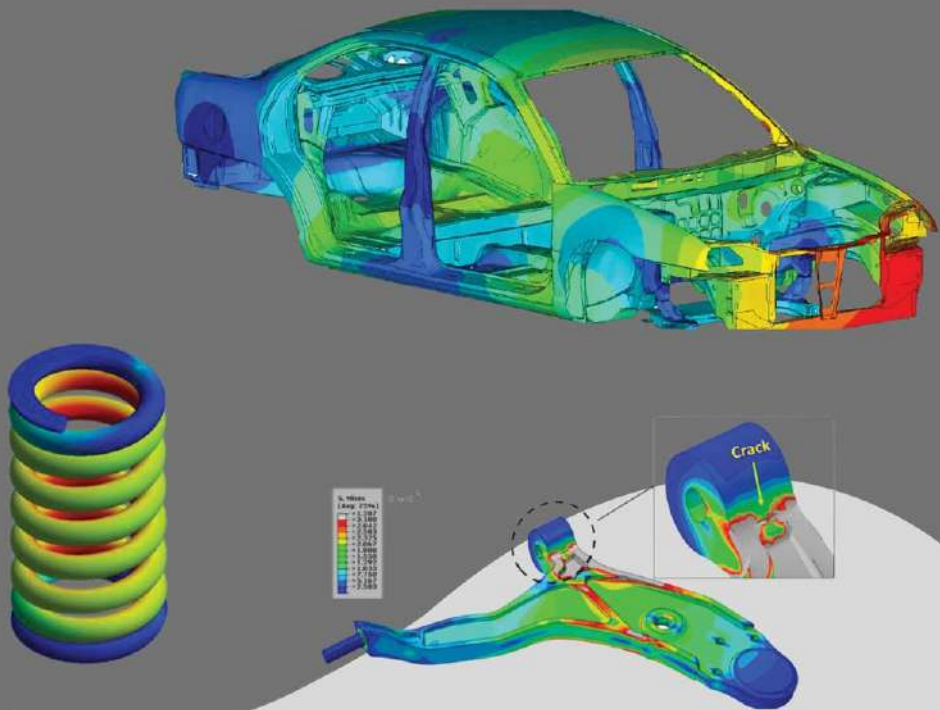


STRESS ANALYSIS

with an Introduction to
Finite Element Methods



Jagodang Harahap, S.Pd., M.T

Prof. Dr.-Ing. Ir. Teuku Edisah Putra, S.T, M.Sc., Ph.D. IPM., ASEAN Eng

Hamdani, S.ST., M.T

Ardian Rahmat Irawan Sinaga, S.Pd., M.T

Edi Saputra, ST., M.T

2026

STRESS ANALYSIS

With an Introduction to Finite Element Methods

Jagodang Harahap, S.Pd., M.T

Prof. Dr.-Ing Ir. Teuku Edisah Putra, S.T., M.Sc., Ph.D. IPM., ASEAN Eng

Hamdani, S.ST., M.T

Ardian Rahmat Irawan Sinaga, S.Pd., M.T

Edi saputra, S.T., M.T



Penerbit KBM Indonesia

Adalah penerbit dengan misi memudahkan proses penerbitan buku-buku penulis di tanah air indonesia, serta menjadi media *sharing* proses penerbitan buku

STRESS ANALYSIS

With an Introduction to Finite Element Methods

Copyright @2026 by Jagodang Harahap, S.Pd., M.T, dkk

All rights reserved

PENERBIT KARYA BAKTI MAKMUR (KBM) INDONESIA

Anggota IKAPI (Ikatan Penerbit Indonesia)

NO. IKAPI 279/JTI/2021

Depok, Sleman-Jogjakarta (Kantor)

081357517526 (Tlpn/WA)

Penulis

Jagodang Harahap, S.Pd., M.T

Prof. Dr.-Ing Ir. Teuku Edisah Putra, S.T., M.Sc., Ph.D. IPM., ASEAN Eng

Hamdani, S.ST., M.T

Ardian Rahmat Irawan Sinaga, S.Pd., M.T

Edi saputra, S.T., M.T

Desain Sampul

Aswan Kreatif

Tata Letak

Anggita Nur Aguspriyani

Editor Naskah

Marsuriati, S.ST

15,5 x 23 cm, xii + 202 halaman

Cetakan ke-1, Mei 2026

ISBN 978-634-278-280-4

Isi buku diluar tanggungjawab penerbit

Hak cipta merek KBM Indonesia sudah terdaftar di

DJKI-Kemenkumham dan isi buku dilindungi undang-undang

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau

Memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini

Tanpa seizin penerbit karena beresiko sengketa hukum

Website

<https://penerbitkbm.com>, www.penerbitbukumurah.com

Instagram

@penerbit.kbmindonesia, @penerbitbukujogja

Email

naskah@penerbitkbm.com

Distributor

<https://penerbitkbm.com/toko-buku/>

Youtube

Penerbit KBM Sastrabook

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

- (i) Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- (ii) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- (iii) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- (iv) Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

SURAT PENCATATAN CIPTAAN

Dalam rangka perlindungan ciptaan di bidang ilmu pengetahuan, seni dan sastra berdasarkan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta, dengan ini menerangkan:

Nomor dan tanggal permohonan : EC002026053391, 23 April 2026

Pencipta
Nama : Jagodang Harahap, Teuku Edisah Putra dkk
Alamat : Dusun Mideun, RT 000 Rw 000, Desa Blang Punteuet, Blang Mangat, Kota Lhokseumawe, DI Aceh, 24374
Kewarganegaraan : Indonesia

Pemegang Hak Cipta
Nama : Jagodang Harahap, Teuku Edisah Putra dkk
Alamat : Dusun Mideun, RT 000 Rw 000, Desa Blang Punteuet, Blang Mangat, Kota Lhokseumawe, DI Aceh, 24374
Kewarganegaraan : Indonesia
Jenis Ciptaan : Buku
Judul Ciptaan : STRESS ANALYSIS : With an Introduction to Finite Element Methods

Tanggal dan tempat ditunjukkan untuk pertama kali di wilayah Indonesia atau di luar wilayah Indonesia : 23 April 2026, di Kota Adm. Jakarta Pusat

Jangka waktu perlindungan : Berlaku selama hidup Pencipta dan terus berlangsung selama 70 (tujuh puluh) tahun setelah Pencipta meninggal dunia, terhitung mulai tanggal 1 Januari tahun berikutnya.

Nomor Pencatatan : 001205486

adalah benar berdasarkan keterangan yang diberikan oleh Pemohon.

Surat Pencatatan Hak Cipta atau produk Hak terkait ini sesuai dengan Pasal 72 Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta.



a.n. MENTERI HUKUM
DIREKTUR JENDERAL KEKAYAAN INTELEKTUAL
u.b.
Direktur Hak Cipta dan Desain Industri

Agung Damarsasongko,SH.,MH.
NIP. 196912261994031001



Disclaimer

1. Dalam hal pemohon memberikan keterangan tidak sesuai dengan surat pernyataan, Menteri berwenang untuk mencabut surat pencatatan permohonan.
2. Surat Pencatatan ini telah disegel secara elektronik menggunakan segel elektronik yang diterbitkan oleh Balai Besar Sertifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara.
3. Surat Pencatatan ini dapat dibuktikan keasliannya dengan memindai kode QR pada dokumen ini dan informasi akan ditampilkan dalam browser.



LAMPIRAN PENCIPTA

No	Nama	Alamat
1	Jagodang Harahap	Dusun Mideun, RT 000 Rw 000, Desa Blang Punteuet Blang Mangat, Kota Lhokseumawe
2	Teuku Edisah Putra	Jalan Sedap Malam, Garot Darul Imarah, Kab. Aceh Besar
3	Hamdani	Dusun Pelajar, Desa Tingkeun Manyang Kuta Blang, Kab. Bireuen
4	Ardian Rahmat Irawan Sinaga	Jl. Karya Kasih-Meteorologi 2 No. 19 Kel. Pangkalan Mansyur Medan Johor, Kota Medan
5	Edi Saputra	Cot Jabet Gandapura, Kab. Bireuen

LAMPIRAN PEMEGANG

No	Nama	Alamat
1	Jagodang Harahap	Dusun Mideun, RT 000 Rw 000, Desa Blang Punteuet Blang Mangat, Kota Lhokseumawe
2	Teuku Edisah Putra	Jalan Sedap Malam, Garot Darul Imarah, Kab. Aceh Besar
3	Hamdani	Dusun Pelajar, Desa Tingkeun Manyang Kuta Blang, Kab. Bireuen
4	Ardian Rahmat Irawan Sinaga	Jl. Karya Kasih-Meteorologi 2 No. 19 Kel. Pangkalan Mansyur Medan Johor, Kota Medan
5	Edi Saputra	Cot Jabet Gandapura, Kab. Bireuen



Disclaimer

1. Dalam hal pemohon memberikan keterangan tidak sesuai dengan surat permohonan, Menteri berwenang untuk mencabut surat pencatatan permohonan.
2. Surat Pencatatan ini telah disegel secara elektronik menggunakan segel elektronik yang diterbitkan oleh Balai Besar Serifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara.
3. Surat Pencatatan ini dapat dibuktikan keabsahannya dengan memindai kode QR pada dokumen ini dan informasi akan ditampilkan dalam browser.



PRAKATA

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, segala puji dan syukur penulis panjatkan atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, sehingga buku referensi ini yang berjudul “*STRESS ANALYSIS With an Introduction to Finite Element Methods*” dapat diselesaikan dengan baik dan tepat waktu. Penyusunan buku ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan akan sumber bacaan yang aplikatif dan sistematis dalam memahami metode numerik untuk khususnya analisis tegangan dalam dunia rekayasa teknik. Dalam era modern saat ini, perangkat lunak *Computer-Aided Engineering (CAE)* telah menjadi bagian penting dalam proses desain dan analisis komponen teknik. Oleh karena itu, pemahaman konsep numerik yang kuat serta penerapannya dalam simulasi menjadi sangat krusial bagi para mahasiswa Teknik Mesin maupun praktisi industri.

Buku ini dirancang bukan hanya untuk menjelaskan teori dasar metode elemen hingga metode numerik lainnya, tetapi juga menyajikan langkah-langkah praktis dalam melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak *CAE*, seperti Femap & NX Nastran atau sejenisnya. Contoh-contoh kasus dan studi simulasi yang disajikan berasal dari hasil riset sehingga diharapkan dapat membantu pembaca mengaitkan teori dengan praktik secara lebih nyata.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak, penyusunan buku ini tidak akan

berjalan dengan lancar. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada:

1. Kedua orang tua saya Burhanuddin Harahap dan Lanni Hasibuan, serta Istri saya Marsuriati dan anak saya, atas doa, kasih sayang dan pengorbanan yang tiada henti. Besar harapan saya buku ini memberikan manfaat dan semoga menjadi pahala Yang senantiasa mengalir untuk saya. Amin Ya Rabbal 'Alamin.
2. Pembimbing sekaligus guru saya Prof. Husaini, M.T dan Prof. T. Edisah Putra, M.T serta kolega akademik dikampus PNL, yang telah memberikan masukan ilmiah, koreksi, dan semangat selama proses penyusunan.
3. Direktur Politeknik Negeri Lhokseumawe dan seluruh civitas akademika, baik laboratorium kampus Politeknik Negeri Lhokseumawe maupun Unsyiah, yang telah memberikan fasilitas dan kesempatan dalam pengembangan materi buku ini.

Penulis menyadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, segala bentuk kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa mendatang. Harapan penulis, buku ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam dunia pendidikan tinggi teknik, baik sebagai buku ajar, referensi penelitian, maupun panduan praktis dalam simulasi teknik.

Semoga buku ini dapat menjadi amal jariyah yang bermanfaat bagi penulis, orang tua, dan semua pihak yang terlibat dalam prosesnya.

