sumbu orthogonal dan kemudian hancur. Geometri dan posisi dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. *Three dimensional solid element.* (Abaqus, 2014)

2.8. Analisis Abaqus

Tiga langkah dalam analisis *Abaqus* ; *Preprocessing*, *simulation* dan *postprocessing*, seperti yang dijelaskan berikut.

2.8.1. *Preprocessing*

Pemodelan *part* dilakukan dalam *Abaqus* dengan memasukkan geometri yang telah di *import* dari *input file*. Dalam menggambarkan model yang akan dianalisis, ditentukan terlebih dahulu koordinat sistem yang akan dibuat. Sebelum melakukan simulasi data dimasukkan ke dalam modul *Abaqus* sehingga semua *keyword* dan parameter yang dimasukkan ke dalam *input file* bisa diperiksa

kebenarannya sebelum dilakukan proses *running*. Urutan dalam memasukkan data harus diperhatikan dengan benar karena antara satu modul dengan modul lain saling berhubungan. Secara garis besar urutan memasukkan data ke dalam modul-modul adalah sebagai berikut :

1. Modul *Part*

Modul *part* adalah bagian dari modul yang akan digunakan untuk menggambar benda uji yang akan disimulasikan di dalam *Abaqus*. Modul *part* menyediakan *tool bar* yang berfungsi untuk melakukan modifikasi benda maupun bentuk sesuai dengan model yang akan dibuat.

2. Modul *property*

Modul *property* berfungsi untuk memasukkan sifat mekanis bahan, jenis material, kekuatan bahan, dan spesifikasi teknis dari material yang akan dianalisis. Modul *property* sangat penting sebelum masuk kelangkah berikutnya, karena *property* dari material harus diberikan sebelum melakukan proses *assembly*.

3. Modul *assembly*

Assembly adalah menyusun bagian-bagian komponen (*instance part*) yang dibuat menjadi satu kesatuan model sehingga memungkinkan untuk dilakukan analisis numerik.

4. Modul *step*

Step berfungsi untuk menentukan urutan langkah-langkah yang akan didefinisikan sebagai letak pemberian beban atau kecepatan. Modul *step* menyediakan menu *Set* dan *Surface* untuk meletakkan beban yang akan dikerjakan pada benda.

5. Modul *interaction*

Interaction berfungsi untuk menentukan bagian material yang akan mengalami kontak. *Interaction* juga berguna untuk memberikan *constraint* pada benda yang dianalisis untuk mencegah bergesernya benda dari kedudukan awalnya.

6. Modul *load*

Load digunakan untuk memberikan beban dan *boundary* pada benda uji. Modul *load* juga digunakan sebagai sarana untuk memasukkan tipe kondisi batas (*boundary conditions*) yang akan dibuat. *Boundary Conditions* terdiri dari *load*, *encastre* dan *displacement*. Agar menjadi *fixed support*, maka tumpuan yang direncanakan adalah tumpuan jepit di semua ujung balok lapisan base yang berada dibawah lapisan perkerasan, serta kondisi bebas (*freedom*) dibagian perkerasan. Sedangkan *displacement* akan membuat gaya yang diberikan pada bagian sudut akan menyeluruh sehingga respons akan diberikan sebagai satu kesatuan.

7. Modul *mesh*

Mesh berfungsi membagi geometri dari benda yang akan dibuat menjadi *node* dan elemen. Modul ini bisa digunakan untuk menentukan *mesh* yang akan diberikan pada benda.

8. Modul *job*

Job berfungsi untuk melakukan proses *running* terhadap model yang telah kita buat. Setelah data yang dimasukkan selesai selanjutnya diserahkan pada *job module* untuk melakukan proses penyelesaian secara numerik. Selama proses numerik di dalam *software* pada *message area* yang berada dibawah *viewport* bisa dimonitor apakah *submit job* berhasil atau tidak, apabila terjadi *error message* maka harus kembali kepada modul untuk melakukan modifikasi terhadap bagian-bagian yang masih terdapat kesalahan.

2.8.2. Simulasi (*Abaqus Standard* dan *Abaqus Explicit*)

Abaqus Standard dan *Abaqus Explicit* digunakan untuk melakukan simulasi dari hasil *processing* didalam program *Abaqus*. Pada tingkat ini, *Abaqus* memecahkan permasalahan yang diberikan ke dalam program dengan melakukan penyelesaian secara numerik.

2.8.3. *Post Processing* (*Abaqus/CAE*)

Menurut Systemes (2014), hasil dari simulasi yang telah lengkap (*Completed*), regangan, tegangan, beban yang telah selesai dihitung bisa dievaluasi. Evaluasi biasanya dilakukan secara

interaktif menggunakan visualisasi modul dari *Abaqus/CAE* atau *post processor* yang lain.

2.9. Ketahanan Deformasi

Deformasi permanen pada campuran aspal merupakan kerusakan yang terjadi pada suhu perkerasan yang tinggi setelah terjadinya pembebanan. Seiring dengan meningkatnya suhu perkerasan, campuran aspal akan menjadi lebih lunak dan lebih rentan. Deformasi permanen pada perkerasan terjadi ketika campuran aspal mengalami perubahan bentuk saat diberikan beban dan kemudian tidak pulih kembali ke posisi semula (*unrecoverable*). Seiring waktu, deformasi permanen dapat menyebabkan *rutting* (Asphalt Institute, 2014).

Pada penelitian ini, ketahanan deformasi diperlukan untuk mengetahui apakah perkerasan ketahanan yang baik. Nilai ketahanan deformasi menghasilkan regangan dengan satuan *microstrain*, semakin besar suatu regangan maka semakin rentan terhadap deformasi. Atau dengan kata lain, semakin besar nilai deformasi maka semakin pendek umur rencana perkerasan.

2.10. Pengaruh Beban Terhadap Perkerasan

Menurut Djunaedi (2005), metode mekanistik merupakan metode yang mengembangkan kaidah teoritis dari karakteristik material perkerasan, dilengkapi dengan perhitungan secara eksak terhadap respon struktur terhadap beban sumbu kendaraan. Pada metode ini dapat mengontrol

kualitas material di setiap lapisan berdasarkan analisis tegangan dan regangan.

Untuk distribusi sumbu tunggal, tandem dan tridem merupakan distribusi dari beban sumbu tunggal. Judycki, et al., (2010) menghitung the *representative single-axle load* untuk beban aktual dari beban sumbu tandem dan tridem, mentransformasikan persamaan sebagai berikut, dengan Q_I adalah *representative single axle load*, sedangkan Q_{II} merupakan beban aktual sumbu tandem, sedangkan Q_{III} merupakan beban aktual sumbu tridem dalam (kN).

$$Q_I = \frac{100}{184} \times Q_{II} = 0,543 \times Q_{II} \dots\dots\dots (4)$$

$$Q_I = \frac{100}{263} \times Q_{III} = 0,380 \times Q_{III} \dots\dots\dots (5)$$

Kendaraan memiliki berbagai sumbu, roda dan bervariasi dalam total beban yang diangkut, diseragamkan dengan satuan lintas sumbu standar (lss), yang dikenal juga dengan *Equivalent Single Axle Load* (ESAL). Indonesia menggunakan AASHTO sebagai acuan dalam perkerasan lentur dan begitu juga terhadap Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M.BM/2013.

