

PENCIRIAN ISYARAT TERIKAN KOMPONEN
SISTEM GANTUNGAN KERETA MENGGUNAKAN
PARAMETER ANAK-GELOMBANG

HAZATUL AKMA BINTI MUSTAIN

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

PENCIRIAN ISYARAT TERIKAN KOMPONEN SISTEM GANTUNGAN
KERETA MENGGUNAKAN PARAMETER ANAK-GELOMBANG

HAZATUL AKMA BINTI MUSTAIN

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH
IJAZAH SARJANA MUDA

FAKULTI KEJURUTERAAN DAN ALAM BINA
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI

2025

PENGAKUAN

Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan sumbernya.

05 Julai 2025

HAZATUL AKMA BINTI
MUSTAIN
A187999

PENGHARGAAN

Pertama sekali saya ingin bersyukur ke hadrat Allah SWT kerana dengan limpah kurnia dan izin-Nya, saya berjaya menyiapkan projek tahun akhir ini. Sepanjang proses pelaksanaannya, pelbagai cabaran, suka dan duka telah saya hadapi, namun dengan keazaman dan pertolongan-Nya, projek ini akhirnya dapat disempurnakan dengan jayanya.

Terima kasih khas ditujukan kepada penyelia saya, Prof. Ir. Dr. Shahrum Abdullah, atas bimbingan, tunjuk ajar serta sokongan berterusan sepanjang pelaksanaan projek ini. Segala nasihat dan ilmu yang dicurahkan amat membantu dalam memastikan projek ini dapat dilaksanakan dengan teratur dan berkesan.

Ucapan terima kasih tidak terhingga untuk Encik Muhammad Muaz Mubasyir atas bantuan, bimbingan teknikal, tunjuk ajar serta sokongan moral yang sangat besar sepanjang penyediaan projek ini.

Saya juga ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada ibu bapa dan ahli keluarga saya atas segala doa, semangat serta dorongan yang berterusan. Tidak dilupakan juga kepada semua sahabat seperjuangan yang turut memberikan sokongan dan kerjasama sepanjang pelaksanaan projek ini.

Saya juga ingin merakamkan ucapan terima kasih kepada Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, atas segala kemudahan penyelidikan, sokongan akademik dan persekitaran pembelajaran yang kondusif.

Seterusnya, saya ingin mengucapkan penghargaan kepada pihak yang telah memberikan sokongan kewangan, kemudahan teknikal dan sumber lain secara langsung atau tidak langsung dalam menjayakan projek ini.

Sekian, terima kasih.

ABSTRAK

Sistem gantungan automotif sentiasa terdedah kepada beban kejutan dan getaran yang disebabkan oleh permukaan jalan yang tidak rata, membrek, pecutan, dan daya selekoh, yang akhirnya menyumbang kepada tekanan mekanikal tinggi dan kegagalan akibat lesu bahan. Cabaran utama dalam penyelenggaraan komponen gantungan adalah mengenal pasti kerosakan pada peringkat awal kerana isyarat terikan yang diperolehi bersifat tidak pegun. Oleh itu, kajian ini dijalankan bagi mencirikan isyarat terikan komponen gantungan kenderaan menggunakan parameter anak-gelombang. Komponen yang dikaji ialah lengan bawah gantungan dan pegas gegelung bagi kenderaan jenis sedan di kawasan kajian sekitar UKM, iaitu melalui tiga laluan berbeza yang mewakili jenis jalan rata berbonggol dan berlubang. Data isyarat terikan diambil melalui ujian jalan sebenar dan dilakukan analisis melalui pengekstrakan parameter statistik seperti min, nilai puncak RMS, sisihan piawai dan kurtosis. Data suntingan turut dibandingkan untuk tujuan analisis hayat lesu. Transformasi anak-gelombang digunakan untuk menganalisis kandungan frekuensi-masa, manakala pemetaan radar diaplikasikan untuk perbandingan visual antara jenis jalan dan komponen bagi pengesanan awal kerosakan. Hasil kajian menunjukkan bahawa laluan jalan berlubang memberikan kesan tertinggi terhadap pengurangan hayat lesu bagi kedua-dua komponen, dengan nilai hayat lesu berkurang sehingga 80% selepas proses suntingan isyarat dijalankan. Selain itu, parameter statistik seperti RMS dan kurtosis turut meningkat ketara pada permukaan jalan tidak rata, menunjukkan wujudnya beban puncak yang menyumbang kepada lesu bahan. Kajian ini membuktikan bahawa parameter statistik dan gelombang mampu membezakan ciri-ciri tingkah laku beban terhadap jenis jalan yang berbeza dan menghasilkan pola data lesu yang boleh digunakan bagi tujuan penyelenggaraan ramalan. Kajian ini memberi sumbangan terhadap bidang pemantauan kesihatan struktur melalui penggunaan parameter anak-gelombang dalam menganalisis data terikan tidak pegun secara lebih berkesan. Implikasi kajian ini boleh menyokong pembangunan sistem pengesanan kerosakan awal dalam komponen automotif, seterusnya meningkatkan keselamatan, prestasi dan kecekapan penyelenggaraan kenderaan.

CHARACTERISATION OF STRAIN SIGNALS IN AUTOMOTIVE SUSPENSION COMPONENTS USING THE WAVELET PARAMETERS

ABSTRACT

The automotive suspension system is constantly exposed to shock loads and vibrations caused by uneven road surfaces, braking, acceleration, and cornering forces, which ultimately contribute to high mechanical stress and fatigue failure. The main challenge in maintaining suspension components lies in detecting damage at an early stage, as the acquired strain signals are non-stationary in nature. Therefore, this study was conducted to characterise the strain signals of vehicle suspension components using wavelet-based parameters. The components investigated were the lower control arm and coil pegas of a sedan vehicle, tested across three different routes around the UKM area, each representing flat, bumpy, and pothole-filled road conditions. Strain signal data were collected through real road tests and analysed by extracting statistical parameters such as mean, peak RMS, standard deviation, and kurtosis. The edited data were also compared for fatigue life analysis. The wavelet transform was employed to analyse the time–frequency content, while radar mapping was applied for visual comparison between road types and components for early damage detection. The results showed that pothole-filled roads had the greatest impact on reducing the fatigue life of both components, with fatigue life decreasing by up to 80% after signal editing. Additionally, statistical parameters such as RMS and kurtosis increased significantly on uneven road surfaces, indicating the presence of peak loads that contribute to material fatigue. This study demonstrates that statistical and wavelet parameters can distinguish load behaviour characteristics across different road conditions and generate fatigue data patterns suitable for predictive maintenance. The research contributes to the field of structural health monitoring by employing the wavelet-based parameters for more effective analysis of non-stationary strain signals. The implications of this study may support the development of early damage detection systems in automotive components, thereby enhancing vehicle safety, performance, and maintenance efficiency.

KANDUNGAN

		Halaman
PENGAKUAN		ii
PENGHARGAAN		iii
ABSTRAK		iv
ABSTRACT		v
KANDUNGAN		vi
SENARAI JADUAL		ix
SENARAI RAJAH		x
SENARAI SINGKATAN		xv
BAB I	PENGENALAN	
1.1	Pendahuluan	16
1.2	Kajian Lesu Secara Analisis Anak-Gelombang	19
1.3	Pernyataan Masalah	21
1.4	Objektif Kajian	24
1.5	Hipotesis Kajian	24
1.6	Skop Kajian	25
BAB II	KAJIAN PUSTAKA	
2.1	Pengenalan	26
2.2	Sistem Gantungan Kenderaan	27
2.3	Penilaian Hayat Lesu	30
	2.3.1 Fenomena Umum Hayat Lesu	30
	2.3.2 Analisis Hayat Terikan	40
	2.3.3 Kaedah Pengiraan Kitaran Lesu	43
	2.3.4 Kerosakan Linear Palmgren-Miner	48
	2.3.5 Kaedah Analisis Carta Radar	50
2.4	Analisis Isyarat	55
	2.4.1 Pengenalan isyarat	55
	2.4.2 Statistik Isyarat	60
	2.4.3 Kuasa Ketumpatan Spektrum dalam Domain Frekuensi	62
	2.4.4 Analisis Isyarat Secara Penjelmaan Anak-Gelombang	67

2.5	Suntingan Data Lesu	68
2.6	Rumusan	70
BAB III	METODOLOGI KAJIAN	
3.1	Pengenalan	71
3.2	Pencirian Kelakuan Isyarat Terikan	73
	3.2.1 Pencerapan Data Terikan	75
	3.2.2 Analisis Statistik	82
	3.2.3 Penilaian Hayat Lesu	84
	3.2.4 Korelasi isyarat terikan hasil data statistik dengan analisis hayat lesu	86
3.3	Analisis Profail Data Terikan Lesu	87
	3.3.1 Suntingan Data Lesu	87
	3.3.2 Analisis Statistik	88
	3.3.3 Penilaian Hayat Lesu	88
	3.3.4 Korelasi Suntingan Data Lesu dengan Hasil Data Statistik dan Analisis Hayat Lesu	89
	3.3.5 Penghasilan Data Jangkaan Kerosakan	89
3.4	Perbandingan Pemetaan Radar Parameter	90
	3.4.1 Analisis Data Serakan Isyarat Terikan	90
	3.4.2 Pemetaan Radar Parameter	91
	3.4.3 Hubungan antara Kuasa Ketumpatan Spektrum dan Parameter Anak-Gelombang	91
3.5	Ringkasan	94
BAB IV	KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN	
4.1	Pengenalan	95
4.2	Pencirian Kelakuan Isyarat Terikan	96
	4.2.1 Hasil Pencerapan Data Terikan	97
	4.2.2 Analisis Statistik Isyarat Terikan Asal	102
	4.2.3 Penilaian Hayat Lesu Data Terikan Asal	105
	4.2.4 Hubungan antara Parameter Statistik dan Hayat Lesu	106
4.3	Analisis Profail Data Terikan Lesu Selepas Suntingan	108
	4.3.1 Proses Suntingan Data Lesu	109
	4.3.2 Analisis Statistik Selepas Suntingan	116
	4.3.3 Penilaian Semula Hayat Lesu	117
	4.3.4 Hubungan antara Statistik, Suntingan dan Hayat Lesu	119
	4.3.5 Data Jangkaan Kerosakan	120
4.4	Perbandingan Melalui Pemetaan Radar Parameter	134

4.4.1	Hasil Analisis Serakan Isyarat Terikan	136
4.4.2	Pemetaan Carta Radar Statistik dan Hayat Lesu	139
4.5	Ringkasan	144
BAB V KESIMPULAN DAN CADANGAN		
5.1	Pengenalan	146
5.1.1	Pencirian Isyarat Terikan bagi Komponen Gantungan	147
5.1.2	Kesan Suntingan Data Mengikut Kriteria Hayat Lesu	147
5.1.3	Pemetaan Carta Radar Sebagai Alat Visual Analitik	148
5.2	Sumbangan Keilmuan	148
5.3	Cadangan	149
RUJUKAN		150

SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
Jadual 3.1	Perwakilan data terikan yang dicerap pada lengan bawah sistem gantungan	73
Jadual 3.2	Perwakilan data terikan yang dicerap pada pegas gegelung	73
Jadual 4.1	Statistik Isyarat Terikan Asal bagi Laluan 1	103
Jadual 4.2	Statistik Isyarat Terikan Asal bagi Laluan 2	104
Jadual 4.3	Statistik Isyarat Terikan Asal bagi Laluan 3	105
Jadual 4.4	Penentuan ramalan hayat lesu	106
Jadual 4.5	Nilai statistik selepas suntingan bagi komponen lengan bawah gantungan	116
Jadual 4.6	Nilai statistik selepas suntingan bagi komponen pegas gegelung	117
Jadual 4.7	Data hayat lesu asal dan selepas suntingan	118
Jadual 4.8	Nilai PSD isyarat asal dan suntingan bagi lengan bawah gantungan	121
Jadual 4.9	Nilai PSD isyarat asal dan suntingan bagi pegas gegelung	121
Jadual 4.10	Nilai tenaga anak-gelombang isyarat asal dan suntingan bagi lengan bawah gantungan	122
Jadual 4.11	Nilai tenaga anak-gelombang isyarat asal dan suntingan bagi pegas gegelung	122
Jadual 4.12	Nilai data serakan bagi komponen lengan bawah gantungan	136
Jadual 4.13	Nilai data serakan bagi komponen pegas gegelung	137
Jadual 4.14	Nilai carta radar bagi komponen lengan bawah gantungan	141
Jadual 4.15	Nilai carta radar bagi komponen pegas gegelung	143

SENARAI RAJAH

No. Rajah		Halaman
Rajah 2.1	Contoh kegagalan pada pegas heliks	26
Rajah 2.2	Contoh sistem gantungan kereta	27
Rajah 2.3	Skematik untuk sistem gantungan kereta	28
Rajah 2.4	Jenis sistem gantungan kenderaan: (a) sistem MacPherson, (b) sistem <i>double-wishbone suspension</i>	29
Rajah 2.5	Data terikan: (a) Amplitud malar, (b) Amplitud tidak malar	31
Rajah 2.6	Permukaan keretakan akibat lesu	31
Rajah 2.7	Graf tegasan melawan terikan	32
Rajah 2.8	Kecacatan mikro	33
Rajah 2.9	Rajah min tegasan	35
Rajah 2.10	Proses pembentukan retak-lesu	35
Rajah 2.11	Unsur-unsur asas proses reka bentuk lesu	36
Rajah 2.12	Skematik bagi lengkung S-N dua langkah (tegasan-bilangan kitaran). LCF, HCF, VHCF menunjukkan lesu kitaran rendah, tinggi, dan sangat tinggi	38
Rajah 2.13	Kitaran hayat lesu dalam skala logaritma	39
Rajah 2.14	Kitaran tegasan-terikan	45
Rajah 2.15	Ilustrasi kitaran toplevel-up, di mana amplitud $H(t)$ ditakrifkan sebagai nilai minimum antara $H - (t)$ dan $H + (t)$ berdasarkan kajian Rychlik (1987)	46
Rajah 2.16	Contoh kaedah pengiraan kitaran toplevel-up berdasarkan kajian Rychlik (1987)	46
Rajah 2.17	Contoh penggunaan kaedah pengiraan kitaran <i>rainflow</i> yang diaplikasikan pada sejarah terikan seperti ditunjukkan dalam Rajah 2.6 berdasarkan kajian terdahulu.	47
Rajah 2.18	Ilustrasi prosedur pengiraan kitaran separuh berdasarkan kajian terdahulu.	47

Rajah 2.19	Ilustrasi sejarah terikan yang digunakan untuk membuktikan kesetaraan antara kaedah pengiraan <i>Toplevel-Up Cycle</i> (TUC) dan <i>Rainflow Cycle Counting</i> (RFC) berdasarkan kajian terdahulu.	48
Rajah 2.20	Ramalan hayat untuk sejarah tekanan berulang dengan peralihan tahap purata	48
Rajah 2.21	Ramalan hayat untuk sejarah tekanan berulang dengan peralihan tahap purata	49
Rajah 2.22	Keterbatasan Palmgren-Miner bagi pengumpulan kegagalan adalah bebas daripada tahap tekanan	50
Rajah 2.23	Carta radar bagi fasa ujian (kiri) dan fasa pengesahan (kanan) berdasarkan kajian terdahulu	51
Rajah 2.24	Carta radar yang merumuskan perubahan intervensi (% perubahan) untuk pemboleh ubah utama selepas latihan kekuatan (ruang biru yang diliputi) dan penjagaan ergonomik biasa (ruang merah yang diliputi). Garis putus-putus hitam mewakili tiada perubahan. Pemboleh ubah disusun mengikut arah jam: (1) intensiti kesakitan tangan/pergelangan tangan, (2) ketakutan yang dielakkan, (3) kesihatan diri yang dinilai sendiri, (4) kekuatan genggam tangan, (5) EMG ekstensor semasa MVC genggam tangan, (6) EMG fleksor semasa MVC genggam tangan, (7) masa hingga lesu, (8) EMG ekstensor semasa ujian lesu, (9) EMG fleksor semasa ujian lesu. *P < 0.05, berdasarkan kajian terdahulu	52
Rajah 2.25	Carta radar penilaian prestasi multimodal 3x3 berdasarkan kajian terdahulu	53
Rajah 2.26	Grafik bagi nilai purata subskor tahap lesu dengan carta radar pada pesakit yang memperoleh skor positif (garis pepejal) dan negatif (garis putus-putus). Q1 Motivasi lebih rendah apabila letih, Q2 Senaman menyebabkan lesu, Q3 Mudah letih, Q4 Lesu mengganggu fungsi fizikal, Q5 Lesu menyebabkan masalah yang kerap, Q6 Lesu menghalang fungsi fizikal yang berterusan, Q7 Lesu mengganggu pelaksanaan tugas dan tanggungjawab tertentu, Q8 Lesu adalah antara simptom yang paling membataskan, Q9 Lesu mengganggu kerja, keluarga, atau kehidupan sosial, berdasarkan kajian terdahulu	54
Rajah 2.27	Pemprosesan isyarat data: (a) Siri masa dengan komponen deterministik sinusoidal ditambah kepada data stokastik normal, (b) Magnitud pekali kompleks, (c) Pekali yang kurang mewakili dijadikan sifar, (d) Pekali kompleks dibawa kembali ke domain masa. Perbandingan (a) komponen stokastik telah dikeluarkan	56

Rajah 2.28	Jenis isyarat masa berterusan (analog) dan isyarat masa diskret (digital)	57
Rajah 2.29	Campuran isyarat bagi pencerapan isyarat	57
Rajah 2.30	Contoh Penjelmaan Fourier	58
Rajah 2.31	Contoh Penjelmaan Fourier dan penjelmaan anak-gelombang (<i>Wavelet Transform</i> , WT)	58
Rajah 2.32	Isyarat stabil dan tidak stabil	59
Rajah 2.33	Contoh isyarat lesu	59
Rajah 2.34	Contoh kepencongan negatif dan positif	61
Rajah 2.35	PSD bagi data pecutan untuk (a) Jalan Kampus 1, (b) Jalan Kampus 2 dan (c) Jalan Kampus 3 berdasarkan kajian terdahulu	66
Rajah 2.36	Tegasan PSD bagi lengan bawah gantungan dibawah beban yang berbeza berdasarkan kajian terdahulu	67
Rajah 2.37	Pencirian masa-frekuensi isyarat getaran yang diperoleh pada keadaan jalan di kampus berdasarkan kajian terdahulu	69
Rajah 3.1	Aliran Proses Metodologi Kajian	72
Rajah 3.2	Simulasi FEA bagi sistem bawah gantungan: (a) Sistem lengan bawah gantungan, (b) Sistem pegas gegelung	76
Rajah 3.3	Model kereta yang digunakan dalam kajian	77
Rajah 3.4	Bahagian sistem gantungan kenderaan yang digunakan untuk kajian: (a) lengan bawah gantungan, (b) pegas gegelung	77
Rajah 3.5	Tolok terikan pada lengan bawah gantungan	78
Rajah 3.6	Tolok terikan (a) tolak terikan yang digunakan, (b) saiz tolak terikan	79
Rajah 3.7	Tolok terikan pada pegas gegelung	80
Rajah 3.8	Alat Dewesoft Sirius	81
Rajah 3.9	Penyambungan alatan semasa pencirian data	81
Rajah 3.10	Jenis permukaan jalan dan peta laluan yang dilalui semasa proses pencerapan data: (a) DECTAR – KUO, (b) FSSK – Pintu Masuk UKM 2, (c) Pintu Masuk UKM 3 – FUU	82
Rajah 3.11	Paparan perisian N-Code selepas pemilihan ikon Glyphworks	83

Rajah 3.12	Paparan susunan gambarajah blok untuk analisis statistik global	84
Rajah 3.13	Susunan simulasi dalam Glyphworks untuk analisis hayat terikan	85
Rajah 3.14	Penukaran model untuk analisis hayat terikan	86
Rajah 3.15	Contoh data asal, hingar dan suntingan	88
Rajah 4.1	Isyarat asal bagi lengan bawah gantungan: (a) A1-Isyarat bagi laluan pertama, (b) A2-Isyarat bagi laluan kedua, (c) A3-Isyarat bagi laluan ketiga	99
Rajah 4.2	Isyarat asal bagi komponen pegas gegelung: (a) B1-Isyarat bagi laluan pertama, (b) B2-Isyarat bagi laluan kedua, (c) B3-Isyarat bagi laluan ketiga	101
Rajah 4.3	Data suntingan komponen lengan bawah gantungan bagi laluan 1 (Data A1)	110
Rajah 4.4	Data suntingan komponen lengan bawah gantungan bagi laluan 2 (Data A2)	111
Rajah 4.5	Data suntingan komponen lengan bawah gantungan bagi laluan 3 (Data A3)	112
Rajah 4.6	Data suntingan komponen pegas gegelung bagi laluan 1 (Data B1)	113
Rajah 4.7	Data suntingan komponen pegas gegelung bagi laluan 2 (Data B2)	114
Rajah 4.8	Data suntingan komponen pegas gegelung bagi laluan 3 (Data B3)	115
Rajah 4.9	Kuasa ketumpatan spektrum (PSD) bagi lengan bawah gantungan: (a) Laluan 1, (b) Laluan 2, (c) Laluan 3	123
Rajah 4.10	Kuasa ketumpatan spektrum (PSD) bagi pegas gegelung: (a) Laluan 1, (b) Laluan 2, (c) Laluan 3	125
Rajah 4.11	Analisis anak-gelombang untuk lengan bawah gantungan Laluan 1: (a) Data asal, (b) Data suntingan	127
Rajah 4.12	Analisis anak-gelombang untuk lengan bawah gantungan Laluan 2: (a) Data asal, (b) Data suntingan	128
Rajah 4.13	Analisis anak-gelombang untuk lengan bawah gantungan Laluan 3: (a) Data asal, (b) Data suntingan	129

Rajah 4.14	Analisis anak-gelombang untuk pegas gegelung Laluan 1: (a) Data asal, (b) Data suntingan	131
Rajah 4.15	Analisis anak-gelombang untuk pegas gegelung Laluan 2: (a) Data asal, (b) Data suntingan	132
Rajah 4.16	Analisis anak-gelombang untuk pegas gegelung Laluan 3: (a) Data asal, (b) Data suntingan	133
Rajah 4.17	Data serakan kaedah Morrow	137
Rajah 4.18	Data serakan kaedah SWT	138
Rajah 4.19	Carta radar bagi lengan bawah gantungan: (a) Laluan 1, (b) Laluan 2, (c) Laluan 3	141
Rajah 4.20	Carta radar bagi pegas gegelung: (a) Laluan 1, (b) Laluan 2, (c) Laluan 3	143

SENARAI SINGKATAN

ε	Terikan
FEA	Analisis unsur terhingga
HCF	<i>High cycle fatigue</i>
LCF	<i>Low cycle fatigue</i>
LEFM	<i>Linear elastic fracture mechanics</i>
PSD	<i>Power spectral density</i>
RMS	Punca min kuasa dua
SWT	Smith-Watson-Topper
UKM	Universiti Kebangsaan Malaysia
VHCF	<i>Very high cycle fatigue</i>
σ	Tegasan

BAB I

PENGENALAN

1.1 PENDAHULUAN

Kenderaan yang bergerak di jalan raya perlu menghadapi pelbagai cabaran, termasuk kerosakan jalan, daya brek, daya pecutan, dan daya emparan di selekoh. Ini bukan sahaja menimbulkan ketidakselesaan kepada pemandu dan penumpang, tetapi juga memberi kesan kepada kelancaran pergerakan kenderaan serta kepada komponen kenderaan (Mohamed et al. 2018). Salah satu cabaran ialah keadaan jalan raya seperti lubang, bonggol, atau permukaan jalan raya yang tidak rata, yang menghasilkan getaran dan tekanan mekanikal yang tinggi pada komponen kenderaan seperti tayar, sistem gantungan, dan casis. Situasi ini dikenalpasti dan dianalisis melalui isyarat terikan, yang menunjukkan tindak balas mekanikal komponen terhadap keadaan jalan raya (Zhang & Liu, 2019).

Industri automotif terus berkembang dengan pesat, seiring dengan permintaan yang semakin meningkat terhadap kenderaan yang lebih efisien, selamat, dan tahan lama. Sistem gantungan kenderaan adalah salah satu komponen utama dalam reka bentuk kenderaan yang berfungsi untuk memastikan kestabilan dan keselesaan pemanduan (Funtasticko, 2013). Sistem ini menyerap hentakan dan getaran yang diterima oleh kenderaan semasa melintasi permukaan jalan yang tidak rata, seperti lubang atau bonggol. Komponen utama dalam sistem gantungan termasuk penyerap hentakan, pegas, dan casis. Keberkesanan sistem gantungan ini sangat bergantung kepada kualiti bahan dan ketahanannya terhadap beban yang berulang. Dalam jangka panjang, sistem gantungan akan terdedah kepada lesu bahan, yang menyebabkan kerosakan pada komponen akibat pendedahan berulang terhadap beban yang berbeza. Oleh itu, pemantauan keadaan sistem gantungan adalah sangat penting bagi memastikan

keselamatan dan prestasi kenderaan sepanjang hayat operasinya (Avcı & Yıldırım, 2019).

Salah satu kaedah yang berkesan untuk memantau keadaan komponen automotif adalah melalui analisis isyarat terikan yang dihasilkan apabila beban berulang dikenakan ke atas komponen. Isyarat terikan ini menggambarkan tekanan atau ketegangan yang dikenakan pada bahan akibat beban luar yang diterima oleh komponen tersebut. Dalam sistem gantungan kenderaan, isyarat terikan memainkan peranan yang sangat penting dalam mengenal pasti masalah yang timbul akibat lesu bahan atau kegagalan struktur. Isyarat ini boleh diukur dengan menggunakan tolok terikan yang diletakkan pada permukaan komponen yang diuji (Latifi et al., 2025) serta data yang diperoleh dapat dianalisis untuk mengenal pasti sebarang perubahan dalam ketegangan atau tekanan yang mungkin menyebabkan kegagalan awal komponen. Walau bagaimanapun, isyarat terikan dalam sistem gantungan adalah kompleks dan tidak pegun, yang menjadikannya lebih sukar untuk dianalisis menggunakan kaedah tradisional seperti jelmaan Fourier (Choi & Lee, 2020). Oleh itu, kaedah terkini diperlukan untuk menganalisis isyarat tersebut dengan lebih tepat.

Antara corak analisis ialah menggunakan pendekatan anak-gelombang yang mana ia dapat memberikan kelebihan dalam mengenal pasti ciri-ciri isyarat daripada pelbagai frekuensi dan skala, sekali gus membantu mencirikan impak gangguan jalan terhadap kestabilan kenderaan. Berbeza dengan jelmaan Fourier yang hanya menguraikan isyarat kepada komponen frekuensi, jelmaan anak-gelombang membolehkan kajian isyarat dalam kedua-dua domain masa dan domain frekuensi secara serentak (Gunawan, 2017). Hal ini membolehkan pengenalan perubahan dalam isyarat yang mungkin berlaku pada masa yang singkat dan dalam julat frekuensi yang berubah. Kaedah ini juga amat sesuai untuk aplikasi dalam sistem gantungan kenderaan di mana isyarat terikan yang dihasilkan mengandungi pelbagai komponen frekuensi yang berubah mengikut masa. Dengan menggunakan parameter anak-gelombang, isyarat terikan boleh dianalisis secara lebih mendalam untuk mengesan perubahan dalam corak getaran yang disebabkan oleh lesu atau kerosakan komponen (Abhishek & Singh, 2018). Kaedah ini juga membolehkan pemeriksaan secara lebih terperinci

terhadap isyarat terikan yang tidak mudah dikawal dengan kaedah lain, memberi peluang untuk mengenal pasti tanda-tanda awal kerosakan bahan.

Transformasi anak-gelombang membolehkan pengekstrakan ciri-ciri penting dari isyarat yang mengandungi perubahan secara dinamik, seperti perubahan dalam amplitud atau frekuensi isyarat yang berlaku akibat lesu atau kerosakan komponen. Sebagai contoh, semasa kenderaan bergerak di atas jalan yang berbonggol atau tidak rata, sistem gantungan menerima hentakan yang mengubah isyarat terikan yang dihantar kepada penderia (Yusuff, 2014). Melalui analisis anak-gelombang, pemecahan isyarat ini kepada komponen yang lebih kecil untuk mengkaji perubahan dalam pola getaran. Perubahan yang lebih terperinci, seperti perubahan frekuensi yang berlaku apabila komponen mula mengalami kerosakan atau lesu, dapat dikesan dengan lebih mudah menggunakan kaedah ini. Hal ini penting kerana perubahan kecil dalam isyarat boleh menunjukkan masalah yang lebih besar yang akan bertambah jika tidak dikesan dengan lebih awal (Furlan & Puglisi, 2021).

Kegagalan lesu pada jalan raya berlaku apabila struktur jalan mengalami tegasan berulang akibat beban trafik yang berterusan (Hasif, 2015), terutamanya dari kenderaan bermuatan berat. Walaupun beban ini tidak melebihi kekuatan maksimum bahan, ia boleh menyebabkan kerosakan yang bertambah dari masa ke masa, dengan retak lesu yang terbentuk akibat beban berulang pada lapisan asphalt dan perubahan bentuk kekal pada lapisan bawah jalan yang menyebabkan alur memanjang. Hayat lesu merujuk kepada jumlah kitaran beban yang dapat ditahan oleh bahan atau komponen sebelum ia mengalami kerosakan akibat pendedahan berulang kepada beban yang lebih rendah daripada kekuatan maksimum bahan tersebut. Lesu pada bahan ini sering kali berlaku pada komponen sistem gantungan kenderaan seperti penyerap hentakan dan pegas, yang boleh mengalami perubahan dalam struktur mikroskopik akibat tekanan berulang, menyebabkan pembentukan retakan kecil yang berkembang menjadi keretakan lebih besar, dengan potensi untuk menjejaskan keselamatan kenderaan (Ghosal & Chakraborty, 2017).

Untuk memantau hayat lesu bahan dalam sistem gantungan kenderaan, analisis isyarat terikan dengan parameter anak-gelombang dapat memberikan petunjuk awal

tentang perubahan dalam corak gelombang, seperti amplitud atau frekuensi, yang menunjukkan lesu bahan akibat beban berulang. Apabila retakan terbentuk, isyarat terikan yang dihasilkan menunjukkan perubahan yang dapat dikesan menggunakan teknik jelmaan anak-gelombang (Karami & Alavi, 2018). Pengesanan awal perubahan ini membolehkan tindakan pencegahan yang lebih cepat, mengurangkan risiko kegagalan besar dan meningkatkan keselamatan kenderaan. Dalam industri automotif, perhatian semakin diberikan kepada ketahanan komponen, dengan kajian menunjukkan bagaimana isyarat terikan daripada komponen kenderaan dapat memberi maklumat mengenai keupayaan komponen tersebut untuk bertahan terhadap tegasan berulang Zakaria et al. (2015). Analisis ini mengenal pasti ciri-ciri dinamik, seperti frekuensi dan amplitud getaran yang dihasilkan oleh lesu, dan membantu dalam memperbaiki reka bentuk komponen untuk meningkatkan ketahanan terhadap kegagalan lesu, memanjangkan jangka hayat kenderaan dan mengurangkan kos penyelenggaraan.

1.2 KAJIAN LESU SECARA ANALISIS ANAK-GELOMBANG

Kajian oleh Rahman, Abdullah, & Hassan (2022) memfokuskan kepada penggunaan parameter anak-gelombang dalam menganalisis isyarat terikan pada komponen sistem gantungan automotif. Dalam kajian ini, jelmaan anak-gelombang digunakan untuk menganalisis data tidak pegun yang diperolehi semasa ujian lesu sistem gantungan kenderaan. Hasil kajian menunjukkan bahawa kaedah ini dapat mengenal pasti pola lesu awal, termasuk retakan mikro, sebelum kegagalan struktur berlaku. Penemuan ini menunjukkan bahawa jelmaan anak-gelombang berkesan dalam memberikan analisis yang lebih terperinci dalam domain masa dan domain frekuensi, membolehkan pengesanan perubahan kecil dalam isyarat yang mungkin tidak ditumpukan jika hanya menggunakan analisis domain masa sahaja. Kajian ini memberi sumbangan besar kepada peningkatan reka bentuk komponen sistem gantungan yang lebih tahan lasak dan mengurangkan kos penyelenggaraan dalam industri automotif.

Satu kajian lain oleh Zhou, Gao, & Tang (2021) pula meneliti penggunaan jelmaan anak-gelombang untuk menganalisis isyarat terikan pada omboh enjin automotif. Dalam eksperimen ini, data simulasi digunakan untuk mengenal pasti titik kritikal pada bahan yang mengalami beban berulang. Walaupun analisis domain masa

sahaja kurang berkesan untuk data tidak pegun, kombinasi dengan jelmaan anak-gelombang membolehkan pemahaman yang lebih mendalam tentang perubahan dalam isyarat yang membawa kepada kegagalan bahan. Kajian ini juga menunjukkan bahawa parameter anak-gelombang dapat mengesan perubahan tenaga dalam isyarat pada tahap awal lesu, yang membantu pengeluar enjin meningkatkan kawalan kualiti dan memperkenalkan bahan yang lebih tahan lama dalam komponen enjin.

Selain itu, kajian oleh Wang, Liu, & Huang (2021) menumpukan pada pemantauan isyarat getaran dan terikan pada casis automotif semasa kenderaan beroperasi dalam keadaan jalan berbukit atau kasar. Jelmaan anak-gelombang digunakan untuk mencirikan isyarat tekanan yang tidak pegun, walaupun dalam keadaan hingar tinggi. Hasil kajian ini menunjukkan bahawa kaedah ini telah mengesan titik kelemahan pada casis sebelum retakan besar berlaku. Kaedah ini juga membolehkan pemantauan struktur dinamik dalam keadaan yang kritikal, memberi impak besar terhadap reka bentuk casis yang lebih ringan tetapi tetap kukuh. Ini bukan sahaja meningkatkan keselamatan kenderaan, tetapi juga menyumbang kepada penjimatan kos dalam pengeluaran kenderaan.

Kajian lain oleh Kumar, Singh, & Patel (2020) meneliti penggunaan transformasi anak-gelombang untuk menganalisis isyarat terikan pada roda kereta yang diuji di bawah beban tinggi. Dalam kajian ini, transformasi anak-gelombang membantu mengenal pasti perubahan frekuensi dalam isyarat yang berkaitan dengan pembentukan retakan mikro, yang berlaku sebelum kegagalan komponen berlaku. Hasil kajian membuktikan bahawa teknik ini berkesan dalam pengesanan awal kegagalan roda semasa ujian prestasi tinggi. Kajian ini membantu dalam reka bentuk roda yang lebih tahan lasak, sesuai untuk digunakan dalam pelbagai keadaan jalan, dan meningkatkan keselamatan serta ketahanan kenderaan.

Kajian-kajian yang dinyatakan dalam bahagian ini, menunjukkan betapa pentingnya penggunaan parameter anak-gelombang dalam mengenal pasti perubahan awal dalam isyarat terikan yang boleh meramalkan kegagalan komponen automotif (Yusuff, 2014). Pendekatan ini bukan sahaja memberi manfaat dalam analisis terikan

tetapi juga dalam meramalkan hayat lesu komponen, meningkatkan ketahanan bahan, dan menyumbang kepada keselamatan kenderaan.

Dalam analisis data lesu yang menggunakan kaedah anak-gelombang, kualiti data adalah kritikal untuk ramalan kegagalan yang tepat bagi komponen automotif. Penyuntingan data yang tidak tepat atau tidak lengkap boleh menyebabkan kesilapan dalam analisis, mengurangkan kebolehan untuk mengesan perubahan awal dalam isyarat terikan yang menandakan kegagalan komponen yang berpotensi. Sebagai contoh, satu kajian oleh Oh (2001) menunjukkan bahawa transformasi anak-gelombang boleh menyunting sejarah lesu dengan berkesan melalui penapisan bunyi, menghapuskan lonjakan, dan memampatkan set data, dengan itu meningkatkan ketepatan analisis lesu.

Selain itu, kajian oleh Sun et al. (2023) memperkenalkan kaedah penyuntingan spektrum beban berdasarkan Penjelmaan *Wigner-Ville* (WVT) untuk meningkatkan kecekapan ujian ketahanan bagi komponen kenderaan. Kaedah ini menggunakan spektrum tenaga segera yang diperoleh melalui WVT untuk mengenal pasti titik masa dalam domain masa yang mempunyai sumbangan kerosakan yang minimum, membolehkan pengurangan tempoh ujian disamping mengekalkan ciri-ciri kerosakan yang penting.