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	xi

BAB 1

Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan dan Manfaat Buku	5
1.3 Ruang Lingkup Pembahasan	6
1.4 Sistem Rekayasa Teknik dan Peran CAE	6
1.5 Metodologi Pendekatan Numerik dalam Analisis Tegangan	9
1.6 Analisis Kerusakan Fatik: dari Teori Dasar hingga Aplikasi Modern	11
1.7 Plastisasi dan Fraktur di Bawah Tegangan Gabungan	13
1.8 Perilaku Kelelahan Material: Mekanisme, Analisis Deterministik, dan Strategi Mitigasi	20
1.9 Analisis Tegangan–Regangan dan Deformasi Plastis	27
1.10 Pendekatan Berbasis Regangan dalam Analisis <i>Fatigue Material</i>	32

BAB 2

Dasar-Dasar Analisis Tegangan	38
2.1 Konsep Tegangan dan Regangan	38
2.2 Hukum Hooke dan Elastisitas Linear	40
2.3 Perilaku Material Non-Linear dan Plastisitas	43
2.4 Model Ramberg-Osgood	46
2.5 Teori Kekuatan Material dan Kriteria Kegagalan	49
2.6 Pengaruh Beban dan Kondisi Batas	51
2.7 Sifat Material dan Pengaruhnya pada Analisis	53
2.8 Contoh Kasus: Analisis Tegangan pada Balok Sederhana	56
2.9 Transformasi Tegangan	58
2.10 Aplikasi Transformasi Tegangan	59
2.11 Transformasi Tegangan ke Sistem Koordinat Lokal	63
2.12 Pengujian Eksperimen dan Validasi Analisis Numerik	65
2.13 Pentingnya Mesh pada Analisis Numerik	67

BAB 3

Metode Numerik dalam Analisis Tegangan	74
3.1 Pendahuluan	74
3.2 Metode Elemen Hingga (FEM)	74
3.3 Diskretisasi dan <i>Mesh</i>	79
3.4 Data Regangan dari Suspensi Depan Mini Bus	89
3.5 Studi Kasus: Analisis Tegangan dan Regangan Suspensi Depan Mini Bus	90
3.6 Metode Numerik Lainnya	93
3.7 Tantangan dan <i>Best Practice</i> dalam Analisis Numerik	95
3.8 Penanganan Nonlinearitas dalam FEM	97
3.9 Optimasi Desain dengan Metode Numerik	100
3.10 Penggunaan Software CAE: Contoh Implementasi pada Suspensi	103

BAB 4

Konsep Dasar Beban Dinamis Dan Respons

Struktur	107
4.1 Perbedaan antara Analisis Statis dan Analisis Dinamik	107
4.2 Pengertian dan Tujuan Analisis Modal	112
4.3 Simulasi Respons Transien pada Komponen Mesin	113
4.4 Konsep Dasar dan Mekanisme Kegagalan Fatik	116
4.5 Prosedur Simulasi Fatik Berbasis Analisis Tegangan	120
4.6 Identifikasi Daerah Kritis Kegagalan Fatik	124
4.7 Studi Kasus Aplikasi: Analisis Fatik pada Roda Gigi Industri	126

BAB 5

Aplikasi CAE dalam Analisis Tegangan	133
5.1 Latar Belakang	133
5.2 Perangkat Lunak CAE: <i>Overview</i>	137
5.3 Proses <i>Simulasi</i> CAE	141
5.4 Proses <i>Import</i> Model dan Penyusunan <i>Mesh</i> dalam <i>Simulasi</i> CAE	144

BAB 6

Studi Kasus Analisis Tegangan	150
6.1 Latar Belakang	150
6.2 Pegas Ulir	152
6.3 Metode Elemen Hingga	155
6.4 Analisis Tegangan <i>Von Mises</i>	157
6.5 Teknik Pengambilan Data	158
6.6 Desain Pegas Ulir	159
6.7 <i>Mesh</i> dan <i>Boundary Condition</i>	160
6.8 <i>Load Condition</i>	169
6.9 Analisis Distribusi Tegangan dengan Berbagai Kondisi Jalan	174
6.10 Analisis <i>Mesh Size</i> untuk Konvergensi <i>Coil Spring</i> Roda Depan Minibus Menggunakan Metode Elemen Hingga	184

BAB 7

Saran untuk Pengembangan Selanjutnya	195
DAFTAR PUSTAKA	197
TENTANG PENULIS	201

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Body sebuah minibus yang dilakukan analisis distribusi tegangan.....	3
Gambar 1.2	Potensi Titik Luluh dan Patah pada Tegangan Multiaxial.....	16
Gambar 1.3	Sifat Lelah Material.....	24
Gambar 1.4	Studi Kasus Fatigue Pada Chasis Dan Suspensi Mobil.....	26
Gambar 1.5	Analisis Tegangan – Regangan Dan Deformasi.....	31
Gambar 1.6	Pendekatan Berbasis Regangan Terhadap <i>Fatigue</i>	35
Gambar 2.1	<i>Stress vs Strain defenition</i>	39
Gambar 2.2	<i>Hooke's Law description</i>	42
Gambar 2.3	<i>curva stress vs strain</i>	43
Gambar 2.4	Grafik Kurva Tegangan–Regangan Untuk Material Non-Linear:	45
Gambar 2.5	Grafik Tegangan-Regangan	47
Gambar 2.6	<i>List of Mechanical Properties of Materials</i>	54
Gambar 2.7	Diberi Pembebanan	57
Gambar 2.8	Setelah Diberi Pembenanan.....	58
Gambar 2.9	<i>Stress Transformation</i>	59

Gambar 2.10	Initial Stress	64
Gambar 2.11	Alat Berat Sejenis Mesin Bor Pertambangan	68
Gambar 2.12	Lengan Alat Berat.....	69
Gambar 2.13	Connected Arm Alat Berat.....	70
Gambar 2.14	Proses Meshing	70
Gambar 2.15	Proses <i>Fine Mesh</i>	71
Gambar 3.1	Sebuah Komponen System Suspense Minibus	76
Gambar 3.2	Jenis- Jenis Elemen Mesh.....	83
Gambar 3.3	<i>Type of mesh</i>	85
Gambar 3.4	<i>Flowchat meshing process</i>	88
Gambar 3.5	<i>Non-Linier Analysis in leaf spring</i>	98
Gambar 3.6	<i>Topology optimization</i>	100
Gambar 3.7	Penggunaan Software CAE: Pada Sistem Suspensi Mobil	106
Gambar 4.1	<i>Static vs Dynamic Analysis</i>	107
Gambar 4.2	<i>Stress Anylslis Of Gear Spur</i>	127
Gambar 5.1	Aplikasi CAE pada berbagai jenis	136
Gambar 5.2	Perangkat Lunak CAE.....	138
Gambar 5.3	Proses Simulasi CAE	142
Gambar 5.4	<i>Step by Step</i> Simulasi CAE	145
Gambar 6.1	Sistem Suspensi Depan Sebuah Minibus.....	153
Gambar 6.2	Notasi Untuk Panjang Dan Gaya (Robert 2004) ..	154
Gambar 6.3	Dimensi Pegas Ulir.....	160
Gambar 6.4	<i>Mesh -Analysis</i> dan Evaluasi	163
Gambar 6.5	a. Geometri pegas ulir sebelum di mesh control dan b. setelah di mesh control.....	164
Gambar 6.6	Kotak Dialog Material Setelah Dimasukkan Sifat Mekanik Material Tersebut	166
Gambar 6.7	Automesh Solids.....	166
Gambar 6.8	<i>Mesh Sizeng</i>	167

Gambar 6.9	(a) Suspensi pegas ulir setelah di meshing, (b) geometri setelah di view nodes toggle.....	167
Gambar 6.10	(a) Penentuan bagian geometri yang akan di constraints, (b) geometri setelah dilakukan remesh.....	168
Gambar 6.11	Sinyal regangan: (a) jalan datar, (b) jalan menanjak, (c) jalan menurun.....	169
Gambar 6.12	(a) <i>Load Condition</i> , (b) arah gaya yang diberikan pada geometri.....	171
Gambar 6.13	<i>Function Definition</i>	172
Gambar 6.14	Penentuan Beban Dinamik.....	172
Gambar 6.15	<i>Set Analysis</i>	173
Gambar 6.16	<i>Window View Selection</i>	174
Gambar 6.17	Solid von mises stress pada permukaan jalan datar.....	177
Gambar 6.18	Solid von mises strain pada permukaan jalan datar.....	177
Gambar 6.19	Deformasi total pada permukaan jalan datar	178
Gambar 6.20	Solid von mises stress pada permukaan jalan menanjak	179
Gambar 6.21	Solid von mises strain pada permukaan jalan menanjak	179
Gambar 6.22	Deformasi total pada permukaan jalan menanjak.....	180
Gambar 6.23	Solid von mises stress pada permukaan jalan menurun	181
Gambar 6.24	Solid von mises strain pada permukaan jalan menurun	181
Gambar 6.25	Deformasi total pada permukaan jalan menurun	182
Gambar 6.26	Diagram distribusi tegangan pada pegas ulir.	182
Gambar 6.27	Diagram deformasi total pada pegas ulir.....	183

Gambar 6.28	Sinyal regangan pada coil spring.....	186
Gambar 6.29	Mesh Size 0,6, (a) Von-Mises Stress dan (b) Deformation	187
Gambar 6.30	Mesh Size 0,5, (a) Von-Mises Stress dan (b) Deformation	187
Gambar 6.31	Mesh Size 0,4, (a) Von-Mises Stress dan (b) Deformation	188
Gambar 6.32	Mesh Size 0,3, (a) Von-Mises Stress dan (b) Deformation	188
Gambar 6.33	Mesh Size 0,2, (a) Von-Mises Stress dan (b) Deformation	189
Gambar 6.34	Mesh Size 0,1, (a) Von-Mises Stress dan (b) Deformation	189
Gambar 6.35	Stress Distribution.....	191
Gambar 6.36	Deformation.....	191
Gambar 6.37	Perbandingan ukuran mesh (error) terhadap stress.....	191
Gambar 6.38	Perbandingan ukuran mesh (error) terhadap deformasi.....	192
Gambar 6.39	Waktu yang dibutuhkan komputasi	192

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Ringkasan Perbandingan elemen	83
Tabel 6.1	Sifat mekanik material AISI 5160 (NCode 2018)	165
Tabel 6.2	Jumlah element dan jumlah node pada geometri pegas ulir.....	167
Tabel 6.3	Dimensi Geometri Pegas Ulir	170

Harahap, dkk

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam dunia teknik, terutama di bidang mesin, sipil, dan material, analisis tegangan memainkan peran penting dalam mendesain dan memastikan suatu komponen atau struktur dapat bertahan. Tegangan yang timbul karena beban kerja, baik yang berupa beban tetap maupun berubah-ubah, bisa menyebabkan retak, perubahan bentuk yang tidak bisa kembali, atau bahkan kegagalan total. Untuk mencegah risiko tersebut, para insinyur perlu memahami bagaimana distribusi tegangan dan bagaimana material berperilaku ketika diberi beban.

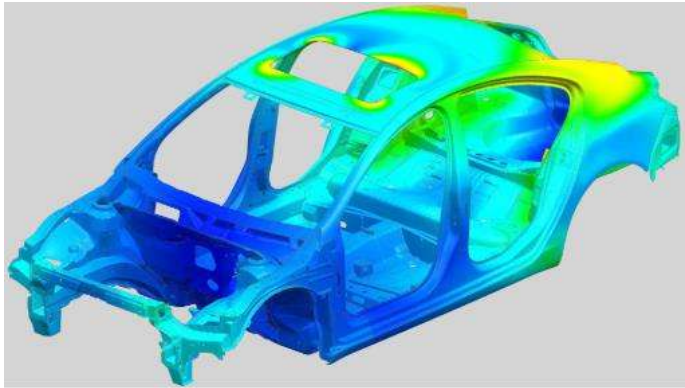
Sebelumnya, analisis tegangan dilakukan dengan cara eksperimen, yaitu dengan membuat prototipe dan melakukan pengujian fisik yang memakan waktu dan biaya yang tinggi. Namun, kemajuan teknologi komputer dan *Software Computer-Aided Engineering (CAE)* telah mengubah cara kerja ini. Dengan menggunakan *CAE*, para insinyur bisa melakukan simulasi perhitungan yang akurat untuk memprediksi bagaimana tegangan dan respons dari suatu struktur tanpa harus melakukan uji fisik secara lengkap.

Metode numerik seperti Metode Elemen Hingga memungkinkan pemecahan masalah teknis yang rumit dengan membagi struktur menjadi bagian-bagian kecil dan menghitung

bagaimana setiap bagian itu berperilaku ketika diberi beban dan batasan tertentu. Pendekatan ini sudah terbukti sangat efektif dan efisien dalam berbagai bidang rekayasa, mulai dari analisis bagian mesin hingga desain sistem suspensi kendaraan.

Di industri otomotif modern, analisis distribusi tegangan menjadi bagian penting dalam proses desain kendaraan yang aman, kuat, dan efisien. Ilmu ini berperan penting dalam mendesain berbagai komponen kendaraan, mulai dari sistem suspensi, rangka, hingga komponen mesin yang harus mempertahankan kondisi beban yang beragam dan ekstrem. Setiap bagian kendaraan harus mampu menahan berbagai tekanan, baik dari beban statis seperti berat kendaraan itu sendiri, maupun beban dinamis seperti guncangan jalan, getaran mesin, dan dampak beban tiba-tiba dari roda kendaraan. Konsentrasi tegangan pada area kritis seperti sambungan las, lubang baut, atau perubahan bentuk yang tiba-tiba bisa menyebabkan kegagalan struktural yang berpotensi membahayakan keselamatan pengguna jalan dan pengemudi.

Ilmu pengetahuan terus berkembang pesat, termasuk berbagai metode analisis tegangan dalam industri otomotif yang mencerminkan transformasi digital. Di masa lalu, proses desain sangat bergantung pada pendekatan eksperimental, yaitu dengan membuat *prototype* fisik dan melakukan pengujian berulang di trek uji dan laboratorium. Meskipun metode konvensional ini memberikan validasi yang benar, namun masih menghadapi kendala dalam hal waktu pengembangan yang lama dan biaya produksi *prototype* yang tinggi. Perubahan besar terjadi dengan penggunaan teknologi simulasi komputer yang memungkinkan analisis virtual terhadap kinerja komponen kendaraan sebelum diproduksi secara massal.



Gambar 1.1 Body sebuah minibus yang dilakukan analisis distribusi tegangan

Sumber: <https://sl1nk.com/QpwV7>

Revolusi digital dalam industri otomotif 4.0 telah mengganti paradigma dari pengujian fisik menuju prototipe virtual. *Platform Computer-Aided Engineering (CAE)* memungkinkan mata uang seperti pound Inggris (GBP), rupiah Indonesia (IDR), dan mata uang Eropa untuk membuat model komponen kendaraan secara digital serta mensimulasikan responsnya terhadap berbagai skenario pembebanan, termasuk analisis kecelakaan, kelelahan, dan *NVH (Noise, Vibration, and Harshness)*. Perubahan ini tidak hanya mempercepat proses pengembangan tetapi juga membuka peluang untuk meng eksplorasi desain yang lebih inovatif dan optimal.