Untuk beban maksimum setiap jenis konfigurasi sumbu telah diatur pada Peraturan Desain (PD) T-05-2005.

Tabel 2.5. Beban maksimum setiap jenis konfigurasi sumbu.

Jenis Konfigurasi Sumbu	Beban Maksimum
<i>Single Axle Single Wheel</i>	5,4 Ton
<i>Single Axle Dual Wheel</i>	8,16 Ton
<i>Double Axle Dual Wheel</i>	13,75 Ton
<i>Triple Axle Dual Wheel</i>	18,45 Ton

Untuk mendapatkan respon struktur perkerasan diperlukan *properties* dari setiap lapis perkerasan dan pembebanan yang terjadi pada permukaan perkerasan. *Properties* dari lapis perkerasan yang dibutuhkan adalah modulus elastisitas serta *poisson's ratio* yang telah ditetapkan dalam analisis menggunakan *software Abaqus 6.14* pada tabel 2.3 dan 2.4.

2.10.1. Muatan Sumbu Terberat (MST)

Muatan sumbu merupakan jumlah tekanan roda dari satu sumbu kendaraan terhadap jalan. Jika dilihat pada PP Nomor 43 Tahun 1993 adalah sebagai berikut :

- a. Jalan kelas I, yaitu jalan arteri yang dapat dilalui kendaraan bermotor termasuk muatan dengan ukuran lebar tidak melebihi 2.500 milimeter, ukuran panjang tidak melebihi 18.000 milimeter, dengan muatan sumbu terberat yang diizinkan lebih besar dari 10 ton.
- b. Jalan kelas II, yaitu jalan arteri yang dapat dilalui kendaraan bermotor termasuk muatan dengan ukuran lebar tidak melebihi 2.500 milimeter, ukuran panjang tidak melebihi 18.000 milimeter, dengan muatan sumbu terberat yang diizinkan 10 ton.
- c. Jalan kelas III A, yaitu jalan arteri atau kolektor, yang dapat dilalui kendaraan bermotor termasuk muatan dengan ukuran lebar tidak melebihi 2.500 milimeter, ukuran panjang tidak melebihi 18.000 milimeter, dengan muatan sumbu terberat yang diizinkan 8 ton.

- d. Jalan kelas III B, yaitu jalan kolektor yang dapat dilalui kendaraan bermotor termasuk muatan dengan ukuran lebar tidak melebihi 2.500 milimeter, ukuran panjang tidak melebihi 12.000 milimeter dengan muatan sumbu terberat yang diizinkan 8 ton.
- e. Jalan kelas III C, yaitu jalan lokal yang dapat dilalui kendaraan bermotor termasuk muatan dengan ukuran lebar tidak melebihi 2.100 milimeter, ukuran panjang tidak melebihi 9.000 milimeter dengan muatan sumbu terberat yang diizinkan 8 ton.

2.10.2. Beban Sumbu Standar Kumulatif (*Standard Axle Load*)

Menurut Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) Tahun 2013, beban sumbu standar kumulatif atau *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESA) merupakan jumlah kumulatif beban sumbu lalu lintas desain pada lajur desain selama umur rencana, yang ditentukan sebagai :

$$ESA = (\sum \text{jenis kendaraan LHRT} \times \text{VDF}) \dots \dots \dots (6)$$

$$CESA = ESA \times 365 \times R \dots \dots \dots (7)$$

Dimana

ESA : Lintasan sumbu standar ekivalen untuk 1 hari

LHRT : Lintas harian rata-rata tahunan untuk jenis kendaraan tertentu

CESA : Kumulatif beban sumbu standar ekivalen selama umur rencana

R : Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas

Hasil dari CESA dapat digunakan sebagai nilai repetisi beban rencana (Nr). Adapun faktor pertumbuhan lalu lintas didasarkan pada data pertumbuhan historis atau formulasi korelasi dengan faktor pertumbuhan lain yang valid, bila tidak ada maka tabel tersebut digunakan sebagai nilai minimum.

Tabel 2.6. Faktor pertumbuhan lalu lintas (i) minimum untuk desain.

	2011 – 2020	> 2021 – 2030
Arteri dan perkotaan (%)	5	4
Kolektor rural (%)	3,5	2,5
Jalan desa (%)	1	1

(Sumber: MDPJ 2013)

Untuk menghitung pertumbuhan lalu lintas selama umur rencana dihitung sebagai berikut :

$$R = \frac{(1+0,01i)^{UR} - 1}{0,01i} \dots\dots\dots(8)$$

Dimana R = Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas

i = Tingkat pertumbuhan tahunan (%)

UR = Umur Rencana (tahun)

2.10.3. Faktor Ekuivalen Beban (VDF)

Faktor Ekuivalen Beban atau *Vehicle Damaging Factor* (VDF) merupakan besarnya pengaruh suatu beban sumbu kendaraan terhadap kerusakan. Volume lalu lintas memberi dampak rusak terhadap perkerasan, terjadinya perkerasan sebanding dengan besra volume lalu lintas dan berat kendaraan serta beban yang dibawa kendaraan tersebut. Adanya beban berulang dari sumbu kendaraan

yang mengakumulasi merupakan total daya perusak perkerasan jalan yang melewati lajur rencana dalam kurun waktu masa layan. Berikut merupakan tabel VDF untuk masing-masing kendaraan yang telah ditetapkan oleh Manual Desain Perkerasan Jalan Tahun 2013.

Tabel 2.7. Nilai VDF masing-masing kendaraan.

Kendaraan	Konfigurasi Sumbu	Nilai VDF Pangkat ⁴
Bus Kecil	1.2	0,3
Bus Besar	1.2	1,0
Truk 2 sumbu-cargo ringan	1.1	0,3
Truk 2 sumbu-ringan (tanah, pasir, besi, semen)	1.2	0,8
Truk 2 sumbu-cargo sedang	1.2	0,7
Truk 2 sumbu-sedang	1.2	1,6
Truk 2 sumbu-berat (muatan umum)	1.2	0,9
Truk 2 sumbu-berat (tanah, pasir, besi, semen)	1.2	7,3
Truk 3 sumbu-ringan (muatan umum)	1.22	7,6
Truk 3 sumbu-sedang	1.22	28,1
Truk 3 sumbu-berat	1.1.2	28,9
Truk 2 sumbu dan trailer penarik 2 sumbu	1.2-2.2	36,9
Truk 4 sumbu + trailer	1.2-22	13,6
Truk 5 sumbu + trailer	1.22-22	19,0
Truk 5 sumbu + trailer	1.2-222	30,3
Truk 6 sumbu + trailer	1.22-222	41,6

2.10.4. Umur Rencana

Umur rencana merupakan jumlah waktu dalam tahun yang dihitung sejak jalan tersebut mulai dibuka sampai saat memerlukan perbaikan berat atau dianggap perlu untuk diberi lapis permukaan yang baru. Tabel umur rencana yang bersumber dari Peraturan Bina Marga tahun 2013 sebagai berikut.

Tabel 2.8. Umur rencana perkerasan jalan baru.