1.3 PERNYATAAN MASALAH

Dalam industri automotif, analisis hayat lesu memainkan peranan penting dalam menilai ketahanan komponen terhadap beban berulang. Hayat lesu merujuk kepada jumlah kitaran beban yang boleh ditanggung oleh sesuatu bahan sebelum berlaku kegagalan. Kajian oleh Smith et al. (2023) menunjukkan bahawa lebih daripada 70% kegagalan komponen mekanikal berpunca daripada hayat lesu bahan, terutama dalam sistem yang terdedah kepada beban dinamik seperti komponen gantungan kenderaan dan enjin kereta. Beban dinamik ini menghasilkan isyarat terikan yang kompleks, yang perlu dianalisis secara terperinci untuk memahami corak kegagalan dan meramalkan hayat lesu.

Kaedah tradisional untuk menganalisis hayat lesu sering menggunakan data dalam domain masa, iaitu dengan menganalisis pelbagai isyarat terikan terhadap masa. Pendekatan ini penting kerana ia memberikan maklumat langsung tentang perubahan yang berlaku secara masa tetap pada bahan. Namun, salah satu cabaran utama adalah kebolehan untuk membezakan antara isyarat normal dan isyarat awal kegagalan, terutamanya apabila isyarat terikan yang disebabkan oleh hingar. Kajian oleh Zhou et al. (2021) mendapati bahawa analisis domain masa sahaja kurang sensitif terhadap perubahan kecil dalam pola isyarat, yang sering menjadi petunjuk awal kepada retakan mikro atau kerosakan bahan.

Penjelmaan anak-gelombang telah muncul sebagai alat yang berkuasa dalam menganalisis isyarat kerana keupayaannya untuk memproses data dalam domain masa dan frekuensi secara serentak. Kaedah ini membolehkan isyarat dipecahkan kepada komponen yang lebih kecil, memudahkan pengenalpastian perubahan yang mungkin sukar dikesan dalam domain masa tradisional. Sebagai contoh, kajian oleh Rahman, Abdullah, dan Hassan (2022) menunjukkan bahawa analisis menggunakan parameter anak-gelombang mampu mengenal pasti ciri-ciri awal kegagalan bahan, termasuk perubahan kecil dalam isyarat yang berlaku sebelum kegagalan kritikal.

Dalam konteks suntingan data lesu, kaedah ini berperanan dalam meningkatkan ketepatan data yang digunakan untuk meramalkan kegagalan komponen. Sebagai contoh, suntingan data lesu yang menggunakan transformasi anak-gelombang dapat membuang gangguan dan mengasingkan elemen-elemen penting yang menunjukkan potensi kegagalan komponen automotif sebelum ianya berlaku. Oleh itu, melalui gabungan analisis anak-gelombang dan penyuntingan data yang tepat, ketepatan ramalan hayat lesu dapat dipertingkatkan, seterusnya meningkatkan keselamatan dan kebolehpercayaan kenderaan.

Walau bagaimanapun, aplikasi parameter anak-gelombang dalam menilai hayat lesu komponen kereta masih kurang dikaji secara mendalam. Isyarat terikan dalam kenderaan sering kali tidak tetap kerana ia dipengaruhi oleh pelbagai faktor seperti kelajuan, beban dinamik, dan perubahan persekitaran. Faktor-faktor ini menjadikan analisis isyarat dalam domain masa sahaja kurang mencukupi untuk menilai perubahan

yang berlaku pada komponen kenderaan secara tepat. Oleh itu, pendekatan yang lebih dinamik dan komprehensif diperlukan untuk membezakan antara isyarat yang normal dan yang menunjukkan tanda-tanda awal kerosakan atau lesu.

Dinyatakan bahawa analisis terperinci isyarat terikan dalam kedua-dua domain masa dan frekuensi boleh meningkatkan ketepatan ramalan hayat lesu komponen (Liu, Yang, & Cheng, 2023). Dengan memanfaatkan transformasi anak-gelombang, isyarat lesu yang berlaku secara perlahan tetapi konsisten dapat dikenali lebih awal, sekali gus meningkatkan kebolehpercayaan sistem keselamatan kenderaan. Melalui pengenalpastian dan analisis data lesu yang lebih sensitif, ramalan kerosakan boleh dilakukan dengan lebih tepat, dan pendekatan ini berpotensi untuk memperpanjang jangka hayat komponen kereta, mengurangkan kos penyelenggaraan, serta meningkatkan keselamatan keseluruhan.

Dalam kajian berkaitan (Liu, Yang, & Cheng, 2023), analisis terperinci isyarat terikan dalam kedua-dua domain masa dan frekuensi menggunakan transformasi anak-gelombang dapat meningkatkan ketepatan ramalan hayat lesu komponen. Namun, untuk memastikan ketepatan ini, proses suntungan data lesu yang teliti adalah penting bagi membantu untuk menghilangkan gangguan dan ketidaktepatan yang mungkin wujud dalam isyarat, membolehkan analisis yang lebih fokus dan tepat terhadap perubahan kecil yang menunjukkan kegagalan awal komponen. Melalui penyuntingan ini, data yang digunakan dalam analisis dapat disesuaikan dengan keadaan sebenar, memastikan bahawa ramalan kegagalan komponen adalah lebih tepat. Oleh itu, gabungan antara transformasi anak-gelombang dan penyuntingan data lesu bukan sahaja meningkatkan ketepatan ramalan kerosakan, tetapi juga dapat memperpanjang jangka hayat komponen dan meningkatkan keselamatan kenderaan secara keseluruhan.

1.4 OBJEKTIF KAJIAN

Dalam kajian ini, beberapa objektif yang perlu dicapai adalah seperti berikut:

1. Mencirikan kelakuan isyarat terikan sistem gantungan kereta berdasarkan permukaan jalan yang berbeza.
2. Memformulasi hasil analisis isyarat terikan bagi kaedah suntingan data lesu.
3. Membandingkan pemetaan radar frekuensi antara isyarat terikan bagi menilai keberkesanan dan mengesan tanda awal kerosakan.

1.5 HIPOTESIS KAJIAN

Beberapa hipotesis telah dikenalpasti berdasarkan objektif kajian yang telah ditetapkan. Hipotesis tersebut adalah seperti berikut:

1. Jika kelakuan isyarat terikan adalah berbeza bagi setiap data terikan yang dianalisis, maka kajian analisis statistik dan penilaian hayat lesu memaparkan maklumat parameter yang berbeza.
2. Jika penggunaan kaedah suntingan isyarat terikan dapat menghasilkan model jangkaan kerosakan yang lebih sensitif, maka perubahan kecil dalam isyarat terikan boleh meningkatkan ketepatan ramalan hayat lesu komponen kereta.
3. Jika pemetaan radar frekuensi dapat mengenal pasti tanda awal kerosakan dalam isyarat terikan, maka analisis parameter radar yang lebih sensitif kepada perubahan kecil dalam isyarat terikan dapat diperolehi.

1.6 SKOP KAJIAN

Dalam kajian ini, isyarat terikan akan dicerap daripada komponen automotif iaitu sistem gantungan kenderaan. Peranti pengumpulan data isyarat terikan yang digunakan dalam kajian ini adalah tolok terikan yang berfungsi mengukur isyarat terikan yang akan dipasang pada sistem gantungan kenderaan untuk mengumpul data apabila kenderaan sedang bergerak. Pengukuran data isyarat akan dilakukan pada lima permukaan jalan raya yang berbeza bagi setiap jalan di dalam kampus utama Universiti Kebangsaan Malaysia.

Data isyarat terikan dari tolok terikan dalam transformasi anak-gelombang akan dicirikan berdasarkan analisis statistik dan analisis kegagalan lesu yang diperolehi dari perisian Dewesoft bagi setiap isyarat terikan yang digunakan. Penjadualan masa pada isyarat terikan dilakukan menggunakan perisian bagi menjalankan proses penguraian isyarat terikan. Data asal akan dibandingkan dengan data yang telah disunting.

Bagi membangunkan algoritma dalam domain masa, perisian nCode GlyphWork digunakan bagi menganalisis lesu dengan penggunaan pendekatan penyuntingan data lesu. Selain itu, perisian Matlab pula dilakukan bagi menentukan algoritma dalam domain frekuensi. Perisian Matlab juga digunakan bagi mengekstrak sifat lesu melalui pendekatan dalam domain masa-frekuensi. Berdasarkan isyarat yang diperolehi, kaedah domain masa frekuensi yang digunakan bagi mengplot skalogram penjelmaan anak-gelombang dalam perisian Matlab.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 PENGENALAN

Bab ini membincangkan teori dan konsep asas yang digunakan sepanjang kajian ini bagi memudahkan pemahaman tentang analisis yang dilakukan. Fokus utama kajian adalah pada analisis isyarat terikan pada komponen automotif, khususnya sistem gantungan kenderaan, menggunakan pelbagai kaedah analisis dalam domain masa, frekuensi dan masa-frekuensi. Sistem gantungan memainkan peranan penting dalam memastikan keselesaan dan keselamatan pengguna semasa pemanduan. Namun begitu, kegagalan lesu dalam komponen kenderaan telah menjadi isu utama yang mempengaruhi prestasi keseluruhan yang mendorong kepada pelbagai kajian untuk meningkatkan daya tahan dan kebolehpercayaan sistem. Data pergerakan kenderaan yang dikumpulkan semasa pemanduan menghasilkan isyarat terikan yang kompleks. Analisis terhadap isyarat ini dalam domain masa, melalui korelasi dengan data statistik dan hayat lesu, dapat membantu mengenal pasti pola lesu yang mungkin membawa kepada kegagalan komponen.



Rajah 2.1 Contoh kegagalan pada pegas heliks

Sumber: Arslan dan Genel (2023)

Melalui bab ini, teori-teori utama yang diperlukan untuk memahami sifat isyarat terikan, korelasi data statistik dengan hayat lesu, serta aplikasi parameter anak-gelombang dihuraikan secara terperinci. Teori-teori ini menjadi asas untuk membangunkan algoritma yang dapat menganalisis dan menambah baik prestasi komponen dalam sistem gantungan kenderaan.

2.2 SISTEM GANTUNGAN KENDERAAN

Sistem gantungan kenderaan adalah sistem utama dalam kenderaan yang berfungsi untuk meningkatkan keselesaan, keselamatan, serta kestabilan pemanduan. Fungsi utama sistem ini adalah untuk menyerap hentakan dan getaran yang terhasil daripada permukaan jalan yang tidak rata serta memastikan cengkaman roda pada jalan sentiasa optimum. Cengkaman roda yang baik adalah penting bagi memastikan kestabilan kenderaan, terutamanya semasa membelok atau ketika melalui permukaan jalan yang kasar (Gillespie, 2022). Mereka juga menyatakan bahawa sistem gantungan yang cekap dapat meningkatkan kawalan pemanduan dan mengurangkan risiko kemalangan yang disebabkan oleh kehilangan kestabilan kenderaan.

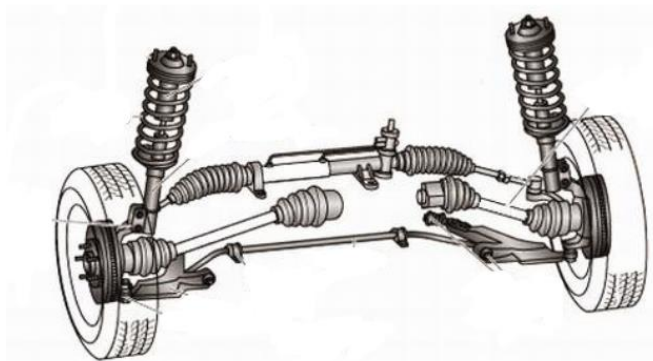


Rajah 2.2 Contoh sistem gantungan kereta

Sumber: Rangan (2020)

Sistem gantungan terdiri daripada beberapa komponen utama seperti pegas gegelung, penyerap hentak, lengan bawah gantungan, dan komponen pemindah. Pegas gegelung berfungsi untuk menyerap tenaga hentakan yang terhasil daripada pergerakan roda apabila melalui permukaan yang tidak rata, manakala penyerap hentak bertindak untuk mengurangkan getaran yang berlaku selepas tenaga diserap oleh pegas. Lengan

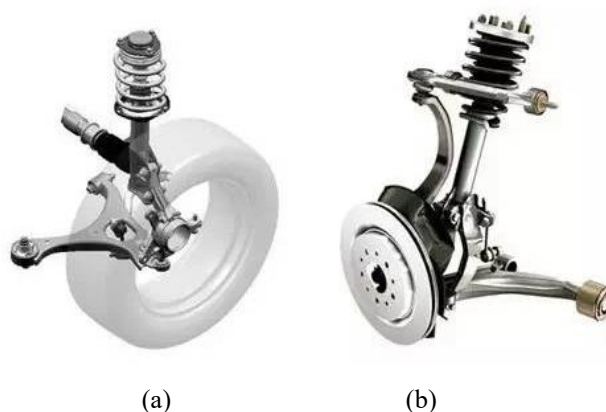
bawah gantungan pula berperanan menghubungkan roda dengan casis kenderaan, membolehkan pergerakan roda yang fleksibel serta mengekalkan kestabilan. Selain itu, komponen pemindah membantu dalam memindahkan beban secara seragam ke seluruh sistem gantungan, memastikan setiap bahagian berfungsi dengan baik (Smith et al., 2020).



Rajah 2.3 Skematik untuk sistem gantungan kereta

Sumber: Abolorunke (2016)

Terdapat dua jenis sistem gantungan kenderaan utama yang digunakan dalam kenderaan, iaitu sistem gantungan bebas dan sistem gantungan tidak bebas. Sistem gantungan bebas membolehkan setiap roda bergerak secara individu tanpa mempengaruhi roda yang lain. Contohnya, sistem MacPherson dan sistem *double-wishbone suspension* adalah dua jenis sistem gantungan bebas yang sering digunakan dalam kenderaan penumpang kerana ia menawarkan keselesaan yang lebih baik dan prestasi yang lebih stabil (Gillespie, 2022). Sebaliknya, sistem gantungan tidak bebas seperti gandar tegar menyambungkan kedua-dua roda pada satu paksi, menyebabkan pergerakan satu roda mempengaruhi roda yang lain. Sistem ini sering digunakan dalam kenderaan berat seperti trak dan lori kerana ia memberikan ketahanan dan kekuatan yang lebih tinggi berbanding sistem gantungan bebas (Rajamani, 2012).



Rajah 2.4 Jenis sistem gantungan kenderaan: (a) sistem MacPherson,
(b) sistem *double-wishbone suspension*

Sumber: Taizhou Shuangyi Auto Bahagian Co.,Ltd (2023)

Namun, sistem gantungan juga berdepan cabaran besar, terutamanya kegagalan akibat fenomena lesu. Lesu berlaku apabila komponen sistem gantungan terdedah kepada beban mekanikal yang berulang-ulang dalam tempoh masa tertentu. Beban ini boleh menyebabkan pembentukan retakan mikro setempat pada bahan atau komponen, yang seterusnya membawa kepada kegagalan struktur secara keseluruhan. Penyelidikan oleh Zhou et al. (2021) menunjukkan bahawa faktor utama yang menyumbang kepada kegagalan lesu termasuk kualiti bahan, reka bentuk komponen, dan intensiti beban yang dikenakan semasa operasi kenderaan.

Bagi mengatasi masalah ini, kajian telah dijalankan untuk meningkatkan daya tahan sistem gantungan. Salah satu penyelesaian ialah penggunaan bahan komposit seperti gentian karbon dan aloi aluminium yang mempunyai ketahanan tinggi terhadap lesu. Penyelidikan oleh Ahmed et al. (2020) mendapati bahawa bahan komposit ini bukan sahaja meningkatkan ketahanan tetapi juga mengurangkan berat kenderaan, yang seterusnya meningkatkan kecekapan bahan api. Di samping itu, teknologi sensor pintar yang digunakan untuk memantau keadaan sistem gantungan secara masa nyata telah membolehkan pengesanan awal kerosakan sebelum ia menjadi lebih serius (Bianchi et al., 2022).

Selain itu, sistem gantungan kenderaan moden kini dilengkapi dengan teknologi canggih seperti gantungan aktif dan gantungan adaptif. Gantungan aktif menggunakan kawalan elektronik untuk menyesuaikan parameter operasi berdasarkan keadaan jalan

dan gaya pemanduan, manakala gantungan adaptif pula menyesuaikan tahap redaman secara automatik untuk memberikan keselesaan maksimum kepada pengguna. Penyelidikan oleh Wang et al. (2023) menunjukkan teknologi gantungan adaptif mampu mengurangkan getaran sehingga 30% berbanding sistem gantungan konvensional.

Tambahan lagi, pendekatan berbantu kecerdasan buatan semakin popular dalam analisis sistem gantungan. Kajian oleh Tan et al. (2022) mendapati bahawa algoritma pembelajaran mesin dapat menganalisis pola data isyarat terikan dengan lebih cekap dan meramalkan kegagalan komponen dengan ketepatan yang lebih tinggi. Penggunaan teknologi ini bukan sahaja meningkatkan kebolehpercayaan sistem gantungan tetapi juga mengurangkan kos penyelenggaraan jangka panjang.

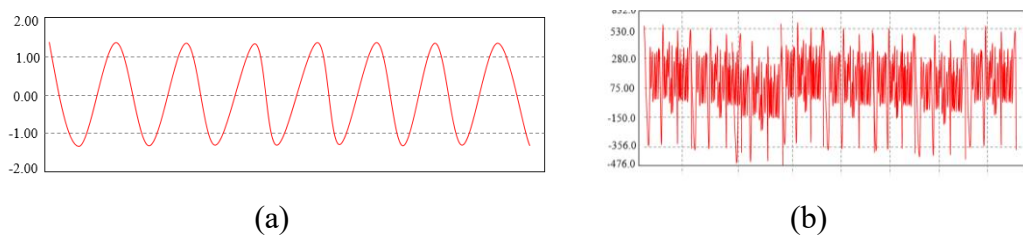
2.3 PENILAIAN HAYAT LESU

Hayat lesu merujuk kepada jangka masa atau bilangan kitaran beban yang boleh diterima oleh komponen sebelum ia mengalami kegagalan akibat pembebanan berulang. Dalam konteks sistem gantungan kenderaan, komponen seperti pegas gegelung dan lengan bawah gantungan sering terdedah kepada beban dinamik berulang apabila kenderaan bergerak melintasi pelbagai permukaan jalan (Suresh, 2018). Beban yang berulang ini menyebabkan pembentukan kerosakan mikroskopik pada bahan komponen, yang boleh menyebabkan retakan dan akhirnya kepada kegagalan struktur. (Manson & Halford, 2020). Kebolehtahanan pegas dan lengan bawah gantungan terhadap lesu adalah penting dalam memastikan kestabilan dan keselesaan pemanduan (Fujii et al., 2016). Reka bentuk yang baik dan pemilihan bahan yang tepat, seperti aloi titanium atau komposit, dapat meningkatkan ketahanan komponen terhadap kegagalan, mengurangkan kos penyelenggaraan, dan meningkatkan keselamatan kenderaan (Suresh, 2018; Fujii et al., 2016).

2.3.1 Fenomena Umum Hayat Lesu

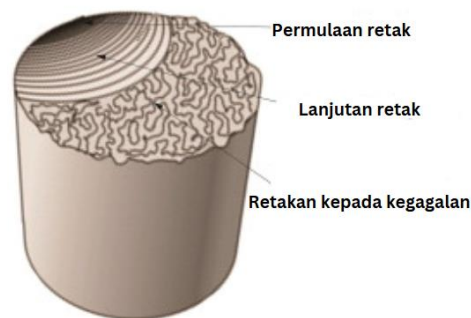
Fenomena lesu adalah salah satu cabaran utama dalam reka bentuk komponen mekanikal, terutamanya dalam industri automotif, kerana ia berlaku di bawah beban berulang. Dalam sistem gantungan kenderaan, komponen seperti pegas gegelung dan

lengan bawah gantungan kerap terdedah kepada tegasan dinamik semasa pemanduan, terutama apabila melalui permukaan jalan yang kasar. Kegagalan akibat lesu bukan sahaja menjejaskan prestasi kenderaan, tetapi juga boleh membawa risiko keselamatan yang serius kepada penumpang (Suresh, 2018). Mekanisme lesu pada bahan-bahan logam pada asasnya dikaitkan dengan kegelinciran kitaran dan penukaran menjadi permulaan retak dan lanjutan retak. Perincian mekanisme bergantung kepada jenis bahan (Morgado, 2016).



Rajah 2.5 Data terikan: (a) Amplitud malar, (b) Amplitud tidak malar

Sumber: Graspengineering (2021)



Rajah 2.6 Permukaan keretakan akibat lesu

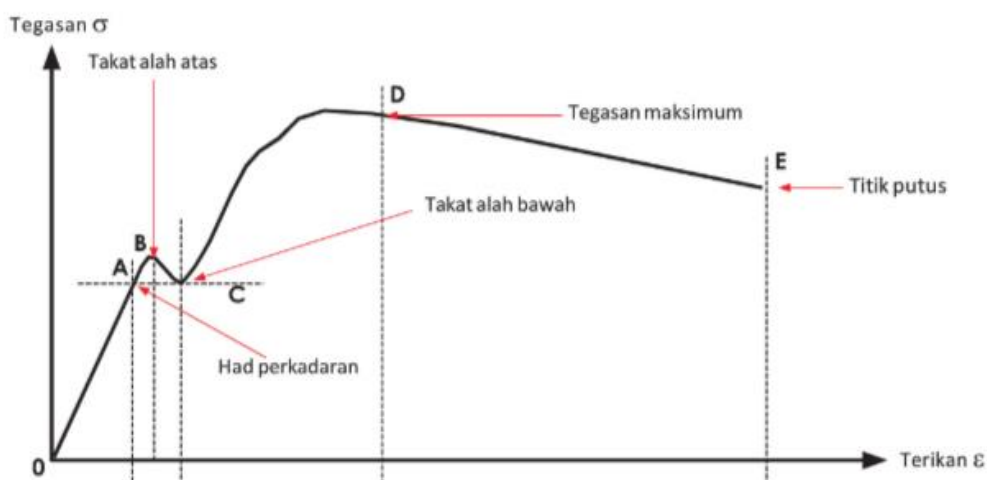
Sumber: Bai & Bai (2014)

Hayat lesu adalah aspek penting dalam analisis kegagalan bahan, terutama apabila komponen berada di bawah beban berulang. Tegasan, terikan, dan pembentukan retakan adalah parameter utama yang menentukan jangka hayat bahan dan struktur. Setiap parameter ini berfungsi sebagai asas untuk memahami bagaimana bahan bertindak balas terhadap beban berulang sehingga mencapai tahap kegagalan.

Tegasan merujuk kepada daya yang dikenakan ke atas unit luas bahan akibat beban luaran, menggunakan formula:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \dots(2.1)$$

yang mana F adalah daya dan A adalah luas permukaan. Dalam konteks hayat lesu, tegasan yang dikenakan secara berulang boleh menyebabkan lesu pada bahan. Tegasan maksimum dan julat tegasan memainkan peranan penting dalam menentukan bilangan kitaran sebelum kegagalan berlaku. Menurut Schijve (2009), julat tegasan yang besar meningkatkan kadar pertumbuhan retakan, menyebabkan hayat lesu menjadi lebih pendek.



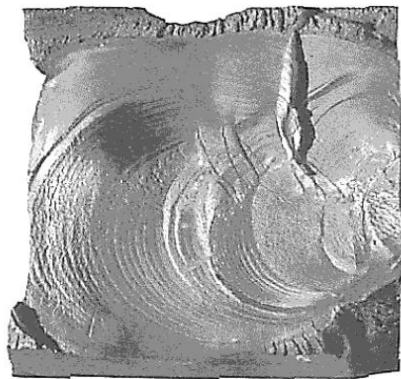
Rajah 2.7 Graf tegasan melawan terikan

Selain itu, terikan merujuk kepada perubahan relatif dalam dimensi bahan akibat tegasan yang dikenakan. Terikan (ϵ) dihitung dengan formula:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \dots(2.2)$$

yang mana ΔL adalah perubahan panjang bahan dan L adalah panjang asalnya. Terikan terbahagi kepada terikan elastik, yang berlaku dalam had keanjalan bahan, dan terikan plastik, yang melibatkan ubah bentuk kekal. Dalam analisis hayat lesu, terikan plastik

sering menjadi penyumbang utama kegagalan, terutama bagi bahan yang terdedah kepada beban rendah dengan ubah bentuk plastik yang signifikan. Kajian oleh Morrow (1968) menunjukkan bahawa analisis berasaskan terikan adalah lebih relevan dalam memahami mekanisme kegagalan bahan di bawah keadaan ini. Pembentukan retakan pula berlaku apabila tegasan dan terikan melebihi kekuatan bahan, menyebabkan kecacatan mikro yang berkembang secara beransur-ansur hingga mencapai tahap kegagalan struktur.



Rajah 2.8 Kecacatan mikro

Sumber: Ekberg dan Marais (2000)

Mekanik retakan memainkan peranan penting dalam menganalisis kegagalan ini, dengan faktor intensiti tegasan (K) menjadi parameter utama untuk menilai retakan, dengan formula adalah seperti berikut:

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad \dots(2.3)$$

yang mana a adalah panjang retakan, digunakan untuk menentukan daya yang mendorong pertumbuhan retakan. Kajian oleh Paris dan Erdogan (1963) mencadangkan hubungan matematik antara kadar perambatan retak ($\frac{da}{dN}$) dan julat faktor keamatan tegasan (ΔK) melalui persamaan Paris:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \dots(2.4)$$

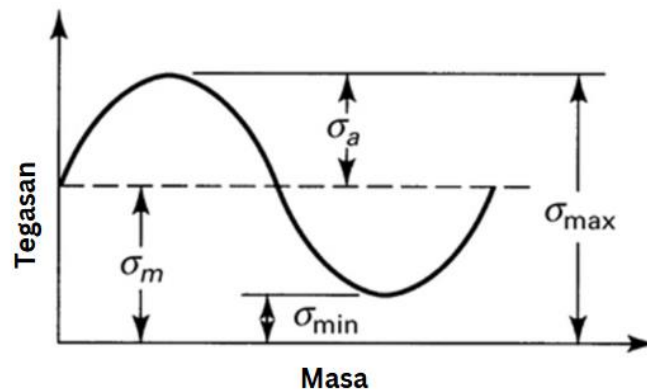
yang mana C dan m adalah pemalar bahan yang bergantung kepada sifat bahan tersebut

dan $\frac{da}{dN}$ ialah kitaran perambatan retak. Retak yang berkembang lebih pantas pada bahan dengan tegasan tinggi boleh menyebabkan kegagalan awal, mengurangkan hayat lesu (Zubairi et al., 2017).

Untuk menilai keupayaan bahan, formula model Goodman digunakan sebagai medium analisis utama. Formula ini menyatakan hubungan antara tegasan purata (σ_m) dan tegasan amplitud (σ_a) untuk menentukan sama ada sesuatu bahan mengalami kegagalan atau tidak di bawah beban gabungan. Formula model Goodman dinyatakan seperti berikut:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad \dots(2.5)$$

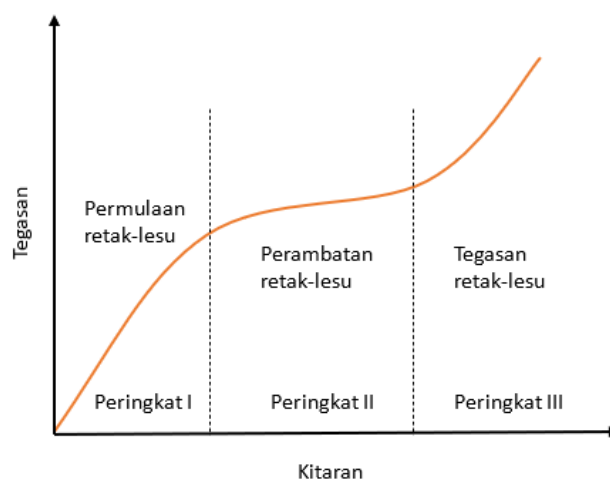
yang mana σ_f ialah kekuatan lesu bahan, dan σ_u ialah kekuatan tegangan tetap. Formula ini berguna dalam aplikasi kejuruteraan seperti automotif, di mana bahan sering terdedah kepada tegasan siklik dan purata secara serentak. Dowling (2013) menyatakan bahawa pendekatan ini sesuai untuk logam, menjadikannya alat penting dalam reka bentuk komponen automotif yang selamat dan tahan lama.



Rajah 2.9 Rajah min tegasan

Sumber: Fujimoto (2023)

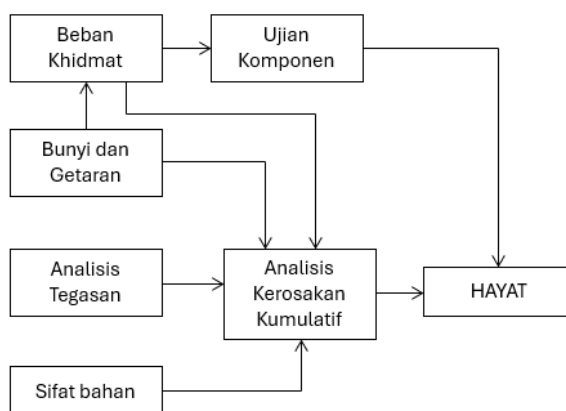
Fenomena lesu melibatkan proses fizikal yang kompleks yang berlaku dalam tiga peringkat utama. Peringkat pertama ialah permulaan retak-lesu, di mana tegasan berulang menghasilkan canggaan plastik pada kawasan tertentu bahan sehingga terbentuknya retakan mikro. Seterusnya, pada peringkat perambatan retak-lesu, retakan tersebut mula berkembang melalui struktur bahan secara berperingkat, dengan setiap kitaran beban menyebabkan penambahan saiz retakan. Akhir sekali, apabila retakan mencapai saiz kritikal, bahan mengalami kegagalan akhir, yang berlaku secara mendadak dan biasanya tanpa amaran awal. Proses ini dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti keamatan tegasan, sifat bahan, dan persekitaran operasi (Stephens et al., 2022). Proses pembentukan retak-lesu digambarkan dalam Rajah 2.10.



Rajah 2.10 Proses pembentukan retak-lesu

Sumber: Gao et al., (2021)

Reka bentuk komponen memainkan peranan dalam menentukan daya tahan terhadap lesu. Pengoptimuman reka bentuk seperti penggunaan bahan berketahanan tinggi, pengurangan keamatan tegasan, dan perubahan geometri komponen sering digunakan untuk meningkatkan daya tahan komponen terhadap lesu. Sebagai contoh, pelarasan pada reka bentuk sambungan las dan penggunaan bahan seperti keluli atau gentian karbon boleh memanjangkan hayat lesu komponen automotif (Dowling, 2019). Reka bentuk untuk lesu merupakan salah satu bentuk kegagalan mekanikal yang sering berlaku dalam aplikasi praktikal. Oleh itu, aspek lesu menjadi faktor penting dalam proses reka bentuk bagi pelbagai jenis struktur, termasuk pesawat, jambatan, kereta api, sistem gantungan automotif, dan rangka kenderaan. Dalam struktur-struktur ini, beban kitaran yang dialami dapat mengakibatkan kegagalan akibat lesu jika reka bentuknya tidak memenuhi kriteria yang ditetapkan. Proses asas dalam reka bentuk untuk lesu digambarkan dalam Rajah 2.11.



Rajah 2.11 Unsur-unsur asas proses reka bentuk lesu

Sumber: Kamal dan Rahman, (2015)

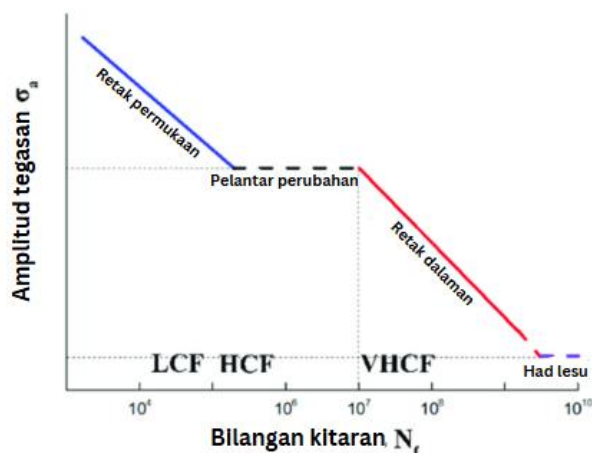
Berdasarkan Rajah 2.11 beban khidmat adalah elemen pertama yang menjadi asas dalam reka bentuk lesu kerana ia menentukan beban sebenar yang dialami oleh komponen semasa operasi. Maklumat ini penting untuk memahami kesan tegasan pada komponen. Ujian komponen pula bertujuan menguji keupayaan komponen bagi menahan beban, sekali gus membantu menentukan sama ada reka bentuk tersebut memenuhi keperluan ketahanan lesu.

Seterusnya, bunyi dan getaran juga merupakan faktor penting dalam reka bentuk lesu kerana ia boleh mempercepatkan proses lesu pada bahan. Faktor ini perlu dianalisis untuk memastikan komponen direka agar tahan terhadap kesan bunyi dan getaran. Selain itu, analisis tegasan digunakan untuk mengenal pasti kawasan kritikal yang terdedah kepada tegasan tinggi. Hasil analisis ini membolehkan reka bentuk diperbaiki untuk mengurangkan risiko lesu pada kawasan tersebut. Pemilihan bahan juga memainkan peranan penting dalam reka bentuk lesu, seperti yang ditunjukkan dalam elemen sifat bahan. Bahan yang dipilih harus mempunyai ciri-ciri yang sesuai, seperti kekuatan yang tinggi dan keupayaan untuk menahan beban berulang tanpa mengalami kegagalan. Tambahan pula, analisis kerosakan kumulatif membantu memahami bagaimana kerosakan terkumpul dari masa ke masa akibat pendedahan kepada beban berulang. Proses ini memastikan reka bentuk mampu mengelakkan kegagalan awal. Akhir sekali, elemen hayat menjadi matlamat utama reka bentuk lesu, iaitu untuk memastikan komponen dapat mencapai jangka hayat yang ditetapkan tanpa kegagalan akibat lesu.

Dalam kajian hayat lesu, analisis kerosakan memainkan peranan penting untuk mengenal pasti mekanisme dan faktor kegagalan. Analisis ini melibatkan penggunaan teknik yang canggih seperti imbasan mikroskop elektron (SEM) untuk mengesan retakan mikro dan pengujian sifat bahan yang berubah akibat tegasan berulang. Terdapat tiga kaedah yang boleh digunakan untuk menentukan hayat lesu sesuatu struktur komponen. Tiga kaedah tersebut adalah kaedah hayat tegasan ($S-N$), kaedah hayat terikan ($\epsilon-N$), dan kaedah linear-elastik keretakan mekanik (LEFM) (Djoković et al. 2018). Data yang diperoleh daripada analisis ini sering digunakan untuk membangunkan model anggaran hayat lesu yang lebih tepat, seperti kaedah hayat tegasan ($S-N$) atau hayat terikan ($\epsilon-N$), yang membantu meramalkan tempoh hayat komponen sebelum kegagalan berlaku (Manson & Halford, 2020).

Proses hayat lesu boleh dibahagikan kepada tiga domain utama berdasarkan jumlah kitaran beban iaitu kitaran rendah lesu (*low cycle fatigue*, LCF), kitaran tinggi lesu (*high cycle fatigue*, HCF), dan kitaran sangat tinggi lesu (*very high cycle fatigue*, VHCF). Dalam domain LCF, kegagalan berlaku pada jumlah kitaran rendah, biasanya di bawah 10^4 kitaran, di mana bahan mengalami ubah bentuk plastik yang penting

akibat tegasan yang tinggi. Sebagai contoh, lengan bawah gantungan sering terdedah kepada LCF apabila kenderaan melalui permukaan jalan yang tidak rata, yang menyebabkan beban hentakan tinggi pada komponen tersebut. Dalam kajian oleh Stephens et al. (2022), didapati bahawa rekabentuk geometri yang baik dan pemilihan bahan yang sesuai mampu mengurangkan risiko kegagalan akibat LCF.