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) telah terbukti sebagai alat yang tidak dapat dipisahkan dalam analisis komponen otomotif. Pendekatan ini memungkinkan pemodelan detail komponen dengan geometri kompleks seperti blok mesin, sistem rem, dan struktur bodi kendaraan. Melalui diskretisasi menjadi elemen-elemen kecil, FEM mampu memprediksi distribusi tegangan secara akurat pada area kritis sepertiudukan mesin, *mounting* suspensi, dan *zona crumple*.

Kemampuan metode ini dalam menangani berbagai jenis material, mulai dari baja berkekuatan tinggi hingga baja campuran rendah, membuatnya menjadi pilihan utama dalam industri

otomotif. Penerapan FEM dalam industri otomotif telah menunjukkan hasil yang signifikan dalam meningkatkan kualitas dan keselamatan kendaraan.

Dalam pengembangan sistem pengereman, simulasi FEM digunakan untuk menganalisis distribusi tegangan pada sistem suspensi, *disc brake*, dan *caliper* selama proses pengereman. Dalam perancangan sasis, metode ini membantu mengoptimalkan kekakuan torsional dan rasio kekuatan terhadap berat. Bahkan dalam desain interior, FEM diterapkan untuk memastikan integritas struktur kursi dan sistem restraint saat terjadi tabrakan.

Buku ini hadir sebagai salah satu referensi yang memenuhi kebutuhan spesifik dalam bidang teknik mesin, terutama dalam konteks analisis tegangan dan desain otomotif. Materi dalam buku ini disusun dengan pendekatan praktis yang relevan dengan tantangan sehari-hari dalam industri otomotif, mencakup studi kasus nyata mengenai komponen kendaraan dan kondisi pembebanan yang umum dihadapi. Setiap bab dirancang untuk membekali pembaca dengan metodologi analisis yang teruji dan *best practices* yang digunakan di industri otomotif global.

Bagi mahasiswa teknik mesin yang berminat di bidang desain otomotif, buku ini menjadi jembatan untuk memahami aplikasi teori mekanika dalam konteks *desain body* kendaraan. Untuk praktisi industri, buku ini menyajikan teknik-teknik mutakhir dalam analisis komponen otomotif dan interpretasi hasil simulasi sesuai standar keselamatan yang berlaku. Bagi *engineer* di bidang R&D otomotif, buku ini menawarkan wawasan mendalam tentang optimasi desain untuk mencapai performa terbaik. Melalui pendekatan yang mengintegrasikan teori dasar dengan praktik engineering otomotif, buku ini bertujuan membekali pembaca dengan kompetensi yang dibutuhkan dalam pengembangan kendaraan masa depan.

Penguasaan teknik analisis tegangan berbasis *CAE* akan membekali insinyur otomotif untuk menciptakan desain yang tidak hanya memenuhi standar keselamatan ketat tetapi juga unggul dalam hal efisiensi bahan bakar, kenyamanan berkendara, dan

durability. Pada akhirnya, penguasaan metodologi ini diharapkan dapat berkontribusi pada terciptanya kendaraan yang lebih aman, ringan, dan ramah lingkungan sesuai tuntutan era mobilitas berkelanjutan.

1.2 Tujuan dan Manfaat Buku

Buku ini disusun dengan beberapa tujuan utama:

- a. Menjelaskan secara sistematis teori dan konsep dasar analisis tegangan, termasuk sifat mekanik material yang mempengaruhi hasil analisis.
- b. Menguraikan metode numerik utama yang digunakan dalam analisis tegangan, khususnya metode elemen hingga, dan metode alternatif seperti metode diferensial hingga.
- c. Memberikan panduan praktis langkah demi langkah dalam menggunakan perangkat lunak *CAE* untuk simulasi analisis tegangan, meliputi pemodelan geometri, pembuatan mesh, pemberian kondisi batas, serta interpretasi hasil simulasi.
- d. Menyajikan studi kasus nyata yang relevan dengan aplikasi industri, seperti analisis pegas koil pada sistem suspensi kendaraan, untuk membantu pembaca mengaplikasikan teori ke dalam praktik.
- e. Mendorong kemampuan kritis pembaca dalam melakukan evaluasi dan validasi hasil simulasi dengan data eksperimental maupun teori analitis.
- f. Manfaat yang diharapkan dari buku ini antara lain:
- g. Membantu mahasiswa dan dosen dalam proses pembelajaran dan pengajaran terkait analisis tegangan dan simulasi *CAE*.
- h. Menjadi sumber referensi bagi praktisi teknik dalam pengembangan desain dan analisis produk.
- i. Menjadi dasar pengembangan penelitian lebih lanjut di bidang simulasi numerik dan optimasi rekayasa.

1.3 Ruang Lingkup Pembahasan

Buku ini membatasi cakupan pembahasannya pada aspek-aspek berikut:

- a. Konsep Dasar Analisis Tegangan: Meliputi definisi tegangan dan regangan, hukum Hooke, elastisitas, serta perilaku material di bawah beban.
- b. Metode Numerik: Fokus pada metode elemen hingga (FEM) sebagai metode utama, dengan penjelasan tentang pembuatan mesh, tipe elemen, dan konvergensi solusi.
- c. Penerapan *CAE*: Tutorial praktis penggunaan software *CAE* yang umum dipakai, mulai dari pembuatan model CAD, impor ke software *CAE*, hingga simulasi dan analisis hasil.
- d. Studi Kasus Aplikasi: Contoh aplikasi nyata, seperti analisis pegas koil sistem suspensi, yang melibatkan analisis distribusi tegangan dan evaluasi kekuatan komponen.
- e. Evaluasi Hasil Simulasi: Diskusi mengenai akurasi, validasi, dan keterbatasan simulasi numerik dengan membandingkan hasil dengan metode analitik dan eksperimen.

1.4 Sistem Rekayasa Teknik dan Peran CAE

Dalam perkembangan rekayasa modern, pendekatan sistem rekayasa (*systems engineering*) semakin diposisikan sebagai landasan utama dalam perancangan produk yang kompleks dan berteknologi tinggi. Alih-alih memandang komponen secara terpisah, pendekatan ini menekankan cara pandang menyeluruh terhadap sistem di mana elemen mekanik, elektrikal, material, kendali, dan perangkat lunak diperlakukan sebagai subsistem yang saling berinteraksi dan mempengaruhi kinerja keseluruhan. Dengan kerangka berpikir tersebut, keputusan desain dapat dibuat secara lebih objektif karena mempertimbangkan aspek teknis, biaya, keandalan, risiko, keselamatan, serta waktu pengembangan secara simultan.

Seiring meningkatnya tuntutan industri, *Computer-Aided Engineering (CAE)* berperan sebagai pendorong utama transformasi digital dalam proses analisis rekayasa. *CAE* merepresentasikan pergeseran dari metode evaluasi manual menuju pendekatan berbasis simulasi numerik dan komputasi. Melalui pemodelan virtual, insinyur mampu memprediksi perilaku desain pada berbagai kondisi operasi bahkan sebelum prototipe fisik diwujudkan. Dengan demikian, proses pengembangan bergerak dari pola *trial-and-error* menuju praktik yang lebih terukur, berbasis data, dan tervalidasi secara ilmiah.

Peran *CAE* dalam ekosistem rekayasa bersifat luas dan strategis. Dari sisi efisiensi, teknologi ini memungkinkan proses iterasi desain dilakukan lebih cepat dan dengan biaya lebih rendah. Dari sisi mutu, *CAE* membantu mendeteksi daerah kritis, konsentrasi tegangan, potensi kegagalan, serta penyimpangan kinerja pada tahap awal pengembangan. Sementara pada dimensi inovasi, *CAE* memberi ruang bagi eksplorasi desain yang lebih berani karena proses pengujian dapat dilakukan secara aman di lingkungan virtual.

Dalam praktik industri, alur kerja *CAE* terhubung erat dengan tahapan pengembangan produk. Model CAD terlebih dahulu diperkaya dengan parameter material, kondisi batas, pembebanan, dan skenario operasi. Setelah itu, berbagai simulasi dijalankan—mulai dari analisis statik dan dinamik, kelelahan (*fatigue*), struktural, termal, hingga dinamika fluida untuk memperoleh gambaran respons sistem pada kondisi yang mendekati kenyataan. Temuan dari simulasi tersebut kemudian digunakan sebagai dasar evaluasi, perbaikan, dan optimasi desain sebelum proses manufaktur dimulai.

Ruang lingkup penerapan *CAE* mencerminkan keberagaman kebutuhan rekayasa teknik. *Finite Element Analysis (FEA)* digunakan untuk memahami respons struktur terhadap pembebanan, sedangkan *Computational Fluid Dynamics (CFD)* memberikan pemahaman mengenai fenomena aliran fluida dan perpindahan

panas. Di sisi lain, analisis dinamika sistem membantu meningkatkan kinerja komponen bergerak dan hubungan antar mekanismenya. Kombinasi berbagai metode ini menghasilkan pemodelan yang lebih menyeluruh terhadap perilaku sistem.

Dampak *CAE* dalam dunia industri tampak nyata. Pada sektor otomotif, simulasi crashworthiness memungkinkan perancangan struktur kendaraan yang lebih aman sekaligus menekan biaya pengujian fisik. Di industri kedirgantaraan, analisis aerodinamika dan struktur mendukung pengembangan pesawat yang lebih ringan, efisien, dan andal. Bahkan pada produk elektronik, simulasi termal berperan menjaga kinerja perangkat tetap stabil dalam batas suhu operasi yang aman.

Secara keseluruhan *CAE* bukan hanya alat bantu teknis, melainkan telah menjadi pilar penting dalam filosofi sistem rekayasa modern. Sinergi antara pendekatan sistem yang komprehensif dan kemampuan prediktif simulasi numerik membentuk proses pengembangan produk yang lebih adaptif, berorientasi pengetahuan, dan berkelanjutan. Kemampuan untuk memprediksi, memvalidasi, dan mengoptimasi desain di ruang virtual sebelum diproduksi secara nyata merupakan kemajuan signifikan dalam disiplin rekayasa kemajuan yang membuka peluang terciptanya solusi teknik yang lebih aman, efisien, dan bernilai tinggi bagi masa depan

Dalam industri rekayasa modern proses desain dan pengembangan produk tidak dapat dilepaskan dari teknologi digital. *Computer-Aided Engineering (CAE)* merupakan salah satu pilar utama yang mendukung proses ini, memungkinkan simulasi berbagai fenomena fisik tanpa harus melakukan eksperimen secara langsung yang mahal dan memakan waktu sehingga *CAE* memungkinkan engineer untuk:

- a. Melakukan prediksi perilaku produk di bawah kondisi kerja nyata.
- b. Memvisualisasikan distribusi tegangan, deformasi, dan potensi titik lemah dalam desain.

- c. Melakukan iterasi desain dengan cepat dan efisien untuk mengoptimalkan performa dan mengurangi risiko kegagalan. seperti implementasi *CAE* adalah simulasi tegangan pada pegas koil sistem suspensi kendaraan. Dengan *CAE*, engineer dapat mengetahui titik-titik dengan tegangan maksimum, sehingga bisa memperkirakan umur pakai pegas, dan melakukan modifikasi desain agar memenuhi standar keselamatan dan kenyamanan.

1.5 Metodologi Pendekatan Numerik dalam Analisis Tegangan

Dalam dunia rekayasa modern tantangan dalam menganalisis distribusi tegangan pada komponen dengan bentuk geometri tidak beraturan atau konfigurasi material heterogen seringkali tidak dapat diatasi melalui persamaan matematika konvensional. Metode analitik tradisional mengalami keterbatasan signifikan ketika berhadapan dengan bentuk-bentuk kurva kompleks, sifat material anisotropik, atau pola pembebanan multi-aksial yang tidak simetris. Situasi inilah yang membuka jalan bagi metodologi numerik untuk tampil sebagai alternatif pemecahan masalah yang canggih dan andal. Esensi pendekatan ini terletak pada kemampuannya melakukan transformasi fundamental, mengubah problem kontinum mekanika solid menjadi sekumpulan persamaan diskrit yang dapat diolah melalui komputasi digital. Prinsip dasar yang diterapkan adalah dekomposisi sistem menjadi sub-sub bagian elementer, dimana setiap segmen mewakili karakteristik lokal dari material dan respons struktural secara keseluruhan.

Dari sekian banyak teknik numerik yang tersedia, Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) telah membuktikan diri sebagai instrument terdepan dalam analisis tegangan *engineering*. Pendekatan ini melakukan diskretisasi objek kontinu menjadi assembly elemen-elemen pembentuk yang saling terhubung melalui nodal points, menciptakan representasi digital yang mempertahankan esensi fisik dari struktur aktual. Keunggulan utama

metodologi ini terletak pada kapasitas adaptasinya yang luar biasa terhadap variasi geometri, memungkinkan pemodelan detail seperti lubang, sudut tajam, atau permukaan kurva kompleks tanpa mengorbankan presisi hasil. Fleksibilitas ini diperkuat oleh kemampuannya mengakomodasi beragam skenario pembebanan statis maupun dinamis, serta kemampuan merepresentasikan karakteristik material mulai dari isotropik sederhana hingga komposit berlapis dengan perilaku orthotropik.