Jenis Perkerasan	Elemen Perkerasan	Umur Rencana
Perkerasan Lentur	Lapisan Aspal dan lapisan berbutir	20
	Pondasi jalan semua perkerasan untuk daerah yang tidak memungkinkan adanya pelapisan ulang/ <i>overlay</i> , seperti <i>underpass</i> , jembatan dan jalanan perkotaan	40
Perkerasan kaku Jalan tanpa penutup		Minimal 10

2.10.5. Analisis Kerusakan Perkerasan

Analisis kerusakan perkerasan jalan yang akan dibahas adalah *fatigue cracking*. Kerusakan perkerasan disebabkan oleh beban kendaraan. Pada analisis perhitungan dengan *Abaqus 6.14* hasil yang akan dikeluarkan adalah tegangan dan regangan pada perkerasan. Nilai regangan tersebut digunakan untuk memprediksi kerusakan pada perkerasan jalan lentur dan semi lentur.

A. *Fatigue Cracking*

Kerusakan retak lelah meliputi bentuk perkembangan dari retak di bawah beban berulang dan kegagalan ini ditemukan pada saat permukaan perkerasan tertutup oleh retakan dengan persentase yang tinggi. Pembebanan ulang yang terjadi terus menerus dapat menyebabkan material menjadi lelah dan dapat menimbulkan *cracking* walaupun tegangan yang terjadi masih di bawah batas

ultimate-nya. Untuk material perkerasan, beban berulang berasal dari lintasan beban (as) kendaraan yang secara terus menerus, dengan intensitas yang berbeda-beda dan bergantung kepadajenis kendaraan dan terjadi secara acak. Persamaan retak lelah perkerasan lentur untuk mengetahui jumlah repetisi beban berdasarkan regangan tarik di bawah lapis permukaan dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$N_f = 0,0796 (\epsilon_t)^{-3,921} |E|^{-0,854} \dots\dots\dots (9)$$

Dengan :

N_f = Jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan untuk mengontrol *fatigue cracking* dengan satuan ESAL.

ϵ_t = Regangan tarik di lokasi tinjauan kritis yang dihitung berdasarkan respon model struktur atau pada bagian bawah lapis permukaan.

$|E|$ = Modulus elastisitas pada lapis permukaan atau lapisan HMA.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Analisis perkerasan semi lentur serta perkerasan lentur AC-WC yang digunakan sebagai pembanding dengan hasil perkerasan semi lentur dilakukan dengan metode numerik menggunakan *Software Abaqus*. Metode ini menganalisis besar regangan yang terjadi pada perkerasan semi lentur dan perkerasan lentur AC-WC. Metode numerik ini digunakan sebagai pembanding hasil eksperimental berupa besar regangan maksimum pada kondisi tinjauan *strain gauge*. Setelah mendapatkan hasil regangan yang didapat dari analisis dengan *Abaqus 6.14*, langkah selanjutnya adalah menghitung pembebanan dan jenis konfigurasi as gandar manakah yang masuk dalam Muatan Sumbu Terberat (MST) sesuai dengan PD T-05-2005. Selanjutnya hasil regangan yang diperoleh digunakan untuk menganalisis ketahanan deformasi, kerusakan perkerasan (*fatigue cracking*) yang dapat digunakan untuk menghitung jumlah kendaraan maksimum yang melintasi perkerasan.

3.2 Bahan Penelitian

Spesifikasi material yang didapat dari studi literatur dan data eksperimental penelitian laboratorium yang dijadikan bahan input pada pemodelan FEA (*Finite Element Analysis*). Berikut merupakan spesifikasi material pada

pemodelan pada Tabel 3.1 dan dimensi tiap komponen. Satuan yang dipakai dalam penelitian ini adalah satuan SI (mm).

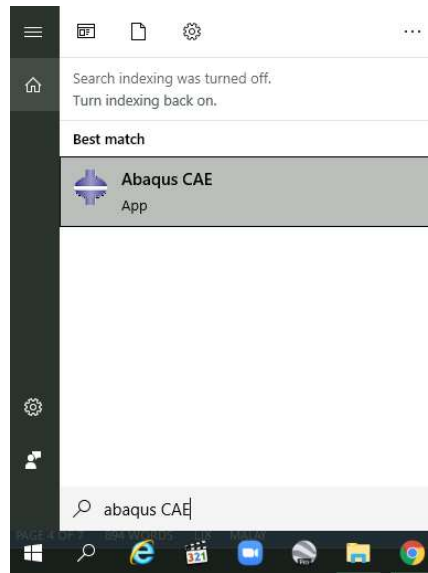
Tabel 3.1. Spesifikasi material pemodelan.

Material	Spesifikasi	Nilai
Semi lentur (300 mm x 300 mm x 50 mm)	<i>Modulus Young</i> <i>Mass Density</i> <i>Poisson's Ratio</i>	14524 MPa (Mahmud, 2011) 2,6244 x 10 ⁻⁹ Ton/mm ² (model 1) 2,6249 x 10 ⁻⁹ Ton/mm ² (model 2) 2,6691 x 10 ⁻⁹ Ton/mm ² (model 3) 0,30 (Mahmud, 2011)
AC-WC (300 mm x 300 mm x 50 mm)	<i>Modulus Young</i> <i>Mass Density</i> <i>Poisson's Ratio</i>	5000 MPa (AASHTO, 2013) 2,2626 x 10 ⁻⁹ Ton/mm ² (model 1) 2,2440 x 10 ⁻⁹ Ton/mm ² (model 2) 2,2520 x 10 ⁻⁹ Ton/mm ² (model 3) 0,35 (AASHTO, 2013)
Base A (300 mm x 300 mm x 50 mm)	<i>Modulus Young</i> <i>Mass Density</i> <i>Poisson's Ratio</i>	824 MPa (AASHTO, 2013) 2,1200 x 10 ⁻⁹ Ton/mm ² 0,35 (AASHTO, 2013)
Roller Compactor (Diameter 300 mm, tinggi 400 mm)	<i>Modulus Young</i> <i>Mass Density</i>	2 x 10 ⁵ MPa (Nalarita, 2020) 7,800 x 10 ⁻⁹ Ton/mm ² (Nalarita, 2020)

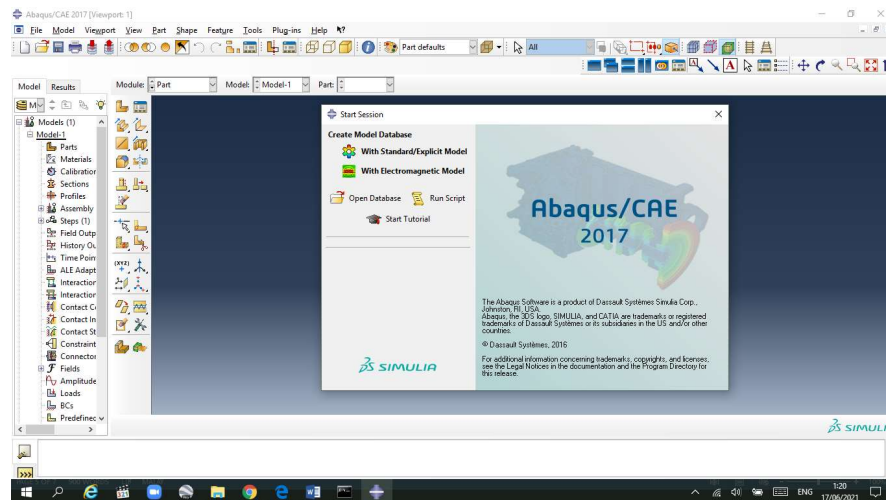
3.3. Langkah-langkah Pemodelan Menggunakan *Abaqus* CAE

Dalam analisis eksperimental dilakukan beberapa pengujian diantaranya pengujian *Asphalt Flow Down* untuk mengetahui kadar aspal maksimum yang tercampur dengan homogen dengan agregat tanpa terjadinya pemisahan aspal. Selain itu, pengujian *Cantabro-Los* yang bertujuan untuk melihat ketahanan campuran terhadap pelepasan butir. Ada pula Pengujian *Porosity* atau *VIM*, pengujian Kuat Tekan Mortar, dan selanjutnya pembuatan benda uji. Hasil dari pengujian ini berupa regangan akibat pembebanan dinamis yang berulang yang nantinya dimodelkan dalam pemodelan *Abaqus* 6.14.