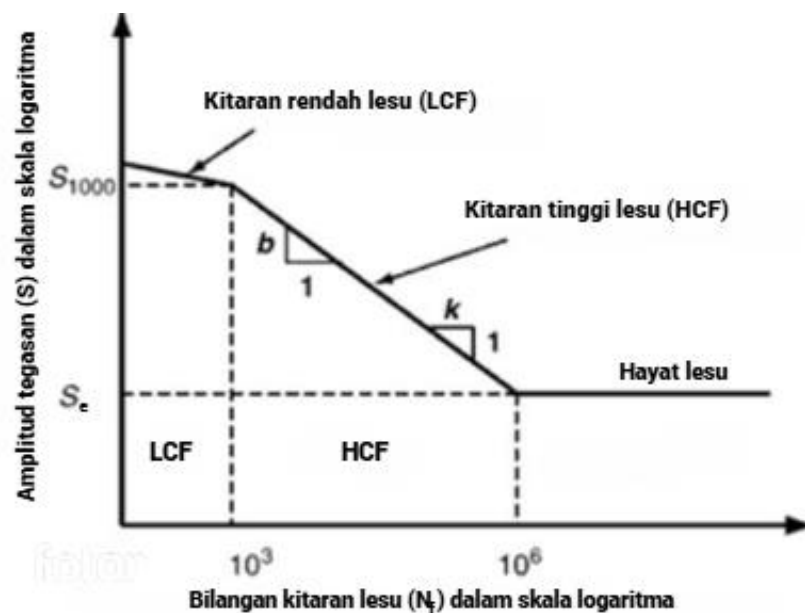
Rajah 2.12 Skematik bagi lengkung S-N dua langkah (tegasan-bilangan kitaran).
LCF, HCF, VHCF menunjukkan lesu kitaran rendah, tinggi, dan sangat tinggi

Sumber: He et al. (2022)

HCF pula berlaku dalam julat julat 10^4 hingga 10^7 kitaran, di mana tegasan yang dikenakan adalah sederhana dan menyebabkan perubahan elastik yang dominan. Komponen seperti pegas gegelung, yang berfungsi menyerap hentakan semasa pemanduan, sering terdedah kepada HCF. Kajian oleh Dowling (2019) menunjukkan bahawa analisis hayat tegasan (S-N) digunakan secara meluas untuk memahami tingkah laku bahan dalam domain ini, dengan tumpuan kepada kekuatan tegasan dalam julat elastik. Sebaliknya, VHCF melibatkan lebih daripada 10^7 kitaran, di mana bahan mengalami beban rendah yang berulang dalam tempoh masa yang panjang. Kegagalan akibat VHCF sering dikaitkan dengan pembentukan retakan mikro dari kotoran atau kelemahan dalaman bahan. Penyelidikan oleh Bathias (2011) menunjukkan bahawa komponen automotif seperti penyerap hentakan dan turbin enjin sering terdedah kepada VHCF, terutama dalam kenderaan yang beroperasi pada kelajuan tinggi untuk tempoh masa yang panjang.

Penyelidikan tentang hayat lesu juga melibatkan kajian terhadap proses fizikal lesu, analisis kerosakan, anggaran hayat lesu, dan kajian ketahanan struktur. Proses fizikal lesu melibatkan pembentukan retakan mikro, perkembangan retakan, dan akhirnya kegagalan struktur. Kajian oleh Manson dan Halford (2020) mendapati bahawa model hayat terikan adalah lebih sesuai untuk meramalkan ubah bentuk plastik pada peringkat awal LCF. Analisis kerosakan pula memanfaatkan teknologi moden seperti mikroskop elektron untuk mengesan perubahan mikrostruktur dalam bahan akibat lesu.

Dalam jangka hayat antara 10 hingga 10^7 kitaran beban terhadap struktur akan menyebabkan berlakunya kegagalan lesu. Rajah 2.3 menggambarkan kitaran hayat lesu dalam skala logaritma bagi paksi x dan paksi y. Lekungan plot boleh dibahagikan kepada tiga kawasan iaitu, kitaran rendah lesu (LCF), kitaran tinggi lesu (HCF) dan kitaran sangat tinggi lesu (VHCF) bergantung kepada bilangan kitaran bebanan. LCF mempunyai amplitud tegasan yang tinggi dalam bilangan kitaran lesu yang rendah. Dalam LCF, perubahan bentuk bagi plastik berlaku disebabkan amplitud tegasan yang tinggi yang dapat menyebabkan ubah bentuk dalam struktur (Goedel et al. 2018). Di samping itu, apabila komponen mengalami bebanan amplitud yang rendah, kitaran tinggi lesu berlaku dan ubah bentuk berlaku dalam julat elastik.



Rajah 2.13 Kitaran hayat lesu dalam skala logaritma

Sumber: Goedel et al. (2018)

Kajian terkini dalam bidang hayat lesu juga telah memanfaatkan teknologi moden seperti kecerdasan buatan untuk meningkatkan pemahaman terhadap pola kegagalan. Kajian oleh Tan et al. (2022) menunjukkan bahawa algoritma pembelajaran mesin dapat meramalkan kegagalan komponen dengan ketepatan yang tinggi berdasarkan data isyarat tegasan yang dikumpul semasa pemanduan. Selain itu, pemantauan keadaan secara masa nyata menggunakan penderia pintar membolehkan pengesanan awal kerosakan, memberikan peluang untuk tindakan pencegahan sebelum kegagalan kritikal berlaku.

Di samping itu, anggaran hayat lesu memainkan peranan penting dalam reka bentuk kejuruteraan untuk memastikan jangka hayat komponen memenuhi keperluan operasi. Penyelidikan oleh Wang et al. (2021) menunjukkan bahawa penggunaan aloi aluminium dan gentian karbon dapat meningkatkan daya tahan bahan terhadap lesu dalam pelbagai domain kitaran. Malah, teknologi kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) kini digunakan untuk meramal kegagalan lesu berdasarkan data operasi masa nyata, seperti yang dibuktikan oleh kajian Tan et al. (2022).

2.3.2 Analisis Hayat Terikan

Kaedah analisis hayat terikan merupakan pendekatan penting dalam memahami daya tahan bahan terhadap beban dinamik yang berulang, khususnya dalam aplikasi industri automotif. Berbanding kaedah hayat tegasan, analisis hayat terikan memberi fokus kepada hubungan antara regangan dan kitaran sehingga menyebabkan kegagalan, menjadikannya lebih sesuai untuk komponen yang mengalami beban tinggi atau canggaaan plastik. Pendekatan ini biasanya menggunakan model hayat terikan (ϵ - N), yang memetakan amplitud tegasan terhadap jumlah kitaran hayat dalam skala logaritma. Dowling (2019) menekankan kepentingan analisis ini dalam mengkaji komponen seperti pegas gegelung dan lengan bawah gantungan, yang terdedah kepada beban dinamik ketika melalui permukaan jalan yang berbeza.

Kaedah analisis hayat terikan mula diperkenalkan melalui kajian Coffin dan Manson pada tahun 1954 (Sornette, Magnin, & Brechet, 1992). Mereka membangunkan persamaan empirikal yang menjelaskan hubungan antara amplitud terikan plastik dengan hayat lesu. Dalam kajian ini, didapati bahawa komponen yang mengalami

amplitud tegasan lebih tinggi mempunyai jangka hayat yang lebih pendek. Kajian Morrow (1965) pula memperkenalkan kesan tegasan purata ke dalam model ini, yang menambah baik ketepatan ramalan hayat lesu dalam aplikasi dunia sebenar. Tambahan pula, Smith et al. (2020) membangunkan model lanjutan yang menggabungkan faktor suhu dan kelajuan kitaran, di mana suhu tinggi didapati mempercepatkan pembentukan retakan mikro, manakala kelajuan kitaran yang tinggi meningkatkan kadar perkembangan retakan.

Proses analisis hayat terikan melibatkan beberapa langkah utama. Pertama, amplitud regangan diukur menggunakan alat seperti tolok terikan yang dipasang pada komponen. Data ini digunakan untuk memetakan hubungan regangan-kitaran menggunakan model matematik seperti persamaan Coffin-Manson atau lengkung tegasan-terikan berkitar. Seterusnya, pemerhatian mikrostruktur bahan dijalankan untuk mengesan pembentukan retakan mikro yang menjadi punca utama kegagalan bahan. Kajian mikrostruktur seperti yang dijalankan oleh Stephens et al. (2022) menunjukkan bahawa kekotoran, saiz butiran, dan kandungan karbon dalam bahan mempengaruhi ketahanan terhadap lesu.

Dalam konteks industri automotif, analisis hayat terikan digunakan secara meluas untuk meningkatkan ketahanan dan prestasi komponen kritikal. Sebagai contoh, pegas gegelung dalam sistem gantungan diperiksa menggunakan pendekatan hayat terikan untuk memastikan ia mampu bertahan dalam pelbagai keadaan pelaksanaan. Penyelidikan oleh Ahmed et al. (2020) menunjukkan bahawa penggunaan bahan komposit seperti gentian karbon dapat meningkatkan hayat lesu sebanyak 30% berbanding bahan keluli konvensional. Selain itu, simulasi menggunakan perisian unsur terhingga (*finite element analysis*, FEA) seperti yang dilakukan oleh Zhou et al. (2021), membolehkan pengenalpastian zon tegasan tinggi pada komponen, yang sering menjadi lokasi utama retakan mikro.

Penerapan analisis hayat terikan perlu menerangkan tindak balas bahan kepada terikan elastik - kitaran plastik dan hubungan antara terikan dan hayat lesu untuk memulakan pemecahan. Ramalan hayat lesu untuk analisis hayat terikan biasanya digunakan dengan model kehidupan terikan kerosakan lesu. Rintangan lesu logam

boleh dicirikan oleh lengkung hayat terikan. Lengkungan ini berasal dari spesimen makmal yang diuji di bawah kawalan ketegangan yang telah terbalik, Hubungan antara amplitud terikan $\frac{\Delta\varepsilon}{2}$ dan pembalikan kepada kitaran kegagalan $2N_f$, dinyatakan dalam Persamaan (2.6). (Denefeld et al. 2014), (Zhu et al. 2014). Hayat ketegangan Coffin-Manson ditentukan secara matematik seperti dalam persamaan (2.6),

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad \dots(2.6)$$

yang mana hayat lesu $2N_f$, ialah pekali kekuatan lesu, E ialah modulus Young, b ialah eksponen kekuatan lesu, ε'_f ialah pekali kemuluran lesu; dan c ialah eksponen kemuluran lesu. Dalam mereka bentuk ketahanan, kehadiran tegasan biasa bukan tegasan tekanan normal boleh mempengaruhi kelakuan lesu bahan-bahan yang disebabkan oleh tekanan tegangan normal atau mampatan. Model yang biasa digunakan dalam industri kenderaan darat adalah daripada Morrow dan Smith, Watson, dan Topper (SWT).

Dalam kajian pencirian isyarat terikan lesu dan kerosakan sistem penggantung automobil oleh Zakaria et al. (2018), model kerosakan yang telah digunakan ialah model Morrow. Lengkungan hayat yang diubahsuai oleh Morrow untuk mewakili kesan tegasan min digunakan untuk menjalankan analisis lesu melalui analisis unsur terhingga. Morrow dapat mengubah nilai pekali kekuatan lesu dalam komponen elastik perhubungan tegasan-terikan untuk penilaian yang tepat (Wagare & Hundekari 2015). Morrow juga telah mencadangkan hubungan berikut apabila tegasan min dinyatakan dalam persamaan (2.7).

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad \dots(2.7)$$

Simbol ε_a mewakili jumlah amplitud terikan. persamaan (2.7) menunjukkan bahawa tegasan biasa bermakna diambil kira dengan mengubah sebahagian elastik lengkungan tegasan hayat dengan tegasan min. Manakala kerosakan lesu D untuk setiap kitaran boleh dikira dengan menggunakan persamaan berikut:

$$D = \frac{1}{N_f} \quad \dots(2.8)$$

Persamaan di atas merupakan kaedah awal retakan untuk meramal hayat lesu. Kaedah ini adalah ungkapan linear yang dicadangkan oleh Palmgren dan Miner (Chen et al. 2011) untuk menggabungkan kegagalan lesu. Smith, Watson, dan Topper mencadangkan satu lagi model tekanan utama yang dipanggil Smith-Watson-Topper (SWT) untuk pembetulan tekanan. Ia secara matematik ditakrifkan dalam persamaan (2.9).

$$\sigma_{max} \varepsilon_a E = (\sigma'_f)^2 (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f E (2N_f)^{b+c} \quad \dots(2.9)$$

yang mana σ_{max} mewakili tekanan maksimum. Dalam situasi lain Ramberg-Osgood mencirikan perilaku tegangan terikan kitaran komponen sebagai:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad \dots(2.10)$$

yang mana ε adalah jumlah tegangan, σ ialah tegangan, K' ialah pekali kekuatan kitaran dan n' ialah pemalar tegangan kitaran tegangan.

Ramberg-Osgood adalah satu prosedur yang terbaik untuk meramal hayat lesu satu komponen di atas had lesu khususnya untuk bahagian gantungan kereta. Pembebanan berulang adalah menentukan tempoh kitaran yang diperlukan untuk kegagalan secara lesu yang merupakan perkara utama dalam menganalisis bahagian yang dikenakan. Pengiraan kitaran menentukan nilai kerosakan lesu kumulatif kerana hayat lesu berkemungkinan berlaku secara terhingga ataupun tidak terhingga (Putra et al. 2014).

2.3.3 Kaedah Pengiraan Kitaran Lesu

Kaedah pengiraan kitaran merupakan pendekatan yang penting dalam analisis hayat lesu untuk mengenal pasti bilangan kitaran beban yang dialami oleh sesuatu bahan atau komponen. Proses ini memainkan peranan utama dalam memahami tingkah laku bahan apabila terdedah kepada beban berulang, terutama dalam aplikasi seperti automotif, di

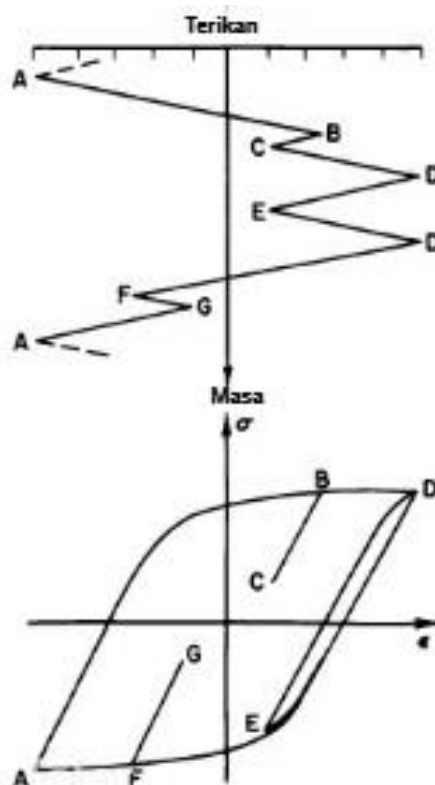
mana komponen seperti pegas gegelung dan lengan bawah gantungan sering mengalami beban dinamik. Salah satu kaedah pengiraan kitaran yang paling popular ialah kaedah pengiraan Rainflow yang diperkenalkan oleh Matsuishi dan Endo (1968). Kaedah ini membantu dalam mengenal pasti dan mengklasifikasikan amplitud beban dalam isyarat kompleks, menjadikannya sesuai untuk menganalisis beban dinamik seperti pergerakan kenderaan di atas permukaan jalan yang tidak rata (Matsuishi & Endo, 1968).

Kaedah pengiraan Rainflow berfungsi dengan mengenal pasti puncak dan lembah dalam isyarat beban, yang kemudiannya diklasifikasikan kepada kitaran lengkap dan separa. Kaedah ini memberikan data yang diperlukan untuk mengira kerosakan lesu menggunakan pendekatan Miner. Dalam pendekatan Miner, jumlah kerosakan dianggarkan berdasarkan nisbah bilangan kitaran sebenar kepada bilangan kitaran hingga kegagalan untuk setiap tahap tegasan. Persamaan asasnya adalah:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad \dots(2.11)$$

yang mana D ialah jumlah kerosakan, n_i adalah bilangan kitaran sebenar, dan N_i ialah bilangan kitaran sehingga kegagalan pada tahap tegasan tertentu. Apabila D mencapai atau melebihi 1, bahan dianggap telah gagal akibat kerosakan lesu (Fatemi & Yang, 1998).

Kaedah pengiraan Rainflow dilakukan berdasarkan tingkah laku tekanan terikan bahan yang digambarkan dalam Rajah 2.14. Oleh kerana bahan ubah bentuk dari titik A hingga B, ia mengikuti jalan yang digambarkan oleh keluk tegangan terikan kitaran. Pada titik B, beban dipantulkan dan bahan secara elastik dimungkah ke titik C. Apabila beban diambil semula dari C ke D, bahan yang secara elastik disusun ke titik B, di mana bahan tersebut diambil dari A ke B, dan perubahan bentuk terjadi di sepanjang laluan A-D seperti kejadian B-C tidak pernah berlaku.



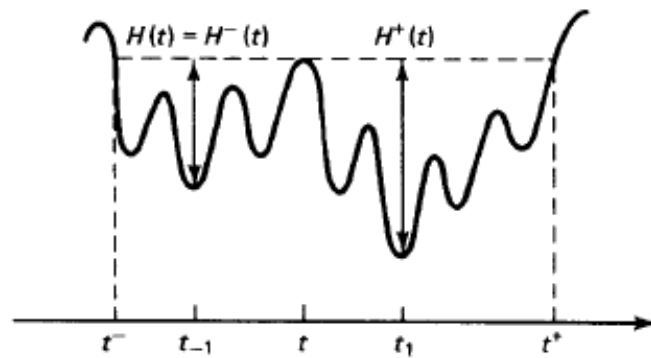
Rajah 2.14 Kitaran tegasan-terikan

Sumber: Downing and Socie (1982)

Kaedah pengiraan kitaran kaedah pengiraan Rainflow juga merupakan pendekatan utama dalam meramalkan hayat lesu bahan. Menurut kajian Rychlik (1987), diiktiraf secara meluas sebagai kaedah terbaik untuk menilai kitaran histeresis tertutup yang berkaitan dengan kegagalan lesu bahan logam. Walaupun begitu, struktur jujukan RFC yang rumit menyukarkan penggunaannya dalam analisis statistik amplitud kitaran, terutamanya untuk proses beban secara rawak. Oleh itu, Rychlik (1987) memperkenalkan pendekatan baharu yang dikenali sebagai kitaran tertinggi (*Toplevel-Up Cycle*, TUC), yang bertujuan untuk menyederhanakan proses sekaligus mengekalkan ketepatan hasil.

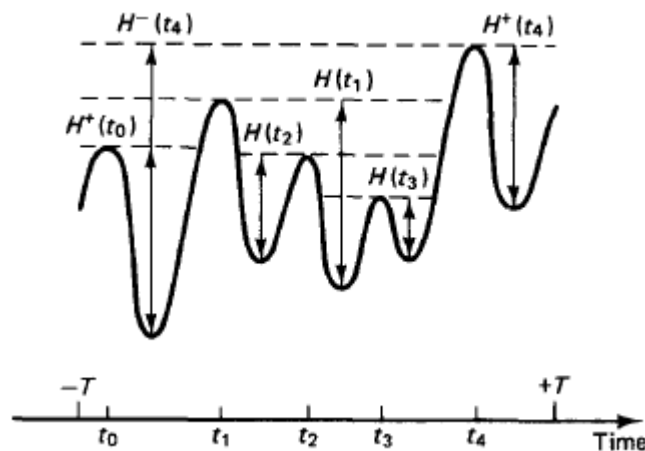
Pendekatan TUC didefinisikan dengan melampirkan kitaran penuh atau separuh kepada setiap puncak maksimum sebagai fungsi tegasan atau terikan. Dalam kaedah ini, amplitud kitaran penuh ditentukan sebagai nilai minimum antara dua jarak tegasan, iaitu jarak antara maksimum dengan minimum sebelumnya dan jarak antara maksimum dengan minimum selepasnya. Peraturan TUC juga menetapkan bahawa kitaran separuh

akan dihitung sekiranya maksimum berlaku di awal atau akhir tegasan. Dengan pendekatan ini, semua jarak tegasan yang relevan dalam bentuk kitaran tertutup atau separuh tertutup dapat dikesan dengan jelas, menjadikannya lebih sesuai untuk analisis statistik proses beban rawak.



Rajah 2.15 Ilustrasi kitaran toplevel-up, di mana amplitud $H(t)$ ditakrifkan sebagai nilai minimum antara $H^-(t)$ dan $H^+(t)$ berdasarkan kajian Rychlik (1987)

Sumber: Rychlik (1987)

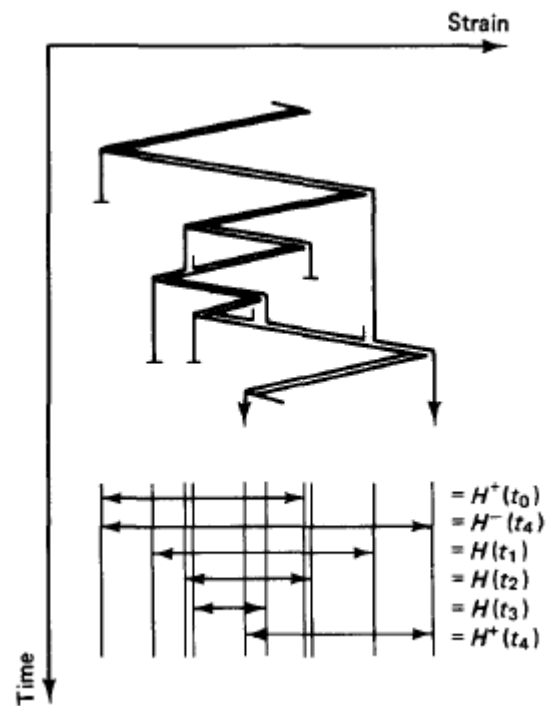


Rajah 2.16 Contoh kaedah pengiraan kitaran toplevel-up berdasarkan kajian Rychlik (1987)

Sumber: Rychlik (1987)

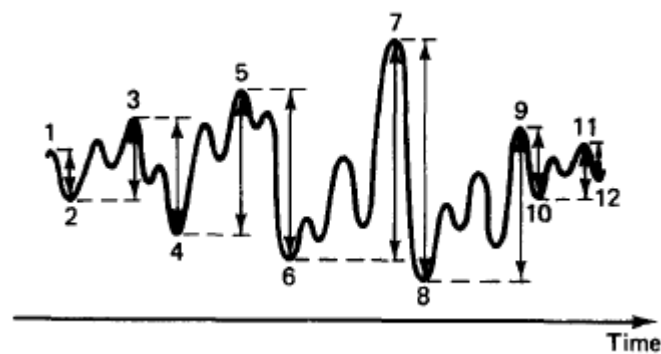
Kajian Rychlik (1987) ini menunjukkan bahawa kaedah TUC adalah setara dengan RFC dari segi bilangan kitaran yang dikira. Walau bagaimanapun, TUC lebih mesra statistik kerana ia tidak bergantung pada turutan data, dan prosesnya boleh dimulakan dari mana-mana titik maksimum. Selain itu, TUC bebas daripada arah masa, iaitu hasil pengiraannya tidak berubah walaupun urutan data diterbalikkan. Sebaliknya,

RFC memerlukan pengesanan turutan maksimum dan minimum yang belum membentuk kitaran tertutup, menjadikan struktur analisisnya lebih kompleks. TUC, sebaliknya, menggunakan pendekatan yang lebih ringkas dan intuitif, yang sesuai untuk aplikasi dalam proses beban rawak yang bersifat pegun.



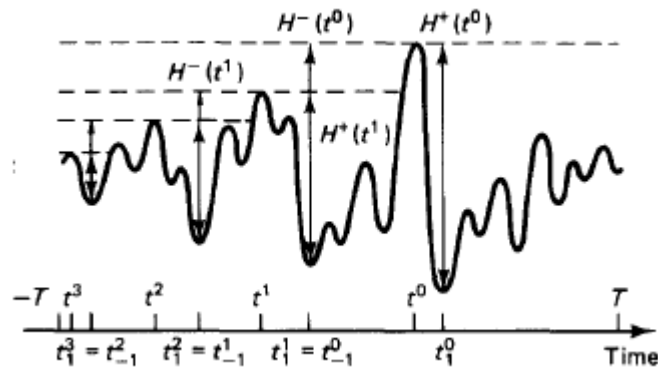
Rajah 2.17 Contoh penggunaan kaedah pengiraan kitaran *rainflow* yang diaplikasikan pada sejarah terikan seperti ditunjukkan dalam Rajah 2.6 berdasarkan kajian terdahulu.

Sumber: Rychlik (1987)



Rajah 2.18 Ilustrasi prosedur pengiraan kitaran separuh berdasarkan kajian terdahulu.

Sumber: Rychlik (1987)

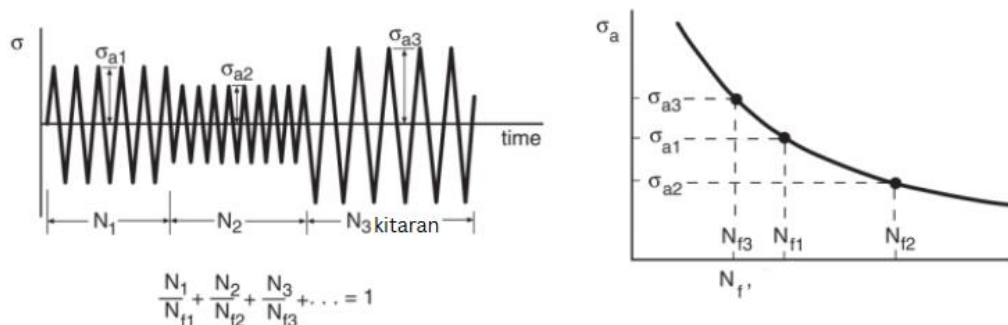


Rajah 2.19 Ilustrasi sejarah terikan yang digunakan untuk membuktikan kesetaraan antara kaedah pengiraan *Toplevel-Up Cycle (TUC)* dan *Rainflow Cycle Counting (RFC)* berdasarkan kajian terdahulu.

Sumber: Rychlik (1987)

2.3.4 Kerosakan Linear Palmgren-Miner

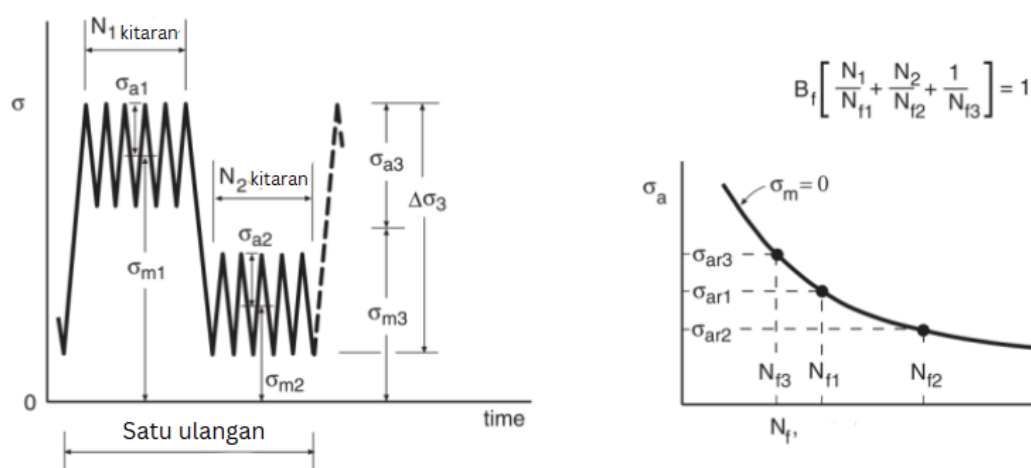
Kerosakan linear Palmgren-Miner, atau lebih dikenali sebagai Miner's Rule, adalah salah satu kaedah yang paling meluas digunakan untuk meramalkan hayat lesu bahan di bawah beban berulang. Kaedah ini berasaskan konsep kerosakan kumulatif, di mana setiap kitaran tegasan menyumbang kepada kerosakan bahan, dan jumlah kerosakan adalah hasil pengumpulan sumbangan ini. Pendekatan ini diperkenalkan oleh Palmgren pada tahun 1924 dan diperhalusi oleh Miner pada tahun 1945, dengan prinsip asas bahawa apabila jumlah kerosakan terkumpul mencapai nilai 1 (Miner, 1945).



Rajah 2.20 Ramalan hayat untuk sejarah tekanan berulang dengan peralihan tahap purata

Sumber: Hussein dan Kadhim (2020)

Kaedah ini amat berguna yang membolehkan jurutera meramalkan hayat komponen tanpa memerlukan analisis kompleks. Kajian oleh Dowling (2013) menunjukkan bahawa Miner's Rule adalah sesuai untuk analisis awal lesu bahan, terutama pada beban rendah, tetapi mungkin kurang tepat apabila diaplikasikan pada bahan yang mengalami tegasan tinggi atau beban kompleks. Walaupun kaedah ini mudah, ia mempunyai batasan. Miner's Rule mengabaikan interaksi antara kitaran tegasan yang berbeza dan tidak mengambil kira perubahan sifat bahan akibat sejarah beban. Sebagai contoh, kajian oleh Fatemi dan Yang (1998) menunjukkan bahawa dalam bahan logam tertentu, kaedah ini boleh memberikan ramalan konservatif atau terlalu optimistik bergantung pada keadaan tegasan. Untuk mengatasi kelemahan ini, kajian oleh Schijve (2009) mencadangkan pendekatan bukan linear yang mengambil kira perubahan sifat bahan sepanjang hayat lesu.

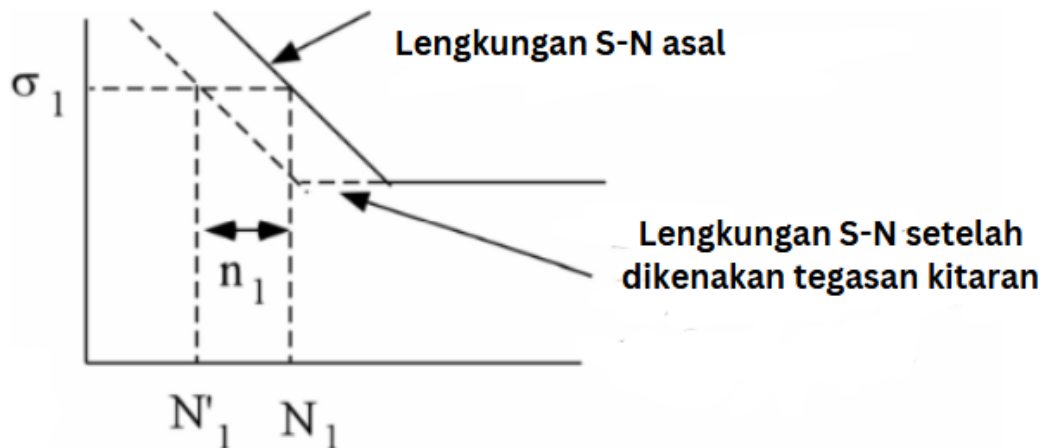


Rajah 2.21 Ramalan hayat untuk sejarah tekanan berulang dengan peralihan tahap purata

Sumber: Hussein dan Kadhim (2020)

Dalam konteks kejuruteraan automotif, Miner's Rule banyak digunakan untuk meramalkan kegagalan lesu pada komponen kritikal seperti pegas gegelung, lengan bawah gantungan, dan kerangka casis. Komponen ini sering terdedah kepada beban berulang semasa pemanduan, termasuk impak akibat permukaan jalan yang tidak rata. Kajian oleh Stephens et al. (2000) mendapati bahawa Miner's Rule dapat memberikan ramalan kegagalan yang mencukupi apabila disokong oleh data eksperimen. Tambahan

pula, aplikasi teknologi moden seperti simulasi komputer dan pembelajaran mesin telah membolehkan kaedah ini digabungkan dengan teknik canggih untuk meningkatkan ketepatan ramalan hayat lesu.



Rajah 2.22 Keterbatasan Palmgren-Miner bagi pengumpulan kegagalan adalah bebas daripada tahap tekanan

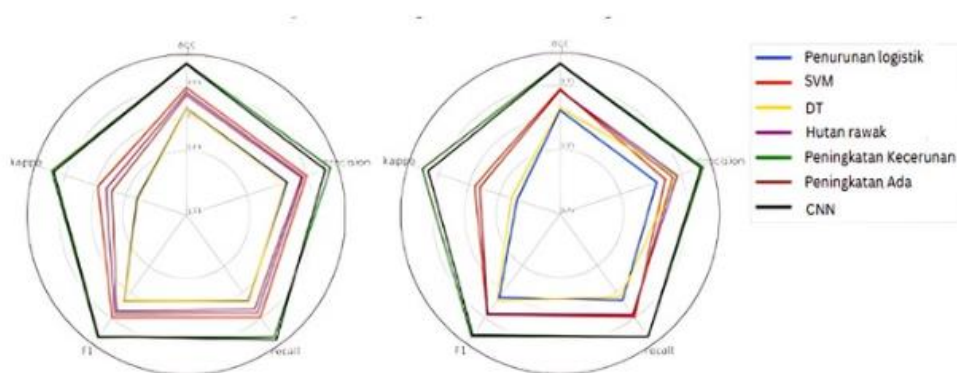
Sumber: Aerospace Engineering (2013)

2.3.5 Kaedah Analisis Carta Radar

Carta radar ialah alat visual yang berkesan untuk menganalisis dan membandingkan data variasi, yang menjadikannya relevan dalam pelbagai kajian seperti lesu pada bahan (Caporaso et al., 2020), prestasi sistem (Minnesota Department of Health, 2022.), dan analisis tingkah laku manusia (Miazek et al., 2024). Berdasarkan kajian yang terdahulu, carta radar digunakan untuk memvisualkan hubungan antara pelbagai parameter, membandingkan hasil kajian, dan mengenal pasti pola kritikal yang mempengaruhi keputusan penyelidikan.

Kajian oleh Torres et al. (2019) yang menggunakan carta radar untuk menilai prestasi model pembelajaran mesin dalam mengenal pasti gangguan pemanduan ketika membaca mesej. Parameter seperti ketepatan, sensitiviti, dan kadar kesalahan dibandingkan dalam pelbagai algoritma seperti *Convolutional Neural Networks* (CNN) dan *Gradient Boosting*. Carta radar memberikan gambaran visual yang mudah difahami tentang kelebihan setiap algoritma, serta menunjukkan model terbaik bagi mengesan

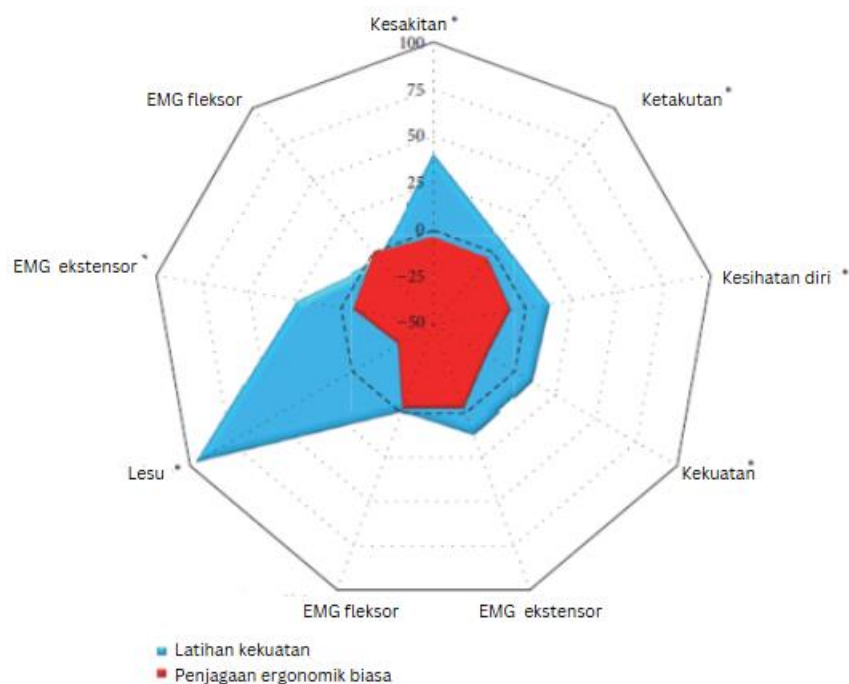
sebarang halangan. Selain itu, carta radar digunakan untuk menilai prestasi penderia seperti meter pecut, giroskop, dan magnetometer, yang memaparkan bagaimana setiap penderia menyumbang kepada pengesanan gangguan pemanduan. Hasil kajian menunjukkan keupayaan carta radar untuk menganalisis parameter kompleks secara serentak.