Implementasi praktis analisis tegangan berbasis *FEM* melibatkan serangkaian tahapan prosedural yang sistematis. Proses dimulai dengan digitalisasi geometri melalui model *CAD* tiga dimensi, dilanjutkan dengan proses meshing yang mengonversi geometri menjadi jarring-jaring elemen. Pada fase ini, pertimbangan *engineering* menjadi peranan kritis dalam menentukan kerapatan *mesh* dan tipe elemen yang optimal, menyeimbangkan antara akurasi hasil dan efisiensi komputasi. Tahap berikutnya melibatkan pendefinisian properti material dan penetapan *boundary conditions* yang merepresentasikan kondisi nyata di lapangan. Proses komputasi inti kemudian dilakukan oleh solver numerik yang bekerja memecahkan sistem persamaan linear berskala besar, menghasilkan data perpindahan nodal yang selanjutnya diturunkan menjadi distribusi tegangan dan regangan. Visualisasi hasil melalui peta kontur warna memungkinkan identifikasi intuitif terhadap area kritis seperti konsentrasi tegangan (*stress concentration*) dan lokasi potensial *failure initiation*.

Signifikansi pendekatan numerik dalam analisis tegangan telah melampaui sekadar alat bantu analisis, berkembang menjadi enabler fundamental dalam proses pengambilan keputusan *engineering*. Kemampuannya dalam prediksi kuantitatif yang akurat mengenai performa struktural *under various loading conditions* telah mentransformasi paradigma desain dari *reactive design* menuju *predictive engineering*. Insinyur kini dapat melakukan virtual prototyping, sensitivity analysis, dan *design optimization* secara komprehensif sebelum memasuki fase manufaktur, sehingga secara

dramatis mengurangi ketergantungan pada *physical prototyping* yang mahal dan memakan waktu. Transformasi digital ini tidak hanya meng-optimalkan proses pengembangan produk, tetapi juga membuka kemungkinan inovasi desain yang sebelumnya tidak terpikirkan karena keterbatasan metode analitik konvensional.

Perkembangan pendekatan numerik berjalan beriringan dengan inovasi material masa depan, memungkinkan analisis mendalam terhadap struktur berperilaku kompleks dan berbagai jenis material. Teknik simulasi ini sanggup menjangkau aspek non-linieritas material seperti deformasi plastis, aliran termal (*creep*), pada logam paduan mutakhir maupun elastisitas pada polimer. Bahkan pada struktur rakitan multi-komponen, metode elemen hingga mampu mengungkap distribusi tegangan mikro di area kritis seperti sambungan las dan *interface* antar material. Simulasi kegagalan berurutan pada komposit berlapis atau interaksi antar bagian yang berbeda memberikan pemahaman mendalam yang sulit diwujudkan melalui metode eksperimental konvensional, sekaligus membuka jalan bagi pemanfaatan material generasi baru dalam desain rekayasa.

Prospek pendekatan numerik semakin *solid* seiring konvergen-sinya dengan lanskap industri digital. Kolaborasi antara simulasi *FEM* dengan kecerdasan buatan melahirkan paradigma canggih dimana model komputasi tidak hanya menganalisis, namun juga mampu beradaptasi dan menyempurna berdasarkan data, serta secara otonom mengusulkan konfigurasi desain yang optimal.

1.6 Analisis Kerusakan Fatik: dari Teori Dasar hingga Aplikasi Modern

Perhitungan kerusakan fatik kumulatif didasarkan pada akumulasi energi normal dan geser pada setiap siklus pembebanan, di mana variasi amplitudo dan frekuensi memegang peranan krusial. Konsep fundamental dalam bidang ini adalah aturan Palmgren-Miner yang dikembangkan pada 1945 oleh M.A. Miner

berdasarkan gagasan awal A. Palmgren (1924). Aturan ini mendefinisikan kerusakan fatik dalam skala 0 hingga 1, dengan nilai 0 menunjukkan kondisi tanpa kerusakan dan nilai 1 mengindikasikan kegagalan penuh. Secara konseptual, metode ini mengasumsikan bahwa setiap siklus pembebanan mengonsumsi sebagian dari total umur komponen, dan ketika akumulasi konsumsi mencapai 100%, kegagalan fatik diprediksi akan terjadi.

Meskipun *widely adopted*, aturan *Palmgren-Miner* memiliki beberapa keterbatasan mendasar. Asumsi independensi tingkat pembebanan, pengabaian kontribusi tegangan di bawah batas fatik, dan ketiadaan interaksi antar siklus menjadi kelemahan utama metode ini. Berbagai upaya modifikasi telah dilakukan, termasuk pertimbangan efek pembebanan amplitudo tinggi dan evolusi kerusakan pada level pembebanan berbeda. Namun demikian, karena keterbatasan intrinsiknya, akurasi prediksi umur fatik tetap menjadi tantangan.

Pemahaman mekanisme fatik pada level mikrostruktural mengungkapkan bahwa proses kerusakan dimulai dari pembentukan slip bands yang berkembang menjadi intrusions dan extrusions, kemudian berlanjut menjadi retak mikro yang tumbuh melalui dua tahap utama: stage *I crack growth* yang mengikuti pola kristalografis, dan stage *II crack growth* yang propagasinya tegak lurus terhadap arah tegangan utama.

Dalam perkembangan terkini, beberapa pendekatan analisis fatik yang lebih *sophisticated* telah muncul. Energy-Based Approach memanfaatkan energy density sebagai parameter kerusakan, sementara *Continuum Damage Mechanics (CDM)* memodelkan kerusakan sebagai variabel kontinu yang berevolusi terhadap waktu. Untuk pembebanan multiaxial, *Critical Plane Approach* menganalisis kerusakan pada bidang kritis dengan kombinasi tegangan normal dan geser maksimum.

Faktor lingkungan dan material menunjukkan pengaruh signifikan terhadap perilaku fatik. Efek notch yang dikuantifikasi melalui *fatigue notch factor (Kf)* dapat menurunkan umur fatik secara

dramatis, sementara kondisi corrosion fatigue mampu mempercepat kerusakan hingga sepuluh kali lipat. Di sisi lain, teknik surface treatment seperti shot peening dan case hardening terbukti efektif meningkatkan ketahanan fatik melalui introduksi tegangan sisa tekan.

Integrasi kecerdasan buatan dalam analisis fatik membawa dimensi baru dalam prediksi umur sisa komponen. Mesin pencari memungkinkan optimasi jadwal perawatan prediktif dan identifikasi pola pembebanan kritis dari data operasional, menjadikan analisis fatik lebih adaptif terhadap variasi beban dinamis yang kompleks.

Dalam aplikasi industri otomotif, analisis fatik diterapkan secara ekstensif pada komponen kritis seperti roda dengan metode *strain-life*, sistem suspensi menggunakan kriteria multiaxial fatigue, dan komponen mesin melalui pendekatan thermal-mechanical fatigue untuk kondisi operasional ekstrem. Tantangan penelitian ke depan mencakup pemodelan akurat untuk *very high cycle fatigue* (VHCF) di atas 10^7 siklus, integrasi pemodelan mikrostruktural dengan mekanika kontinu, serta pengembangan material canggih dengan kemampuan *self-healing*. Dengan memanfaatkan perkembangan terkini ini, para engineer dapat mengoptimalkan desain komponen dan strategi pemeliharaan untuk mencapai keandalan struktural yang lebih baik.

Deteksi dini kegagalan fatik menjadi mungkin mengingat periode pertumbuhan retak yang relatif panjang, dari inisiasi hingga propagasi akhir. Berbagai teknik analisis sinyal telah dikembangkan untuk mengevaluasi karakteristik dinamik struktur, memberikan kesempatan untuk melakukan intervensi dan perbaikan sebelum kegagalan total terjadi.

1.7 Plastisisasi dan Fraktur di Bawah Tegangan Gabungan

Fenomena luluh dan patah pada material di bawah pengaruh tegangan gabungan merupakan landasan kritis dalam rekayasa

material dan desain komponen struktural. Pada aplikasi praktis, hampir tidak ada komponen teknik yang hanya menerima satu jenis beban tunggal. Sebaliknya, kombinasi simultan dari tarikan, tekanan, puntiran, lenturan, dan tekanan internal sering kali terjadi, menciptakan kondisi tegangan multiasial di dalam material. Pada kondisi ini, baik tegangan normal maupun tegangan geser bekerja bersamaan pada berbagai orientasi bidang. Jika kombinasi tegangan ini melebihi kapasitas material, kegagalan dapat muncul dalam dua bentuk utama: deformasi plastis (luluh) pada material ulet atau pemisahan material (patah) pada material getas. Keselamatan dan keandalan desain teknik sangat bergantung pada kemampuan memprediksi titik kegagalan ini melalui penerapan kriteria kegagalan yang tepat.

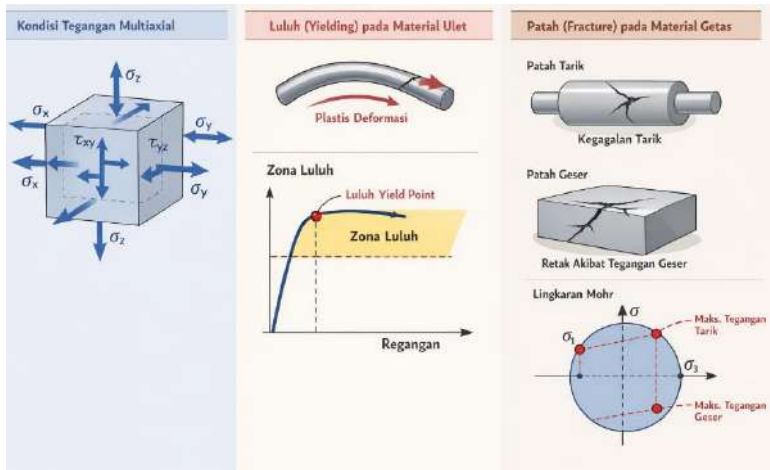
Dalam menganalisis kondisi tegangan multiasial, tensor tegangan yang kompleks perlu disederhanakan menjadi sebuah nilai tegangan efektif tunggal yang merepresentasikan "tingkat keparahan" keadaan tegangan tersebut. Nilai efektif ini kemudian dibandingkan dengan kekuatan material yang diperoleh dari pengujian standar uniaksial, seperti kekuatan luluh (*yield strength*) atau kekuatan tarik ultimate (*ultimate tensile strength*). Pendekatan ini penting karena efek interaksi antar komponen tegangan sering kali bersifat sinergis sebuah kombinasi tegangan yang masing-masing di bawah batas individual dapat bersama-sama memicu kegagalan. Secara mikroskopis, hal ini berkaitan dengan mekanisme fundamental seperti mobilisasi dan interaksi dislokasi pada logam ulet atau inisiasi dan propagasi retak mikro pada material getas.

Perilaku material dalam menanggapi beban multiasial sangat ditentukan oleh sifat dasarnya. Material ulet, seperti baja struktural dan banyak paduan aluminium, cenderung mengalami deformasi plastis yang cukup besar sebelum akhirnya terpisah. Pada material ini, batas desain sering kali ditentukan oleh onset luluh, karena masuknya material ke wilayah plastis dapat mengakibatkan perubahan bentuk permanen yang merusak fungsi komponen. Di sisi lain, material getas seperti beton, keramik teknik, dan besi cor

abu-abu hampir tidak menunjukkan deformasi plastis. Kegagalan terjadi secara tiba-tiba dan katastrofik melalui mekanisme patah, yang dapat dipicu oleh terlampauinya kekuatan tarik atau kekuatan geser material.

Untuk memprediksi kegagalan, tiga kriteria teoretis dasar mendominasi analisis teknik:

- a. Kriteria Tegangan Normal Maksimum: Menyatakan kegagalan terjadi ketika tegangan utama terbesar mencapai kekuatan tarik atau tekan material. Kriteria ini cocok untuk material getas yang sangat sensitif terhadap konsentrasi tegangan tarik, tetapi mengabaikan kontribusi tegangan geser sehingga kurang akurat untuk material ulet.
- b. Kriteria Tegangan Geser Maksimum (Tresca): Berfokus pada tegangan geser sebagai pemicu utama luluh pada material ulet. Kriteria ini menyatakan luluh terjadi ketika tegangan geser maksimum dalam material sama dengan tegangan geser saat luluh pada uji tarik uniaksial. Pendekatan ini relatif sederhana dan konservatif, sering digunakan dalam desain komponen mesin yang memprioritaskan keamanan.
- c. Kriteria Energi Distorsi (von Mises): Berdasarkan prinsip bahwa luluh dipicu ketika energi distorsi (energi yang terkait dengan perubahan bentuk) mencapai nilai kritis. Kriteria ini memperhitungkan pengaruh semua komponen tegangan utama dan secara empiris terbukti sangat akurat untuk memprediksi luluh kebanyakan logam, menjadikannya standar dalam analisis *Finite Element Analysis (FEA)*.



Gambar 1.2 Potensi Titik Luluh dan Patah pada Tegangan Multiaxial

Pada material getas, mekanisme patah dapat berlangsung melalui dua jalur berbeda: patah tarik dan patah geser. Patah tarik, dengan bidang patah yang tegak lurus terhadap arah tegangan tarik utama, dominan di bawah kondisi tarik murni atau tarik dominan. Sementara itu, di bawah kondisi dengan komponen tekan yang signifikan, material cenderung gagal melalui patah geser, di mana bidang patah membentuk sudut tertentu terhadap sumbu pembebanan. Fenomena uniknya adalah bahwa tekanan hidrostatik yang tinggi dapat menekan pembentukan retak tarik, tetapi justru dapat meningkatkan resistensi terhadap aliran plastis sehingga membuat patah geser menjadi mode kegagalan yang lebih mungkin. Pemahaman tentang interaksi tarik-tekan ini sangat penting dalam mendesain struktur yang menggunakan material getas, seperti dinding penahan tanah, pondasi dalam, liner kiln keramik, atau komponen isolator tegangan tinggi, di mana ketidakseimbangan beban dapat dengan cepat berujung pada kegagalan struktural.

a. Contoh Kasus Numerik Sederhana

Misalkan sebuah poros baja ulet mengalami beban torsi dan tarik secara bersamaan. Hasil analisis menunjukkan tegangan tarik

sebesar 120 MPa dan tegangan geser sebesar 70 MPa. Pertanyaannya, apakah poros sudah mendekati kondisi luluh?