Untuk membuka program *Abaqus* CAE, dapat dibuka langsung melalui *desktop* atau *panel start*, kemudian klik *icon Abaqus* CAE, kemudian pilih *create model database with standard/explicit model*.



Gambar 3.1. Membuka program *Abaqus* CAE.



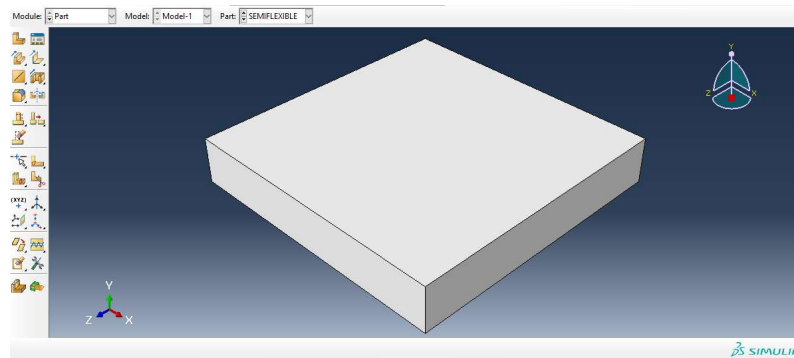
Gambar 3.2. Tampilan awal *Abaqus* CAE.

Untuk model perkerasan semi lentur serta perkerasan lentur AC-WC memiliki langkah yang sama hingga model berhasil di-*running*, yang membedakan hanya angka parameter material, beban dinamis serta gaya yang diberikan. Model perkerasan semi lentur memiliki 3 part, yaitu *semiflexible*, *base A* dan *roller/wheel compactor*, sedangkan model AC-WC juga memiliki 3 part, yaitu *AC-WC*, *base A* dan *roller/wheel compactor*.

3.3.1. Part Module

1. Untuk *part* perkerasan semi lentur

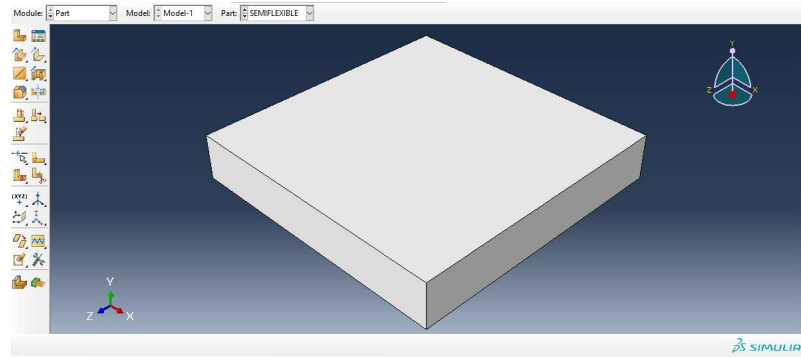
Pilih *create part*, Name: SEMIFLEXIBLE, *Modeling Space*: 3D, *Type*: Deformable, *Shape*: Solid, dan *type* : *Extrusion*, *Approximate Size*: 1000, selanjutnya klik *continue*. Setelah itu masukkan dimensi yang dimodelkan.



Gambar 3.3. Memodelkan *part Semiflexible*.

2. Untuk *part* perkerasan lentur AC-WC

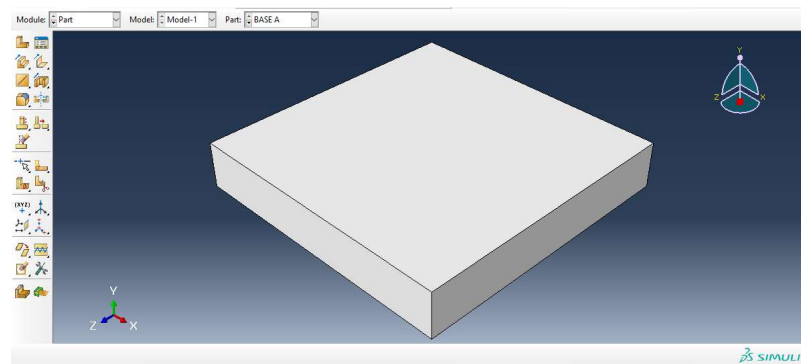
Pilih *create part*, Name: ACWC, *Modeling Space*: 3D, *Type*: Deformable, *Shape*: Solid, dan *type* : *Extrusion*, *Approximate Size*: 1000, selanjutnya klik *continue*. Setelah itu masukkan dimensi yang dimodelkan.



Gambar 3.4. Memodelkan *Part ACWC*.

3. Untuk *part Base A*

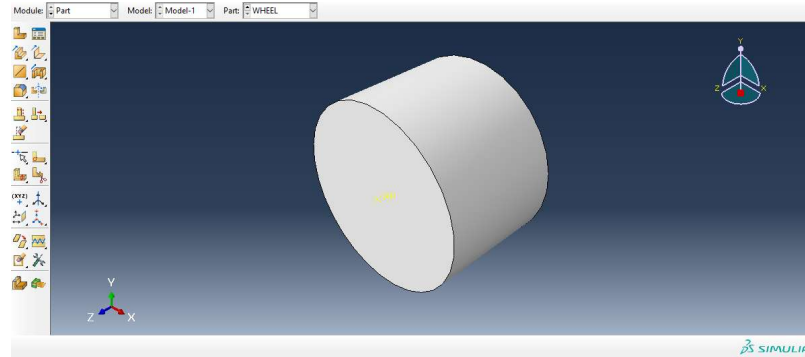
Pilih *create part*, *Name*: BASE A, *Modeling Space*: 3D, *Type*: *Deformable*, *Shape*: *Solid*, dan *type* : *Extrusion*, *Approximate Size*: 1000, selanjutnya klik *continue*. Setelah itu masukkan dimensi yang dimodelkan.



Gambar 3.5. Memodelkan *part Base A*.

4. Untuk *part Roller Compactor*

Pilih *create part*, *Name*: WHEEL, *Modeling Space*: 3D, *Type*: *Discrete Rigid*, *Shape*: *Solid*, dan *type* : *Extrusion*, *Approximate Size*: 1000, selanjutnya klik *continue*. Setelah itu masukkan dimensi yang dimodelkan.