Rajah 2.23 Carta radar bagi fasa ujian (kiri) dan fasa pengesahan (kanan) berdasarkan kajian terdahulu

Sumber: Torres, Ohashi, dan Pessin (2019)

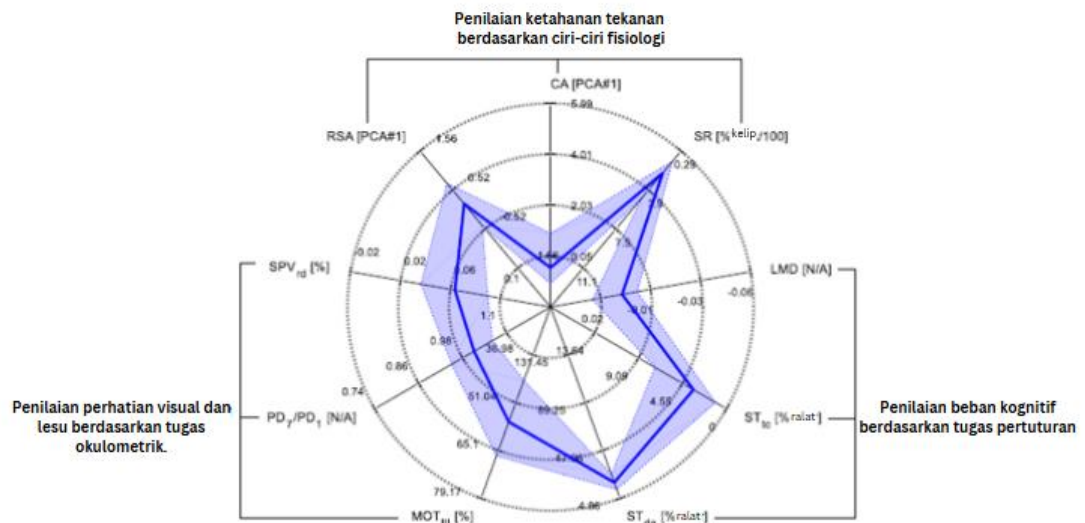
Dalam kajian Sundstrup et al., (2016), carta radar digunakan untuk menilai kesan latihan kekuatan terhadap daya tahan otot dan persepsi kesihatan. Parameter seperti daya tahan otot, intensiti kesakitan, dan keyakinan diri dibandingkan sebelum dan selepas latihan. Carta radar menunjukkan perubahan ketara selepas penyesuaian, dengan pola simetri yang mencerminkan peningkatan dalam daya tahan dan penurunan tahap kesakitan. Penggunaan carta radar dalam kajian ini memudahkan penyelidik bagi memahami interaksi antara parameter kesihatan dan daya tahan lesu secara visual dan komprehensif.



Rajah 2.24 Carta radar yang merumuskan perubahan intervensi (% perubahan) untuk pemboleh ubah utama selepas latihan kekuatan (ruang biru yang diliputi) dan penjagaan ergonomik biasa (ruang merah yang diliputi). Garis putus-putus hitam mewakili tiada perubahan. Pemboleh ubah disusun mengikut arah jam: (1) intensiti kesakitan tangan/pergelangan tangan, (2) ketakutan yang dielakkan, (3) kesihatan diri yang dinilai sendiri, (4) kekuatan genggam tangan, (5) EMG ekstensor semasa MVC genggam tangan, (6) EMG fleksor semasa MVC genggam tangan, (7) masa hingga lesu, (8) EMG ekstensor semasa ujian lesu, (9) EMG fleksor semasa ujian lesu. * $P < 0.05$, berdasarkan kajian terdahulu

Sumber: Sundstrup, et al. (2016).

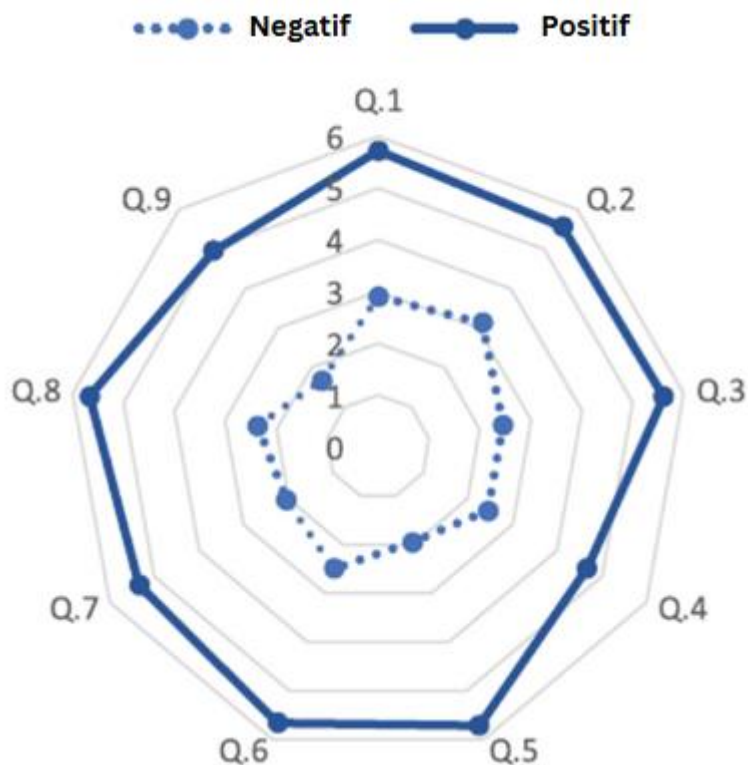
Seterusnya, kajian oleh Ćosić et al. (2019) menggunakan carta radar untuk menilai data multimodal seperti ciri fisiologi, pergerakan mata, dan corak suara dalam tugas kawalan trafik udara (ATC). Parameter seperti kadar denyutan jantung, perubahan diameter pupil, dan pola pergerakan mata dibandingkan menggunakan carta radar untuk mengenal pasti calon yang terbaik. Carta radar memaparkan pola unik yang membantu mengenal pasti keupayaan calon untuk bertindak balas di bawah tekanan. Kajian ini juga menunjukkan bahawa carta radar bukan sahaja memudahkan analisis perbandingan tetapi juga meningkatkan keberkesanan dalam membuat keputusan berdasarkan data bervariasi.



Rajah 2.25 Carta radar penilaian prestasi multimodal 3x3 berdasarkan kajian terdahulu

Sumber: Ćosić, et al. (2019)

Walaupun carta radar tidak digunakan secara langsung, kajian oleh AIEnzi et al. (2020) menunjukkan kesesuaian carta radar dalam memvisualisasikan data lesu yang disebabkan oleh sindrom Sjögren. Parameter seperti indeks lesu, tahap kesakitan, dan kekeringan dapat divisualkan menggunakan carta radar untuk menggambarkan kesan penyakit terhadap kualiti hidup pesakit. Carta radar mempermudah analisis hubungan antara parameter kesihatan, menjadikannya alat yang berguna untuk menilai perubahan klinikal.



Rajah 2.26 Grafik bagi nilai purata subskor tahap lesu dengan carta radar pada pesakit yang memperoleh skor positif (garis pepejal) dan negatif (garis putus-putus). Q1 Motivasi lebih rendah apabila letih, Q2 Senaman menyebabkan lesu, Q3 Mudah letih, Q4 Lesu mengganggu fungsi fizikal, Q5 Lesu menyebabkan masalah yang kerap, Q6 Lesu menghalang fungsi fizikal yang berterusan, Q7 Lesu mengganggu pelaksanaan tugas dan tanggungjawab tertentu, Q8 Lesu adalah antara simptom yang paling membataskan, Q9 Lesu mengganggu kerja, keluarga, atau kehidupan sosial, berdasarkan kajian terdahulu

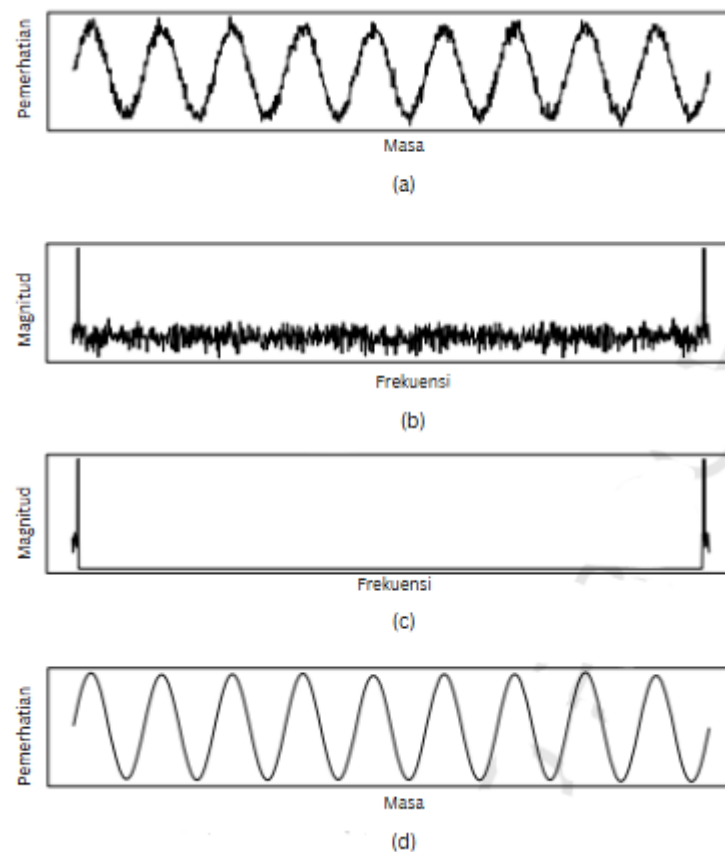
Sumber: AlEnzi, et al. (2020)

2.4 ANALISIS ISYARAT

Analisis isyarat merupakan kaedah utama dalam memahami tingkah laku sistem mekanikal dan mengenal pasti kerosakan melalui data yang diperoleh. Dalam kejuruteraan automotif, analisis ini digunakan untuk menilai tindak balas komponen seperti pegas gegelung dan lengan gantungan terhadap beban dinamik. Isyarat biasanya dianalisis dalam domain masa dan frekuensi untuk mengenal pasti pola kerosakan dan mengesan kegagalan awal (Oppenheim & Schaffer, 2010). Teknik seperti transformasi Fourier dan transformasi anak-gelombang sering digunakan untuk mengenal pasti ciri isyarat seperti amplitud, frekuensi domain, dan perubahan masa. Transformasi Fourier menukar isyarat ke domain frekuensi, manakala transformasi anak-gelombang membolehkan analisis isyarat tidak stabil dengan lebih tepat (Mallat, 2009). Kemajuan teknologi pintar seperti penderia dan algoritma pembelajaran mesin juga mempermudah pengumpulan data masa nyata dan pemprosesan yang lebih cekap (Ahmed et al., 2020).

2.4.1 Pengenalan isyarat

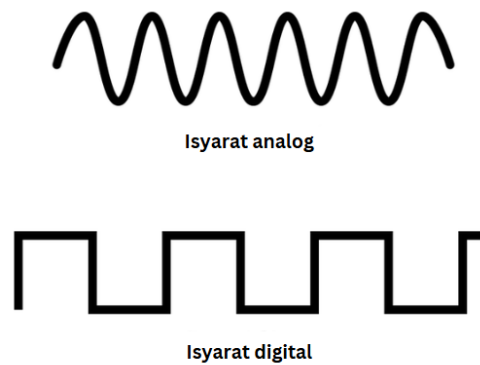
Isyarat adalah mewakili kuantitatif terhadap fenomena fizikal yang boleh diukur, sama ada dalam bentuk analog atau digital. Dalam konteks kejuruteraan mekanikal dan automotif, isyarat merujuk kepada data yang diperoleh daripada perubahan parameter sistem seperti daya, regangan, tekanan, dan getaran apabila sistem terdedah kepada beban atau gangguan tertentu. Isyarat ini memainkan peranan penting dalam menganalisis prestasi, pengesanan kerosakan, dan ramalan kegagalan komponen (Plante et al., 2015).



Rajah 2.27 Pemprosesan isyarat data: (a) Siri masa dengan komponen deterministik sinusoidal ditambah kepada data stokastik normal, (b) Magnitud pekali kompleks, (c) Pekali yang kurang mewakili dijadikan sifar, (d) Pekali kompleks dibawa kembali ke domain masa. Perbandingan (a) komponen stokastik telah dikeluarkan

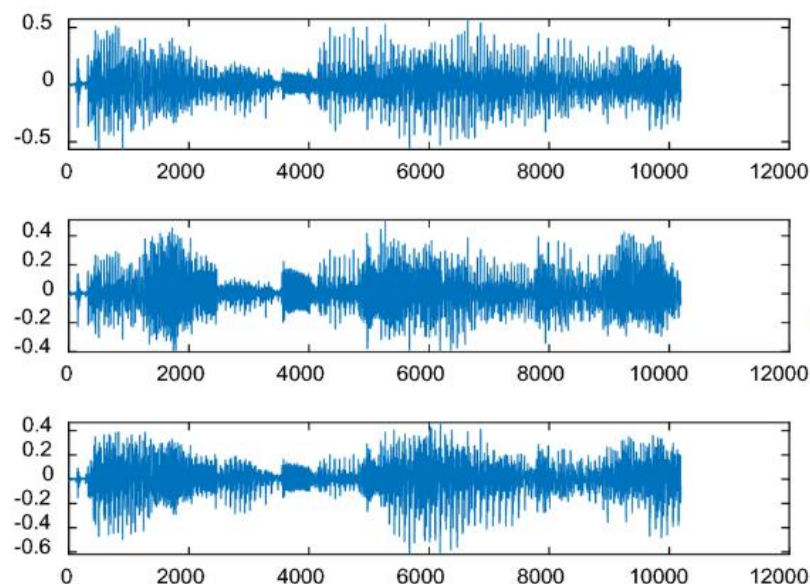
Sumber: Duarte et al. (2019)

Terdapat dua jenis isyarat yang utama, iaitu isyarat masa berterusan (analog) dan isyarat masa diskret (digital). Isyarat masa berterusan diwakili oleh fungsi yang berubah secara berterusan terhadap masa, manakala isyarat masa diskret dihasilkan daripada pensampelan isyarat analog pada selang waktu tertentu. Dengan kemajuan teknologi, kebanyakan isyarat dalam analisis kejuruteraan kini diproses dalam bentuk digital, memudahkan pemprosesan, penyimpanan, dan analisis data (Oppenheim & Schafer, 2010).



Rajah 2.28 Jenis isyarat masa berterusan (analog) dan isyarat masa diskret (digital)

Dalam analisis kejuruteraan, isyarat biasanya diperoleh melalui penderia yang dipasang pada komponen sistem. Sebagai contoh, dalam kajian sistem gantungan kenderaan, isyarat regangan diperoleh daripada tolok terikan yang dipasang pada pegas gegelung dan lengan bawah gantungan. Isyarat ini boleh dianalisis dalam domain masa untuk melihat perubahan parameter secara langsung, atau dalam domain frekuensi untuk mengenal pasti komponen frekuensi dominan yang berkaitan dengan getaran atau lesu (Mallat, 2009).

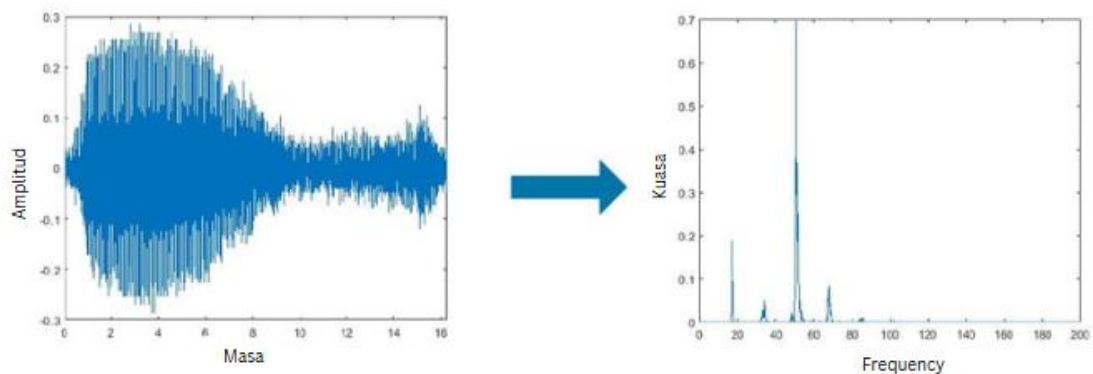


Rajah 2.29 Campuran isyarat bagi pencerapan isyarat

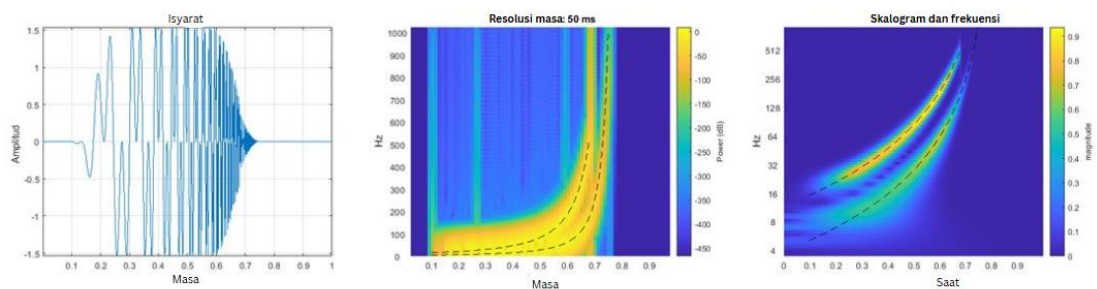
Sumber: Benzvi (2021)

Penggunaan teknik analisis isyarat seperti penjelmaan Fourier (*Fourier Transform*, FT) dan penjelmaan anak-gelombang (*Wavelet Transform*, WT)

mbolehkan jurutera mendapatkan maklumat secara terperinci tentang isyarat. Penjelmaan Fourier digunakan untuk menukar isyarat daripada domain masa ke domain frekuensi, membantu mengenal pasti pola berulang dan frekuensi tertentu. Sebaliknya, transformasi anak-gelombang menunjukkan kelebihan dalam menganalisis isyarat yang tidak stabil, di mana ia membahagikan isyarat kepada komponen masa dan frekuensi untuk analisis yang lebih menyeluruh (Daubechies, 1992).

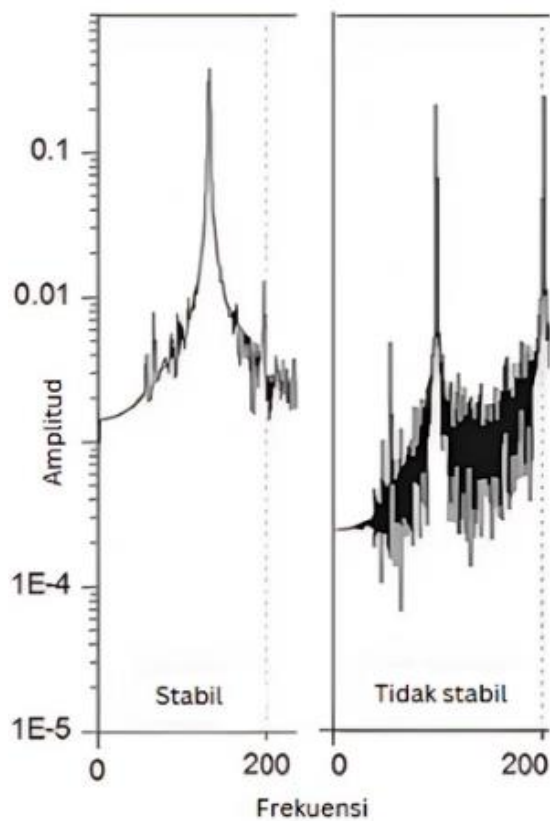


Rajah 2.30 Contoh Penjelmaan Fourier



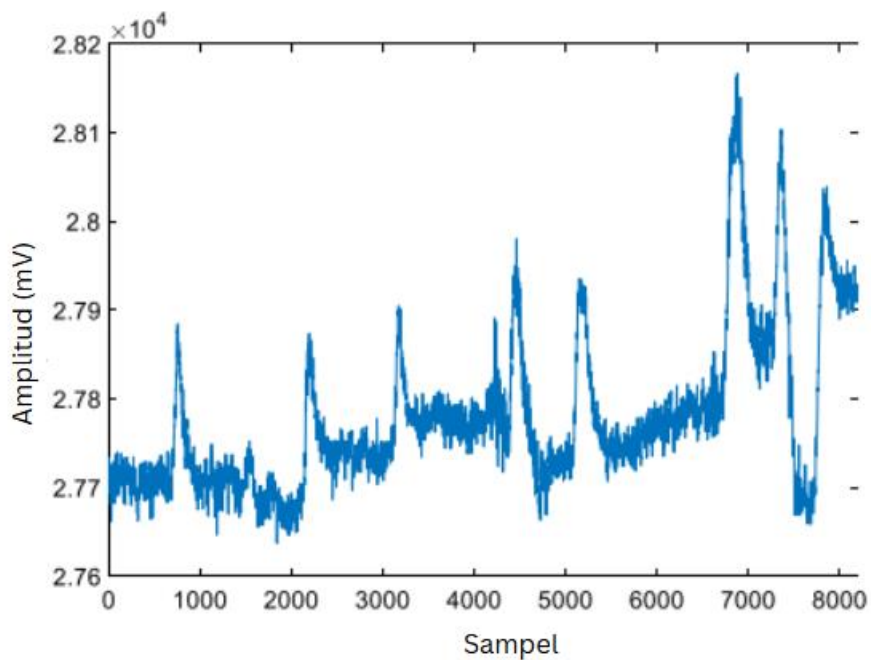
Rajah 2.31 Contoh Penjelmaan Fourier dan penjelmaan anak-gelombang (*Wavelet Transform, WT*)

Selain itu, isyarat yang diperoleh juga boleh dikategorikan sebagai isyarat stabil dan tidak stabil. Isyarat stabil menunjukkan ciri statistik yang tidak berubah dengan masa, manakala isyarat tidak stabil mempunyai parameter yang berubah-ubah, bergantung kepada gangguan atau beban luar yang dikenakan ke atas bahan. Dalam kajian lesu bahan, kebanyakan isyarat yang dihasilkan adalah tidak stabil, menggambarkan variasi beban yang dinamik sepanjang operasi (Rao, 2018).



Rajah 2.32 Isyarat stabil dan tidak stabil

Sumber: Arriaza et al. (2018)



Rajah 2.33 Contoh isyarat lesu

Sumber: Tuncer et al. (2021)

2.4.2 Statistik Isyarat

Statistik isyarat merupakan pendekatan penting dalam analisis kuantitatif data isyarat untuk memahami pola, tingkah laku, dan ciri-ciri isyarat yang diperoleh daripada sistem mekanikal. Dalam konteks kejuruteraan automotif, statistik isyarat digunakan secara meluas untuk menganalisis tingkah laku dinamik sistem seperti sistem gantungan kenderaan. Analisis ini membantu jurutera mengenal pasti pola beban dinamik, mengesan keabnormalan, dan meramalkan kegagalan komponen berdasarkan data yang dikumpulkan. Parameter statistik utama yang sering digunakan termasuk nilai min, sisihan piawai (*standard deviation*, SD), punca min kuasa dua (rms), kepencongan, kurtosis, serta nilai puncak maksimum dan minimum. Setiap parameter ini memberikan gambaran tentang keadaan operasi sistem dan membantu mengenal pasti masalah kelakuan isyarat yang berlaku.

Sebagai contoh, nilai min isyarat menunjukkan purata tingkah laku sistem dalam tempoh tertentu, di mana n ialah titik data dalam urutan sampel seperti yang dinyatakan:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad \dots(2.12)$$

Sisihan piawai (SD) mengukur sejauh mana data isyarat yang berubah arah daripada nilai min. Sisihan piawai (SD) dapat ditentukan secara matematik sebagai

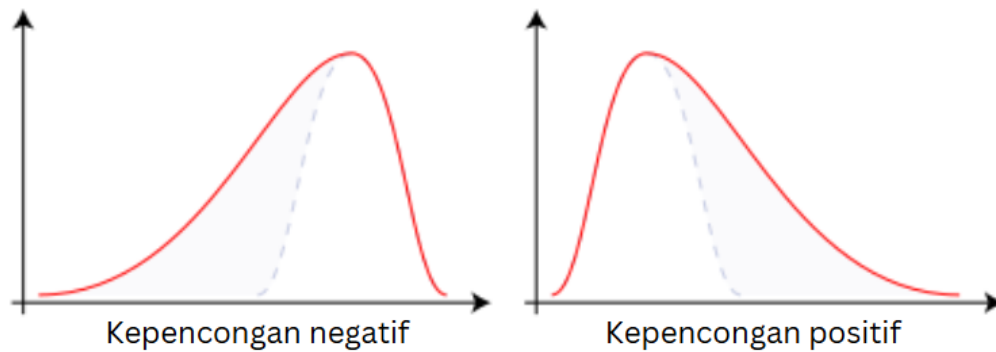
$$SD = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots(2.13)$$

Punca min kuasa dua (rms), yang merupakan momen statistik kedua yang digunakan untuk mengukur kandungan tenaga keseluruhan isyarat. Untuk set data diskret, nilai rms ditakrifkan sebagai:

$$rms = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots(2.14)$$

Kepencongan yang merupakan momen statistik ketiga digunakan untuk mengukur taburan data simetri berdasarkan nilai min. Kepencongan sesuatu taburan simetri seperti bentuk sinus atau taburan Gaussian adalah sifar. Kepencongan negatif menunjukkan taburan kebarangkalian pencong ke kiri, manakala kepencongan positif menunjukkan taburan kebarangkalian ke kanan, bergantung kepada nilai min. Kepencongan isyarat F_j , boleh dinyatakan seperti berikut :

$$Skew = \frac{1}{n(SD)^3} \sum_{j=1}^n (F_j - \bar{x})^3 \quad \dots(2.15)$$



Rajah 2.34 Contoh kepencongan negatif dan positif

Kurtosis ialah pendekatan statistik yang keempat yang merupakan statistik isyarat global yang sensitif terhadap perubahan turun dan naik data. Nilai kurtosis ditakrifkan sebagai:

$$K = \frac{1}{n(rms)^4} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^4 \quad \dots(2.16)$$

Statistik isyarat boleh dianalisis dalam dua domain utama, iaitu domain masa dan domain frekuensi. Dalam domain masa, parameter seperti nilai rms, sisihan piawai, dan faktor puncak digunakan untuk menilai tingkah laku isyarat secara langsung daripada data yang diperoleh.

Dalam kajian kejuruteraan automotif, statistik isyarat memainkan peranan penting dalam analisis lesu bahan dan sistem gantungan kenderaan. Parameter seperti nilai punca min kuasa dua (rms) dan kurtosis sering digunakan untuk mengenal pasti lesu bahan yang berlaku dalam komponen automotif akibat beban berulang. Kajian oleh Yang et al. (2020) menunjukkan bahawa rms dan kurtosis adalah petunjuk utama dalam mengenal pasti lesu bahan pada komponen gantungan kenderaan. Penyelidikan ini mendapati bahawa analisis statistik yang tepat dapat membantu meramalkan kegagalan awal komponen dan meningkatkan keberkesanan penyelenggaraan. Selari dengan penemuan ini, kajian oleh Abdullah et al. (2012) yang menggunakan analisis unsur terhingga (FEA) untuk menilai hayat lesu lengan bawah gantungan kenderaan. Kajian ini menunjukkan bahawa pemantauan dan analisis isyarat yang teliti dapat meningkatkan keupayaan dalam meramalkan kegagalan komponen dan mengoptimalkan reka bentuk bagi meningkatkan ketahanan terhadap lesu bahan.

Selain itu, kajian oleh Abdullah et al. (2015) yang menekankan bahawa tingkah laku kegagalan lesu pada lengan bawah gantungan boleh dikaji secara mendalam dengan pendekatan analisis statistik dan simulasi. Kajian ini menegaskan bahawa pemahaman mendalam mengenai corak tegasan dan perubahan mikrostruktur bahan boleh membantu dalam membangunkan sistem gantungan yang lebih tahan lama dan mengurangkan risiko kegagalan pramatang. Sementara itu, Abdullah et al. (2019) juga membincangkan kaedah pengoptimuman parameter sistem gantungan untuk meningkatkan hayat lesu pegas. Melalui pendekatan reka bentuk eksperimen, kajian ini menunjukkan bahawa analisis dalam domain frekuensi mampu meningkatkan ketepatan pengesanan kerosakan sehingga 15% berbanding analisis dalam domain masa sahaja (Ahmed et al., 2021). Oleh itu, kombinasi pendekatan statistik isyarat dengan analisis frekuensi dan elemen terhingga dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh dalam menilai daya tahan komponen dan memperbaiki ketahanan sistem gantungan kenderaan secara keseluruhan.

2.4.3 Kuasa Ketumpatan Spektrum dalam Domain Frekuensi

Kuasa Ketumpatan Spektrum (*power spectral density*, PSD) ialah teknik analisis matematik yang digunakan untuk menentukan pengagihan tenaga atau kuasa dalam

sesuatu isyarat merentasi pelbagai frekuensi. Dalam konteks kejuruteraan mekanikal, terutamanya analisis hayat lesu, PSD membantu mengenal pasti frekuensi-frekuensi dominan yang menyumbang kepada tekanan dinamik dan kegagalan akibat lesu pada bahan (Kařavský et al., 2023). Kajian ini amat penting dalam sistem automotif seperti pegas gegelung dan lengan bawah gantungan, di mana analisis PSD dapat mengenal pasti bagaimana beban dinamik yang dikenakan mempengaruhi hayat komponen. Dalam operasi automotif, sumber beban dinamik ini sering kali berpunca daripada keadaan jalan, kelajuan kenderaan, dan getaran yang dihasilkan oleh sistem enjin (Randall, 2011).

Dalam analisis lesu, data beban dinamik biasanya diperoleh melalui pengumpulan isyarat masa. Isyarat ini kemudiannya ditukar kepada domain frekuensi menggunakan transformasi Fourier, di mana PSD digunakan untuk menilai kuasa pada setiap frekuensi. Contohnya, kandungan frekuensi tinggi yang dikenalpasti melalui PSD biasanya dikaitkan dengan kitaran lesu tinggi (HCF), manakala frekuensi rendah menunjukkan risiko kitaran lesu rendah (LCF). Penyelidikan oleh Shigley et al. (2020) menekankan bahawa kuasa yang lebih tinggi pada frekuensi tertentu boleh mempercepatkan pembentukan retakan mikro, terutamanya dalam bahan yang beroperasi di bawah beban berulang.

Tindak balas tegasan pada lengan bawah gantungan serta pegas gegelung dalam bentuk kepadatan spektrum kuasa (PSD) dianggarkan melalui hasil skalar antara spektrum beban dan fungsi tindak balas frekuensi komponen tersebut. Dalam kajian Santharaguru et al (2022), taburan tegasan dianggap sebagai proses Gaussian pegun, di mana kitaran tegasan dapat ditentukan secara langsung daripada taburan tegasan *Narrowband*. Namun, penentuan kitaran tegasan daripada taburan jalur lebar adalah lebih kompleks. Kaedah seperti Dirlik dan Lalanne merupakan pendekatan yang sering digunakan untuk pengiraan kitaran lesu dalam domain frekuensi (Santharaguru, et al 2022). Untuk mendapatkan maklumat daripada PSD, momen spektrum boleh dikira sebagai:

$$m_n = \sum f^n \cdot G(\omega) \cdot \delta\omega \quad \dots(2.17)$$

yang mana $G(\omega)$ merujuk kepada fungsi PSD dengan luas momen n . Kadar jangkaan lintasan menaik purata dinyatakan sebagai:

$$E[0] = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \quad \dots(2.18)$$

Kadar jangkaan wujudan puncak boleh diperolehi sebagai:

$$E[P] = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \quad \dots(2.19)$$

Faktor ketaksekataan boleh didapati melalui:

$$\gamma = \frac{E[0]}{E[P]} \quad \dots(2.20)$$

Kaedah Lalanne mengandaikan jumlah wajaran mudah bagi taburan Rayleigh dan Gaussian bagi PSD. Ia mencadangkan penggunaan fungsi ketumpatan kebarangkalian julat tegasan (S) yang diberikan oleh (Datta et al., 2017):

$$N(S) = E[P] \hat{A} \cdot p(S) \quad \dots(2.21)$$

yang mana $E[P]$ ialah kadar jangkaan wujudan puncak, $N(S)$, adalah bilangan kitaran tegasan yang dijangka berlaku setiap saat dan $p(S)$ ditakrifkan sebagai:

$$p(S) = \frac{1}{2rms} \left\{ \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-s^2}{8r(1-\gamma^2)ms^2}} + \frac{S \cdot \gamma}{4rmse} e^{\frac{-s^2}{8rms^2}} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{s \cdot \gamma}{2rmS\sqrt{2(1-\gamma^2)}} \right) \right] \right\} \quad \dots(2.22)$$

Kaedah Dirlik boleh dikira melalui persamaan berikut (Datta et al., 2017):

$$p(S) = \frac{\frac{D_1}{Q} e^{-\frac{Z}{Q}} + \frac{D_2 Z}{R} e^{-\frac{Z^2}{2.R^2}} + D_3 Z e^{-\frac{Z^2}{2}}}{2 \cdot \sqrt{m_0}} \quad \dots(2.23)$$

$$D_1 = \frac{2(X_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2} \quad \dots(2.24)$$

$$D_2 = \frac{(1 - \gamma - D_1 + D_1^2)}{1 + R} \quad \dots(2.25)$$

$$D_3 = 1 - D_1 - D_2 \quad \dots(2.26)$$

$$Z = \frac{S}{\sqrt{m_0}} \quad \dots(2.27)$$

$$Q = \frac{1.23(\gamma - D_3 - D_2 \cdot R)}{D_1} \quad \dots(2.28)$$

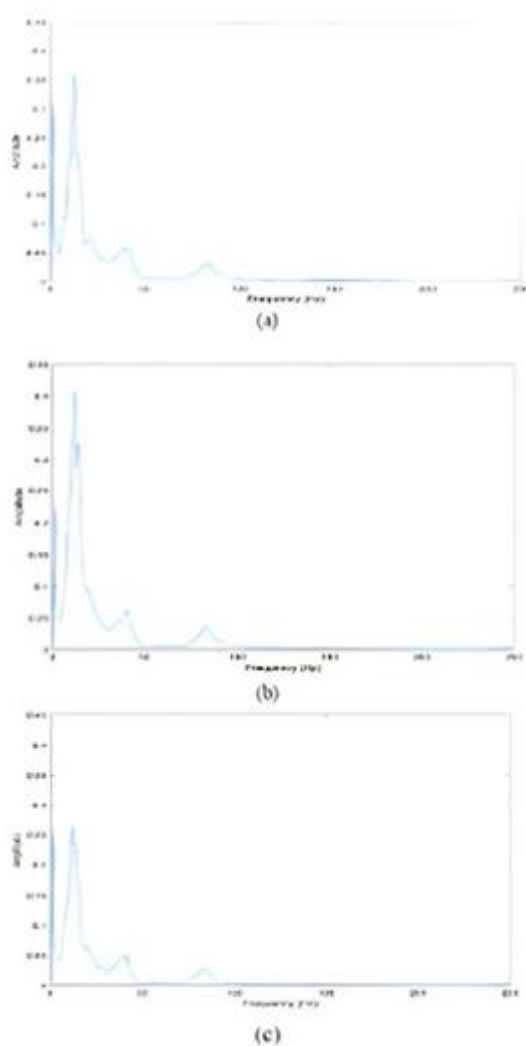
$$R = \frac{\gamma - X_m - D_1^2}{1 - \gamma - D_1 - D_2^2} \quad \dots(2.29)$$

$$X_m = \frac{m_1}{m_0} \cdot \sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \quad \dots(2.30)$$

yang mana D_1 , D_2 , D_3 , dan R adalah fungsi kepada momen spektrum m_0 , m_1 , m_2 , dan m_4 . Kaedah Narrowband adalah kaedah paling mudah di mana kitaran lesu ditakrifkan oleh sepasang puncak dan palung simetrik berikutnya (Benasciutti & Tovo, 2018). Oleh itu, kitaran ini mempunyai purata sifar dan taburan amplitudnya bertepatan dengan

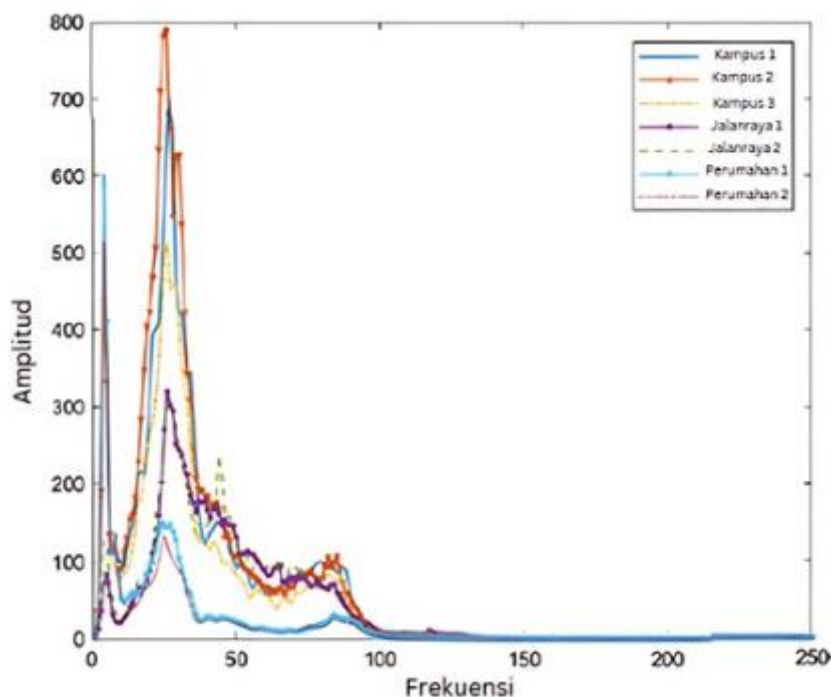
taburan puncak tempatan. Dalam jalur lebar yang kecil, PSD puncak boleh dinyatakan dengan taburan Rayleigh. Anggaran *Narrowband* bagi tindak balas tekanan PSD dinyatakan sebagai:

$$N(S) = E[P] \cdot \frac{S}{4m_0} \cdot e^{\frac{S^2}{8m_0}} \quad \dots(2.31)$$



Rajah 2.35 PSD bagi data pecutan untuk (a) Jalan Kampus 1, (b) Jalan Kampus 2 dan (c) Jalan Kampus 3 berdasarkan kajian terdahulu

Sumber: Santharaguru et al (2022)



Rajah 2.36 Tegasan PSD bagi lengan bawah gantungan dibawah beban yang berbeza berdasarkan kajian terdahulu

Sumber: Santharaguru et al (2022)

2.4.4 Analisis Isyarat Secara Penjelmaan Anak-Gelombang

Analisis isyarat menggunakan penjelmaan anak-gelombang (*wavelet transform*, WT) telah menjadi alat yang penting dalam kejuruteraan dan sains untuk menganalisis isyarat yang tidak stabil dan kompleks. Berbeza dengan penjelmaan Fourier yang menguraikan isyarat kepada komponen frekuensi tanpa maklumat masa, penjelmaan anak-gelombang menawarkan analisis masa-frekuensi yang membolehkan penempatan kedua-dua domain secara serentak. Ini dicapai melalui penggunaan fungsi asas yang dikenali sebagai anak-gelombang yang berskala dan beralih untuk menangkap ciri-ciri isyarat pada pelbagai peleraian.