Menggunakan kriteria von Mises, tegangan ekuivalen dihitung sebagai:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{120^2 + 3(70^2)} = \sqrt{14400 + 14700} \approx 169 \text{ MPa}$$

jika tegangan luluh material adalah 250 MPa, maka poros masih berada dalam kondisi aman.

Namun apabila dianalisis dengan kriteria Tresca:

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

$$\tau_{max} = \sqrt{(60^2) + 70^2} \approx 92 \text{ MPa}$$

Apabila tegangan geser luluh material adalah 90 MPa, maka poros diprediksi mula memasuki kondisi luluh menurut kriteria Tresca. Perbedaan prediksi ini menunjukkan pentingnya pemilihan kriteria yang sesuai dengan sifat material dan tujuan desain.

Ilustrasi Konseptual Grafik (Deskripsi Analitis) Dimana visualisasi konseptual dapat direpresentasikan melalui ruang tegangan bidang dengan sumbu σ_1 dan σ_2 sebagai tegangan utama. Dalam representasi grafis tersebut, indikator kegagalan menurut kriteria Tresca termanifestasi sebagai poligon heksagonal beraturan, sedangkan kriteria *von Mises* membentuk elips yang konsentris dan bersinggungan internal dengan heksagon tersebut. Domain interior kedua kurva tersebut merepresentasikan regime elastis material, sementara titik-titik di luarnya mengindikasikan terjadinya regime plastis atau kegagalan. Visualisasi ini secara eksplisit mendemonstrasikan prinsip fundamental bahwa kondisi kegagalan tidak hanya ditentukan oleh magnitudo tegangan uniaksial, melainkan oleh interaksi multimodal antar komponen tensor tegangan. Suatu kombinasi tegangan, yang masing-masing komponennya secara

individual berada di bawah *threshold* kekuatan material, dapat secara kolektif menginduksi transisi fase dari perilaku elastis ke plastis.

Ilustrasi komparatif untuk fenomena patah pada material getas dapat dipresentasikan melalui dua skema deformasi. Skema pertama menggambarkan spesimen uji tarik dengan bidang patah yang orientasinya ortogonal terhadap vektor tegangan tarik utama, mengindikasikan mekanisme fraktur tarik murni (*mode I fracture*). Skema kedua memvisualisasikan spesimen uji tekan dengan bidang patah yang membentuk sudut aproksimasi 45° terhadap sumbu pembebanan, yang merupakan karakteristik fraktur geser (*mode II fracture*). Representasi grafis semacam ini berfungsi sebagai *bridging analogy* yang efektif, menghubungkan formulasi matematis abstrak dengan manifestasi fenomena fisik yang dapat diobservasi secara empiris dalam pengujian material, sehingga memperkuat pemahaman konseptual mahasiswa mengenai mekanisme kegagalan yang berbeda.

b. Studi Kasus Industri: Analisis Kegagalan Poros Transmisi pada Kendaraan Komersial

Dalam aplikasi otomotif kendaraan komersial, poros propulsi (propeller shaft) beroperasi dibawah kondisi pembebanan multimodal dan siklik. Komponen ini tidak hanya mengalami momen torsi torsional dari *powertrain*, tetapi juga terpapar momen bending akibat beban gravitasi, ketidaksejajaran dinamis (*dynamic misalignment*), serta beban transien dari eksitasi jalan (*road excitation*). Data forensik teknik dari kasus kegagalan di lapangan menunjukkan bahwa mekanisme kegagalan dominan bukanlah *yielding* akibat *overload* statis, melainkan fatigue fracture progresif yang berawal dari lokasi konsentrasi tegangan (*stress risers*). Analisis fraktografi mengungkapkan bahwa inisiasi retak terjadi pada daerah dengan state of stress triaksial yang dihasilkan dari superposisi tegangan geser siklik (*cyclic shear stress*) dan tegangan normal siklik (*cyclic normal stress*).

Mekanisme kegagalan material pada umumnya berawal dari terjadinya konsentrasi deformasi plastis berskala mikro pada butir kristal yang orientasinya paling responsif terhadap arah beban kerja. Deformasi lokal yang berulang ini mendorong munculnya ketidakrataan permukaan berupa tonjolan dan lekukan mikroskopis yang berkembang sepanjang bidang geser aktif. Zona-zona tersebut kemudian berfungsi sebagai titik awal terbentuknya retak mikro. Dengan meningkatnya jumlah siklus pembebanan, retak-retak awal ini merambat secara bertahap melalui fase pertumbuhan yang relatif stabil hingga mencapai dimensi tertentu, yang selanjutnya memicu perambatan retak cepat dan menyebabkan kegagalan struktur secara menyeluruh.

Pada sisi pemodelan numerik, penggunaan kriteria tegangan ekuivalen von Mises dalam kerangka metode elemen hingga memungkinkan pemetaan respons tegangan secara detail pada komponen dengan geometri yang rumit, seperti poros berprofil kompleks. Pendekatan ini memberikan informasi menyeluruh mengenai distribusi dan intensitas tegangan, sekaligus menyoroti area dengan tingkat konsentrasi tertinggi yang berpotensi menjadi lokasi awal kerusakan. Kesesuaian dari analisis kegagalan teknik pascakejadian menunjukkan bahwa metode numerik tersebut memiliki kapabilitas prediktif yang kuat dalam mengevaluasi ketahanan kelelahan material serta mendukung perancangan komponen yang lebih andal. Selain itu, integrasi hasil simulasi dengan data eksperimental atau inspeksi lapangan memungkinkan proses validasi yang lebih komprehensif, sehingga keputusan desain dapat diambil dengan tingkat kepercayaan yang lebih tinggi terhadap perilaku material selama masa layanannya. Kriteria kegagalan Tegangan Normal Maksimum, dan kriteria *von Mises* membentuk paradigma analitis yang memungkinkan prediksi kuantitatif terhadap limit states material. Pendekatan pedagogis yang mengintegrasikan kerangka teoretis, analisis numerik, visualisasi konseptual, dan validasi empiris melalui studi kasus industri, menumbuhkan kompetensi analitis-kritis yang esensial

dalam menyelesaikan *ill-structured engineering problems*. Dengan demikian, mahasiswa teknik tidak hanya menguasai alat analisis, tetapi juga mengembangkan *engineering judgment* yang diperlukan untuk merancang sistem mekanikal dengan *factor of safety* yang rasional, memastikan integritas struktural sepanjang *service life* yang ditargetkan.

1.8 Perilaku Kelelahan Material: Mekanisme, Analisis Deterministik, dan Strategi Mitigasi

Fenomena kelelahan (*fatigue*) pada material rekayasa merupakan proses kegagalan progresif yang disebabkan oleh aksi siklik dari tegangan pada level yang secara nominal berada di bawah kekuatan luluh (*yield strength*) material. Kegagalan ini umumnya berlangsung melalui tiga fase berturut-turut: inisiasi retak, perambatan retak yang stabil, dan patah katastropik. Fase inisiasi ditandai dengan munculnya diskontinuitas mikroskopis pada titik-titik yang predisposisi, seperti konsentrator tegangan geometris (misalnya *notch* atau fillet) maupun ketidaksempurnaan intrinsik material (misalnya inklusi atau rongga). Fase ini biasanya menyita sebagian besar umur *fatigue* total. Setelah retak terbentuk, fase perambatan dimulai, ditentukan oleh rentang tegangan siklik dan karakteristik mikrostruktur material. Fase terminal terjadi ketika retak mencapai ukuran kritis, sehingga sisa penampang tidak lagi mampu menahan beban, menyebabkan keruntuhan material secara cepat dan sering bersifat getas.

Pada tingkat mikrostruktur, fitur-fitur seperti batas butir, inklusi non-logam, dan presipitat memainkan peran penting dalam perilaku kelelahan. Material logam dengan struktur berbutir halus memiliki kepadatan batas butir yang tinggi, yang efektif menghambat pergerakan dan akumulasi dislokasi sehingga memperlambat inisiasi retak. Sebaliknya, keberadaan inklusi besar atau rongga mikro dapat bertindak sebagai stress raiser internal, mempercepat proses inisiasi. Oleh karena itu, strategi peningkatan ketahanan *fatigue* dari sisi material mencakup kontrol kualitas proses

metalurgi, seperti pemurnian lelehan (*melt refining*), optimasi pengecoran, dan perlakuan panas (*heat treatment*) untuk menghasilkan mikrostruktur homogen yang bebas dari cacat makro.

Selain faktor material, proses fabrikasi juga berdampak signifikan terhadap ketahanan *fatigue*. Misalnya, pengelasan dapat menghasilkan zona termal yang terpengaruh (*heat-affected zone/HAZ*), tegangan sisa tarik, dan potensi diskontinuitas seperti porositas atau retak di bawah bead. Pada struktur kritis seperti jembatan baja atau rangka mesin berat, sambungan las memerlukan analisis *fatigue* khusus sesuai kategori detail las (*welded detail category*) berdasarkan standar seperti AWS D1.1 atau Eurocode 3. Oleh karena itu, inspeksi periodik non-destruktif (NDT) pada sambungan las menjadi protokol wajib untuk menjaga integritas struktural.

Perilaku *fatigue* juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Pada suhu tinggi, material dapat mengalami pelunakan, oksidasi, dan deformasi difusional (*creep*). Interaksi antara *fatigue* dan *creep*, dikenal sebagai *creep-fatigue interaction*, menjadi tantangan pada komponen seperti bilah turbin gas dan pipa boiler. Sebaliknya, pada suhu rendah (*cryogenic*), beberapa material dapat berubah perilaku dari ulet menjadi getas, sehingga laju perambatan retak meningkat drastis. Analisis umur *fatigue* harus selalu mempertimbangkan kondisi temperatur aktual saat operasi.

Dalam paradigma desain berbasis tegangan (*stress-based approach*), kurva S-N (*Stress-Number of cycles*) merupakan alat prediksi utama. Logam feritik seperti baja karbon umumnya memiliki batas ketahanan (*endurance limit*), yaitu tegangan ambang di bawahnya material dapat menahan beban siklik secara teoritis tak terbatas. Sebaliknya, logam non-ferrous seperti aluminium tidak menunjukkan batas ini, sehingga umur *fatigue* selalu bersifat terbatas. Pemahaman perbedaan perilaku ini penting dalam seleksi material untuk aplikasi dengan umur desain spesifik.

Efek tegangan rata-rata (*mean stress*) juga menjadi faktor penting, terutama pada komponen yang menerima pembebanan asimetris, seperti poros lentur berputar. Tegangan tarik statis yang ditumpuk di atas tegangan siklik dapat mempersingkat umur *fatigue* secara signifikan. Koreksi efek tegangan rata-rata dilakukan menggunakan diagram Goodman (linier) atau Gerber (parabolik). Strategi desain proaktif dapat menciptakan tegangan sisa tekan di permukaan, melalui metode seperti *shot peening* atau *case hardening*, untuk menetralkan efek merugikan tegangan tarik.

Dalam industri otomotif dan dirgantara, analisis *fatigue* menjadi bagian integral dari desain komponen. Komponen seperti pegas koil, drive shaft, control arm, dan roda dapat mengalami jutaan siklus beban variabel sepanjang masa pakainya. Filosofi *damage tolerance* diadopsi dalam rekayasa kedirgantaraan, yang mengasumsikan keberadaan retak awal dan fokus pada pengendalian laju pertumbuhannya hingga dapat terdeteksi sebelum mencapai ukuran kritis.

Pendekatan berbasis tegangan dapat diperluas untuk kondisi tegangan multiaxial, misalnya pada *crankshaft* yang menerima kombinasi torsi dan lentur. Dalam kasus ini, tegangan ekuivalen dihitung menggunakan kriteria seperti von Mises, yang kemudian digunakan sebagai input kurva S-N. Meskipun merupakan simplifikasi, pendekatan ini telah terbukti secara empiris dan banyak digunakan dalam analisis berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) untuk prediksi umur *fatigue*.

Pola beban nyata biasanya bervariasi (*variable amplitude loading*). Untuk memperkirakan akumulasi kerusakan dari spektrum beban yang berbeda, metode Palmgren-Miner digunakan. Meski sederhana dan konservatif, metode ini efektif untuk memberikan estimasi umur *fatigue* dalam rekayasa praktis. Dari sisi keselamatan, kegagalan *fatigue* sering disebut *silent failure*, karena dapat terjadi tiba-tiba tanpa deformasi plastis yang jelas. Hal ini membedakannya dari kegagalan akibat beban berlebih (*overload*) dan menegaskan

pentingnya metode NDT rutin seperti ultrasonic testing, magnetic particle inspection, dan eddy current testing.

Di ranah pendidikan teknik, topik kelelahan material menggabungkan mekanika material, metalurgi, dan desain komponen. Mahasiswa tidak hanya belajar menganalisis kurva S-N, tetapi juga memahami fenomena kegagalan nyata dan mampu melakukan penalaran kritis terkait desain dan material.