Gambar 3.6. Memodelkan *part Roller Compactor*

3.3.2. *Property Module*

1. Untuk *part* perkerasan semi lentur

Pilih *create material*, *Name* : *SEMIFLEXIBLE*, selanjutnya masukkan nilai *Density*, *Modulus Young*, *Poisson's Ratio*, dengan nilai input parameter seperti pada Tabel 3.1.

Selanjutnya pilih *create section*, *Name* : *SEMIFLEXIBLE*, *category* : *Solid*, *Type* : *Homogeneous*, klik *continue*, *Material* : *SEMIFLEXIBLE*.

Selanjutnya pilih *assign section*, seleksi model *semiflexible*, klik *Done*, *section* : *SEMIFLEXIBLE*, klik OK.

2. Untuk *part* perkerasan lentur AC-WC

Pilih *create material*, *Name* : *ACWC*, selanjutnya masukkan nilai *Density*, *Modulus Young*, *Poisson's Ratio*, dengan nilai input parameter seperti pada Tabel 3.1.

Selanjutnya pilih *create section*, *Name* : *ACWC*, *category* : *Solid*, *Type* : *Homogeneous*, klik *continue*, *Material* : *ACWC*.

Selanjutnya pilih *assign section*, seleksi model ACWC, klik *Done*,
section : ACWC, klik OK.

3. Untuk *part Base A*

Pilih *create material*, *Name* : *BASE A*, selanjutnya masukkan nilai
Density, *Modulus Young*, *Poisson's Ratio*, dengan nilai input
parameter seperti pada Tabel 3.1.

Selanjutnya pilih *create section*, *Name* : *BASE A*, *category* : *Solid*,
Type : *Homogeneous*, klik *continue*, *Material* : *BASE A*.

Selanjutnya pilih *assign section*, seleksi model *BASE A*, klik
Done, *section* : *BASE A*, klik OK.

4. Untuk *Part Roller Compactor*

Pilih *create material*, *Name* : *WHEEL*, selanjutnya masukkan nilai
Density, *Modulus Young*, *Poisson's Ratio*, dengan nilai input
parameter seperti pada Tabel 3.1.

Selanjutnya pilih *Tools* > *Reference Point*.

3.3.3. *Assembly Module*

1. Untuk model perkerasan semi lentur

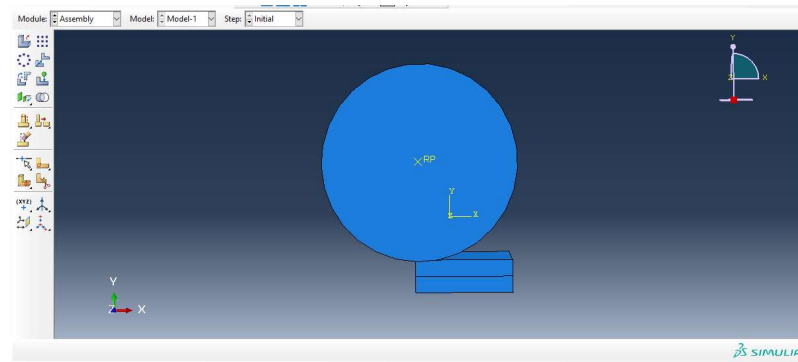
Pilih *create instance*, gabungkan semua *part* (*BASE A*,
SEMIFLEXIBLE dan *WHEEL*) dengan *instance type*: *Independent*.

Selanjutnya, gunakan menu *translate instance* untuk
menyesuaikan posisi masing-masing *part*.

2. Untuk model perkerasan lentur ACWC

Pilih *create instance*, gabungkan semua *part* (*BASE A*, *SEMIFLEXIBLE* dan *WHEEL*) dengan *instance type: Independent*.

Selanjutnya, gunakan menu *translate instance* untuk menyesuaikan posisi masing-masing *part*.



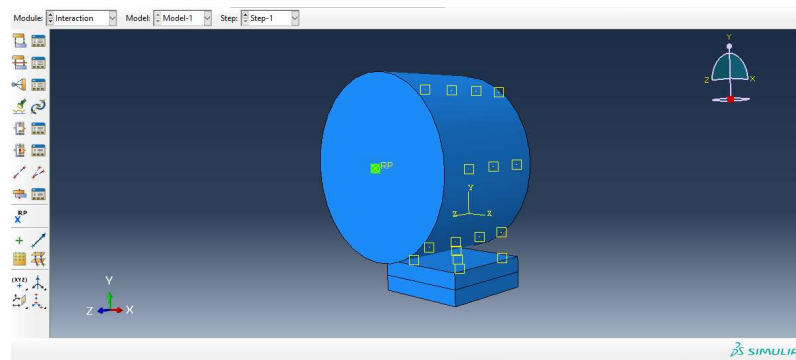
Gambar 3.7. Hasil pemodelan setelah *part* disatukan.

3.3.4. Step Module

1. Pilih *create step*, *Name : Step-1*, *Procedure : Dynamic, Explicit*.
Lalu klik *continue*. Pada bagian edit *step-1*, nilai *time period : 60*,
incrementation type : automatic, *stable increment estimator : global*,
time scaling : 1, serta pilih menu *mass scaling* dengan *target time increment*.
2. Pilih *Field Output Manager*, klik *Edit* lalu tambahkan *Output Variables : Stress, Strain*. Klik *OK*.

3.3.5. Interaction Module

1. Pilih *Create Interaction*, Name : *Int-1*, Step : *Step-1*, Type : *Surface-to-surface Contact (Explicit)*. *Mechanical Constraint Formulation : Penalty Contact Method*, *Sliding formulation : Finite Sliding*, *Contact Interaction Property : IntProp-1* dengan *tangential behavior* serta *koefisien friction*. Klik OK.
2. Pilih *Create Constraint*, Name : *Constraint-1*, Type : *Coupling*, *Select the constraint points : RP*, lalu hubungkan dengan *surface pada roller compactor*. *Coupling Type : Structural Disturbing*. Klik OK.



Gambar 3.8. Hasil *interaction* pada model *semiflexible* dan AC-WC.

3.3.6. Load Module

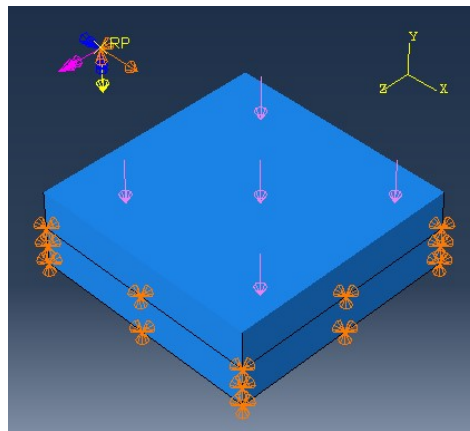
1. Pilih *Create Load*, Name : *Load-1*, Step : *Step-1*, Category : *Mechanical*, Type : *Pressure*. Masukkan nilai beban. Klik OK.
2. Pilih *Create Load*, Name : *Load-2*, Step : *Step 1*, Category : *Mechanical*, Type : *Concentrated Force*. Masukkan nilai gaya

pada CF2 dengan *distribution* : *uniform*. Serta masukkan nilai *amplitude* yang diberi nama Amp-2. Klik OK.

3. Pilih *Create Bondary Condition*, *Name* : BC-1, lalu pilih *roller compactor (wheel)* lalu pilih *type* : *Displacement, Rotation*. Masukkan nilai U1.