Penjelmaan anak-gelombang terbahagi kepada dua kategori utama iaitu penjelmaan anak-gelombang berterusan (*Continuous Wavelet Transform*, CWT) dan penjelmaan anak-gelombang diskret (*Discrete Wavelet Transform*, DWT). CWT menyediakan analisis terperinci dengan mengira pekali anak-gelombang pada setiap skala dan peralihan yang menghasilkan peta masa-frekuensi yang komprehensif. Walau bagaimanapun, ini memerlukan pengiraan yang intensif dan menghasilkan sejumlah

data yang besar. Sebaliknya, DWT menggunakan subset diskret bagi skala dan peralihan, yang mengurangkan kesukaran pengiraan dan sesuai untuk aplikasi seperti pemampatan isyarat dan pengesanan ciri.

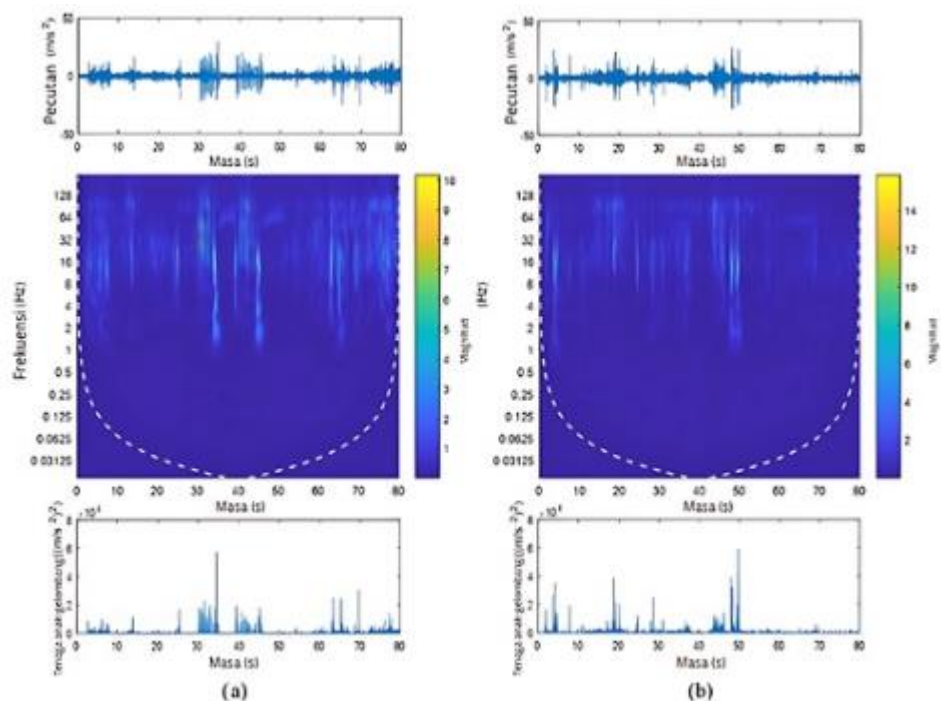
Dalam konteks analisis isyarat, penjelmaan anak-gelombang telah digunakan secara meluas untuk pelbagai aplikasi. Sebagai contoh, dalam pengesanan dan pengkelasan gangguan kualiti kuasa, kaedah anak-gelombang telah digunakan untuk mengesan isyarat gangguan fana dan lendut voltan. Pada asalnya, kaedah anak-gelombang dan pengekodan ramalan lurus telah diperkenalkan untuk analisis isyarat suara (Mohamed et al., 2002).

Pemilihan jenis anak-gelombang adalah kritikal dalam analisis isyarat, kerana ia mempengaruhi keupayaan untuk penamatan ciri-ciri tertentu dalam isyarat. Anak-gelombang dengan sokongan masa yang sempit dan peleraian frekuensi yang baik sesuai untuk mengesan ciri-ciri transien yang cepat, manakala anak-gelombang dengan sokongan frekuensi yang sempit lebih sesuai untuk menganalisis komponen frekuensi rendah yang berterusan. Sebagai contoh, dalam kajian oleh Siti Norbaya Sahadan, penjelmaan anak-gelombang Daubechies digunakan untuk penyuntingan data lesu, menunjukkan kepentingan pemilihan anak-gelombang yang sesuai untuk aplikasi tertentu.

2.5 SUNTINGAN DATA LESU

Suntingan data lesu pula merujuk kepada proses pembersihan, penapisan, dan pemprosesan data beban yang diperoleh daripada pengujian sebenar sebelum ia dianalisis menggunakan kaedah seperti PSD. Langkah ini penting untuk memastikan data yang digunakan menggambarkan beban sebenar yang dialami oleh komponen. Data mentah selalunya mengandungi hingar yang tidak berkaitan dengan kegagalan lesu, seperti gangguan luar atau variasi kecil yang tidak penting terhadap analisis. Dengan menggunakan teknik suntingan seperti penapisan frekuensi dan penghapusan anomali data, PSD boleh digunakan dengan lebih tepat untuk menganalisis kandungan frekuensi kritikal dan menyumbang kepada jangka hayat komponen yang lebih baik (Wang et al., 2021).

Sebagai tambahan, suntingan data lesu juga membantu mengenal pasti pola tekanan yang tidak normal, seperti lonjakan mendadak atau variasi luar biasa dalam isyarat. Sebagai contoh, jika terdapat lonjakan pada frekuensi tinggi yang tidak konsisten dengan operasi biasa, ini mungkin menunjukkan kerosakan awal atau ketidakseimbangan dalam sistem. Kajian oleh Benhamou et al. (2019) mendapati bahawa pengintegrasian suntingan data dengan analisis PSD boleh meningkatkan ketepatan ramalan hayat komponen hingga 25%.



Rajah 2.37 Pencirian masa-frekuensi isyarat getaran yang diperoleh pada keadaan jalan di kampus berdasarkan kajian terdahulu

Sumber: Chin et al., (2023)

2.6 RUMUSAN

Kajian ini telah memperincikan teori dan konsep utama yang menjadi dasar kepada analisis kegagalan akibat beban berulang dalam komponen automotif, khususnya sistem gantungan kenderaan. Penekanan diberikan kepada mekanisme hayat lesu, yang melibatkan kaedah hayat terikan, pengiraan kitaran, dan pendekatan kerosakan linear seperti model Palmgren-Miner. Pemahaman ini membantu dalam mengenal pasti faktor kritikal yang menyumbang kepada kegagalan struktur akibat beban dinamik, di samping memberikan gambaran tentang bagaimana tekanan berulang boleh mengurangkan jangka hayat komponen. Analisis isyarat, seperti statistik isyarat, domain masa, dan kuasa ketumpatan spektrum (PSD), telah dikenalpasti sebagai alat penting untuk menilai pola tekanan, intensiti beban, dan kesannya terhadap kestabilan komponen.

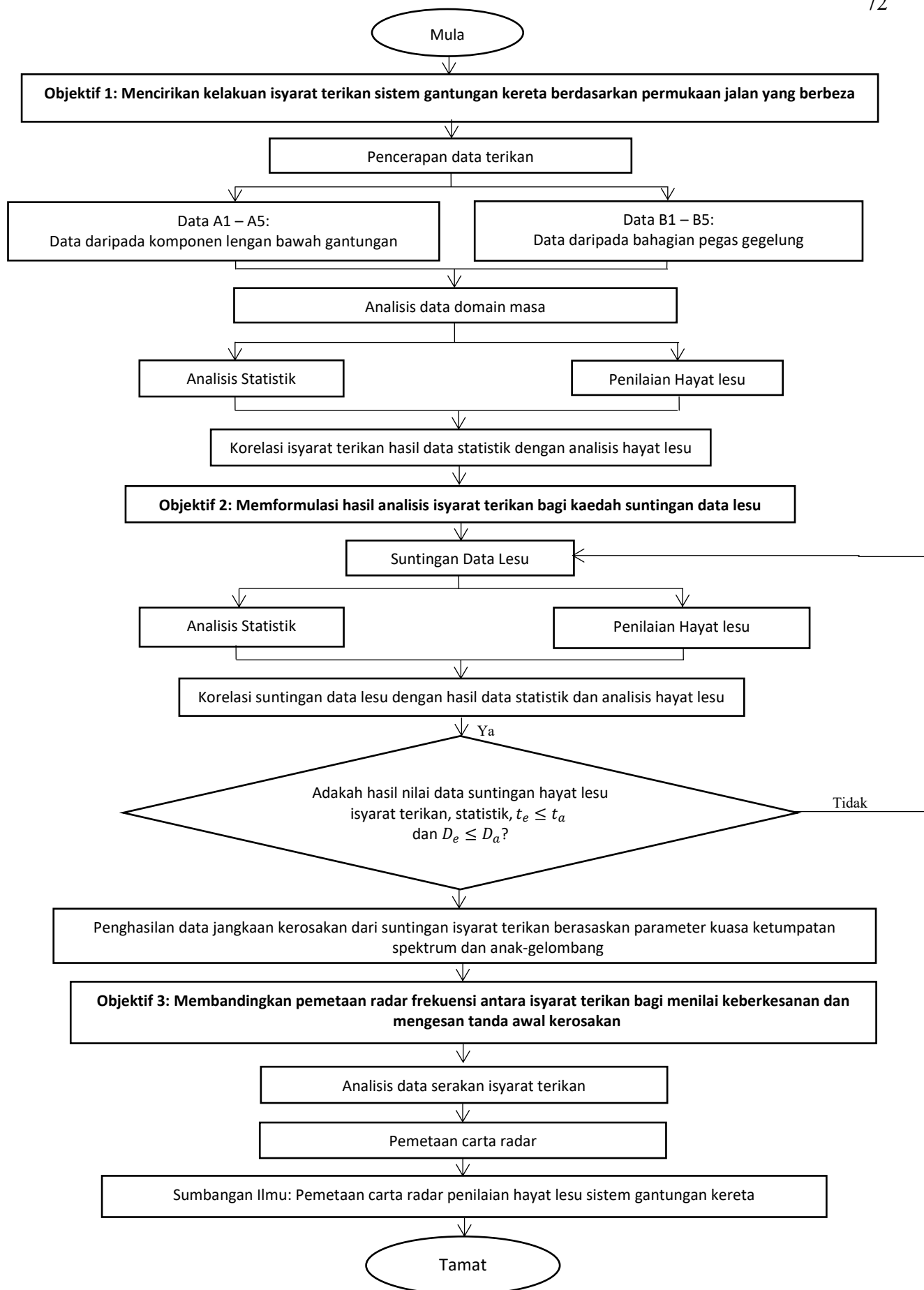
Selain itu, tumpuan diberikan kepada keperluan suntingan data yang teliti bagi memastikan ketepatan analisis dan ramalan hayat komponen. Pendekatan ini membolehkan data yang dikumpul diproses dengan lebih baik untuk menghasilkan ramalan yang boleh dipercayai. Gabungan antara analisis mekanikal dan pendekatan pemrosesan isyarat memperlihatkan potensi besar dalam menilai daya tahan komponen secara lebih komprehensif. Pemahaman ini membuka ruang kepada aplikasi lebih meluas dalam reka bentuk dan penilaian ketahanan struktur, membolehkan pelaksanaan teknologi yang lebih efisien dan tahan lama dalam industri automotif.

BAB III

METODOLOGI KAJIAN

3.1 PENGENALAN

Secara keseluruhan, kajian ini dijalankan mengikut kaedah-kaedah yang digariskan dalam aliran proses metodologi kajian seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3.1, yang menjadi panduan utama untuk mencapai objektif kajian. Pada objektif pertama, mencirikan kelakuan isyarat terikan sistem gantungan kereta berdasarkan permukaan jalan yang berbeza, yang dicapai melalui analisis domain masa bagi data terikan pada bahagian lengan bawah gantungan dan pegas gegelung. Bagi objektif kedua, memformulasi hasil analisis isyarat terikan menggunakan kaedah suntingan data lesu, yang dilaksanakan dengan parameter kuasa ketumpatan spektrum dan anak-gelombang, untuk menghasilkan data ramalan kerosakan yang lebih tepat. Seterusnya, objektif ketiga, membandingkan pemetaan parameter untuk menilai keberkesanan dan mengesan tanda awal kerosakan, bagi menunjukkan bahawa pemetaan parameter lebih sensitif terhadap perubahan kecil dalam isyarat terikan. Sumbangan ilmu kajian ini adalah berkaitan dengan pemetaan radar parameter dalam penilaian hayat lesu bagi sistem gantungan kereta. Kaedah ini bukan sahaja meningkatkan sensitiviti dalam mengenal pasti perubahan kecil pada isyarat terikan, malahan juga menyediakan ramalan kerosakan yang lebih tepat. Melalui gabungan parameter kuasa ketumpatan spektrum dan anak-gelombang, pendekatan ini menawarkan inovasi praktikal dalam penilaian hayat lesu, yang dapat meningkatkan keberkesanan dan keselamatan sistem gantungan kenderaan secara keseluruhan.



Rajah 3.1 Aliran Proses Metodologi Kajian

3.2 PENCIRIAN KELAKUAN ISYARAT TERIKAN

Pencirian kelakuan isyarat terikan merupakan langkah penting dalam memahami perubahan sistem gantungan kereta apabila beroperasi di atas pelbagai jenis permukaan jalan. Proses ini bertujuan untuk mengenal pasti perubahan kelakuan isyarat terikan yang disebabkan oleh faktor seperti jenis jalan, kelajuan, dan beban mekanikal yang dikenakan pada komponen gantungan. Dalam kajian ini, data terikan diperoleh daripada dua komponen utama sistem gantungan kereta, iaitu lengan bawah gantungan (Data A1–A3) dalam Jadual 3.1 dan pegas gegelung (Data B1–B3) dalam Jadual 3.2.

Jadual 3.1 Perwakilan data terikan yang dicerap pada lengan bawah sistem gantungan

Data	Nama Singkatan	Peta Laluan
DECTAR – Kolej Ungku Omar (KUO)	A1	Rajah 3.10
Fakulti Sains Sosial dan Kemanusiaan (FSSK) – Pintu Masuk UKM 2	A2	Rajah 3.10
Pintu Masuk UKM 3– Fakulti Undang-Undang (FUU)	A3	Rajah 3.10

Jadual 3.2 Perwakilan data terikan yang dicerap pada pegas gegelung

Data	Nama Singkatan	Peta Laluan
DECTAR – Kolej Ungku Omar (KUO)	B1	Rajah 3.10
Fakulti Sains Sosial dan Kemanusiaan (FSSK) – Pintu Masuk UKM 2	B2	Rajah 3.10
Pintu Masuk UKM 3– Fakulti Undang-Undang (FUU)	B3	Rajah 3.10

Pencerapan data isyarat terikan dilakukan menggunakan tolok terikan yang dipasang pada kedua-dua komponen ini. Pemilihan penderia ini bertujuan untuk memastikan pengukuran yang tepat dan boleh dipercayai dalam keadaan operasi dinamik. Ujian dijalankan dengan kenderaan yang bergerak merentasi pelbagai jenis permukaan jalan, termasuk permukaan rata, jalan berbonggol, jalan berbatu, dan jalan tidak rata di bawah julat kelajuan 30 hingga 50 km/j. Data yang diperoleh daripada tolok terikan ini direkodkan dalam bentuk isyarat terikan asal, yang menggambarkan

perubahan daya dan tegangan yang dialami oleh komponen gantungan semasa pergerakan kenderaan.

Data yang dikumpul kemudian dianalisis dalam domain masa untuk mencirikan pola kelakuan isyarat terikan. Analisis ini memberi tumpuan kepada ciri-ciri utama seperti puncak nilai terikan, tempoh kitaran, dan magnitud perubahan isyarat. Sebagai contoh, permukaan jalan berbatu menghasilkan lebih isyarat yang tidak stabil berbanding permukaan rata, yang menunjukkan pola isyarat yang lebih konsisten (Panjaitan, 2021). Analisis dalam domain masa ini memberikan gambaran awal mengenai sifat dinamik (Juang, Kuo, & Hsu, 1987) sistem gantungan di bawah pelbagai keadaan operasi.

Seterusnya, data asal dianalisis menggunakan kaedah statistik seperti nilai purata, sisihan piawai, punca min kuasa dua, kepencongan, kurtosis dan analisis korelasi. Analisis statistik ini membantu mengenal pasti kelakuan isyarat terikan pada pelbagai laluan yang dipandu untuk pencerapan data. Selain itu, perbandingan data daripada lengan bawah gantungan dan pegas gegelung membolehkan penilaian kelakuan komponen tentang peranan setiap komponen dalam menyerap daya mekanikal yang dikenakan semasa pemanduan.

Proses pencirian ini menyediakan elemen penting untuk langkah seterusnya, iaitu suntingan data lesu dan pemetaan radar parameter. Pemahaman mendalam mengenai kelakuan asas isyarat terikan ini membolehkan penilaian terperinci dilakukan dengan lebih sistematik. Di samping itu, data yang dicirikan memberikan petunjuk awal tentang tanda-tanda awal kerosakan pada komponen gantungan, yang menjadi faktor untuk meramalkan hayat lesu.

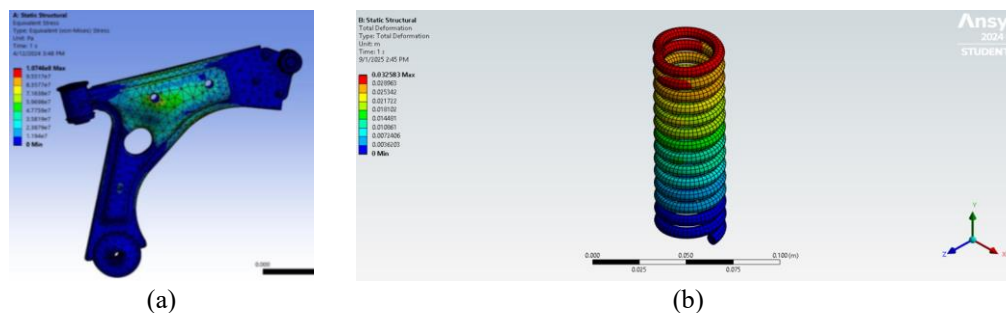
Hasil daripada proses ini dijangka dapat menghasilkan data yang menunjukkan pola berbeza bagi setiap jenis permukaan jalan. Penemuan ini bukan sahaja membantu mencapai objektif pertama kajian tetapi juga menyediakan asas yang kukuh untuk memformulasi dan membandingkan keberkesanan kaedah suntingan data serta pemetaan radar parameter dalam langkah analisis yang seterusnya.

3.2.1 Pencerapan Data Terikan

Pencerapan data terikan merupakan langkah awal yang penting dalam kajian ini, bertujuan untuk memahami kelakuan dinamik sistem gantungan kereta. Proses ini melibatkan pengumpulan data daripada dua komponen utama, iaitu lengan bawah gantungan (Data A1–A3) dan pegas gegelung (Data B1–B3) yang ditunjukkan dalam Rajah 3.2. Data asal yang diperoleh direkodkan secara masa nyata untuk memastikan ketepatan dan kebolehpercayaan analisis. Kedua-dua kumpulan data ini memainkan peranan penting dalam mencirikan tindak balas komponen terhadap pelbagai daya mekanikal serta bertujuan untuk mendapatkan data isyarat getaran lesu yang sesuai bagi analisis seterusnya yang disebabkan oleh pelbagai jenis permukaan jalan, termasuk jalan rata, jalan berbonggol, jalan berbatu, dan jalan tidak rata. Data dicerap menggunakan kereta jenis Proton Saga VVT tahun 2024 seperti Rajah 3.2. Kelajuan kereta semasa proses pencerapan data adalah di bawah julat kelajuan 30 hingga 50 km/j. Sebanyak lima jenis laluan dalam Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) telah dipilih. Proses pencerapan melibatkan penggunaan beberapa alatan utama, termasuk alat pencerapan data, tolok terikan, dan komputer riba.

Pencerapan data terikan merupakan langkah penting dalam kajian ini untuk memantau perubahan tegangan yang berlaku pada komponen automotif, khususnya pada sistem bawah gantungan dan pegas gegelung. Data terikan ini akan membantu dalam menganalisis kekuatan dan prestasi komponen di bawah beban tertentu. Oleh itu, tolok terikan digunakan sebagai alat utama dalam pencerapan ini. Tolok terikan adalah penderia yang dapat mengukur perubahan kecil dalam panjang suatu objek apabila dikenakan beban, yang kemudiannya diterjemahkan ke dalam nilai terikan.

Untuk sistem bawah gantungan dan pegas gegelung, pencerapan terikan akan dilakukan pada lokasi-lokasi yang dianggap kritikal, iaitu kawasan yang menerima beban tertinggi semasa kenderaan bergerak di atas permukaan yang tidak rata. Sebelum pemasangan tolok terikan, kajian awal akan dilakukan menggunakan simulasi unsur terhingga (*Finite Element Analysis*, FEA) untuk mengenal pasti titik-titik kritikal pada sistem tersebut. Melalui FEA, dapat melihat bagaimana tegangan tersebar pada komponen, dan mengenal pasti kawasan yang mengalami tegangan maksimum yang mungkin menyebabkan kerosakan atau kehausan komponen.



Rajah 3.2 Simulasi FEA bagi sistem bawah gantungan: (a) Sistem lengan bawah gantungan, (b) Sistem pegas gegelung

Selepas kawasan kritikal dikenalpasti, tolok terikan akan dipasang pada titik tersebut. Data terikan yang diperolehi akan direkod dan dianalisis untuk memahami bagaimana sistem gantungan bertindak balas terhadap pelbagai jenis beban, termasuk beban statik dan dinamik. Rekod data ini kemudian akan digunakan untuk membandingkan antara hasil analisis FEA dan data sebenar, serta untuk mengesahkan kesesuaian model FEA yang digunakan dalam kajian ini.

Metodologi ini berasaskan kepada kaedah pencerapan data terikan yang telah terbukti dalam kajian-kajian sebelumnya seperti yang dibincangkan oleh Pimenta et al. (2020), yang menggunakan tolok terikan untuk menganalisis prestasi sistem gantungan kereta. Kajian ini menunjukkan bahawa pemasangan tolok terikan di lokasi yang tepat dapat memberikan data yang berguna untuk meningkatkan reka bentuk dan keandalan sistem gantungan. Sumber lain yang relevan termasuk kajian oleh Zhang et al. (2018), yang menerangkan penggunaan tolok terikan dalam kajian mengenai pengaruh beban dinamik terhadap sistem bawah gantungan.



Rajah 3.3 Model kereta yang digunakan dalam kajian



(a)

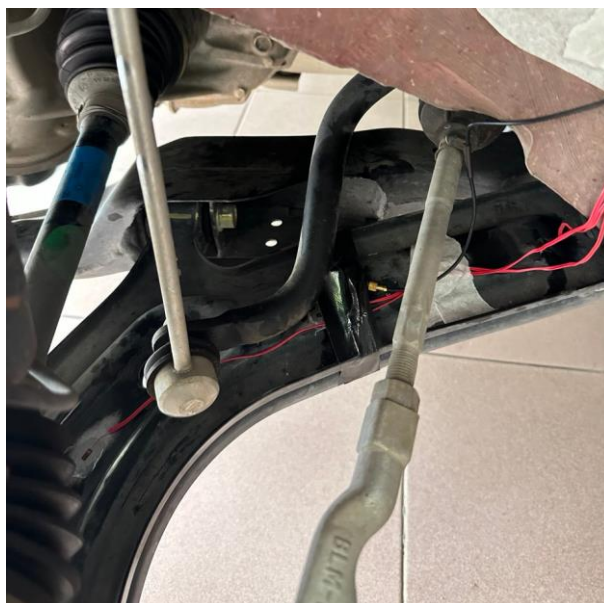


(b)

Rajah 3.4 Bahagian sistem gantungan kenderaan yang digunakan untuk kajian: (a) lengan bawah gantungan, (b) pegas gegelung

i) Data A1–A5 (Lengan Bawah Gantungan)

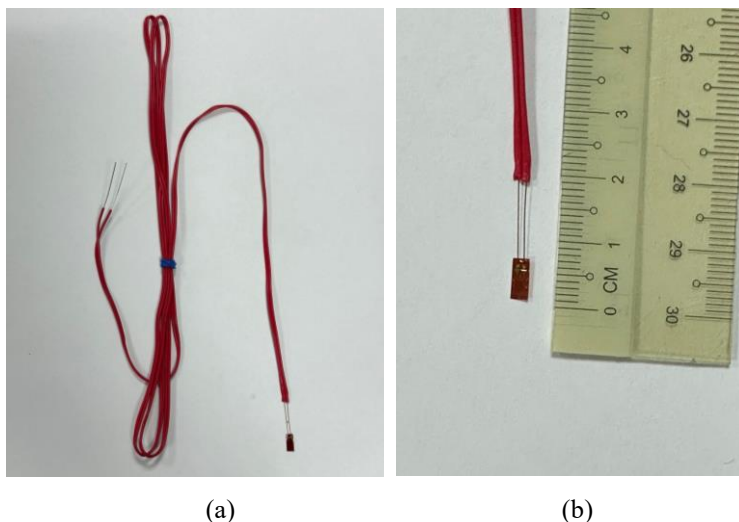
Data A1–A3 diperoleh daripada tolok terikan yang dipasang pada tumpuan tegasan lengan bawah gantungan serta dilekatkan menggunakan gam pelekat untuk pengukuran isyarat regangan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3.5. Tolok terikan ini merekodkan regangan yang berlaku apabila kenderaan diuji pada pelbagai jenis permukaan jalan. Permukaan rata menghasilkan isyarat yang stabil dengan magnitud perubahan yang rendah, menggambarkan beban dinamik yang minimum (Chatti & Lee, 2002). Namun, jalan berbatu atau berbonggol menghasilkan puncak nilai terikan yang lebih tinggi dan lebih pola isyarat yang tidak konsisten, menunjukkan daya mekanikal yang lebih besar (Reza-Kashyzadeh, Ostad-Ahmad-Ghorabi & Arghavan, 2013). Data A1–A3 ini memberikan gambaran yang penting tentang bagaimana lengan bawah gantungan bertindak balas terhadap variasi beban, serta sejauh mana ia menyerap daya dinamik semasa kenderaan bergerak.



Rajah 3.5 Tolok terikan pada lengan bawah gantungan

Tolok terikan yang digunakan dalam Rajah 3.6 merupakan model KFGS-2-120-C1-11 L1M2R keluaran KYOWA STRAIN GAGES dari Jepun ini direka khusus untuk mengukur regangan pada bahan keluli. Tolok terikan ini mempunyai faktor sebanyak $2.11 \pm 1.0\%$ yang menunjukkan kepekaannya terhadap regangan relatif terhadap perubahan rintangan elektrik. Rintangannya adalah $119.6\Omega \pm 0.4\%$, manakala panjang ialah 2 mm, menunjukkan kawasan aktif pengukuran. Selain itu, ia mempunyai nisbah sensitiviti melintang sebanyak $0.8 \pm 0.3\%$, yang bermaksud ia kurang sensitif terhadap regangan di arah selain daripada arah utama pengukuran.

Untuk memastikan ketepatan dalam pelbagai keadaan suhu, tolok terikan ini mempunyai faktor pekali suhu sebanyak $117 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ dan pampasan suhu yang sesuai untuk bahan keluli, menjadikannya stabil dan tepat walaupun dalam keadaan suhu yang berubah-ubah. Selain itu, tolok terikan ini menggunakan gam khas seperti CC-33A atau EP-340 untuk memastikan ia melekat kukuh pada permukaan bahan. Tolok terikan ini sesuai digunakan dalam ujian regangan yang memerlukan ketepatan tinggi, terutamanya dalam bidang seperti penyelidikan komponen automotif, di mana analisis regangan sangat penting untuk menentukan prestasi struktur.



Rajah 3.6 Tolok terikan (a) tolok terikan yang digunakan, (b) saiz tolok terikan

ii) Data B1–B5 (Pegas Gelung)

Data B1–B3 diperoleh daripada tolok terikan yang dipasang pada tumpuan tegasan pegas gelung yang juga dilekatkan menggunakan gam pelekat untuk pengukuran isyarat regangan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3.7. Sama seperti lengan bawah gantungan, pegas gelung diuji pada permukaan jalan yang berbeza untuk memahami tindak balas terhadap variasi beban mekanikal. Data asal yang diperoleh menunjukkan bahawa jalan tidak rata menghasilkan isyarat dengan frekuensi kitaran yang lebih tinggi, menggambarkan tindak balas pegas terhadap impak berulang (Barbosa, 2011). Sebaliknya, jalan rata menghasilkan pola isyarat yang lebih konsisten dengan magnitud perubahan yang lebih rendah. Data B1–B3 ini membantu menilai keberkesanan pegas gelung dalam mengurangkan impak dan memastikan kestabilan sistem gantungan.

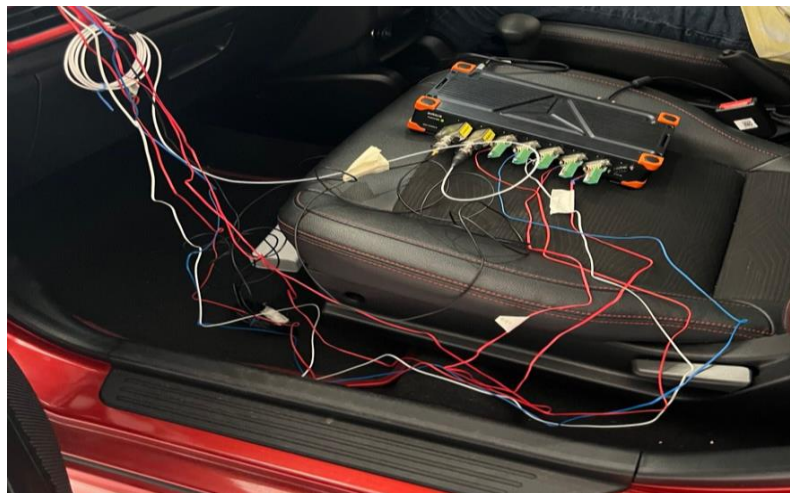


Rajah 3.7 Tolok terikan pada pegas gelung

Kedua-dua tolok terikan yang dipasang pada lengan bawah gantungan dan pegas gelung disambungkan ke pengelod data, seperti yang ditunjukkan pada Rajah 3.9. Pengelod data ini kemudiannya disambungkan ke komputer riba bagi tujuan pemantauan masa nyata. Dengan sambungan ini, data yang dikumpulkan oleh tolok terikan dapat dipantau secara langsung melalui alat Dewesoft Sirius yang dipasang pada komputer riba, membolehkan analisis segera terhadap variasi beban mekanikal yang dikenakan.

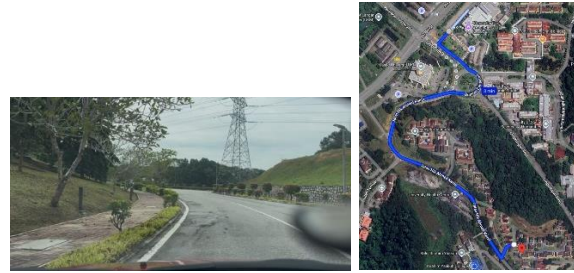


Rajah 3.8 Alat Dewesoft Sirius

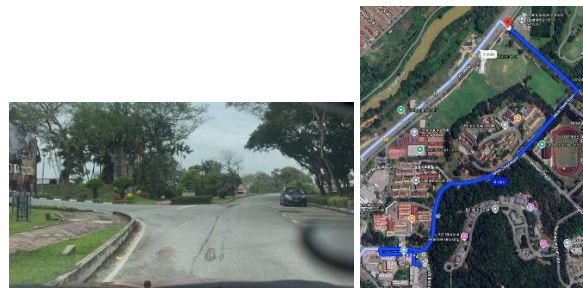


Rajah 3.9 Penyambungan alatan semasa pencirian data

Data yang diperlukan untuk analisis ini melibatkan pembebanan dengan amplitud yang tidak konsisten. Setelah semua peralatan dipasang, proses pengumpulan data terikan jalan dimulakan dengan memandu kereta melalui tiga jenis laluan yang berbeza untuk mendapatkan data bebanan secara rawak. Jalan pertama adalah dari Dewan Canselor Tunku Abdul Rahman (DECTAR) ke Kolej Ungku Omar dan jalan kedua ialah dari Fakulti Sains Sosial dan Kemanusiaan sehingga ke Pintu 2 UKM. Bagi jalan yang terakhir ialah dari Pintu 3 UKM ke Fakulti Undang-Undang. Rajah 3.10 menunjukkan beberapa jenis permukaan jalan yang dilalui semasa proses pencerapan data terikan, serta peta laluan bagi ketiga-tiga laluan jalan yang diuji.