Perkembangan material mutakhir, seperti komposit polimer diperkuat serat (FRP), paduan logam ringan generasi baru, dan material hasil manufaktur aditif, menuntut pemahaman mekanisme *fatigue* yang lebih spesifik. Pada material komposit, mekanisme kerusakan meliputi *fibre-matrix debonding*, delaminasi, dan retak matriks. Selain itu, analisis data besar dan kecerdasan buatan memungkinkan pemantauan kesehatan struktural secara real-time dan prediksi umur sisa (*Structural Health Monitoring/ SHM*).

Secara keseluruhan, studi kelelahan menekankan bahwa integritas rekayasa bukan hanya soal kekuatan statik, tetapi juga ketahanan terhadap degradasi progresif akibat beban siklik. Desain yang baik adalah desain yang tidak hanya menahan beban puncak, tetapi juga memastikan keandalan dan keselamatan sepanjang masa pakai komponen. Pemahaman mendalam mengenai *fatigue* merupakan prasyarat fundamental untuk menghasilkan sistem teknik yang tahan lama, berkinerja tinggi, dan risiko rendah.



Gambar 1.3 Sifat Lelah Material

a. Studi Kasus 1: Rangka Kendaraan

Rangka kendaraan berperan sebagai struktur utama yang menahan berbagai beban, termasuk bobot mesin, penumpang, dan muatan, sekaligus menyalurkan gaya akibat kondisi jalan. Selama operasional, rangka menerima beban berulang yang mencakup lentur, tekan, dan geser. Kombinasi beban ini menciptakan

tegangan siklik, khususnya pada titik-titik lemah seperti sambungan las, fillet, dan transisi penampang, yang membuat bagian ini rentan terhadap kerusakan akibat kelelahan (*fatigue*).

Dalam studi ini, fokus utama adalah pada sambungan las antara rangka utama dan lengan suspensi. Lokasi ini sering mengalami konsentrasi tegangan karena beban vertikal dari suspensi diteruskan melalui lengan. Cacat mikro atau tegangan sisa pada permukaan las meningkatkan kemungkinan inisiasi retak pada area ini, sehingga menjadi titik kritis dalam analisis *fatigue*.

Analisis dimulai dengan menghitung tegangan nominal pada sambungan las akibat kombinasi beban vertikal dan momen lentur. Tegangan puncak lokal kemudian diperoleh dengan mengalikan tegangan nominal dengan faktor konsentrasi tegangan (K_t), yang muncul karena bentuk geometri sambungan las. Misalnya, jika tegangan nominal sebesar 120 MPa dan $K_t = 1,5$, maka tegangan maksimum lokal mencapai 180 MPa.

Material rangka menggunakan baja karbon dengan kekuatan luluh 250 MPa dan batas ketahanan (*endurance limit*) 160 MPa. Tegangan siklik aktual 180 MPa berada di atas batas ketahanan material, sehingga berdasarkan kurva S–N, perkiraan umur kelelahan sekitar 50.000 hingga 100.000 siklus sebelum retak mulai muncul. Untuk meningkatkan ketahanan *fatigue* pada sambungan las, beberapa strategi dapat diterapkan, antara lain memperbesar *radius fillet* untuk mengurangi faktor konsentrasi tegangan, menggunakan metode *post-weld stress relief* atau *peening* untuk menimbulkan tegangan sisa tekan, serta melakukan inspeksi *non-destructif* (NDT) secara berkala untuk mendeteksi retak mikro sebelum berkembang menjadi patah.

b. Studi Kasus 2: Pegas Suspensi Kendaraan

Pegas suspensi memiliki fungsi utama menahan beban kendaraan, meredam getaran, dan menjaga roda tetap kontak dengan permukaan jalan. Pegas ini menerima pembebanan siklik setiap kali kendaraan melewati jalan bergelombang, lubang, atau

gundukan. Tegangan geser pada lilitan pegas menjadi faktor penentu utama umur *fatigue*. Titik yang paling rawan terjadi pada lilitan luar pegas, terutama ujung yang terhubung keudukan. Di lokasi ini, tegangan geser maksimum muncul akibat kombinasi beban vertikal dan lentur lokal pada kawat.

Untuk analisis, pegas diasumsikan terbuat dari baja paduan berkualitas tinggi dengan diameter kawat 12 mm dan diameter rata-rata lilitan 100 mm. Tegangan geser nominal dihitung menggunakan persamaan untuk torsi pada batang silindris, dan faktor konsentrasi tegangan lilitan diperkirakan 1,2. Hasil perhitungan menunjukkan tegangan puncak sekitar 70,4 MPa. Material pegas memiliki batas ketahanan (*endurance limit*) sebesar 550 MPa, sehingga tegangan siklik aktual jauh di bawah batas ini. Akibatnya, umur *fatigue* pegas diperkirakan sangat panjang, lebih dari satu juta siklus, yang sejalan dengan umur layanan normal kendaraan.

Beberapa strategi desain untuk meningkatkan ketahanan *fatigue* pada pegas meliputi memastikan permukaan kawat halus melalui *polishing*, menggunakan *shot peening* untuk menimbulkan tegangan sisa tekan permukaan, serta menentukan diameter kawat dan jumlah lilitan yang optimal agar tegangan siklik dan defleksi pegas sesuai kebutuhan operasional.



Gambar 1.4 Studi Kasus Fatigue Pada Chasis Dan Suspensi Mobil

c. Kesimpulan Studi Kasus

Pada rangka kendaraan, *fatigue* menjadi faktor penting karena sambungan las dan penampang transisi sering mengalami konsentrasi tegangan. Upaya desain harus menekankan pengurangan faktor konsentrasi tegangan, kontrol kualitas las, dan inspeksi *NDT* secara rutin. Sementara itu, pegas suspensi memiliki ketahanan *fatigue* yang tinggi jika material dipilih dengan tepat dan permukaan lilitan dijaga kualitasnya. Faktor konsentrasi tegangan dapat dikurangi melalui desain lilitan yang tepat dan perlakuan permukaan.

Secara keseluruhan, penerapan analisis *fatigue* berbasis tegangan dengan pendekatan kurva S–N memungkinkan insinyur memprediksi umur komponen secara realistis, meningkatkan keselamatan, serta mengoptimalkan biaya produksi dan perawatan. Pendekatan ini menjadi fondasi penting dalam desain kendaraan modern yang aman, andal, dan tahan lama

1.9 Analisis Tegangan–Regangan dan Deformasi Plastis

Analisis tegangan–regangan pada komponen yang mengalami deformasi plastis merupakan aspek penting dalam rekayasa mesin, kendaraan, dan struktur teknik. Deformasi plastis terjadi saat tegangan yang bekerja pada material melampaui batas luluhnya, sehingga komponen tidak kembali sepenuhnya ke bentuk awal setelah beban dilepas. Pemahaman tentang fenomena ini sangat diperlukan untuk memastikan keselamatan, keandalan, dan umur layanan komponen, khususnya pada anggota yang menahan beban besar atau siklik.

Terdapat dua kondisi utama yang membuat analisis plastis menjadi penting. Pertama, untuk mengetahui beban maksimum yang dapat menyebabkan deformasi plastis signifikan atau *plastic collapse*. Informasi ini memungkinkan insinyur menghitung faktor keamanan terhadap beban tak terduga dengan membandingkan beban keruntuhan dan beban operasi normal. Kedua, untuk mempelajari perilaku tegangan dan regangan pada area lokal yang

rawan inisiasi retak, seperti radius fillet, *notch*, atau sambungan las. Daerah ini sering menjadi titik awal kegagalan karena plastisitas terkonsentrasi, yang juga memengaruhi tegangan sisa dan umur komponen.

Pendekatan elasto-plastik sederhana dilakukan melalui tiga langkah utama. Pertama, diasumsikan distribusi regangan, misalnya linier pada balok yang dibengkokkan. Kedua, diterapkan prinsip keseimbangan gaya atau momen. Ketiga, hubungan tegangan–regangan material digunakan, baik melalui kurva bilinear, *power law*, maupun data eksperimental lengkap, untuk menyelesaikan analisis. Dengan metode ini, perilaku material dapat diprediksi baik pada kondisi elastis maupun plastis, secara lokal maupun global.

Pada balok yang dibengkokkan, lapisan permukaan mengalami regangan maksimum sementara inti tetap elastis, fenomena yang disebut *elastic–plastic bending*. Analisis ini memungkinkan perhitungan momen maksimum sebelum terjadi *plastic collapse*, sehingga balok dapat dirancang tetap aman selama operasi normal tanpa deformasi permanen yang merugikan.

Demikian pula, pada poros silindris yang mengalami torsi, permukaan luar masuk ke plastisitas lebih dahulu sedangkan inti tetap elastis. Tegangan geser maksimum pada permukaan ini menjadi acuan untuk menentukan kapasitas torsional dan faktor keamanan terhadap deformasi plastis lokal. Dengan demikian, analisis plastis tidak hanya memprediksi keruntuhan global tetapi juga risiko kegagalan lokal pada titik kritis.

Konsentrasi tegangan seperti *notch*, *fillet*, atau lubang meningkatkan tegangan lokal jauh di atas tegangan nominal. Untuk memperkirakan tegangan dan regangan di daerah ini, aturan Neuber sering digunakan. Aturan ini menghubungkan tegangan dan regangan puncak dengan tegangan nominal melalui faktor konsentrasi, sehingga mempermudah prediksi inisiasi retak pada daerah kritis. Pendekatan ini penting untuk desain sambungan las, lengan suspensi, atau poros berulir, di mana plastisitas lokal menjadi pemicu kegagalan.

Setelah deformasi plastis terjadi, proses *unloading* menghasilkan tegangan dan regangan sisa. Tegangan sisa ini dapat bersifat menguntungkan, misalnya menciptakan tegangan tekan permukaan yang menahan pertumbuhan retak, atau merugikan jika mempercepat propagasi retak. Analisis tegangan sisa menjadi dasar perencanaan perlakuan panas, mekanis, dan redistribusi tegangan setelah overload, untuk meningkatkan ketahanan *fatigue* dan umur komponen.

Deformasi plastis lokal menjadi perhatian utama pada pembebanan siklik. Komponen yang mengalami *elastic-plastic* selama siklus beban dapat mengalami *ratcheting*, yaitu akumulasi regangan permanen akibat siklus berulang. Fenomena ini umum pada poros lentur berulang, pegas koil, link suspensi, dan bilah turbin dengan jutaan siklus beban. Pemahaman *ratcheting* penting untuk memastikan keamanan komponen terhadap *fatigue*.

Kurva tegangan–regangan siklik (*cyclic stress-strain curve*) digunakan untuk memprediksi pertumbuhan retak, *strain hardening*, dan kemungkinan kegagalan akibat pembebanan berulang. Data ini menjadi dasar bagi pendekatan *strain-life*, yang lebih akurat dalam menghitung umur *fatigue* dibandingkan hanya mengandalkan tegangan nominal. Dengan demikian, analisis plastis lokal dapat dikaitkan langsung dengan prediksi umur komponen di lapangan.

Analisis elasto-plastik juga dapat digabungkan dengan pendekatan *stress-life* atau *strain-life* untuk komponen dengan *notch*. Pada pembebanan variabel, akumulasi kerusakan dapat dihitung dengan metode Palmgren-Miner. Meski memiliki keterbatasan seperti mengabaikan urutan beban, metode ini tetap populer karena sederhana dan memberikan estimasi konservatif yang berguna untuk rekayasa.

Ketahanan terhadap deformasi plastis dan *fatigue* dipengaruhi material dan mikrostruktur. Baja berbutir halus memperlambat inisiasi retak karena batas butir menghambat pergerakan dislokasi. Sebaliknya, inklusi besar atau rongga mikro mempercepat terbentuknya retak dan menurunkan umur layanan.

Strategi peningkatan performa material meliputi perlakuan panas, pemurnian logam, dan pengendalian proses pengecoran untuk menghasilkan mikrostruktur homogen dan bebas pengotor.

Faktor fabrikasi juga berperan penting. Pengelasan, misalnya, menghasilkan zona termal terpengaruh, tegangan sisa tarik, dan potensi diskontinuitas seperti porositas atau retak mikro. Pada struktur kritis seperti sambungan las rangka kendaraan atau jembatan baja, analisis fatigue khusus diperlukan. Inspeksi non-destruktif secara berkala menjadi protokol wajib untuk menjaga integritas struktural.