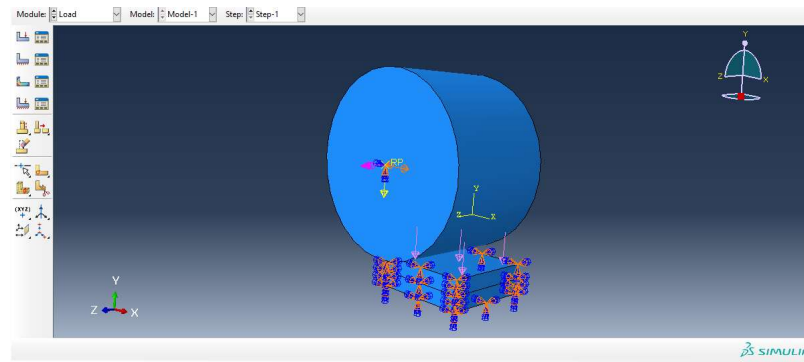
4. Pilih *Create Bondary Condition*, *Name* : BC-2, lalu pilih *roller compactor (wheel)* lalu pilih *type* : *Velocity*. Masukkan kecepatan sudut VR3 dan masukkan Amp-2. Klik OK.

5. Pilih *Create Bondary Condition*, *Name* : BC-3, lalu *category* : *Mechanical* dan masukan *type* : *Symmetry/Antisymmetry/Encastre*. Klik *Continue* dan pilih sisi bawah serta sisi samping. Pilih CSYS: *Pinned (U1=U2=U3=0)*



Gambar 3.9. Kondisi Perletakan.

6. Pilih *Create Predefined Field Manager*, masukkan nilai V1.



Gambar 3.10. Hasil *input* pembebanan pada *module load*.

3.3.7. Mesh Module

1. Model perkerasan semi lentur

Pilih *Object* : *Part* > *SEMIFLEXIBLE*, lalu pilih *Assign elemen type* lalu blok daerah *part*.

Selanjutnya pilih *seed part* dan masukkan nilai *approximate global size* sebesar 20. Klik *apply* lalu OK.

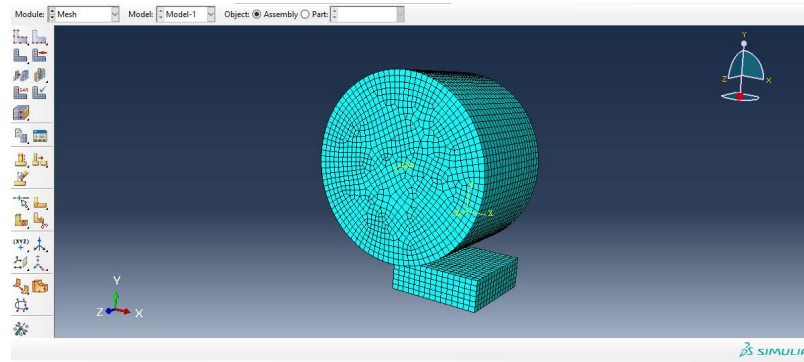
Ulangi langkah yang sama pada *part Base A* dan *Wheel Roller Compactor*.

2. Model perkerasan lentur AC-WC

Pilih *Object* : *Part* > *ACWC*, lalu pilih *Assign elemen type* lalu blok daerah *part*.

Selanjutnya pilih *seed part* dan masukkan nilai *approximate global size* sebesar 20. Klik *apply* lalu OK.

Ulangi langkah yang sama pada part *Base A* dan *Wheel Roller Compactor*.



Gambar 3.11. *Mesh* pada model *semiflexible*.

3.3.8. *Job Module*

1. Untuk model perkerasan semi lentur

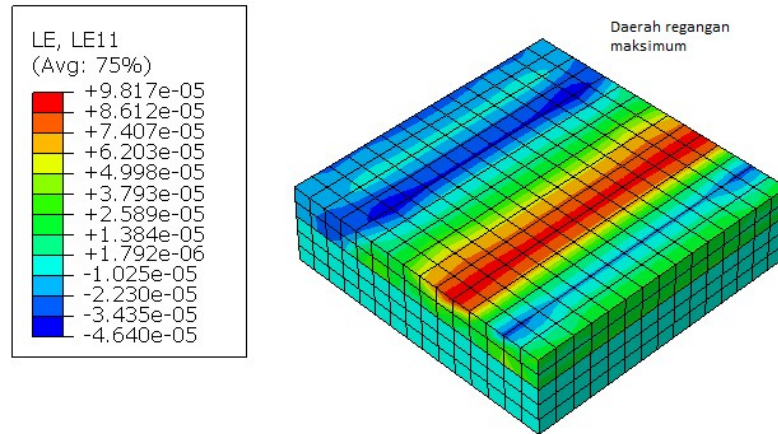
Pilih *Create Job*, *name* : JOB-SF, *Source* : Model-1, klik *Continue*, klik OK.

Pilih Job Manager, klik Job-SF, lalu klik *submit*. Setelah Status “*Completed*” klik *result*.

2. Untuk model perkerasan lentur AC-WC

Pilih *Create Job*, *name* : JOB-ACWC, *Source* : Model-1, klik *Continue*, klik OK.

Pilih Job Manager, klik Job-ACWC, lalu klik *submit*. Setelah Status “*Completed*” klik *result*. Untuk hasil visual dengan *background* berwarna putih, atur dalam menu *View > Graphics Options* dan pilih warna putih.



Gambar 3.12. Hasil regangan pada model perkerasan semi lentur.