(a)



(b)



(c)

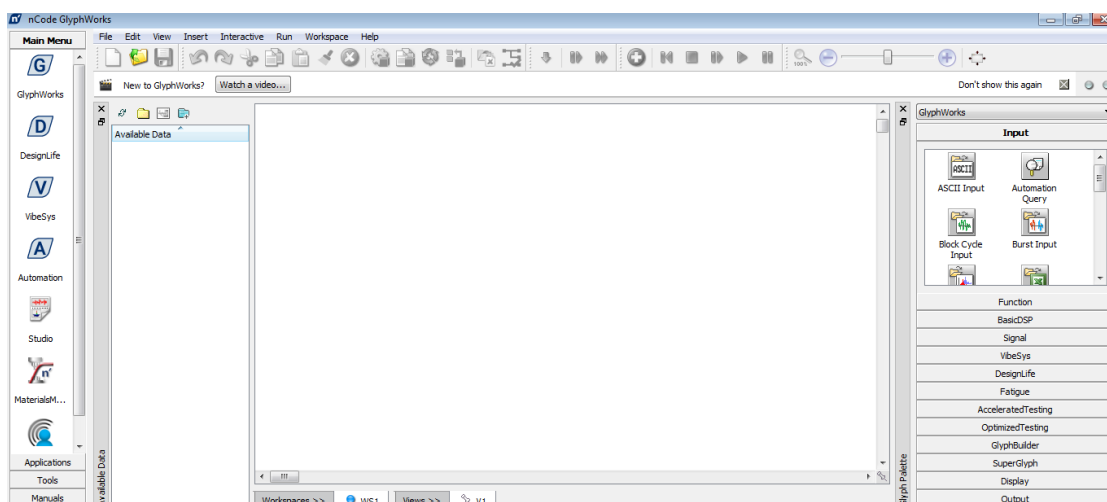
Rajah 3.10 Jenis permukaan jalan dan peta laluan yang dilalui semasa proses pencerapan data:
 (a) DECTAR – KUO, (b) FSSK – Pintu Masuk UKM 2, (c) Pintu Masuk UKM 3 – FUU

3.2.2 Analisis Statistik

Analisis statistik merupakan langkah penting untuk memahami ciri-ciri utama isyarat terikan yang diperoleh daripada proses pencerapan data. Dalam kajian ini, analisis statistik dijalankan menggunakan perisian nCode GlyphWorks dan Matlab, di mana dua perisian ini yang saling melengkapi dalam menganalisis dan memproses data isyarat terikan. Data isyarat terikan daripada lengan bawah gantungan (Data A1–A3) dan pegas gegelung (Data B1–B3) dimuat naik ke dalam kedua-dua perisian untuk diproses dan dianalisis secara mendalam.

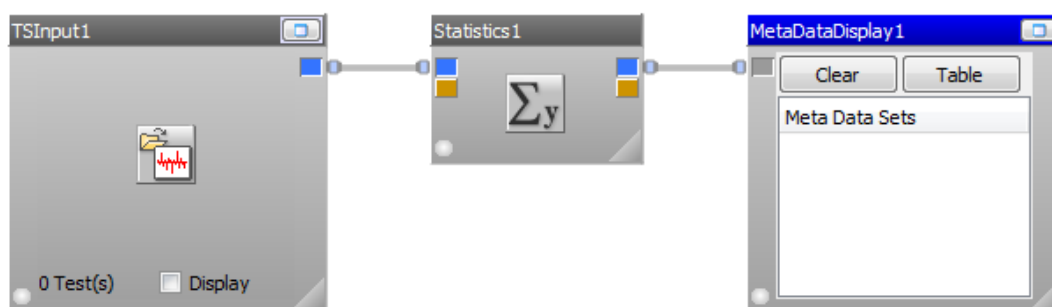
Perisian nCode GlyphWorks digunakan untuk pengiraan parameter statistik utama seperti nilai purata, sisihan piawai, nilai puncak maksimum dan minimum, serta taburan data. Parameter ini memberikan gambaran tentang kestabilan dan variasi dalam isyarat. Sebagai contoh, nilai purata menunjukkan tahap regangan purata yang dialami oleh komponen, manakala sisihan piawai mengukur ketidakseragaman dalam isyarat akibat variasi beban mekanikal. Selain itu, Matlab digunakan untuk ilustrasi data seperti histogram taburan isyarat dan carta nilai puncak. Matlab juga digunakan untuk menulis skrip tertentu bagi analisis data yang lebih kompleks, seperti pengenalpastian pola regangan tertentu dalam isyarat yang berkaitan dengan tanda awal kerosakan.

Rajah 3.11 di bawah menunjukkan paparan selepas GlyphWorks dipilih. Perisian ini mempunyai tiga bahagian utama data masukan, ruang kerja, dan gambar rajah blok untuk proses serta keluaran. Untuk menjalankan analisis dalam perisian GlyphWorks, sekurang-kurangnya satu data masukan, satu proses, dan satu keluaran diperlukan.



Rajah 3.11 Paparan perisian N-Code selepas pemilihan ikon Glyphworks

Bagi analisis statistik, gambarajah blok yang diperlukan adalah *TSInput*, *Statistics* dan *MetaDataDisplay* seperti yang dipaparkan dalam rajah 3.9. Parameter analisis statistic seperti nilai purata, punca-purata-kuasa dua, kurtosis dan kepengcogan boleh diakses dan dipaparkan pada gambarajah blok *MetaDataDisplay*.



Rajah 3.12 Paparan susunan gambarajah blok untuk analisis statistik global

Hasil analisis statistik daripada kedua-dua perisian ini memberikan pemahaman yang mendalam tentang ciri-ciri isyarat terikan. Sebagai contoh, data daripada jalan berbatu mungkin menunjukkan sisihan piawai yang tinggi, menggambarkan variasi beban yang besar, berbanding jalan rata yang menghasilkan isyarat lebih stabil. Hasil analisis statistik ini dirujuk seperti dalam persamaan (2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16). Maklumat ini digunakan untuk analisis hayat lesu dan korelasi dalam langkah seterusnya.

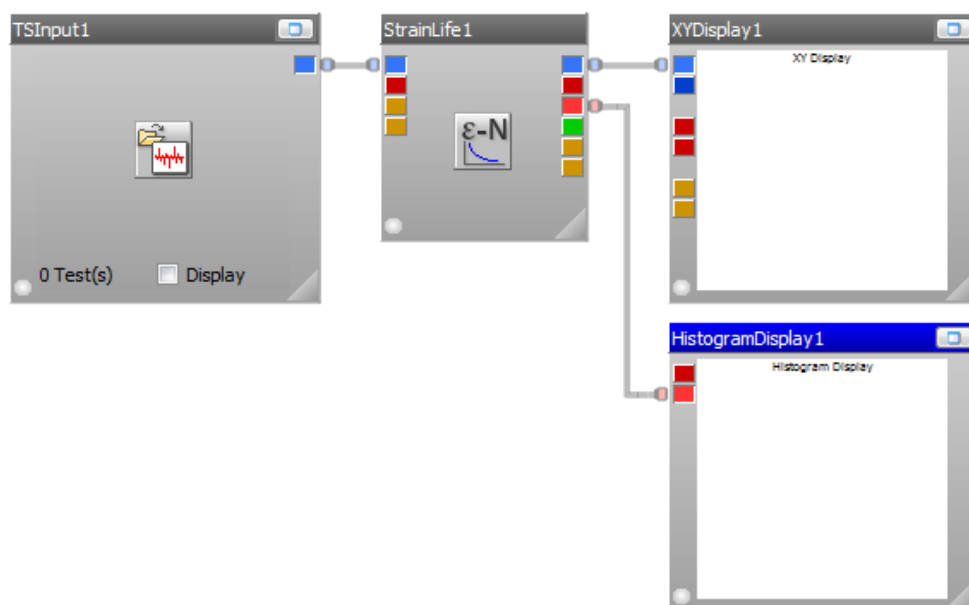
3.2.3 Penilaian Hayat Lesu

Penilaian hayat lesu bertujuan untuk meramalkan potensi kegagalan komponen akibat lesu bahan. Proses ini melibatkan penggunaan nCode GlyphWorks dan Matlab untuk analisis kitaran beban dan ramalan hayat lesu berdasarkan isyarat terikan yang diperoleh. nCode GlyphWorks digunakan untuk menjalankan *Rainflow Counting Algorithm*, yang mengenal pasti kitaran beban dalam isyarat terikan. Ini termasuk pengiraan magnitud kitaran beban (tahap tekanan maksimum) dan jumlah kitaran beban sepanjang tempoh operasi. Kuasa ketumpatan spektrum juga dianalisis untuk menilai taburan tenaga dalam frekuensi yang berbeza. Perisian ini kemudiannya menggunakan model lesu bahan untuk meramalkan hayat lesu komponen berdasarkan faktor seperti kekuatan bahan, keadaan operasi, dan faktor keselamatan.

Pengiraan hayat lesu dilakukan dengan menggunakan pendekatan hayat terikan. Antara blok yang diperlukan untuk proses tersebut adalah *TSInput*, *StrainLife*, *MetaDataDisplay* dan *HistogramDisplay*. *TSInput* menunjukkan rekod data apabila

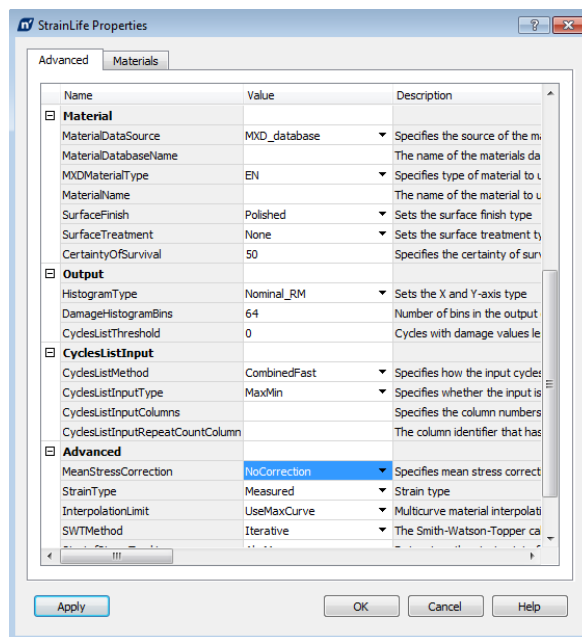
berlakunya kerosakan dalam domain masa. Data masukan lesu yang dimasukkan ke dalam *TSInput* adalah dalam bentuk domain masa dan fail data adalah berformat *.s3t**.

Fail data yang diperoleh dalam format *.csv** akan ditukar kepada format *.s3t** untuk memudahkan proses analisis. Data masukan ini diambil daripada menu *Available Data* di bawah kumpulan *Time Histories*. *MetaDataDisplay* digunakan untuk memaparkan nilai kerosakan lesu, status kerosakan, bilangan kitaran, dan parameter lain, manakala *HistogramDisplay* menunjukkan taburan kitaran lesu serta kerosakan lesu dalam bentuk histogram tiga dimensi. Simulasi akan dijalankan apabila butang run diklik, dan hasil analisis akan dipaparkan pada gambar rajah blok keluaran.



Rajah 3.13 Susunan simulasi dalam Glyphworks untuk analisis hayat terikan

Pemilihan bahan dalam analisis hayat terikan untuk kesemua jenis permukaan jalan dalam kajian ini telah dipilih dalam perisian Glyphworks. Nilai hayat lesu bagi model hayat terikan, iaitu Coffin-Mason seperti dalam persamaan (2.6), Smith-Watson-Topper (2.9) dan Morrow (2.7) juga boleh diperolehi dengan pemilihan jenis model-model hayat terikan seperti Rajah 3.11.



Rajah 3.14 Penukaran model untuk analisis hayat terikan

Hasil penilaian hayat lesu ini memberikan anggaran jangka hayat komponen gantungan dalam pelbagai keadaan operasi. Sebagai contoh, data daripada jalan berbatu dengan kitaran beban tinggi mungkin menunjukkan hayat lesu yang lebih pendek, manakala jalan rata menghasilkan ramalan hayat yang lebih panjang (Putra & Husaini, 2018).

3.2.4 Korelasi isyarat terikan hasil data statistik dengan analisis hayat lesu

Langkah terakhir dalam metodologi Objektif 1 ini adalah mengaitkan hasil analisis statistik dengan penilaian hayat lesu bagi memahami hubungan antara parameter statistik isyarat terikan dan ketahanan komponen terhadap lesu. Proses korelasi ini dijalankan menggunakan nCode GlyphWorks dan Matlab untuk memastikan analisis yang tepat dan sesuai.

Dalam nCode GlyphWorks, data statistik seperti nilai purata, sisihan piawai, dan nilai puncak maksimum dibandingkan dengan hasil kitaran beban dan ramalan hayat lesu. Perisian ini membolehkan korelasi visual antara parameter, seperti graf perbandingan antara sisihan piawai dan jumlah kitaran beban. Matlab, sebaliknya, digunakan untuk membangunkan model korelasi matematik yang lebih kompleks. Skrip Matlab membantu untuk memplotkan hubungan linear atau bukan linear antara

parameter statistik dan hayat lesu, membolehkan pemahaman yang lebih mendalam tentang faktor-faktor yang mempengaruhi kegagalan komponen.

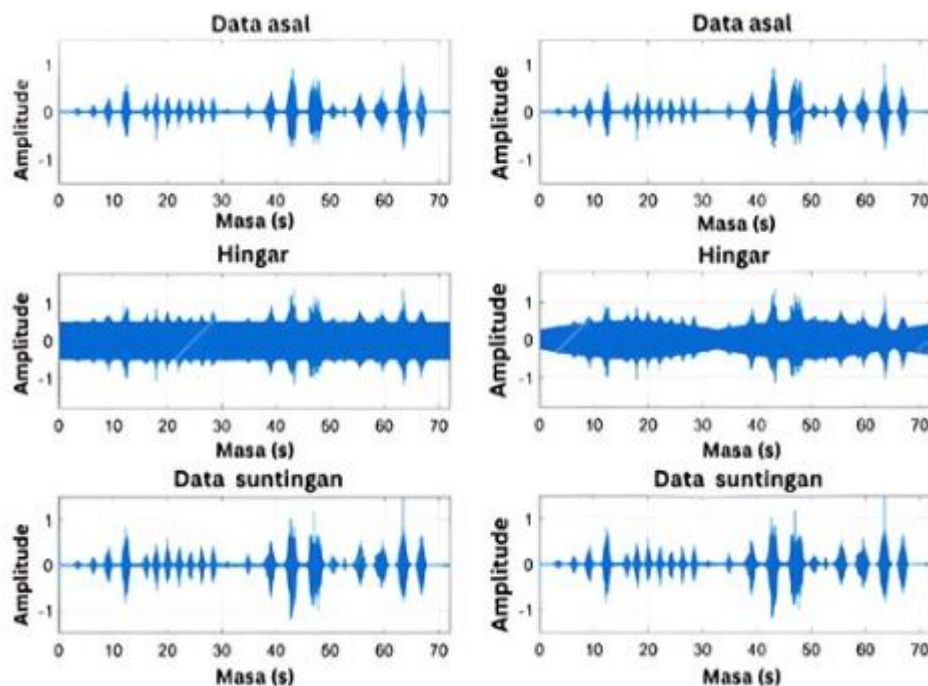
Sebagai contoh, data daripada jalan tidak rata mungkin menunjukkan kaitan yang rapat antara sisihan piawai yang tinggi dalam isyarat terikan dan peningkatan jumlah kitaran beban, yang secara langsung berkaitan dengan hayat lesu yang lebih pendek. Hasil korelasi ini memberikan panduan untuk memperbaiki reka bentuk komponen gantungan, dengan menumpukan kepada parameter statistik tertentu yang paling mempengaruhi ketahanan terhadap lesu.

3.3 ANALISIS PROFAIL DATA TERIKAN LESU

Pemformulasian isyarat terikan bertujuan untuk menghasilkan data yang tetap, terperinci, dan boleh digunakan untuk meramalkan hayat komponen sistem gantungan kereta. Proses ini melibatkan beberapa langkah penting, termasuk analisis statistik, penilaian hayat lesu, korelasi data, dan penghasilan data jangkaan kerosakan. Setiap langkah ini dijalankan dengan menggunakan perisian nCode GlyphWorks dan Matlab.

3.3.1 Suntingan Data Lesu

Langkah awal dalam pemformulasian isyarat terikan adalah proses suntingan data lesu, yang bertujuan untuk menghapuskan gangguan hingar dan menapis data asal untuk mendapatkan isyarat yang tepat. Proses ini dilakukan menggunakan nCode GlyphWorks, dengan menumpukan kepada penghapusan kitaran kecil dan anomali isyarat. Langkah ini memastikan hanya kitaran beban yang signifikan dimasukkan untuk analisis statistik dan penilaian hayat lesu. Sebagai contoh, pada jalan berbatu, isyarat asal mungkin mengandungi variasi frekuensi tinggi yang tidak relevan. Melalui suntingan, variasi ini dapat dihapuskan, sekali gus menjadikan data lebih konsisten dan relevan untuk ramalan hayat lesu.



Rajah 3.15 Contoh data asal, hingar dan suntingan

Sumber: Esposito et al. (2023)

3.3.2 Analisis Statistik

Selepas suntingan data, analisis statistik dilakukan bagi memahami ciri utama isyarat terikan. Perisian nCode GlyphWorks digunakan untuk mendapatkan parameter statistik seperti nilai purata, sisihan piawai, nilai puncak maksimum dan minimum, serta taburan data. Matlab digunakan untuk menyokong analisis dengan visualisasi tambahan seperti graf taburan dan histogram.

Analisis statistik memberikan maklumat tentang kestabilan dan variasi isyarat terikan. Sebagai contoh, jalan tidak rata mungkin menghasilkan sisihan piawai yang tinggi, menggambarkan variasi beban yang lebih besar, berbanding jalan rata yang menghasilkan isyarat lebih stabil. Data statistik ini menyediakan asas untuk langkah penilaian hayat lesu yang seterusnya.

3.3.3 Penilaian Hayat Lesu

Penilaian hayat lesu bertujuan untuk meramalkan potensi kegagalan komponen akibat lesu pada bahan. Langkah ini dilakukan menggunakan nCode GlyphWorks untuk menganalisis kitaran beban secara algoritma pengiraan kitaran Rainflow dan

menentukan parameter penting seperti jumlah kitaran beban dan magnitud kitaran. Disamping itu, Matlab digunakan untuk menghasilkan graf hubungan antara kitaran beban dan hayat lesu, serta menyesuaikan model lesu bahan berdasarkan parameter tambahan seperti variasi frekuensi dalam kuasa ketumpatan spektrum. Hasil analisis ini memberikan anggaran hayat komponen gantungan berdasarkan pelbagai keadaan operasi, seperti jalan berbatu, jalan berbonggol atau jalan tidak rata.

3.3.4 Korelasi Suntingan Data Lesu dengan Hasil Data Statistik dan Analisis Hayat Lesu

Langkah ini mengaitkan data hasil suntingan dengan parameter statistik dan penilaian hayat lesu untuk memahami hubungan antara variasi dalam isyarat terikan serta ketahanan komponen terhadap kegagalan. nCode GlyphWorks digunakan untuk membandingkan hasil statistik seperti nilai purata, r.m.s dan kurtosis dengan jumlah kitaran beban dan hayat lesu. Matlab pula membantu membangunkan model korelasi matematik yang lebih kompleks. Sebagai contoh, data daripada jalan tidak rata mungkin menunjukkan bahawa r.m.s dan kurtosis yang tinggi dalam isyarat terikan berkait rapat dengan peningkatan jumlah kitaran beban, yang akhirnya memendekkan hayat lesu komponen (Zakaria et al., 2018). Hasil korelasi ini menyediakan panduan untuk memahami parameter yang paling mempengaruhi lesu bahan dan kegagalan komponen.

3.3.5 Penghasilan Data Jangkaan Kerosakan

Langkah terakhir dalam pemformulasian isyarat terikan adalah menghasilkan data jangkaan kerosakan berdasarkan suntingan isyarat terikan. Dengan menggabungkan hasil analisis statistik, penilaian hayat lesu, dan korelasi data, model ramalan kerosakan dibangunkan untuk menentukan kawasan kritikal dalam komponen gantungan yang paling terdedah kepada lesu. Matlab digunakan untuk membangunkan model ramalan menggunakan parameter seperti magnitud beban, jumlah kitaran, dan taburan tenaga frekuensi. Hasil ini menghasilkan data jangkaan kerosakan yang boleh digunakan untuk memperbaiki reka bentuk sistem gantungan atau menetapkan jadual penyelenggaraan yang lebih tepat. Sebagai contoh, data daripada jalan berbatu menunjukkan bahawa magnitud beban yang tinggi dan frekuensi kitaran yang kerap menyebabkan kegagalan lebih awal pada pegas gegelung. Ramalan ini penting untuk memastikan komponen

gantungan direka bentuk semula untuk meningkatkan ketahanan terhadap beban dinamik.

3.4 PERBANDINGAN PEMETAAN RADAR PARAMETER

Perbandingan pemetaan radar parameter dilakukan untuk menilai keberkesanan kaedah analisis isyarat terikan dalam mengenal pasti tanda awal kerosakan pada komponen sistem gantungan kereta. Langkah ini melibatkan analisis data serakan isyarat terikan yang diperoleh daripada pencerapan data, diikuti dengan pemetaan radar parameter menggunakan teknik transformasi anak-gelombang. Proses ini dijalankan menggunakan perisian Matlab untuk memastikan analisis yang mendalam dan komprehensif. Analisis pemetaan ini dilakukan menggunakan perisian Excel bagi melihat taburan data berasaskan analisis jejaring labah-labah secara carta radar.

3.4.1 Analisis Data Serakan Isyarat Terikan

Data serakan isyarat terikan diperoleh daripada hasil pencerapan data lengan bawah gantungan (Data A1–A5) dan pegas gegelung (Data B1–B5) yang telah melalui proses analisis statistik dan suntingan data lesu. Data ini merekodkan variasi dalam nilai puncak, magnitud perubahan, dan taburan frekuensi yang dialami oleh kedua-dua komponen semasa diuji pada pelbagai jenis permukaan jalan, termasuk jalan rata, jalan berbatu, jalan berbonggol dan jalan tidak rata.

Perisian Matlab digunakan untuk menggambarkan data serakan ini dalam bentuk spektrum frekuensi, yang membantu mengenal pasti pola variasi yang mungkin tidak kelihatan dalam analisis domain masa. Sebagai contoh, spektrum frekuensi daripada jalan berbatu mungkin menunjukkan kawasan tenaga tinggi pada frekuensi tertentu, menunjukkan beban dinamik besar yang dikenakan pada komponen gantungan. Data serakan ini juga dibandingkan antara lengan bawah gantungan dan pegas gegelung untuk memahami tingkah laku kedua-dua komponen terhadap variasi frekuensi. Sebagai contoh, perbandingan ini mungkin menunjukkan bahawa lengan bawah gantungan lebih sensitif terhadap beban dinamik frekuensi tinggi, manakala pegas gegelung lebih efektif dalam menyerap beban pada frekuensi rendah.

3.4.2 Pemetaan Radar Parameter

Seterusnya, adalah pemetaan radar parameter yang melibatkan penggunaan transformasi anak-gelombang untuk menganalisis isyarat terikan dalam domain masa dan frekuensi secara serentak. Proses ini dijalankan menggunakan Matlab untuk menghasilkan peta radar dua dimensi, di mana satu paksi mewakili masa dan satu lagi mewakili frekuensi. Ketumpatan tenaga pada setiap kombinasi masa dan frekuensi diwakili oleh warna dalam peta radar, membolehkan pengesanan kawasan kritikal dalam isyarat. Sebagai contoh, pada jalan berbatu, peta radar memaparkan kawasan intensiti tinggi pada frekuensi tinggi, iaitu menunjukkan impak dinamik yang lebih kerap dikenakan pada komponen (Putra, Husaini & Ikbal, 2021). Sebaliknya, jalan tidak rata mungkin menghasilkan kawasan intensiti tinggi pada frekuensi rendah, menggambarkan tekanan berterusan pada komponen.

Pemetaan radar parameter ini juga membolehkan perbandingan antara lengan bawah gantungan dan pegas gegelung. Sebagai contoh, analisis radar dapat menunjukkan bahawa pegas gegelung lebih efektif dalam menyerap beban dinamik pada frekuensi rendah, manakala lengan bawah gantungan lebih terdedah kepada kerosakan pada situasi pemanduan kereta. Dengan membandingkan pola radar antara kedua-dua komponen, pemetaan ini membantu mengenal pasti kawasan berisiko tinggi yang mungkin menjadi tanda awal kerosakan bahan.

3.4.3 Hubungan antara Kuasa Ketumpatan Spektrum dan Parameter Anak-Gelombang

Dalam kajian ini, dua pendekatan utama digunakan untuk menganalisis tingkah laku isyarat terikan pada sistem gantungan kereta, iaitu kuasa ketumpatan spektrum (PSD) dan parameter anak-gelombang. Kedua-dua pendekatan ini membolehkan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kesan beban dinamik terhadap komponen gantungan serta bagaimana beban ini berkaitan dengan jangka hayat lesu. Berdasarkan Chin et al. (2023) dan Manouchehrynia et al. (2023), kajian ini menunjukkan bagaimana gabungan kedua-dua teknik ini dapat meningkatkan ketepatan dalam menilai lesu pada bahan serta mengesan tanda awal kegagalan komponen.

Kuasa ketumpatan spektrum (PSD) digunakan untuk memahami bagaimana tenaga dalam isyarat terikan diagihkan dalam domain frekuensi. Dalam konteks sistem gantungan kereta, PSD membantu mengenal pasti frekuensi utama yang memberi kesan lesu pada bahan dengan menentukan puncak tenaga dalam spektrum frekuensi. Kajian Chin et al. (2023) menunjukkan bahawa komponen frekuensi tinggi dalam spektrum PSD berkaitan dengan beban dinamik yang lebih besar, khususnya pada permukaan jalan yang kasar seperti jalan berbatu atau tidak rata. Sebagai contoh, dalam ujian terhadap pelbagai keadaan permukaan jalan, didapati bahawa jalan berbatu mempunyai tenaga yang lebih tinggi pada frekuensi tinggi, yang menunjukkan bahawa sistem gantungan mengalami impak dinamik yang lebih kerap. Sebaliknya, jalan rata menghasilkan spektrum tenaga yang lebih rendah, mencerminkan beban yang lebih terkawal dan kurang memberikan kesan lesu terhadap komponen gantungan.

Namun, kaedah PSD sahaja tidak mencukupi untuk memberikan pemahaman menyeluruh tentang tingkah laku lesu pada sistem gantungan, kerana analisis ini hanya memberikan maklumat dalam domain frekuensi tanpa mengambil kira perubahan sementara dalam isyarat. Oleh itu, parameter anak-gelombang digunakan sebagai pendekatan pelengkap bagi PSD, kerana ia membolehkan analisis dalam domain masa-frekuensi secara serentak. Kajian Manouchehrynia et al. (2023) menunjukkan bahawa transformasi anak-gelombang selanjur (CWT) lebih sesuai untuk mengesan perubahan tidak pegun dalam isyarat terikan. Dalam sistem gantungan kereta, isyarat terikan sering kali bersifat tidak tetap kerana dipengaruhi oleh pelbagai faktor seperti kelajuan kenderaan, keadaan jalan, dan variasi beban dinamik. Dengan menggunakan CWT, analisis dapat dilakukan dengan lebih terperinci kerana kaedah ini membolehkan pemisahan isyarat kepada pelbagai komponen frekuensi mengikut masa.

Hasil daripada gabungan kedua-dua teknik ini menunjukkan bahawa PSD memberikan gambaran tentang spektrum tenaga dalam domain frekuensi, manakala CWT membolehkan pemantauan perubahan tenaga dalam domain masa-frekuensi. Dengan kata lain, PSD boleh mengenal pasti frekuensi dominan yang menyebabkan lesu, sementara CWT boleh menentukan pada waktu bilakah beban tertinggi berlaku dan bagaimana ia berubah dari semasa ke semasa. Sebagai contoh, dalam ujian pada permukaan jalan berbatu, PSD menunjukkan peningkatan tenaga pada frekuensi tinggi,

manakala analisis CWT mendedahkan bahawa impak dinamik berlaku dalam corak yang tidak sekata tetapi berulang dalam tempoh masa tertentu. Ini bermakna, dengan menggunakan CWT, analisis lesu dapat dibuat dengan lebih tepat kerana ia membolehkan pengesanan awal tentang bahagian mana dalam isyarat yang mengalami beban tinggi secara berulang dan berpotensi menyebabkan lesu pada bahan.

Selain itu, kajian ini turut mengaitkan kurtosis dan nilai RMS dalam isyarat terikan dengan hasil analisis PSD dan CWT. Kajian Manouchehrynia et al. (2023) menunjukkan bahawa jalan tidak rata menghasilkan kurtosis yang lebih tinggi dan nilai RMS yang lebih besar, yang menunjukkan bahawa sistem gantungan mengalami kitaran beban yang lebih agresif. Nilai kurtosis yang tinggi dalam isyarat sering dikaitkan dengan lonjakan beban yang tidak sekata, yang boleh mempercepatkan lesu pada bahan. Oleh itu, dengan menggunakan analisis PSD dan CWT secara serentak, lesu pada bahan boleh dikaji dengan lebih tepat, dan model pemantauan kegagalan dapat dikembangkan dengan lebih berkesan.

Hasil analisis ini juga digunakan dalam pemetaan radar parameter, yang membolehkan perbandingan antara sistem gantungan dalam pelbagai keadaan pemanduan. Gabungan PSD dan CWT memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang tingkah laku lesu pada bahan serta membantu dalam membangunkan model ramalan hayat lesu yang lebih tepat. Hasil daripada kajian ini menyumbang kepada pembangunan strategi pemantauan kestabilan sistem gantungan kereta, yang membolehkan tindakan penyelenggaraan dilakukan dengan lebih awal sebelum kegagalan berlaku.

3.5 RINGKASAN

Bab ini menjelaskan metodologi kajian yang terstruktur seperti dalam Rajah 3.1, bermula dengan pencerapan data isyarat terikan daripada lengan bawah gantungan (Data A1–A3) dan pegas gegelung (Data B1–B3). Data ini disunting untuk mengatasi gangguan menggunakan nCode GlyphWorks, diikuti analisis statistik untuk mengenal pasti parameter utama seperti nilai purata dan sisihan piawai. Proses ini memberikan pemahaman awal tentang kestabilan dan variasi isyarat terikan sebelum penilaian hayat lesu dijalankan menggunakan algoritma *Rainflow Counting* untuk meramalkan jangka hayat komponen berdasarkan magnitud dan jumlah kitaran beban. Korelasi antara hasil statistik dan analisis hayat lesu membantu mengenal pasti hubungan parameter isyarat dengan ketahanan komponen, yang seterusnya menghasilkan data jangkaan kerosakan. Kajian ini menyumbang kepada pembangunan pemetaan radar parameter, yang menggabungkan analisis domain masa dan frekuensi secara serentak menggunakan transformasi anak-gelombang dalam Matlab. Pemetaan ini membolehkan pengesanan tanda awal kerosakan dengan lebih sensitif, seperti variasi kecil dalam spektrum tenaga, menjadikannya alat yang berkesan untuk menilai hayat lesu dan meningkatkan kebolehpercayaan sistem gantungan kereta.

BAB IV

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

4.1 PENGENALAN

Bab ini membincangkan hasil analisis yang diperoleh daripada pemerhatian dan pemprosesan isyarat terikan pada komponen utama sistem gantungan kereta. Data isyarat terikan telah direkodkan semasa kenderaan bergerak melalui tiga jenis permukaan jalan yang berbeza. Setiap isyarat dianalisis menggunakan gabungan kaedah statistik, penjelmaan anak-gelombang dan teknik pemetaan visual carta radar bagi mencapai objektif kajian. Pendekatan ini bertujuan untuk memahami tingkah laku dinamik komponen gantungan terhadap bebanan sebenar semasa operasi dan mengenal pasti keupayaan hayat lesu serta kerosakan awal yang mungkin berlaku pada struktur.

Bagi mencapai objektif pertama, data isyarat terikan yang diperoleh telah dianalisis secara statistik dengan mengambil kira beberapa parameter utama iaitu nilai min, nilai punca min kuasa dua (RMS), kurtosis dan hayat lesu. Analisis ini bertujuan mencirikan kelakuan isyarat berdasarkan variasi permukaan jalan serta perbezaan tindak balas antara lengan bawah gantungan dan pegas gegelung. Seterusnya bagi objektif kedua, pendekatan penjelmaan anak-gelombang digunakan untuk mengenal pasti kandungan frekuensi isyarat dalam domain masa. Kaedah ini membolehkan pemetaan ciri-ciri penting seperti kejutan beban atau variasi tenaga yang tidak seragam yang mungkin menyumbang kepada lesu pada komponen. Analisis turut membandingkan antara isyarat asal dan isyarat yang telah disunting berdasarkan hayat lesu bagi melihat kesan penapisan ke atas integriti data.

Akhir sekali, bagi memenuhi objektif ketiga, teknik analisis data serakan dan pemetaan carta radar digunakan untuk membuat perbandingan visual secara carta radar antara pelbagai parameter yang diperoleh. Kaedah ini memberikan gambaran

menyeluruh tentang keberkesanan isyarat yang dianalisis dalam mengesan tanda awal kerosakan pada sistem gantungan kenderaan. Keseluruhan analisis ini dijalankan dengan menggunakan beberapa perisian seperti MATLAB, Dewesoft, nCode, *Microsoft Excel* dan *Wavelet Toolbox* yang digabungkan secara sistematik. Melalui pendekatan ini, kajian ini bukan sahaja dapat mencirikan tingkah laku struktur dengan lebih mendalam, malah membuka peluang untuk diaplikasikan dalam sistem pemantauan kesihatan struktur kenderaan.

4.2 PENCIRIAN KELAKUAN ISYARAT TERIKAN

Pencirian kelakuan isyarat terikan merupakan langkah penting dalam memahami tingkah laku komponen kenderaan terhadap beban dinamik yang dikenakan ketika beroperasi di atas pelbagai jenis permukaan jalan. Isyarat terikan merujuk kepada perubahan relatif panjang asal bahan akibat daya yang dikenakan dan pencerapan nilai ini dapat digunakan untuk menilai potensi kegagalan struktur berdasarkan ciri-ciri statistiknya.

Dalam kajian ini, data isyarat terikan diperoleh daripada pencerapan pada komponen sistem gantungan, iaitu lengan bawah gantungan dan pegas gegelung. Pencerapan dijalankan melalui ujian pemanduan sebenar yang melibatkan tiga jenis laluan berbeza, iaitu jalan pertama (A1 dan B1) DECTAR ke Kolej Ungku Omar (KUO), jalan kedua (A2 dan B2) daripada Fakulti Sains Sosial dan Kemanusiaan (FSSK) ke Pintu Masuk UKM 2 dan jalan ketiga (A3 dan B3) iaitu Pintu Masuk UKM 3 ke Fakulti Undang-Undang (FUU). Setiap laluan ini dipilih bagi mewakili keadaan persekitaran operasi sebenar yang berbeza dari segi kejutan beban dan variasi tenaga yang diterima oleh struktur kenderaan.

Isyarat yang direkodkan merupakan data masa nyata dalam bentuk analog yang kemudiannya ditukarkan kepada bentuk digital melalui sistem pemerolehan data. Data ini kemudiannya dianalisis menggunakan kaedah statistik bagi mendapatkan parameter seperti min, nilai punca min kuasa dua (RMS), kurtosis, dan nilai puncak. Setiap parameter ini mempunyai peranan penting dalam mentafsir keadaan beban yang dikenakan ke atas komponen iaitu min ataupun purata menunjukkan nilai tengah isyarat dan digunakan untuk mengenal pasti sama ada terdapat beban statik tetap ke atas

komponen. RMS atau nilai punca min kuasa dua dapat mengukur magnitud keseluruhan isyarat, berkaitan secara langsung dengan tenaga yang dihantar ke struktur. Seterusnya, nilai kurtosis menggambarkan tumpuan lengkung taburan data. Nilai kurtosis tinggi menunjukkan adanya puncak beban ekstrem yang boleh mempercepatkan kegagalan lesu manakala nilai puncak merujuk kepada nilai maksimum beban yang dikenakan iaitu penting untuk menilai beban fana.