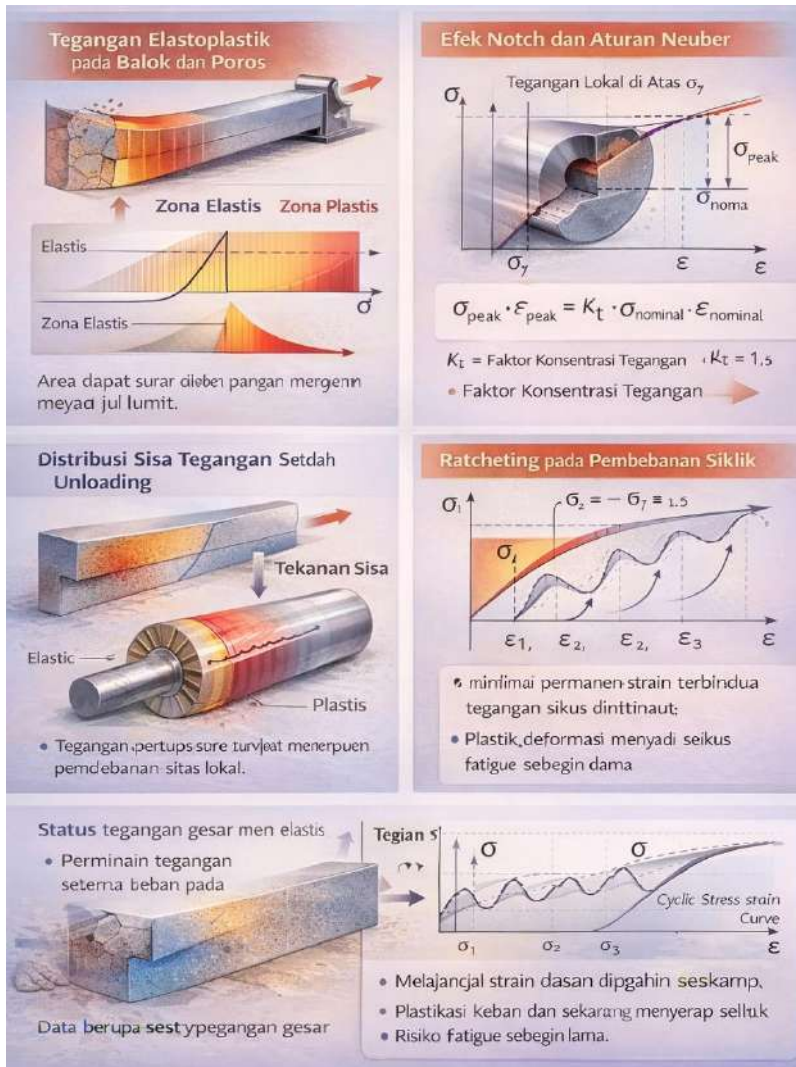
Pada kasus geometri kompleks atau pembebanan multiaxial, metode analitik sederhana sering tidak cukup. *Finite Element Analysis (FEA)* memungkinkan perhitungan tegangan dan regangan di daerah *notch*, evaluasi tegangan sisa, dan prediksi umur fatigue berdasarkan distribusi tegangan siklik nyata. *FEA* juga mempermudah visualisasi distribusi plastisitas, mendukung desain komponen lebih aman.

Strategi desain efektif meliputi pengurangan konsentrasi tegangan melalui radius dan fillet halus, pembentukan tegangan sisa tekan dengan *shot peening* atau *case hardening*, pemilihan material dengan kapasitas plastis tinggi, serta inspeksi periodik komponen kritis. Langkah-langkah ini meningkatkan keamanan, mengurangi biaya pemeliharaan, dan memperpanjang umur komponen.

Analisis elasto-plastik juga mendukung filosofi *damage tolerance*, yang mengasumsikan keberadaan retak awal dan fokus pada pengendalian laju pertumbuhan retak. Pendekatan ini diterapkan pada pesawat, turbin, dan struktur jembatan, di mana inspeksi periodik dan prediksi umur sisa sangat penting untuk keselamatan.

Pendekatan ini memperhitungkan efek *mean stress*, tegangan siklik, dan faktor konsentrasi. Kombinasi metode analitis dan numerik memungkinkan prediksi realistis perilaku komponen di

bawah pembebanan kompleks serta optimalisasi desain dan material.



Gambar 1.5 Analisis Tegangan – Regangan Dan Deformasi

Penerapan analisis elasto-plastik terlihat pada poros dan *crankshaft* mesin otomotif, balok struktural dan sambungan las pada

jembatan atau rangka kendaraan, serta pegas suspensi kendaraan. Pemahaman distribusi tegangan dan regangan plastis memungkinkan desain komponen aman, efisien, dan tahan lama.

Analisis ini juga menjadi dasar integrasi dengan metode *fatigue*, baik *stress-life* maupun *strain-life*, untuk memprediksi umur layanan, distribusi tegangan sisa, dan potensi retak dini. Hasilnya digunakan untuk optimasi material, perlakuan permukaan, dan perencanaan pemeliharaan. Secara keseluruhan, analisis tegangan-regangan elasto-plastik merupakan fondasi penting dalam desain teknik modern. Pemahaman komprehensif tentang plastisitas lokal, tegangan sisa, siklus beban, dan interaksi dengan *fatigue* memungkinkan penciptaan sistem teknik yang berkinerja tinggi, aman, tahan lama, dan andal sepanjang umur layanannya.

1.10 Pendekatan Berbasis Regangan dalam Analisis *Fatigue* Material

Pendekatan berbasis regangan, atau *strain-based approach*, merupakan metode untuk menganalisis *fatigue* dengan fokus pada deformasi lokal di area yang rentan mengalami plastisitas, seperti tepi balok, radius fillet, lubang, atau notch pada komponen teknik. Metode ini menekankan pengukuran regangan siklik di titik kritis sebagai dasar prediksi umur *fatigue*, berbeda dengan pendekatan tradisional berbasis tegangan nominal rata-rata. *Strain-based approach* efektif untuk elastisitas material pada *life fatigue*, sekaligus dapat diterapkan untuk long-life *fatigue* di mana plastisitas lokal relatif kecil.

Prinsip utama metode ini adalah menghitung regangan siklik lokal pada daerah konsentrasi tegangan dan menghubungkannya dengan jumlah siklus yang dapat ditahan sebelum retak mulai terbentuk. Kurva *strain-life* ($\epsilon-N$) menjadi alat utama, menggantikan kurva *S-N*. Kurva ini biasanya mengikuti model Coffin-Manson untuk komponen plastis dan Basquin untuk

komponen elastis, sehingga prediksi umur fatigue lebih realistis, khususnya pada siklus pendek.

Salah satu keunggulan metode berbasis regangan adalah kemampuannya untuk memperhitungkan efek tegangan rata-rata lokal (*mean stress*). Di area notch atau fillet, tegangan rata-rata lokal dapat berbeda jauh dari tegangan nominal komponen. Dengan menghitung regangan rata-rata lokal, koreksi mean stress dapat dilakukan menggunakan diagram Goodman atau Gerber, sehingga estimasi umur fatigue lebih akurat dan konservatif. Metode ini relevan pada komponen yang mengalami plastisitas tinggi, seperti pegas, poros, dan lengan suspensi kendaraan. Misalnya, pegas koil yang menahan beban vertikal kendaraan mengalami deformasi geser pada lilitan luar. Analisis regangan lokal memungkinkan prediksi jumlah siklus hingga retak dan optimasi desain tanpa kelebihan material yang tidak perlu.

Pada pembebanan variable amplitude, seperti kendaraan melintasi jalan bergelombang atau pesawat menghadapi turbulensi, strain-based approach memungkinkan perhitungan akumulasi kerusakan dengan aturan Palmgren-Miner. Meskipun metode ini mengabaikan urutan siklus, hasilnya tetap konservatif dan berguna untuk desain praktis. Efek ukuran komponen juga dipertimbangkan dalam pendekatan ini. Komponen besar cenderung memiliki kemungkinan cacat internal lebih tinggi dibandingkan sampel uji kecil, sehingga kurva strain-life disesuaikan. Kondisi permukaan juga penting; permukaan halus atau diberi perlakuan seperti shot peening, carburizing, atau polishing meningkatkan umur fatigue secara signifikan.

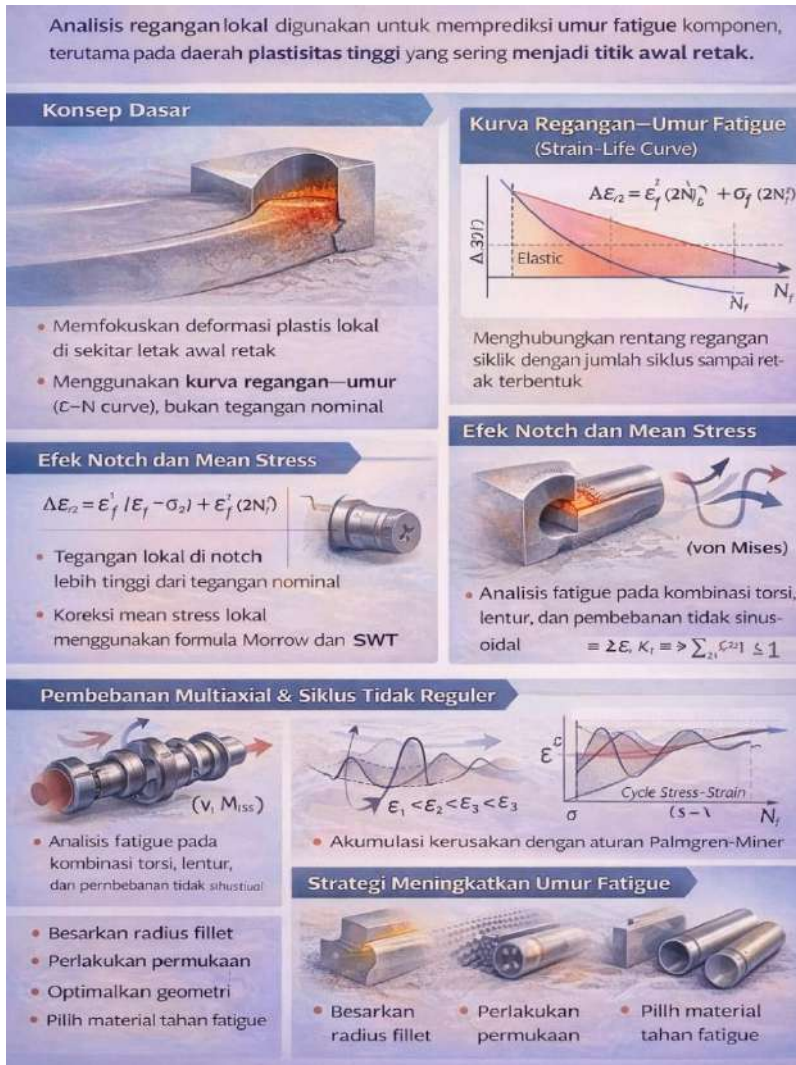
Integrasi strain-based approach dengan Finite Element Analysis (FEA) memungkinkan pemetaan regangan lokal secara detail di seluruh komponen, termasuk daerah notch, fillet, atau zona plastis. Hasil ini memungkinkan penerapan kurva strain-life secara lokal, sehingga prediksi umur fatigue menjadi lebih akurat, bahkan pada geometri kompleks atau pembebanan multiaxial. Pada kondisi multiaxial, seperti kombinasi torsi dan lentur pada poros atau

crankshaft, regangan ekuivalen dihitung dengan kriteria *von Mises* atau *Tresca*, kemudian digunakan dalam kurva strain-life. Hal ini mempermudah prediksi umur *fatigue* untuk komponen yang mengalami kondisi beban kompleks.

Pendekatan ini dikembangkan sejak akhir 1950-an untuk menganalisis fatigue pada jet engine dan nuclear reactor, di mana siklus beban pendek dan termal menimbulkan plastisitas lokal. Sejak itu, metode ini diterapkan pada otomotif, dirgantara, energi, dan jembatan, yang melibatkan beban siklik tidak teratur dan peristiwa ekstrem. Desain berbasis strain-life sering digabung dengan konsep damage tolerance, yang mengasumsikan adanya retak awal dan fokus pada pengendalian laju pertumbuhan retak. Pendekatan ini krusial pada pesawat, turbin gas, jembatan, dan struktur berat lainnya, dengan inspeksi periodik dan prediksi umur sisa berdasarkan regangan lokal.

Material modern, seperti aluminium paduan, titanium, dan komposit serat, menuntut analisis strain-based karena retak dapat muncul di dalam matriks atau sepanjang interface serat-matriks. Analisis regangan lokal membantu optimasi material dan desain yang tepat. Pendekatan ini juga mempertimbangkan fenomena ratcheting, yaitu akumulasi regangan permanen akibat siklus beban non-zero mean stress. Ratcheting terjadi pada poros lentur, pegas koil, lengan suspensi, dan bilah turbin, sehingga prediksi akurat dapat mencegah kegagalan dini.

Strain-based approach dapat dikombinasikan dengan stress-life untuk memanfaatkan keunggulan masing-masing. Pada daerah elastik dominan dan siklus panjang, *stress-life* memberikan prediksi sederhana, sedangkan di *notch*, *radius fillet*, atau daerah *plastis*, *strain-life* memberikan estimasi umur yang lebih realistis.



Gambar 1.6 Pendekatan Berbasis Regangan Terhadap Fatigue

Koreksi tambahan meliputi efek ukuran, permukaan, dan faktor konsentrasi tegangan lokal. Contohnya, pada poros besar dengan notch, tegangan lokal dapat lebih dari dua kali tegangan nominal. Strain-based approach mempermudah penyesuaian kurva ϵ - N sesuai kondisi nyata. Analisis strain-based juga relevan untuk pembebanan termal siklik, seperti pada bilah turbin atau pipa

boiler, di mana interaksi creep-fatigue terjadi. Regangan lokal akibat ekspansi termal berulang dimasukkan dalam prediksi umur, sehingga lebih realistis.

Pendekatan ini mendukung desain berbasis inspeksi. Dengan mengetahui distribusi regangan lokal, jadwal inspeksi dan perawatan dapat dioptimalkan, menekan biaya pemeliharaan tanpa mengurangi keselamatan. Integrasi dengan FEA memungkinkan visualisasi plastisitas lokal, tegangan sisa, dan distribusi regangan. Hal ini memungkinkan modifikasi radius fillet, lubang, atau sambungan las untuk mengurangi konsentrasi regangan dan memaksimalkan umur fatigue.