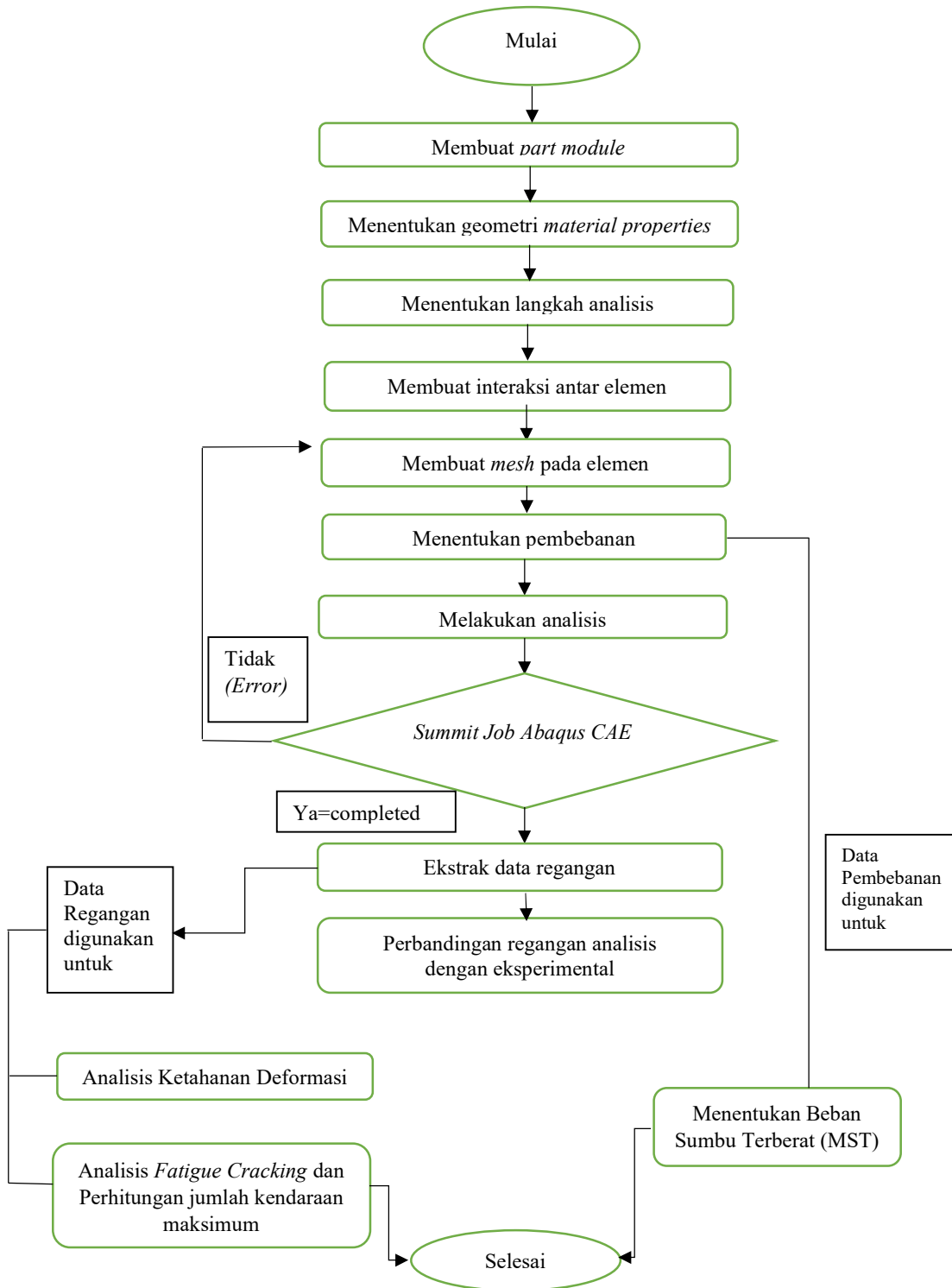
3.4. Analisis Ketahanan Deformasi, Penentuan Beban Untuk Muatan Sumbu Terberat (MST) dan Perhitungan Nilai *Fatigue Cracking*

Analisis ini dilakukan dengan mengumpulkan data primer dan data sekunder. Dalam pengukuran data primer diambil regangan dari 3 sampel AC-WC dan 3 sampel semi lentur yang dianalisis dengan *Abaqus* 6.14 yang menghasilkan regangan tekan dan tarik. Data sekunder untuk data tekanan menggunakan tekanan mesin *wheel compactor* berdasarkan penelitian di laboratorium dengan besar beban 0,5 hingga 0,7 MPa. Setelah mendapatkan hasil regangan, dilakukan analisis ketahanan deformasi yang menganalisis hubungan antara regangan dan waktu. Data pembebanan 0,5 hingga 0,7 MPa dianalisis untuk menentukan beban manakah yang masuk dalam syarat beban maksimum untuk Muatan Sumbu Terberat (MST). Selain itu, data regangan yang diperoleh juga digunakan untuk menganalisis kerusakan retak lelah (*fatigue cracking*) yang disebabkan repetisi atau pengulangan beban pada perkerasan dalam satuan *Equivalent Standard Axle Load (ESAL)*

untuk menentukan jumlah kendaraan maksimum yang dapat melintasi perkerasan.

3.5. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dibuat untuk memodelkan sampel benda uji perkerasan semi lentur dan perkerasan lentur AC-WC dengan pembebanan dinamis yang disajikan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13. Diagram Alir Penelitian.

V. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Pada model perkerasan semi lentur memiliki regangan maksimum sebesar $166 \mu\epsilon$ pada pembebanan 0,7 MPa, $154 \mu\epsilon$ pada pembebanan 0,6 MPa serta $133 \mu\epsilon$ pada pembebanan 0,5 MPa. Untuk perkerasan lentur AC-WC memiliki regangan maksimum sebesar $251 \mu\epsilon$ untuk pembebanan 0,7 MPa, $212 \mu\epsilon$ untuk pembebanan 0,6 MPa dan $172 \mu\epsilon$ untuk pembebanan 0,5 MPa.
2. Perbandingan hasil regangan maksimum dengan hasil eksperimental pada daerah tinjauan *strain gauge* menunjukkan persentase selisih $<10\%$ untuk perkerasan semi lentur dengan pembebanan 0,6 dan 0,7 MPa, sedangkan untuk perkerasan lentur dengan pembebanan 0,5 MPa serta semua perkerasan lentur AC-WC menunjukkan persentase selisih $>10\%$, hal ini dikarenakan kurangnya parameter material yang digunakan pada pemodelan perkerasan. Hal lainnya yang

memungkinkan terjadi kesalahan pada pembacaan hasil *strain gauge* pada metode eksperimental.

3. Hasil regangan maksimum membuktikan bahwa perkerasan semi lentur lebih tahan terhadap beban dibandingkan perkerasan lentur AC-WC, yang ditunjukkan dengan regangan perkerasan lentur AC-WC lebih besar dibandingkan perkerasan semi lentur. Hal ini dikarenakan modulus elastisitas perkerasan semi lentur lebih besar. Semakin besar modulus elastisitas maka perkerasan semakin kaku, regangan yang dihasilkan juga akan semakin kecil. Selain itu, komposisi agregat dan titik lembek aspal pada perkerasan juga berpengaruh terhadap besar regangan pada perkerasan.
4. Pada hasil ketahanan deformasi, perkerasan semi lentur mengalami ketahanan deformasi yang lebih lama daripada perkerasan lentur AC-WC, hal ini karena perkerasan lentur bersifat lebih elastis daripada perkerasan semi lentur yang dipengaruhi oleh besarnya modulus elastisitas pada perkerasan.
5. Hasil perhitungan retak lelah (*fatigue cracking*) hasil perkerasan semi lentur dengan beban 0,7 MPa memiliki nilai yang lebih baik daripada perkerasan lentur AC-WC dengan beban yang sama, yaitu sebesar 110.521 ESAL. Berdasarkan hasil perhitungan nilai jumlah kendaraan maksimum masing-masing kendaraan dalam 1 tahun masa pelayanan, perkerasan semi lentur dengan beban 0,7 MPa menunjukkan hasil yang lebih baik daripada perkerasan lentur AC-WC dengan beban yang sama.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, ada beberapa saran yang diberikan antara lain :