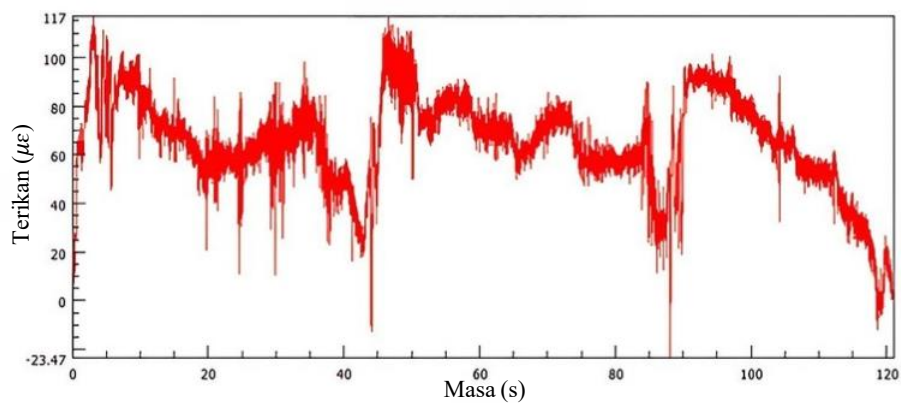
Kesemua parameter ini dianalisis secara perbandingan antara komponen dan jenis laluan. Sebagai contoh, pegas gegelung dijangka menunjukkan kadar variasi lebih tinggi dalam nilai RMS berbanding lengan bawah gantungan kerana sifatnya yang elastik dan keupayaan menyerap kejutan. Hasil pencirian ini juga membolehkan penyelidik mengenal pasti corak beban berulang yang mungkin menyebabkan kepada kegagalan akibat lesu. Dengan mengenal pasti corak ini, ia membantu dalam menapis data penting untuk dianalisis dalam bahagian seterusnya seperti penilaian hayat lesu dan pemetaan radar kerosakan.

4.2.1 Hasil Pencerapan Data Terikan

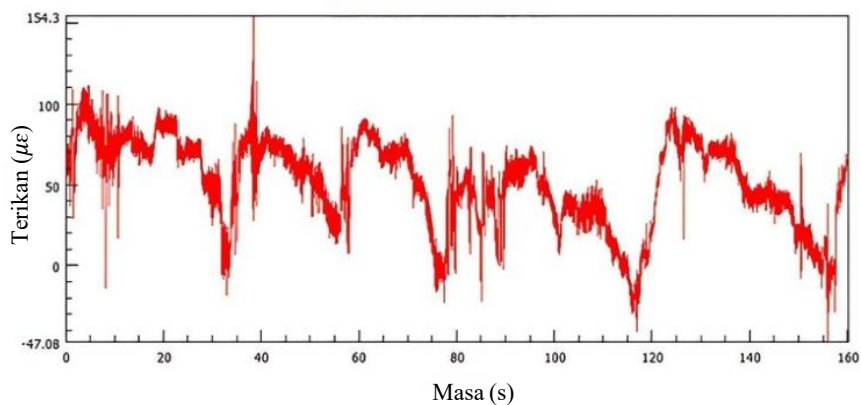
Pencerapan data terikan bagi kajian ini dilakukan menggunakan tolok terikan jenis foil yang dipasang pada dua komponen sistem gantungan kenderaan iaitu lengan bawah gantungan dan pegas gegelung. Pemasangan penderia ini dijalankan berdasarkan lokasi yang dijangka mengalami regangan tertinggi berdasarkan keputusan simulasi unsur terhingga (FEA) apabila kenderaan bergerak di atas pelbagai permukaan jalan. Data terikan direkodkan melalui sistem pemerolehan data semasa ujian pemanduan sebenar yang dijalankan di tiga laluan berbeza sekitar kampus Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), Bangi.

Hasil pencerapan ini digambarkan dalam Rajah 4.1 dan 4.2, yang menunjukkan bentuk isyarat asal bagi kedua-dua komponen merentasi ketiga-tiga laluan tersebut. Berdasarkan Rajah 4.1, bentuk gelombang bagi lengan bawah gantungan menunjukkan perbezaan yang ketara antara laluan. Untuk Laluan 1 merupakan jalan yang agak rata, isyarat terikan menunjukkan bentuk yang lebih stabil dan berkala, menandakan beban yang sekata dan berfrekuensi rendah. Bagi Laluan 2 yang mempunyai beberapa bonggol, terdapat puncak isyarat yang tajam dan mendadak, menunjukkan wujudnya

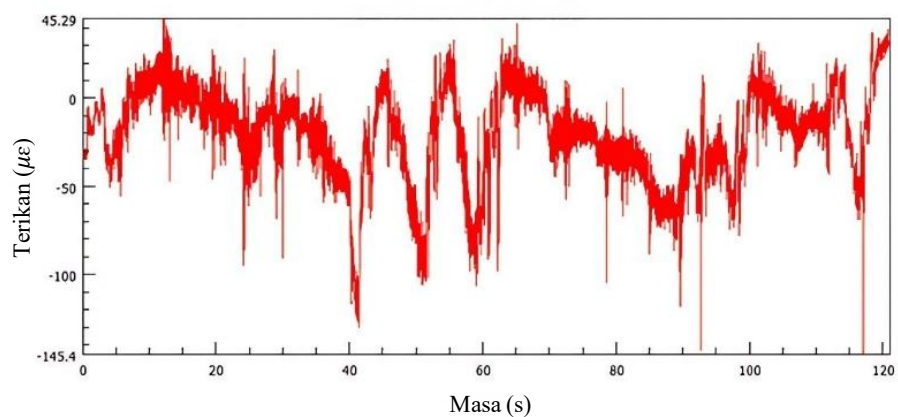
kejutan beban apabila kenderaan melintasi bonggol. Manakala bagi Laluan 3 yang tidak rata dan berlubang, bentuk isyarat memperlihatkan corak yang tidak sekata, dengan fluktuasi amplitud yang tinggi, menunjukkan kesan variasi tenaga akibat permukaan jalan yang tidak rata dan berlubang.



(a)



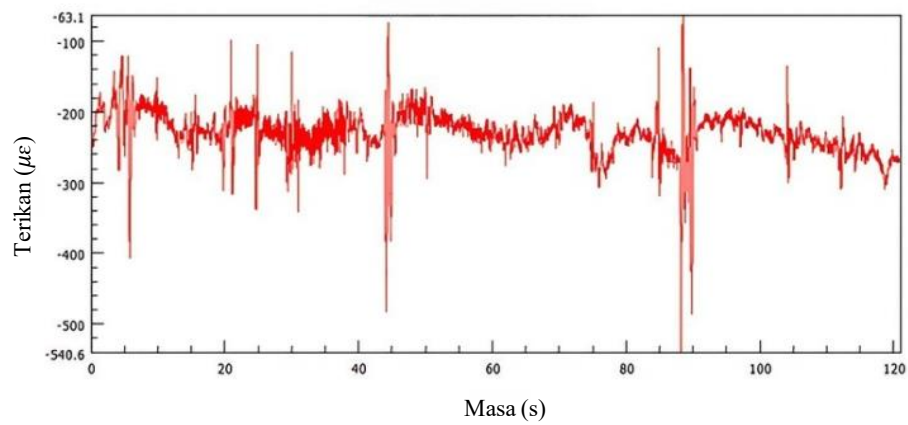
(b)



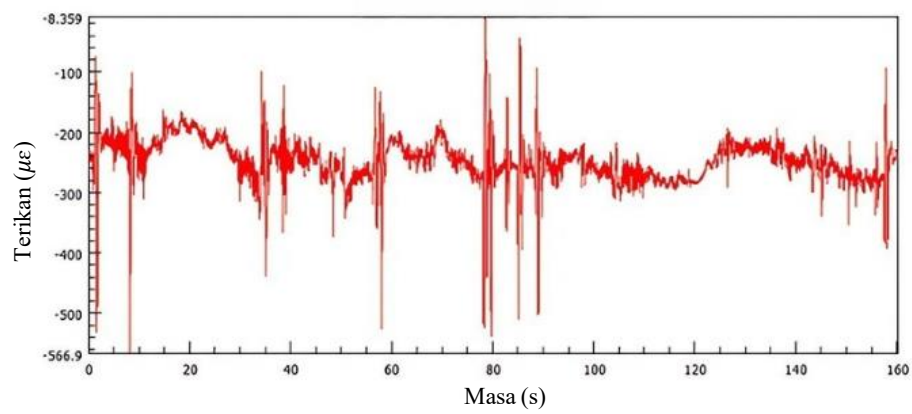
(c)

Rajah 4.1 Isyarat asal bagi lengan bawah gantungan: (a) A1-Isyarat bagi laluan pertama, (b) A2-Isyarat bagi laluan kedua, (c) A3-Isyarat bagi laluan ketiga

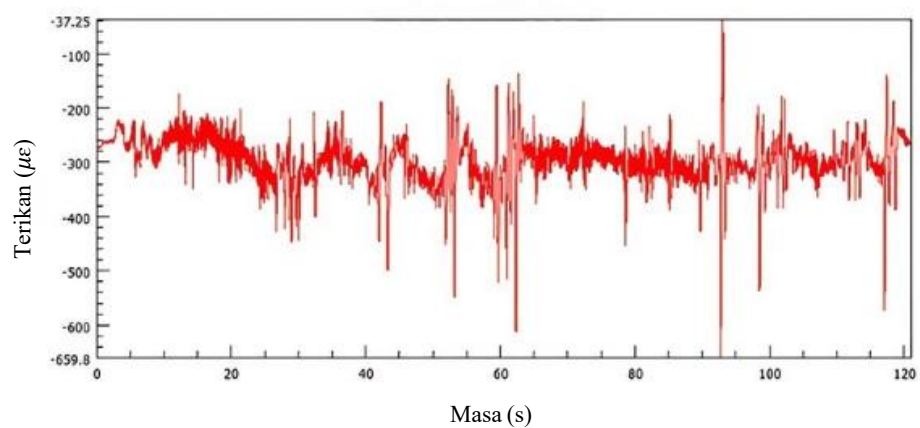
Seterusnya, Rajah 4.2 menunjukkan isyarat terikan asal yang diperolehi daripada pegas gegelung bagi ketiga-tiga laluan yang sama. Secara umumnya, pegas gegelung menunjukkan variasi yang lebih besar dalam amplitud berbanding lengan bawah gantungan, terutamanya dalam Laluan 2 dan Laluan 3. Hal ini disebabkan oleh sifat elastik pegas yang lebih responsif terhadap perubahan beban. Untuk Laluan 1, isyarat masih menunjukkan kestabilan namun terdapat sedikit turun naik kecil yang menunjukkan gerakan semula jadi pada sistem gantungan. Bagi Laluan 2, puncak-puncak regangan adalah lebih tajam, manakala bagi Laluan 3, isyarat menunjukkan ciri-ciri beban tidak terkawal dengan perubahan mendadak dalam tempoh masa yang singkat, menandakan impak tinggi daripada permukaan jalan yang berlubang.



(a)



(b)



(c)

Rajah 4.2 Isyarat asal bagi komponen pegas gegelung: (a) B1-Isyarat bagi laluan pertama, (b) B2-Isyarat bagi laluan kedua, (c) B3-Isyarat bagi laluan ketiga

4.2.2 Analisis Statistik Isyarat Terikan Asal

Bagi menilai ciri-ciri regangan yang dialami oleh komponen sistem gantungan, analisis statistik dijalankan terhadap isyarat terikan asal yang diperoleh daripada Laluan 1 iaitu laluan jalan rata dari (A1 dan B1) DECTAR ke Kolej Ungku Omar (KUO). Dua komponen yang dianalisis ialah lengan bawah gantungan dan pegas gegelung. Lima parameter statistik yang dikira ialah kurtosis, purata, min punca kuasa dua (RMS) dan kepencongan. Analisis ini membolehkan penilaian terhadap kestabilan beban, fluktuasi serta potensi berlakunya kejutan beban terhadap komponen kenderaan.

Berdasarkan data asal bagi lengan bawah gantungan, nilai purata isyarat ialah $64.98 \mu\epsilon$, menunjukkan wujudnya regangan positif yang sederhana sepanjang laluan jalan rata. Nilai RMS direkodkan pada $67.86 \mu\epsilon$, yang menunjukkan sedikit variasi regangan sekitar nilai purata. Nilai kurtosis ialah 3.81, yang berada sedikit di atas nilai normal (3), menandakan terdapat puncak regangan luar biasa dalam jumlah yang kecil. Nilai kepencongan ialah -0.67 , menunjukkan isyarat cenderung ke arah nilai lebih rendah, iaitu kemungkinan terdapat lebih banyak nilai regangan yang lebih kecil berbanding yang tinggi. Ini selari dengan sifat laluan yang rata dan tidak menghasilkan hentakan yang kuat terhadap struktur.

Manakala untuk pegas gegelung, nilai purata isyarat asal ialah $-230 \mu\epsilon$, menunjukkan regangan negatif yang mungkin berkait dengan sifat tekanan mampatan pegas sepanjang pergerakan. Nilai RMS direkodkan pada $232.28 \mu\epsilon$, menunjukkan tahap fluktuasi tenaga yang lebih tinggi berbanding lengan bawah gantungan. Kurtosis bagi isyarat ini sangat tinggi iaitu 17.34, yang jelas menunjukkan kehadiran puncak-puncak regangan yang luar biasa atau kejutan beban sesaat. Nilai kepencongan ialah -1.71 , menunjukkan taburan data yang berat ke arah regangan negatif, iaitu tekanan mampatan mendadak yang mungkin disebabkan oleh penyerap hentakan bekerja secara agresif ketika melalui bahagian jalan yang tidak sempurna walaupun ianya jalan yang rata.

Secara perbandingan, didapati bahawa pegas gegelung menunjukkan regangan yang lebih tinggi serta fluktuasi tenaga yang lebih besar dalam bentuk RMS dan sisihan piawai. Nilai kurtosis yang jauh lebih tinggi juga menandakan bahawa komponen ini

lebih terdedah kepada beban mendadak, walaupun dalam keadaan jalan yang dianggap rata. Hal ini sejajar dengan fungsi asal pegas gegelung sebagai penyerap hentakan utama dalam sistem gantungan kenderaan, justeru sifat dinamikanya lebih ketara. Sebaliknya, lengan bawah gantungan memperlihatkan tingkah laku yang lebih stabil dan regangan yang lebih terkawal.

Jadual 4.1 Statistik Isyarat Terikan Asal bagi Laluan 1

Komponen	Kurtosis	Min ($\mu\epsilon$)	RMS ($\mu\epsilon$)	Kepencongan
(A1) Lengan bawah gantungan	3.81	64.98	67.86	-0.67
(B1) Pegas gegelung	17.34	-230.00	232.28	-1.71

Bagi Laluan 2, iaitu dari (A2 dan B2) Fakulti Sains Sosial dan Kemanusiaan (FSSK) ke Pintu Masuk UKM 2, permukaan jalan mempunyai beberapa bonggol kelajuan yang menghasilkan kejutan beban dan regangan berulang terhadap sistem gantungan. Komponen lengan bawah gantungan yang mempunyai nilai purata isyarat sebanyak $51.59 \mu\epsilon$, menunjukkan regangan positif sederhana dalam lingkungan beban operasi normal. Nilai RMS ialah $57.98 \mu\epsilon$, manakala kurtosis mencatatkan nilai 2.71, sedikit di bawah nilai normal (3), yang menunjukkan taburan isyarat yang lebih rata dan kurang puncak ekstrem. Nilai kepencongan ialah -0.6 , menunjukkan isyarat cenderung ke arah regangan lebih kecil berbanding purata. Ini menunjukkan beban yang dikenakan adalah tidak terlalu ekstrem namun tetap menunjukkan perubahan mendadak akibat bonggol.

Untuk pegas gegelung, nilai purata ialah $-248.02 \mu\epsilon$, yang sekali lagi menunjukkan kehadiran tekanan mampatan, ciri tipikal komponen ini ketika menyerap hentakan. Nilai RMS adalah $251.34 \mu\epsilon$, lebih tinggi berbanding komponen lengan bawah gantungan, menandakan kehadiran tenaga yang lebih besar. Nilai kurtosis adalah sangat tinggi iaitu 14.06, menunjukkan terdapat beberapa puncak regangan mendadak yang menandakan kejutan beban signifikan akibat hentakan bonggol. Nilai kepencongan ialah -1.29 , memperkukuhkan penemuan bahawa regangan negatif iaitu mampatan kuat berlaku lebih kerap berbanding regangan positif. Secara perbandingan,

pegas gegelung menunjukkan regangan yang lebih besar dan lebih bertenaga secara statistik berbanding lengan bawah gantungan. Nilai kurtosis yang tinggi mencadangkan bahawa komponen ini lebih terdedah kepada puncak regangan ekstrem apabila melalui jalan berbonggol, berbanding dalam laluan jalan rata.

Jadual 4.2 Statistik Isyarat Terikan Asal bagi Laluan 2

Komponen	Kurtosis	Min ($\mu\epsilon$)	RMS ($\mu\epsilon$)	Kepencongan
(A2) Lengan bawah gantungan	2.71	51.59	57.98	-0.60
(B2) Pegas gegelung	14.06	-248.02	251.34	-1.29

Laluan 3 melibatkan jalan dari (A3 dan B3) Pintu Masuk UKM 3 ke Fakulti Undang-Undang (FUU), iaitu kawasan yang mempunyai permukaan tidak rata dan berlubang. Permukaan sebegini lazimnya menyebabkan perubahan beban mendadak dan ketara terhadap sistem gantungan kenderaan. Oleh itu, analisis statistik bagi isyarat terikan asal dalam laluan ini penting untuk mengenal pasti kesan sebenar kejutan beban tidak sekata terhadap komponen struktur.

Bagi komponen lengan bawah gantungan, nilai purata regangan ialah $-20.8 \mu\epsilon$, menunjukkan regangan negatif ringan akibat kesan beban ke bawah. Nilai RMS dicatatkan pada $33.43 \mu\epsilon$, menunjukkan wujudnya fluktuasi tenaga yang sederhana sekitar nilai purata. Nilai kurtosis adalah 3.74, yang melebihi nilai normal taburan Gaussian iaitu 3.0, menandakan kehadiran puncak isyarat mendadak akibat impak jalan berlubang. Nilai kepencongan ialah -0.74 , menggambarkan taburan isyarat yang condong ke arah regangan negatif, iaitu tekanan akibat seretan atau hentakan ke bawah.

Bagi pegas gegelung, nilai purata ialah $-297.45 \mu\epsilon$, menandakan tekanan mampatan yang jauh lebih tinggi berbanding komponen lengan bawah gantungan. Nilai RMS ialah $300.94 \mu\epsilon$, menunjukkan magnitud isyarat yang sangat besar. Kurtosis mencecah 11.02 yang merupakan nilai tertinggi antara ketiga-tiga laluan, menunjukkan kejutan beban ekstrem akibat impak yang kuat dari permukaan jalan yang rosak. Nilai

kepencongan ialah -1.21 , menunjukkan taburan berat ke arah regangan negatif secara mendadak dan berulang.

Dapatan bagi Laluan 3 menunjukkan bahawa jalan berlubang memberikan beban yang paling agresif dan tidak seragam terhadap kedua-dua komponen dalam sistem gantungan. Nilai RMS dan kurtosis yang tinggi, terutama bagi pegas gegelung, membuktikan bahawa komponen tersebut menyerap impak paling besar dan terdedah kepada fluktuasi tenaga yang ekstrem, sekaligus meningkatkan risiko kegagalan akibat lesu bahan. Sementara itu, walaupun nilai regangan lengan bawah gantungan lebih rendah, kehadiran puncak-puncak regangan yang dikesan melalui nilai kurtosis menunjukkan komponen ini turut mengalami beban mengejut yang tidak boleh diabaikan.

Jadual 4.3 Statistik Isyarat Terikan Asal bagi Laluan 3

Komponen	Kurtosis	Min ($\mu\epsilon$)	RMS ($\mu\epsilon$)	Kepencongan
(A3) Lengan bawah gantungan	3.74	-20.80	33.43	-0.74
(B3) Pegas gegelung	11.02	-297.45	300.94	-1.21

4.2.3 Penilaian Hayat Lesu Data Terikan Asal

Penilaian hayat lesu dilakukan bagi mengenal pasti keupayaan komponen sistem gantungan kenderaan untuk menahan beban regangan yang dikenakan secara berulang dalam keadaan pemanduan sebenar. Nilai hayat lesu bagi setiap komponen dan laluan diperoleh dengan menggunakan perisian nCode Glyphworks, yang membolehkan pengguna menilai jangka hayat komponen berdasarkan regangan sebenar. Data isyarat yang diperoleh daripada tolok terikan dianalisis dengan input spesifikasi bahan dan geometri asas, dan hasilnya ialah unjuran hayat lesu dalam bentuk bilangan kitaran sebelum kegagalan dijangka berlaku.

Keputusan menunjukkan bahawa lengan bawah gantungan mempunyai nilai hayat lesu yang lebih tinggi berbanding pegas gegelung dalam ketiga-tiga laluan. Dalam Laluan 1, hayat lesu bagi lengan bawah dicatatkan sebanyak 3.89×10^{10} kitaran,

manakala dalam Laluan 2 dan Laluan 3 masing-masing menurun kepada 5.23×10^9 kitaran dan 2.43×10^9 kitaran. Nilai ini menunjukkan bahawa permukaan jalan yang tidak sekata mempercepatkan proses lesu pada bahan, walaupun beban yang dikenakan masih berada dalam julat kendalian.

Sementara itu, pegas gegelung mencatatkan nilai hayat lesu yang jauh lebih rendah, iaitu 7.06×10^9 kitaran dalam Laluan 1, 2.38×10^9 kitaran dalam Laluan 2, dan hanya 9.11×10^8 kitaran dalam Laluan 3. Nilai ini membuktikan bahawa pegas gegelung lebih terdedah kepada kerosakan akibat beban berulang, sejajar dengan peranannya sebagai penyerap hentakan utama dalam sistem gantungan. Penurunan yang konsisten dalam ketiga-tiga laluan membuktikan bahawa keadaan permukaan jalan memberikan kesan langsung terhadap jangka hayat komponen. Lengan bawah gantungan menunjukkan prestasi lebih baik dari segi ketahanan regangan berulang, manakala pegas gegelung lebih mudah mengalami lesu pada bahan. Dapatan ini penting dalam konteks reka bentuk, penyelenggaraan serta penambahbaikan daya tahan sistem gantungan kenderaan dalam persekitaran sebenar.

Jadual 4.4 Penentuan ramalan hayat lesu

Komponen	Laluan	Hayat lesu (kitaran)
Lengan Bawah Gantungan	Laluan 1 (A1)	3.89×10^{10}
	Laluan 2 (A2)	5.23×10^9
	Laluan 3 (A3)	2.43×10^9
Pegas Gegelung	Laluan 1 (B1)	7.06×10^9
	Laluan 2 (B2)	2.38×10^9
	Laluan 3 (B3)	9.11×10^8

4.2.4 Hubungan antara Parameter Statistik dan Hayat Lesu

Korelasi antara parameter statistik isyarat terikan dan nilai hayat lesu membolehkan pemahaman yang lebih mendalam terhadap kesan beban berulang terhadap ketahanan struktur komponen automotif. Dalam kajian ini, dua parameter statistik utama yang diperhatikan ialah punca min kuasa dua (RMS) dan kurtosis, yang masing-masing mewakili magnitud purata regangan dan kehadiran beban ekstrem dalam isyarat. Walaupun tiada pengiraan korelasi secara matematik dijalankan, hubungan antara pola

nilai statistik ini dan nilai hayat lesu yang diperoleh dapat dinilai secara pemerhatian dan analisis perbandingan.

Secara umum, nilai RMS yang tinggi mencerminkan kandungan tenaga regangan yang lebih besar, manakala kurtosis yang tinggi menunjukkan kehadiran puncak regangan yang mendadak dan ekstrem. Kedua-dua keadaan ini lazimnya meningkatkan kadar kerosakan lesu dalam bahan, yang seterusnya mempercepatkan kegagalan struktur. Berdasarkan keputusan analisis, didapati bahawa apabila nilai RMS dan kurtosis meningkat, nilai hayat lesu komponen cenderung untuk menurun.

Sebagai contoh, bagi lengan bawah gantungan, nilai RMS dalam Laluan 1 ialah $67.86 \mu\epsilon$ dengan kurtosis 3.81, dan nilai hayat lesu direkodkan sebanyak 3.89×10^{10} kitaran. Dalam Laluan 2, walaupun nilai RMS menurun kepada $57.98 \mu\epsilon$ dan kurtosis kepada 2.71, nilai hayat lesu juga menurun secara drastik kepada 5.23×10^9 kitaran. Ini menunjukkan bahawa bukan sahaja magnitud beban mempengaruhi hayat lesu, tetapi juga corak beban dan jenis permukaan jalan yang menghasilkan ketegangan tidak sekata turut memainkan peranan penting.

Bagi pegas gegelung, pola penurunan hayat lesu lebih jelas dan konsisten apabila dibandingkan dengan peningkatan RMS. Dalam Laluan 1, RMS ialah $232.28 \mu\epsilon$ dan hayat lesu ialah 7.06×10^9 kitaran. Dalam Laluan 3, RMS meningkat kepada $300.94 \mu\epsilon$ dan hayat lesu menurun kepada 9.11×10^8 kitaran. Walaupun kurtosis juga menurun sedikit daripada 17.34 kepada 11.02, kehadiran puncak beban secara kerap dapat menyumbang kepada penurunan ketahanan bahan.

Daripada pemerhatian ini, dapat disimpulkan bahawa terdapat korelasi bertentangan secara umum antara nilai RMS dan hayat lesu, iaitu apabila nilai RMS meningkat, hayat lesu berkurang. Korelasi ini juga dapat diperluas kepada kurtosis, terutamanya dalam kes di mana kehadiran regangan ekstrem memainkan peranan penting dalam mempercepatkan kerosakan bahan. Namun begitu, korelasi ini perlu ditafsirkan secara berhati-hati kerana parameter statistik sahaja tidak mencukupi untuk menggambarkan keseluruhan tingkah laku lesu sesuatu bahan, memandangkan faktor

seperti keadaan permukaan jalan, frekuensi beban, dan ciri bahan turut menyumbang kepada nilai hayat lesu secara keseluruhan.

4.3 ANALISIS PROFAIL DATA TERIKAN LESU SELEPAS SUNTINGAN

Bahagian ini membincangkan hasil analisis profail data terikan lesu bagi komponen automotif selepas proses suntingan data dijalankan menggunakan kaedah pemotongan berasaskan hayat lesu. Tujuan utama suntingan ini adalah untuk menyingkirkan bahagian data yang tidak memberikan impak signifikan terhadap kerosakan lesu serta untuk menumpukan kepada segmen data yang menyumbang kepada ketahanan komponen. Proses suntingan telah dilakukan menggunakan perisian nCode GlyphWorks berdasarkan ambang kerosakan iaitu 90% yang ditentukan daripada analisis awal dalam Bab 4.2.

Bagi setiap komponen yang diuji, termasuk lengan bawah gantungan dan pegas gegelung, data yang telah disunting menunjukkan perubahan ketara dari segi bentuk profail isyarat, nilai puncak dan kekerapan beban. Rajah gelombang selepas suntingan memperlihatkan bahawa nilai terikan ekstrem telah dikekalkan, manakala variasi kecil yang tidak menyumbang kepada kerosakan telah dikurangkan. Hal ini membolehkan analisis yang lebih fokus terhadap kerosakan yang sebenar berlaku pada komponen.

Seterusnya, analisis statistik seperti nilai purata, punca min kuasa dua (RMS), serta kurtosis juga menunjukkan perubahan selepas suntingan. Secara amnya, nilai RMS dan kurtosis selepas suntingan menjadi lebih tinggi berbanding data asal, menandakan bahawa data yang tinggal adalah yang lebih berimpak dan membawa kepada kegagalan lesu. Keadaan ini selari dengan objektif utama penyuntingan iaitu mengasingkan data yang mewakili beban lesu terhadap struktur.

Analisis hayat lesu yang dilakukan ke atas data suntingan pula menunjukkan penurunan nilai hayat berbanding data asal. Ini kerana kaedah suntingan menumpukan kepada segmen beban tinggi yang mempercepatkan kerosakan bahan. Selain itu, isyarat yang telah disunting juga dianalisis menggunakan kaedah transformasi anak-gelombang untuk mengenal pasti perubahan dalam domain masa-kekerapan. Hasil transformasi menunjukkan bahawa spektrum tenaga tertumpu pada frekuensi tertentu

selepas suntingan, berbeza dengan spektrum asal yang lebih tersebar. Kepekatan tenaga ini memperkukuhkan dapatan bahawa suntingan berjaya memfokuskan kepada isyarat yang lebih kritikal terhadap ketahanan komponen.

4.3.1 Proses Suntingan Data Lesu

Proses suntingan data lesu merupakan langkah penting dalam mengekstrak maklumat yang lebih signifikan daripada data asal isyarat terikan yang telah direkodkan. Tujuan utama penyuntingan ini adalah untuk menyingkirkan bahagian isyarat yang tidak menyumbang secara signifikan terhadap kerosakan lesu, dan seterusnya mengurangkan masa pemprosesan serta meningkatkan ketepatan dalam penilaian hayat komponen. Kaedah ini juga membolehkan penyelidik memberi tumpuan kepada beban berimpak tinggi yang mencerminkan keadaan operasi sebenar kenderaan di atas jalan raya.

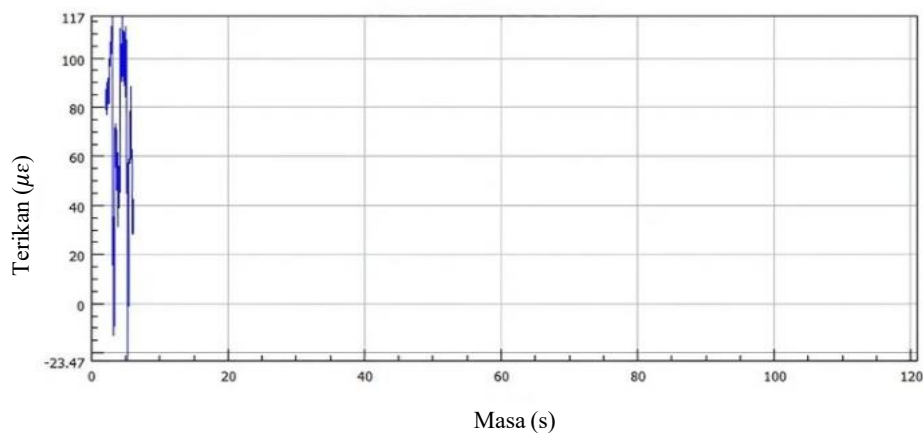
Dalam kajian ini, proses suntingan dijalankan menggunakan perisian nCode GlyphWorks, yang dilengkapi dengan modul untuk analisis dan suntingan data berdasarkan kriteria suntingan kerosakan lesu. Langkah pertama dalam proses ini ialah memuatkan isyarat terikan asal yang telah direkodkan untuk komponen lengan bawah gantungan dan pegas gegelung yang dianalisis berdasarkan parameter bahan yang telah ditentukan dalam fail bahan yang disesuaikan dengan sifat mekanikal komponen masing-masing.

Dalam proses ini, ambang kerosakan telah ditetapkan sebanyak 90%, iaitu hanya segmen isyarat yang menyumbang kepada 90% daripada jumlah keseluruhan kerosakan lesu dikekalkan. Manakala baki 10% yang dianggap sebagai tidak signifikan atau kerosakan rendah telah disingkirkan daripada isyarat. Pemilihan ambang ini dilakukan bagi memastikan proses suntingan tidak terlalu agresif hingga menghapuskan maklumat penting, sekali gus memastikan kecekapan dan tumpuan terhadap beban kritikal dikekalkan.

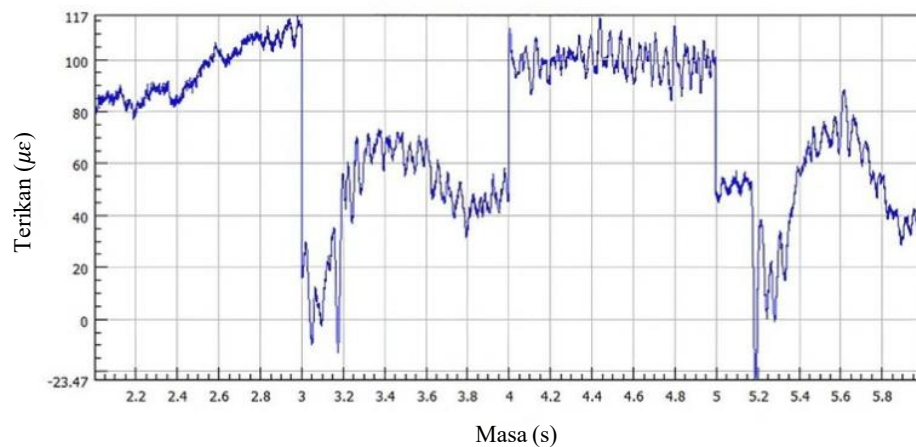
Suntingan dilakukan secara automatik oleh perisian berdasarkan kriteria kerosakan. Setelah proses suntingan selesai, satu set isyarat baharu yang lebih padat tetapi penuh dengan kandungan kerosakan telah dihasilkan. Isyarat ini kemudiannya

dieksport untuk analisis lanjutan menggunakan perisian MATLAB dan juga untuk pengiraan hayat lesu semula dalam nCode GlyphWorks.

Proses suntingan ini terbukti penting dalam menjimatkan masa pemrosesan dan dalam masa yang sama mengekalkan ketepatan analisis. Selain itu, isyarat yang telah disunting juga lebih mudah untuk ditafsir dan dibandingkan dari segi statistik, serta memudahkan pelaksanaan analisis transformasi gelombang dan pemetaan radar untuk pengesanan awal kerosakan.