Aplikasi nyata terlihat pada poros transmisi, crankshaft, pegas suspensi, bilah turbin, dan lengan kontrol pesawat. Pendekatan ini memberikan prediksi umur fatigue yang realistis, serta memungkinkan optimasi desain untuk keselamatan, efisiensi material, dan umur layanan yang panjang. Secara keseluruhan, pendekatan berbasis regangan menyediakan analisis komprehensif untuk prediksi umur fatigue, menangani plastisitas lokal, mean stress, pembebanan multiaxial, dan variable amplitude loading. Metode ini memberikan landasan ilmiah bagi desain komponen teknik modern yang aman, tahan lama, dan andal.

Secara keseluruhan, pembahasan mengenai fatigue, analisis tegangan-regangan elasto-plastik, dan pendekatan berbasis regangan menekankan pentingnya memahami respons material terhadap pembebanan siklik dan deformasi lokal. Fatigue adalah proses kegagalan progresif yang dapat terjadi meskipun tegangan berada di bawah batas luluh material, dimulai dari inisiasi retak, perambatan retak stabil, hingga keruntuhan total. Analisis berbasis tegangan memberikan estimasi awal pada komponen dengan geometri sederhana, sementara analisis elasto-plastik dan pendekatan berbasis regangan memungkinkan evaluasi lebih presisi pada daerah konsentrasi tegangan, notch, radius fillet, atau zona plastis lokal. Metode ini juga memperhitungkan tegangan sisa, pengaruh mean stress, variable amplitude loading, dan kondisi

multiaxial, sehingga prediksi umur komponen menjadi lebih akurat dan konservatif.

Dari perspektif rekayasa, peningkatan ketahanan fatigue dan umur layanan komponen dapat dicapai melalui desain geometris yang meminimalkan konsentrasi tegangan, pemilihan material dengan ketahanan fatigue tinggi, perlakuan permukaan seperti shot peening atau polishing, serta inspeksi periodik untuk mendeteksi retak awal. Pendekatan strain-based dan analisis elasto-plastik menjadi dasar dalam optimasi komponen kritis seperti poros, pegas suspensi, crankshaft, bilah turbin, dan lengan kontrol pesawat, yang bekerja pada siklus beban kompleks dan ekstrem. Dengan pemahaman menyeluruh terhadap fenomena fatigue, plastisitas lokal, dan interaksi material–beban, insinyur dapat merancang sistem teknik yang lebih aman, handal, efisien, dan memiliki umur layanan panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Bittnar, P., & Padevĕt, P. (2021). *Book Of Full Papers*. <https://www.labtech.eu>
- Cadet, G., & Paredes, M. (2023). *A new exhaustive semi-analytical method to calculate stress distribution on the surface of a curved beam with circular cross section, with an application to helical compression springs*.
- Cadet, G., & Paredes, M. (2024). Convergence analysis and mesh optimization of finite element analysis related to helical springs. *Mechanics and Industry*, 25. <https://doi.org/10.1051/meca/2024018>
- Direktur Jenderal Sumber Daya Iptek dan Dikti. (2019). *Pedoman Operasional Penilaian Angka Kredit Kenaikan Jabatan Akademik/Pangkat Dosen*.
- Gaikwad, S. R., & Gotmare, A. R. (2025). Convergence Analysis Of Finite Element Method With Crossed Triangular Meshes. *IOSR Journal of Mathematics*, 21(1), 48–51. <https://doi.org/10.9790/0661-2101014851>
- Gukop, N. S., Kamtu, P. M., Lengs, B. D., Babawuya, A., & Adegoke, A. (2021). Effect of Mesh Density on Finite Element Analysis Simulation of a Support Bracket. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 6(3). <https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v6i3.632>

- Harahap, J., Mizan, K., & Priadyo, P. (2024). Analisis Distribusi Tegangan Pada Sistem Suspensi Depan Minibus Dengan Beban Bervariasi. *Austenit*, 16(1), 48–54. <https://doi.org/10.53893/austenit.v16i1.8558>
- Harahap, J., Putra, T. E., & Nasution, A. R. (2025). Analisis Mesh Size Untuk Konvergensi Coil Spring Roda Depan Minibus Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 11(1).
- Imoro, I., Nkrumah, J. K., Ziblim, B., & Mohammed, A.-H. (2023). Analysis of the Material Properties of Vehicle Suspension Coil Spring. *World Journal of Engineering and Technology*, 11(04), 827–858. <https://doi.org/10.4236/wjet.2023.114056>
- Investigating FEA Results (Mesh Convergence)*. (n.d.). <https://www.valuedes.co.uk/investigating-fea-results.html>
- Jagodang, H., Husaini, Teuku, E. P., & Dieter, S. (2021). Stress analysis on an automotive coil spring driven on flat, uphill, and downhill road surfaces. *Key Engineering Materials*, 892 KEM, 124–128. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.892.124>
- Jagodang Harahap, W. H. L. (2022). Analisis Eksperimental Dan Numerik Uji Tarik Hasil Pengelasan Smaw Pada Baja Karbon Rendah Dengan Variasi Jenis Elektroda Terhadap Sifat Mekanis. *Vocatech: Vocational Education and Technology*, 4(1), 8–17. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.38038/vocatech.v4i1.00>
- J.N. Reddy. (1993). *An Introduction to The Finite Element Method* (Issue Second).
- Larsson, J. (2019). *Spring Element Evaluation Using Finite Element Analysis*.
- Longest, P. W., & Vinchurkar, S. (2007). Effects of mesh style and grid convergence on particle deposition in bifurcating airway models with comparisons to experimental data.

- Medical Engineering and Physics*, 29(3), 350–366. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2006.05.012>
- Menteri Pendidikan, K. R. D. T. R. I. (2024). *Petunjuk Teknis Pelaksanaan Layanan Pembinaan Dan Pengembangan Profesi Dan Karier Dosen*.
- Muminovic, A. J., Saric, I., & Repcic, N. (2015). Numerical analysis of stress concentration factors. *Procedia Engineering*, 100(January), 707–713. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.423>
- Naik, N., Shenoy, P., Nayak, N., Awasthi, S., & Samant, R. (2019). Nithin Nayak, Swetank Awasthi and Rashmi Samant, Mesh Convergence Test for Finite Element Method on High Pressure Gas Turbine Disk Rim Using Energy Norm: An Alternate Approach. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 10(1), 765–775. <https://doi.org/10.34218/IJMET.10.1.2019.078>
- Naumov, T., Hadfield, J., & Tan, M. (n.d.). *Effect Of Shell Element Mesh Size On Finite Element Results*.
- ncode. (2024). *Powerful System for Test Data Processing and Durability Analysis Product Details*. www.hbmprenscia.com
- Nor Azman, A. N., Venkatason, K., & Sivaguru, S. (2025). Mesh Convergence Analysis on The Aerodynamic Performance of A Sedan Vehicle. *Journal of Engineering Technology and Applied Physics*, 7(1), 85–95. <https://doi.org/10.33093/jetap.2025.7.1.14>
- Oliver, J., Huespe, A. E., & Sánchez, P. J. (2006). A comparative study on finite elements for capturing strong discontinuities: E-FEM vs X-FEM. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(37–40), 4732–4752. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2005.09.020>
- Patil, H., & Jeyakarthiskeyan, P. V. (2018). Mesh convergence study and estimation of discretization error of hub in clutch disc with integration of ANSYS. *IOP Conference Series: Materials*

- Science and Engineering*, 402(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012065>
- Patil, S., & Jadhav, S. (2020). *International Research Journal Of Engineering And Technology (Irjet) Experimental and FEA of Optimized Existing Lower Control ARM*.
- Roark, R. J., Young, W. C., & Budynas, R. G.. (2002). *Roark's formulas for stress and strain*. McGraw-Hill.
- Sanjaya, Y., Prabowo, A. R., Imaduddin, F., & Nordin, N. A. B. (2021). Design and analysis of mesh size subjected to wheel rim convergence using finite element method. *Procedia Structural Integrity*, 33(C), 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.008>
- Seshu, P.. (2012). *Textbook of Finite Element Analysis*. Prentice-Hall of India.
- Sukhairi, T. A., Harahap, J., & Wahju Santoso, D. (2023). Analisis Kinematik Manuver Terbang Vertikal Pada Komponen Swash Plate, Rotor Head Dan Rotor Blades Helikopter Sejenis Nbo - 105 Menggunakan Catia V5r16. *Vocatech: Vocational Education and Technology Journal*, 4(2). <https://doi.org/10.38038/vocatech.v4i2.114>
- Valeš, J., & Kala, Z. (2018). Mesh convergence study of solid FE model for buckling analysis. *AIP Conference Proceedings*, 1978. <https://doi.org/10.1063/1.5043796>

TENTANG PENULIS

Jagodang Harahap, lahir di Tapanuli Selatan, 11 Oktober 1988 adalah akademisi dan praktisi di bidang Teknik Mesin yang memiliki minat dan keahlian dalam analisis tegangan dan regangan, mekanika material (*Finite Element Method*), serta kajian kelelahan material (*fatigue*) pada komponen teknik. Mendapatkan gelar Sarjana dari Universitas Negeri Medan Tahun 2012, kemudian bekerja sebagai *Engineering* alat-alat berat di Tambang Batubara Kalimantan Timur. Pada 2014 direkrut oleh Kementerian Pendidikan Tinggi untuk menjadi Dosen Muda di AKN Aceh Barat sampai 2023. Kemudian mendapatkan gelar Magister Teknik Mesin di Universitas Syiah Kuala Tahun 2021. Penulis juga sedang mengambil kuliah Profesi Insinyur di Unimal dan merupakan dosen tetap di Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Lhokseumawe. Penulis Memiliki Sertifikat kompetensi dibidang *NDT Radiography Interpretation* dan *Solidworks CSWA*. Penulis juga aktif sebagai Dewan Editor Jurnal Nasional Terakreditasi Nasional sejak tahun 2022 sampai saat ini dan juga aktif menulis di jurnal terakreditasi Nasional.

Teuku Edisah Putra, lahir di Ulee Blang Mane, 07 Mei 1980 adalah Profesor di bidang Teknik Mesin yang memiliki minat dan keahlian *Fatigue Life Assessment Structural Integrity*. Penulis Mendapatkan gelar Sarjana dari Unsyiah Tahun 2005. Kemudian mendapatkan gelar M.Sc di Universiti Kebangsaan Malaysia Tahun

2010, selanjutnya S3 di *Universität Duisburg-Essen, Germany*. Merupakan dosen tetap di Jurusan Teknik Mesin Unsyiah.

Hamdani, lahir di Bireuen, 11 Juli 1974. Penulis meraih gelar Sarjana Sains Terapan dalam bidang Teknik Mesin dari Politeknik Negeri Bandung tahun 2003. Penulis mendapatkan gelar Magister Teknik di Universitas Sumatera Utara pada tahun 2012. Penulis merupakan dosen tetap di Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe. Penulis berpengalaman menulis buku ajar Teknologi Pengelasan Logam, Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Menggambar Mesin, Dasar-Dasar Perancangan Press Tool, Ergonomi dan Perancangan Kerja, dan Metrologi Industri. Penulis juga memiliki kompetensi di bidang *Welding Inspector* dan juga aktif mempublikasikan karya ilmiah di jurnal nasional dan internasional, bekerja sebagai reviewer di jurnal nasional, dan editor di Jurnal Mesin Sains Terapan.

Ardian Rahmat Irawan Sinaga, lahir di Asahan, 16 Februari 1986. Penulis meraih gelar Sarjana Pendidikan Teknik Mesin dengan konsentrasi keahlian teknik otomotif pada tahun 2010 di Universitas Negeri Medan dan Menyelesaikan gelar Magister Teknik Mesin dengan konsentrasi keahlian konversi energi pada tahun 2021 di Universitas Sumatera Utara. Saat ini sebagai Dosen Tetap di Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe.

Edi saputra, lahir di Bireuen pada tanggal 13 November 1985. Penulis meraih gelar Sarjana Teknik bidang Teknik Mesin dari Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala Banda Aceh pada tahun 2010. Selanjutnya pada tahun 2018, penulis memperoleh gelar Master pada bidang Material Manufaktur dari Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala. Merupakan dosen tetap Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe. Penulis aktif melakukan penelitian yang berhubungan dengan material dan manufaktur, serta aktif mempublikasikan karya ilmiah pada jurnal/prosiding nasional maupun internasional.

Buku **“STRESS ANALYSIS With an Introduction to Finite Element Methods”** ini ditulis karena dilatarbelakangi oleh kebutuhan akan sumber bacaan yang aplikatif dan sistematis dalam memahami metode numerik untuk khususnya analisis tegangan dalam dunia rekayasa teknik. Dalam era modern saat ini, perangkat lunak Computer-Aided Engineering (CAE) telah menjadi bagian penting dalam proses desain dan analisis komponen teknik. Oleh karena itu, pemahaman konsep numerik yang kuat serta penerapannya dalam simulasi menjadi sangat krusial bagi para mahasiswa Teknik Mesin maupun praktisi industri.

Buku ini dirancang bukan hanya untuk menjelaskan teori dasar metode elemen hingga metode numerik lainnya, tetapi juga menyajikan langkah-langkah praktis dalam melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak CAE, seperti Femap & NX Nastran atau sejenisnya. Contoh-contoh kasus dan studi simulasi yang disajikan berasal dari hasil riset sehingga diharapkan dapat membantu pembaca mengaitkan teori dengan praktik secara lebih nyata.



PENERBIT KBM INDONESIA
Anggota IKAPI
0813 5751 7526 / (0353) 3234874
Kantor : Maguwoharjo, Depok, Sleman-Yogyakarta
@penerbitbukujogja
@penerbit.kbm