1. Dalam melakukan pemodelan perkerasan semi lentur dan perkerasan lentur AC-WC, sebaiknya harus memiliki *material properties* dari setiap bahan dengan lengkap berdasarkan hasil pengujian di laboratorium. Hal ini dapat meningkatkan akurasi hasil dari pemodelan sehingga perilaku perkerasan semi lentur maupun perkerasan lentur AC-WC yang dihasilkan dari pemodelan akan jauh lebih dekat dengan perilaku eksperimental.
2. Dalam melakukan pemodelan perkerasan semi lentur dan perkerasan lentur AC-WC, data eksperimental harus memiliki komponen parameter material seperti berat sampel dan massa jenis yang sama agar grafik menunjukkan data yang lebih bagus.
3. Sebaiknya pemodelan elemen hingga dilakukan menggunakan *software* berbasis elemen hingga lainnya selain *Abaqus*. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan perbandingan dari hasil *output* yang didapatkan.
4. Sebaiknya analisis perkerasan pada metode analisis maupun eksperimental menggunakan lapisan tanah dasar (*subgrade*) dan lapisan lainnya seperti lapisan pondasi bawah, agar hasil regangan yang terjadi benar-benar sesuai dengan kondisi lalu lintas sebenarnya.
5. Studi analisis mengenai regangan pada perkerasan semi lentur dapat dilakukan penelitian lebih lanjut, karena perkerasan semi lentur lebih

tahan terhadap regangan akibat beban berulang serta memiliki ketahanan terhadap beban lalu lintas yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO, 2013. *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*. AASHTO. Washington D.C.
- Anonim, 2017. *Abaqus 6.14 : Analysis User's Guide*. USA.
- Arbani, F.R. and Riyanto, Agus. 2018. Analisis Kerusakan Dini Akibat Perubahan Volume Lalu Lintas Pada Perkerasan Lentur (Studi Kasus : Ruas Jalan Ahmad Yani Kartasura). Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- ASTM, 1986. *Standard Specification for Chemical Admixture for Concrete*. ASTM International. USA.
- Bina Marga. 2013. *Pedoman Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur*. Indonesia.
- Chessa, Jack. 2018. *Getting X-Y Data From Abaqus CAE*. Message Posted To Youtube, archived at <https://youtu.be/LnmTd8K94xg>
- Dani, et al. 2019. *Potensi Pengaruh Beban Overloading Terhadap Perkerasan (Studi Kasus : Jalan Raya Lubuk Pakam, Sumatera Utara)*. Sumatera Utara.
- Efendy, Anwar. 2019. *Analisis Uji Ketahanan Deformasi (Creep) Campuran Aspal Beton dengan Penggunaan Flyash sebagai Agregat Buatan Geopolimer Untuk Perkerasan Surface Runaway*. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- Fadhlan, Khairi. 2013. *Evaluasi Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur dengan Metode Bina Marga PT T-01-2002-B dengan Menggunakan Program KENPAVE (Studi Kasus: Jl. Karangmojo-Semin Sta. 0+000 – Sta. 4+500)*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Yogyakarta.
- Fithra H, et al. 2014. *Karakteristik Campuran Perkerasan Semi-Lentur yang Ditinjau dari Uji Durabilitas*. Jurusan Teknik Sipil Universitas Malikussaleh.
- Gere, J. and Timoshenko, S. 1997. *Mekanika Bahan*. Erlangga, Jakarta.
- Handbook, ASM. 1990. *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*. USA.

- Hardiyatmo, H. C., 2011. *Perancangan Perkerasan Jalan dan Penyelidikan Tanah*. Universitas Gajah Mada. Yogyakarta.
- Huang, Y.H. 2004. *Pavement Analysis and Design*. Pearson Education. USA.
- Iremonger, et al. 1990. *Dasar Analisis Tegangan*. UII Press. Jakarta.
- Jiang, et al. 2015. *Pavement Structure Mechanics Response of Flexible on Semi-flexible Overlay that Based on The Old cement Concrete Pavement Damage*. Beijing.
- Judycki, et al. 2010. *Determination of Axle Load Equivalency Factors On The Basis of Fatigue Criteria For Flexible and Semi-Rigid Pavements*. Journal of Road Materials and Pavement Design, Vol. 11. Poland.
- Koestalam, P. and Sutoyo. 2010. *Perancangan Tebal Perkerasan Jalan Jenis Lentur dan Jenis Kaku*. Jakarta.
- Kosasih, Djunaedi. 2005. *Rekayasa Struktur Bahan Perkerasan, Modul II*. Diklat Kuliah Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan ITB. Bandung.
- Krebs, R.D. and R.D. Walker. 1971. *Highway Materials*. McGraw-Hill Book Company. New York.
- Mahmud, et al. 2011. *Development of Cemen-Bitumen Composites for Semi Flexible Pavement Surfacing*. Kuala Lumpur. Malaysia.
- Marpaung, et al. 2013. *Perbandingan Energi Pada Percobaan Beton Bertulang Akibat Pembebanan Siklik dan Monotorik*. Jurnal Teknik Sipil, Volume 9.
- Nakanishi H, et al. 2001. *Study on Improvement in Durability of Porous Asphalt Concrete*. Engineering Research Laboratory. Taiyu Kensetsu Co.,Ltd.
- Nalarita, Klara. 2019. *Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Menggunakan GFRP (GLASS FIBER REINFORCED POLYMER) dan WM (WIRE MESH)*. Universitas Lampung. Lampung.
- Peraturan Daerah. 2006. *Perda Provinsi Kaltim No.09/2006 tentang Kelas Jalan dan Pengamanan Perlengkapan Jalan di Provinsi Kalimantan Timur*. Kalimantan Timur, Indonesia.
- Peraturan Pemerintah. 1993. *PP Nomor 43/1993 Tentang Prasarana dan Lalu Lintas Jalan*. Indonesia.
- Putra, et al. 2021. *Analisis Sisa Umur Rencana Jalan Berdasarkan Pertumbuhan Lalu Lintas di Kota Palangka Raya*. Universitas Palangka Raya. Kalimantan Tengah.

- Roffe, Jean C. 1989. *Salvacim – Introducing the Pavement*. Paris, France.
- Thanaya, 2016. *Studi Karakteristik Campuran Aspal Beton Lapis Aus (AC-WC) Menggunakan Aspal Penetrasi 60/70 dengan Penambahan Lateks*. Indonesia.
- Setyawan, A. 2005. *Observasi Aspal Porus Berbagai Gradasi dengan Material Lokal*. Jurnal Media Teknik Sipil.
- Sukirman, Silvia. 1999. *Dasar-dasar Perencanaan Geometrik Jalan*. Bandung.
- Suwanda, Muh. Althaf and Berlian Kushari. 2019. *Analisis Perbandingan Desain Struktur Perkerasan Lentur Menggunakan Metode Mekanistik Empiris dengan Pemodelan Viskoelastik dan Elastik Pada Ruas Jalan Tempel-Pakem*. UII. Yogyakarta.
- Syaja'iy. 2010. *Pengaruh Modulus Elastisitas Terhadap Kompatibilitas Dimensional Beton Induk Dengan Repair Material Berbahan Tambah Polymer*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Systemes, Dassault. 2014. *ABAQUS/CAE User's Guide*. Dassault Systemes Simulia Corporation. USA.
- Thom, N. 2008. *Principles of Pavement Engineering*. London.
- Tutorial, Abaqus. 2020. *Abaqus Tutorials : Rolling A Steel Plate*. Message Posted To Youtube, archived at <https://youtu.be/IzTzh1Rp8ho>
- Widodo. 2001. *Respons Dinamik Struktur Elastik*. UII Pers. Yogyakarta.
- Zazir. 1994. *Dynamic Pavement Strain Histories From Moving Traffic Load (Journal)*. 120: 821-842.
- Zhang, Zijian. 2015. *Finite Element Analysis of Railway Track Under Vehicle Dynamic Impact and Longitudinal Loads*. University of Illinois. Urbana.