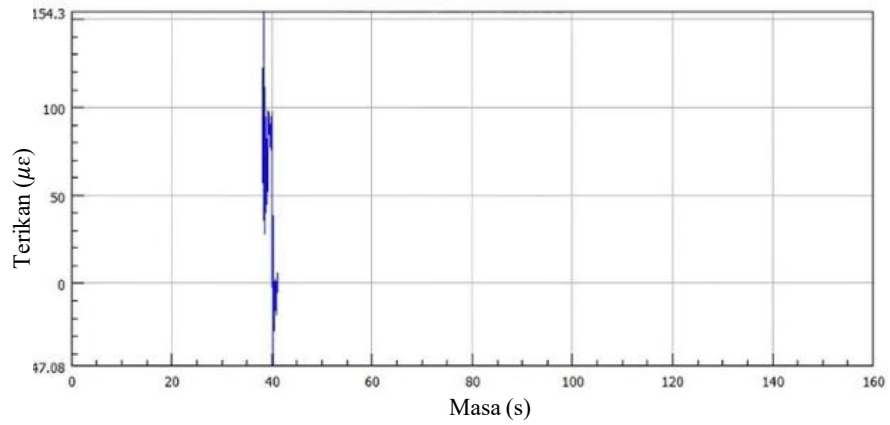


(a)

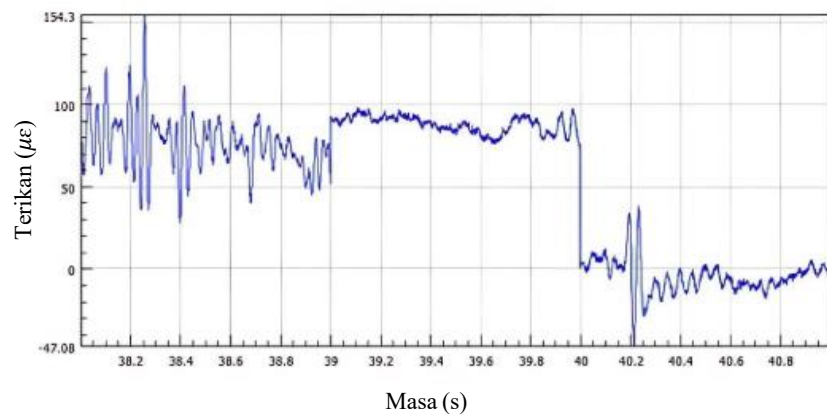


(b)

Rajah 4.3 Data suntingan komponen lengan bawah gantungan bagi laluan 1 (Data A1)

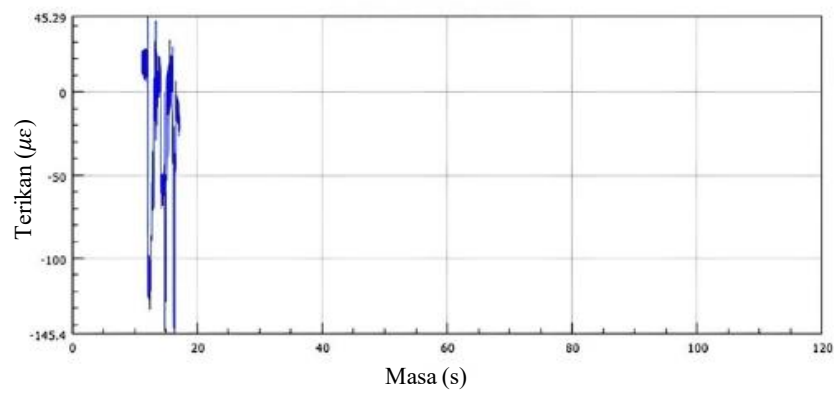


(a)

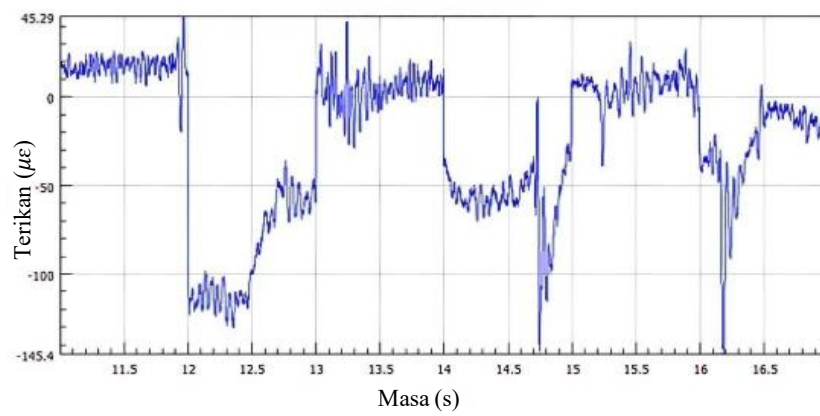


(b)

Rajah 4.4 Data suntingan komponen lengan bawah gantungan bagi laluan 2 (Data A2)

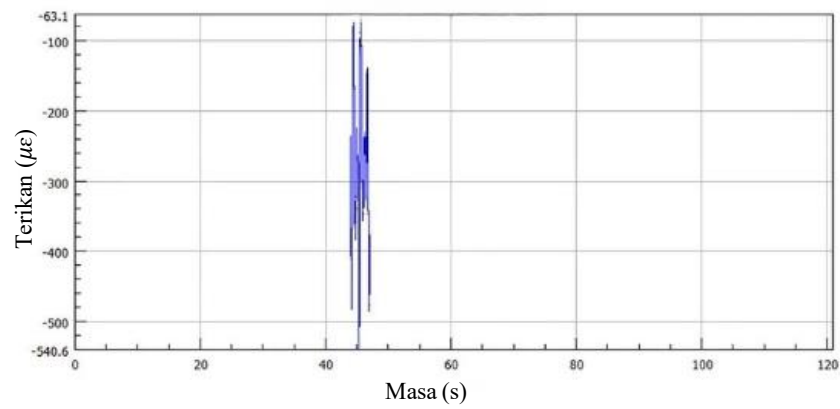


(a)

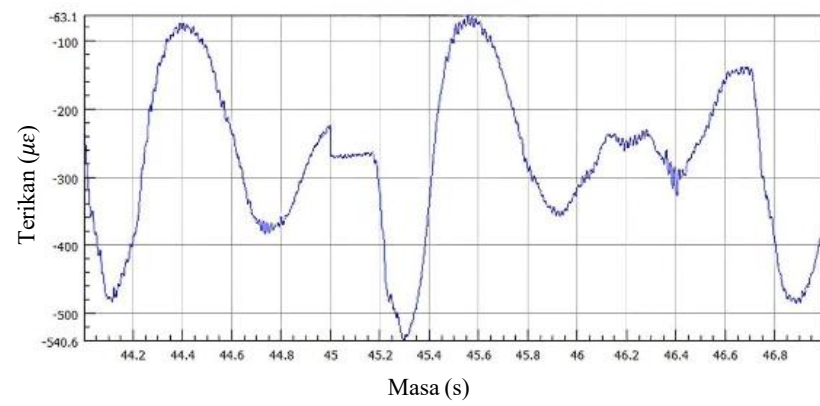


(b)

Rajah 4.5 Data suntigan komponen lengan bawah gantungan bagi laluan 3 (Data A3)

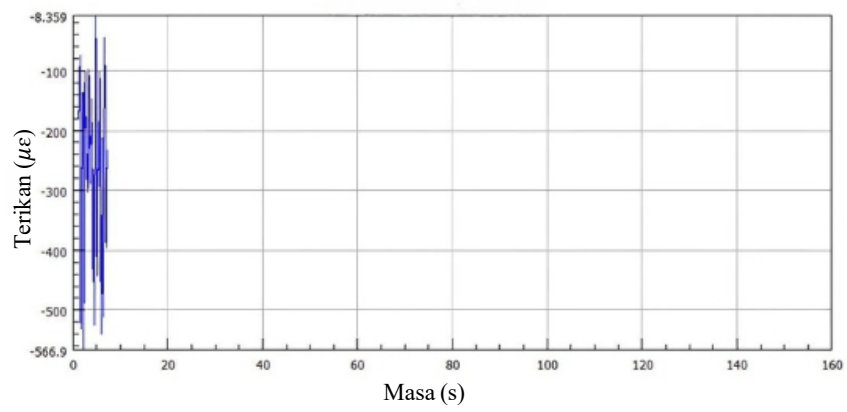


(a)

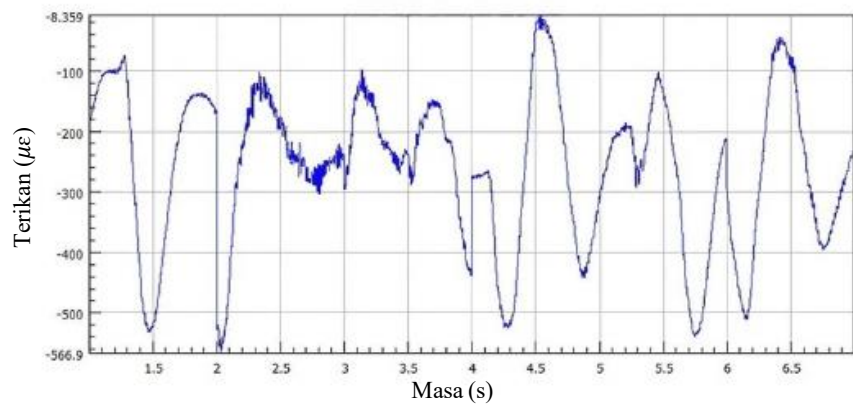


(b)

Rajah 4.6 Data suntingan komponen pegas gelung bagi laluan 1 (Data B1)

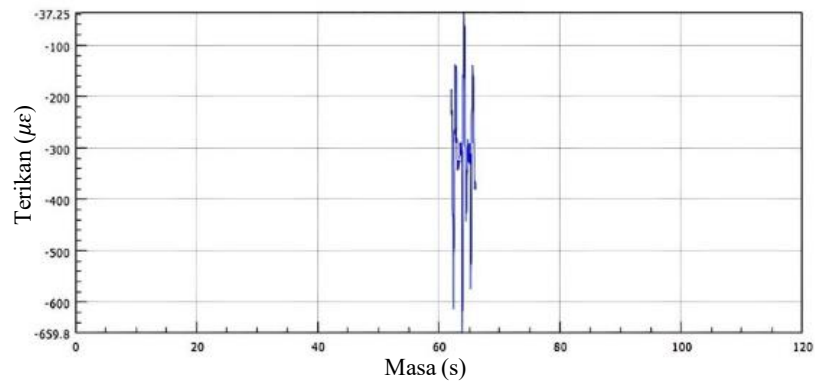


(a)

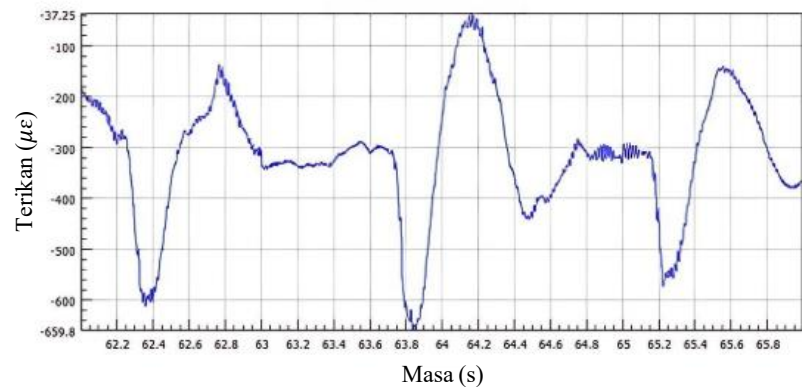


(b)

Rajah 4.7 Data suntingan komponen pegas gelung bagi laluan 2 (Data B2)



(a)



(b)

Rajah 4.8 Data suntingan komponen pegas gegelung bagi laluan 3 (Data B3)

Bagi komponen pegas gegelung, corak yang hampir serupa turut diperhatikan. Nilai RMS meningkat selepas suntingan dalam semua laluan daripada $232.28 \mu\epsilon$ kepada $281.17 \mu\epsilon$ dalam Laluan 1, $251.34 \mu\epsilon$ kepada $288.40 \mu\epsilon$ dalam Laluan 2, dan $300.94 \mu\epsilon$ kepada $338.79 \mu\epsilon$ dalam Laluan 3. Ini menunjukkan bahawa isyarat selepas suntingan lebih mencerminkan kitaran beban yang dominan terhadap kerosakan. Nilai min kekal dalam julat negatif, memperkukuh pemerhatian bahawa pegas gegelung mengalami tekanan mampatan secara konsisten, dan nilai ini turut bertambah magnitudnya selepas suntingan.

Nilai kurtosis menurun dengan signifikan bagi Laluan 1 dan 2 masing-masing daripada 17.34 kepada 2.84, dan 14.06 kepada 2.51 yang menandakan pengurangan drastik dalam kehadiran beban ekstrem. Namun begitu, dalam Laluan 3, nilai kurtosis selepas suntingan kekal tinggi pada 3.62, menunjukkan bahawa walaupun data telah

ditapis, jalan berlubang masih menghasilkan regangan puncak yang penting untuk dikekalkan dalam isyarat akhir.

4.3.2 Analisis Statistik Selepas Suntingan

Analisis statistik selepas proses suntingan dijalankan bertujuan untuk menilai kesan penyuntingan terhadap ciri-ciri penting dalam isyarat terikan yang diperoleh daripada ujian ke atas komponen automotif. Statistik yang dianalisis merangkumi nilai purata, punca min kuasa dua (RMS), kurtosis, dan hayat lesu. Parameter-parameter ini memberi gambaran kuantitatif terhadap perubahan struktur isyarat sebelum dan selepas suntingan, di samping menilai sama ada suntingan berjaya mengekalkan unsur-unsur kritikal yang berkait dengan kerosakan lesu.

Jadual 4.5 Nilai statistik selepas suntingan bagi komponen lengan bawah gantungan

Laluan	Data	Min ($\mu\epsilon$)	RMS ($\mu\epsilon$)	Kurtosis	Kepencongan
1	A1	72.80	78.47	2.62	-0.63
2	A2	53.29	68.30	1.66	-0.56
3	A3	-24.41	48.66	2.65	-0.84

Bagi komponen lengan bawah gantungan, selepas proses suntingan, nilai RMS meningkat bagi ketiga-tiga laluan. Sebagai contoh, dalam Laluan 1, nilai RMS meningkat daripada $67.86 \mu\epsilon$ kepada $78.47 \mu\epsilon$, menunjukkan bahawa isyarat selepas suntingan lebih tertumpu kepada beban dominan yang lebih signifikan. Begitu juga bagi Laluan 2 dan 3, RMS meningkat kepada masing-masing $68.30 \mu\epsilon$ dan $48.66 \mu\epsilon$. Nilai min juga menunjukkan perubahan yang ketara, terutamanya dalam Laluan 3 yang bertukar kepada $-24.41 \mu\epsilon$, mencerminkan kecenderungan regangan ke arah negatif iaitu mampatan setelah data kitaran kecil ditapis keluar.

Nilai kurtosis bagi lengan bawah gantungan turut mengalami penurunan selepas suntingan, daripada 3.81 kepada 2.62 dalam Laluan 1, 2.71 kepada 1.66 dalam Laluan 2, dan 3.74 kepada 2.65 dalam Laluan 3. Penurunan ini menunjukkan bahawa suntingan berjaya mengurangkan kehadiran puncak-puncak beban yang ekstrem dalam isyarat. Ini penting kerana regangan luar biasa yang berlaku hanya sekali tanpa menyumbang kepada lesu sebenar telah berjaya dikeluarkan melalui proses suntingan.

Jadual 4.6 Nilai statistik selepas suntingan bagi komponen pegas gegelung

Laluan	Data	Min ($\mu\epsilon$)	RMS ($\mu\epsilon$)	Kurtosis	Kepencongan
1	B1	-259.94	281.17	2.84	-0.48
2	B2	-258.56	288.40	2.51	-0.50
3	B3	-316.22	338.79	3.62	-0.51

Bagi komponen pegas gegelung, corak yang hampir serupa turut diperhatikan. Nilai RMS meningkat selepas suntingan dalam semua laluan daripada 232.28 $\mu\epsilon$ kepada 281.17 $\mu\epsilon$ dalam Laluan 1, 251.34 $\mu\epsilon$ kepada 288.40 $\mu\epsilon$ dalam Laluan 2, dan 300.94 $\mu\epsilon$ kepada 338.79 $\mu\epsilon$ dalam Laluan 3. Ini menunjukkan bahawa isyarat selepas suntingan lebih mencerminkan kitaran beban yang dominan terhadap kerosakan. Nilai min kekal dalam julat negatif, memperkukuh pemerhatian bahawa pegas gegelung mengalami tekanan mampatan secara konsisten, dan nilai ini turut bertambah magnitudnya selepas suntingan.

Nilai kurtosis menurun dengan signifikan bagi Laluan 1 dan 2 masing-masing daripada 17.34 kepada 2.84, dan 14.06 kepada 2.51 yang menandakan pengurangan drastik dalam kehadiran beban ekstrem. Namun begitu, dalam Laluan 3, nilai kurtosis selepas suntingan kekal tinggi pada 3.62, menunjukkan bahawa walaupun data telah ditapis, jalan berlubang masih menghasilkan regangan puncak yang penting untuk dikekalkan dalam isyarat akhir.

4.3.3 Penilaian Semula Hayat Lesu

Penilaian hayat lesu selepas suntingan dilakukan bagi mengenal pasti impak proses penapisan data ke atas jangka hayat komponen sistem gantungan kenderaan. Melalui kaedah suntingan berasaskan lesu, hanya kitaran beban yang signifikan dan berpotensi menyumbang kepada kerosakan akibat lesu akan dikekalkan, manakala kitaran kecil yang tidak menyumbang akan dikeluarkan.

Hasil penilaian menunjukkan bahawa nilai hayat lesu bagi lengan bawah gantungan kekal sama seperti data asal untuk ketiga-tiga laluan, iaitu 3.89×10^{10} kitaran bagi Laluan 1, 5.23×10^9 kitaran bagi Laluan 2, dan 2.43×10^9 kitaran bagi Laluan 3. Keputusan ini menunjukkan bahawa proses suntingan tidak menjejaskan ketahanan

jangka hayat komponen tersebut secara signifikan. Hal ini berkemungkinan kerana kebanyakan kandungan tenaga dalam isyarat asal datang daripada kitaran-kitaran utama yang turut dikekalkan selepas suntingan.

Namun bagi pegas gegelung, nilai hayat lesu selepas suntingan juga menunjukkan tiada perubahan berbanding data asal, iaitu 7.06×10^9 kitaran bagi Laluan 1, 2.38×10^9 kitaran bagi Laluan 2, dan 9.11×10^8 kitaran bagi Laluan 3. Ini menunjukkan bahawa kitaran-kitaran regangan kecil yang dibuang semasa suntingan tidak menyumbang besar kepada kerosakan lesu bagi komponen ini. Dalam kes ini, keputusan menunjukkan bahawa isyarat asal sudah didominasi oleh kitaran beban yang berisiko tinggi terhadap kerosakan, justeru proses suntingan tidak mengubah unjuran hayat.

Walaupun nilai hayat lesu tidak berubah, nilai RMS dan kurtosis berubah dengan ketara, yang menunjukkan bahawa bentuk isyarat selepas suntingan menjadi lebih padat dan terkawal. Nilai RMS yang meningkat selepas suntingan menunjukkan bahawa kitaran beban yang tinggal adalah lebih aktif, manakala penurunan nilai kurtosis menunjukkan pengurangan puncak ekstrem yang tidak konsisten.

Jadual 4.7 Data hayat lesu asal dan selepas suntingan

Komponen	Laluan	Hayat Lesu (Asal)	Hayat Lesu (Suntingan)	% Perbezaan
Lengan bawah gantungan	1	3.89×10^{10}	3.89×10^{10}	0
	2	5.23×10^9	5.23×10^9	0
	3	2.43×10^9	2.43×10^9	0
Pegas gegelung	1	7.06×10^9	7.06×10^9	0
	2	2.38×10^9	2.38×10^9	0
	3	9.11×10^8	9.11×10^8	0

$$\text{Perbezaan \%} = \left| \frac{\text{Asal} - \text{Suntingan}}{\text{Asal}} \right| \times 100$$

4.3.4 Hubungan antara Statistik, Suntingan dan Hayat Lesu

Korelasi antara statistik isyarat, proses suntingan data dan nilai hayat lesu adalah penting bagi memahami bagaimana pemprosesan isyarat memberi kesan terhadap ramalan lesu bagi komponen. Suntingan data dilakukan dengan matlamat untuk mengekalkan hanya kitaran beban dominan yang dapat menyumbang kepada kerosakan akibat lesu, di samping menyingkirkan kitaran kecil yang tidak signifikan. Dalam konteks ini, perbandingan antara data asal dan data selepas suntingan menunjukkan perubahan dari segi nilai parameter statistik seperti RMS, kurtosis, dan min, yang seterusnya mempengaruhi penjelasan terhadap jangka hayat komponen.

Hasil kajian mendapati bahawa nilai RMS meningkat bagi kedua-dua komponen lengan bawah gantungan dan pegas gegelung selepas proses suntingan, menandakan peningkatan kandungan tenaga dalam isyarat terikan yang tinggal. Ini menunjukkan bahawa isyarat selepas suntingan lebih mewakili beban utama yang mempengaruhi lesu. Pada masa yang sama, nilai kurtosis menurun secara konsisten, terutama dalam laluan jalan rata dan berbonggol, menandakan bahawa puncak-puncak regangan ekstrem yang jarang berlaku telah berjaya disingkirkan. Penurunan nilai kurtosis ini menjadikan isyarat lebih stabil dari segi taburan dan sesuai untuk penilaian hayat lesu yang lebih realistik.

Namun begitu, nilai hayat lesu yang diperoleh selepas suntingan menunjukkan tiada perubahan berbanding nilai asal bagi semua laluan dan komponen. Keputusan ini membuktikan bahawa walaupun struktur isyarat telah berubah secara statistik iaitu RMS meningkat dan kurtosis menurun, namun kitaran-kitaran yang menyumbang secara signifikan kepada kerosakan kekal dalam isyarat, dan oleh itu ramalan hayat lesu tidak berubah. Ini menunjukkan bahawa beban dominan telah wujud dalam data asal dan kekal tidak terjejas selepas proses suntingan.

Korelasi ini menunjukkan bahawa analisis statistik seperti RMS dan kurtosis boleh dijadikan penunjuk awal terhadap kehadiran beban yang signifikan, namun penilaian hayat lesu tetap memerlukan pengiraan menggunakan isyarat yang telah diproses dengan betul. Suntingan membantu menyaring data kepada bentuk yang lebih bersih dan dapat diwakilkan, walaupun nilai hayat lesu tidak semestinya berubah. Oleh

itu, peranan statistik adalah sebagai alat sokongan dalam memahami profil isyarat, manakala hayat lesu bergantung kepada gabungan penuh bentuk gelombang, magnitud, dan taburan kitaran yang mematuhi ciri-ciri lesu bahan.

Secara keseluruhannya, dapat dirumuskan bahawa suntingan data mengubah ciri statistik isyarat kepada bentuk yang lebih terfokus dan bersih, tanpa menjejaskan kebolehpercayaan ramalan hayat lesu. Hal ini membuktikan bahawa pendekatan suntingan berasaskan lesu adalah berkesan untuk aplikasi industri, terutamanya dalam menjimatkan masa analisis, mengurangkan beban pengiraan, dan mengekalkan maklumat kritikal dalam isyarat kejuruteraan.

4.3.5 Data Jangkaan Kerosakan

Analisis data jangkaan kerosakan dilakukan bagi menilai kesan beban berulang terhadap keupayaan struktur komponen sistem gantungan untuk menahan regangan dinamik yang berpanjangan. Dalam kajian ini, dua pendekatan utama digunakan untuk menilai potensi kerosakan berdasarkan isyarat selepas suntingan iaitu melalui parameter Kuasa Ketumpatan Spektrum (PSD) dan penjelmaan anak-gelombang. Kedua-dua kaedah ini digunakan kerana masing-masing dapat memberikan kelebihan dalam menganalisis kandungan tenaga dalam domain frekuensi serta masa-frekuensi secara serentak.

Analisis menggunakan parameter kuasa ketumpatan spektrum (PSD) bertujuan untuk mengenal pasti julat frekuensi yang mengandungi kandungan tenaga tertinggi dalam isyarat terikan. Melalui kaedah ini, perolehan maklumat mengenai bagaimana tenaga getaran diagihkan dalam domain frekuensi, sekali gus mengenal pasti frekuensi utama yang berpotensi menyebabkan lesu bahan. Berdasarkan data selepas suntingan, tenaga PSD menunjukkan peningkatan berbanding data asal, menunjukkan bahawa proses penapisan berjaya mengekalkan kitaran beban yang lebih padat dan signifikan. Sebagai contoh, tenaga PSD bagi pegas gegelung dalam Laluan 3 selepas suntingan ialah 14.93 kJ, iaitu lebih tinggi daripada 13.22 kJ sebelum suntingan, walaupun isyarat telah dipendekkan. Keadaan ini menunjukkan bahawa kitaran regangan yang tersisa adalah kitaran utama yang menyumbang besar terhadap lesu. PSD juga menunjukkan bahawa tenaga tertumpu dalam julat frekuensi rendah sehingga pertengahan iaitu 0

hingga 20 Hz, yang menandakan bahawa beban berfrekuensi rendah seperti hentakan dari bonggol atau lubang memainkan peranan besar dalam kerosakan jangka panjang.

Jadual 4.8 Nilai PSD isyarat asal dan suntingan bagi lengan bawah gantungan

Komponen	Laluan	PSD Asal (kJ)	PSD Suntingan (kJ)	% Perbezaan
Lengan bawah gantungan	1	1.08	2.27	110.19
	2	1.45	2.44	68.28
	3	2.29	4.53	97.81

Jadual 4.9 Nilai PSD isyarat asal dan suntingan bagi pegas gegelung

Komponen	Laluan	PSD Asal (kJ)	PSD Suntingan (kJ)	% Perbezaan
Pegas gegelung	1	13.22	13.48	1.96
	2	16.18	32.43	100.43
	3	18.66	14.93	19.96

Selain itu, pendekatan analisis anak-gelombang digunakan untuk mendapatkan pemetaan tenaga isyarat dalam domain masa dan frekuensi secara serentak. Kelebihan kaedah ini ialah ia membolehkan pengesanan puncak tenaga yang berlaku pada masa tertentu, menjadikannya alat penting untuk mengenal pasti lokasi masa sebenar yang berkait dengan regangan ekstrem. Hasil analisis anak-gelombang menunjukkan bahawa puncak-puncak tenaga muncul secara tidak berkala dan terhad kepada beberapa saat tertentu dalam isyarat. Sebagai contoh, bagi komponen pegas gegelung dalam Laluan 2, tenaga anak-gelombang selepas suntingan ialah 811.41 kJ, yang merupakan sebahagian kecil daripada nilai asal iaitu 2,109.27 kJ. Ini menunjukkan bahawa tenaga yang dikekalkan adalah lebih signifikan dan berpotensi menyumbang kepada kerosakan sebenar, manakala beban-beban kecil yang tidak memberi kesan jangka panjang telah disingkirkan.

Jadual 4.10 Nilai tenaga anak-gelombang isyarat asal dan suntingan bagi lengan bawah gantungan

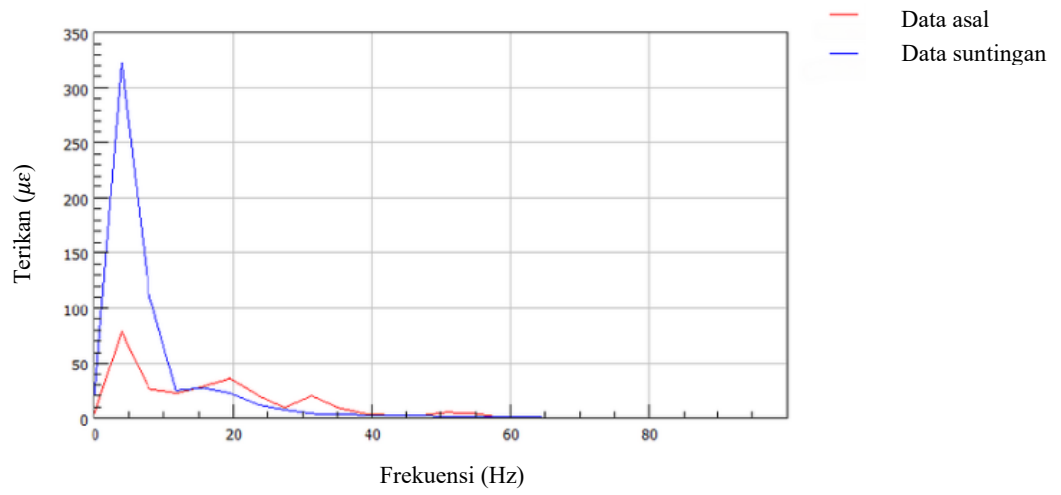
Komponen	Laluan	Tenaga Anak-gelombang Asal (kJ)	Tenaga Anak-gelombang Suntingan (kJ)	% Perbezaan
Lengan bawah gantungan	1	377.50	15.78	95.82
	2	814.36	6.19	99.24
	3	551.47	53.50	90.30

Jadual 4.11 Nilai tenaga anak-gelombang isyarat asal dan suntingan bagi pegas gegelung

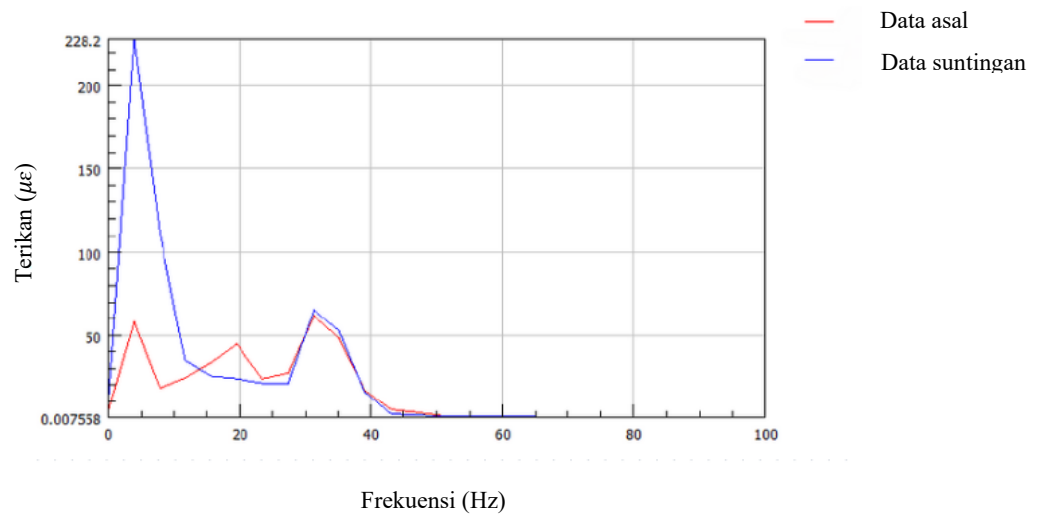
Komponen	Laluan	Tenaga Anak-gelombang Asal (kJ)	Tenaga Anak-gelombang Suntingan (kJ)	% Perbezaan
Pegas gegelung	1	1,058.37	311.12	70.61
	2	2,109.27	811.41	61.52
	3	1,889.72	482.29	74.48

Daripada gabungan kedua-dua pendekatan ini, dapat dirumuskan bahawa proses suntingan telah berjaya menyaring isyarat kepada bentuk yang lebih ringkas namun masih mewakili kandungan tenaga utama yang berisiko tinggi. Parameter PSD membantu mengenal pasti zon frekuensi kritikal manakala analisis anak-gelombang pula memberi gambaran masa yang jelas terhadap masa dan di mana beban puncak berlaku. Hal ini penting untuk tujuan penyelenggaraan dan pemantauan kesihatan struktur secara lebih efektif, di mana tumpuan boleh diberikan kepada kawasan atau keadaan operasi tertentu sahaja, berbanding keseluruhan tempoh operasi.

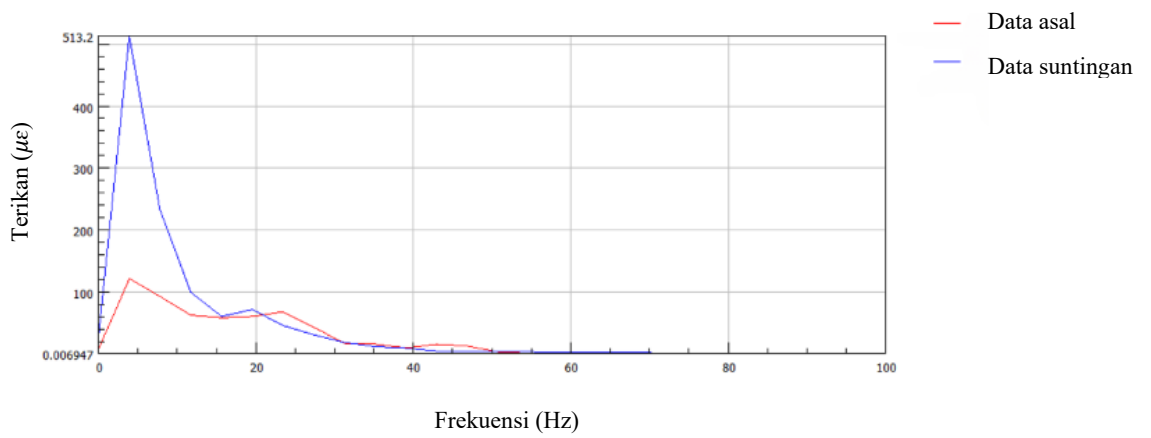
Daripada analisis ini, kita dapat lihat bahawa data jangkaan kerosakan yang diperoleh melalui gabungan parameter PSD dan analisis anak-gelombang selepas proses suntingan menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan ketepatan ramalan hayat lesu dan kecekapan pemantauan struktur. Proses ini bukan sahaja membolehkan pengesanan punca kerosakan dengan lebih baik, tetapi juga membantu dalam pembangunan strategi reka bentuk dan penyelenggaraan yang lebih bersasar dan ekonomi dalam industri automotif.



(a)



(b)

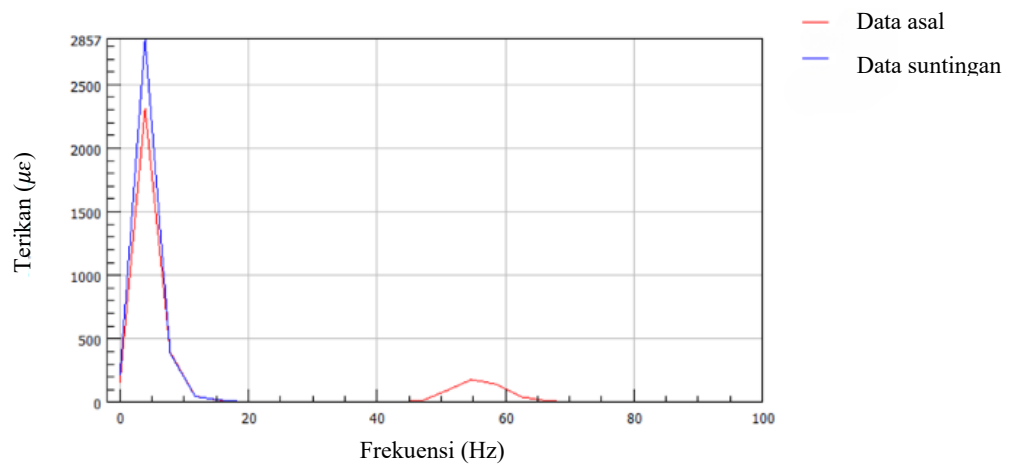


(c)

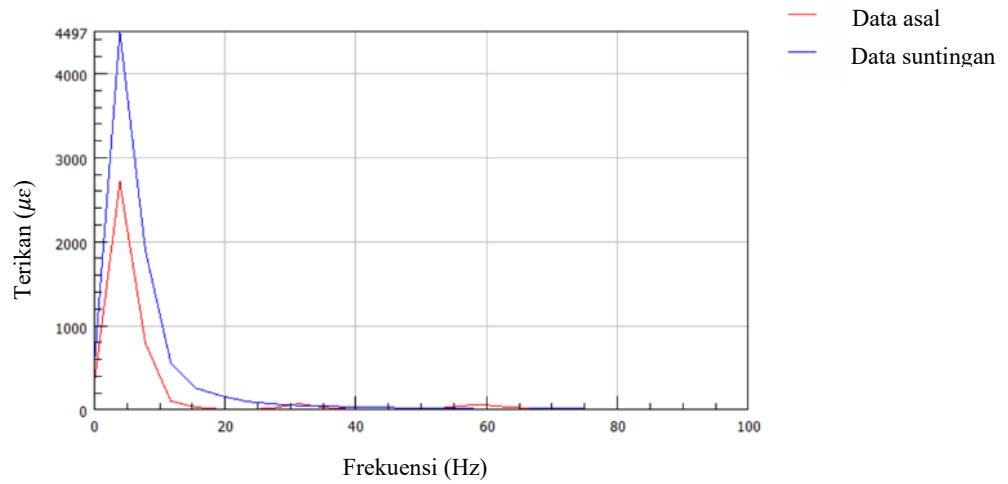
Rajah 4.9 Kuasa ketumpatan spektrum (PSD) bagi lengan bawah gantungan: (a) Lalan 1, (b) Lalan 2, (c) Lalan 3

Berdasarkan graf PSD pada Rajah 4.9 di atas, dapat diperhatikan bahawa nilai tenaga PSD bagi komponen lengan bawah gantungan meningkat selepas proses suntingan bagi ketiga-tiga laluan. Sebagai contoh, dalam Laluan 1, tenaga PSD meningkat daripada 1.08 kJ kepada 2.27 kJ, manakala dalam Laluan 2 ia meningkat daripada 1.45 kJ kepada 2.44 kJ. Kenaikan ini menunjukkan bahawa walaupun jumlah kitaran berkurang selepas suntingan, kandungan tenaga dalam julat frekuensi utama kekal dan menjadi lebih padat. Ini membuktikan bahawa proses suntingan berjaya mengekalkan komponen tenaga penting dalam isyarat dan menyingkirkan kitaran regangan kecil yang tidak menyumbang kepada lesu. Untuk Laluan 3, peningkatan yang lebih ketara direkodkan daripada 2.29 kJ kepada 4.53 kJ, mencerminkan bahawa jalan berlubang memberikan lebih banyak beban berfrekuensi rendah yang masih signifikan selepas suntingan.

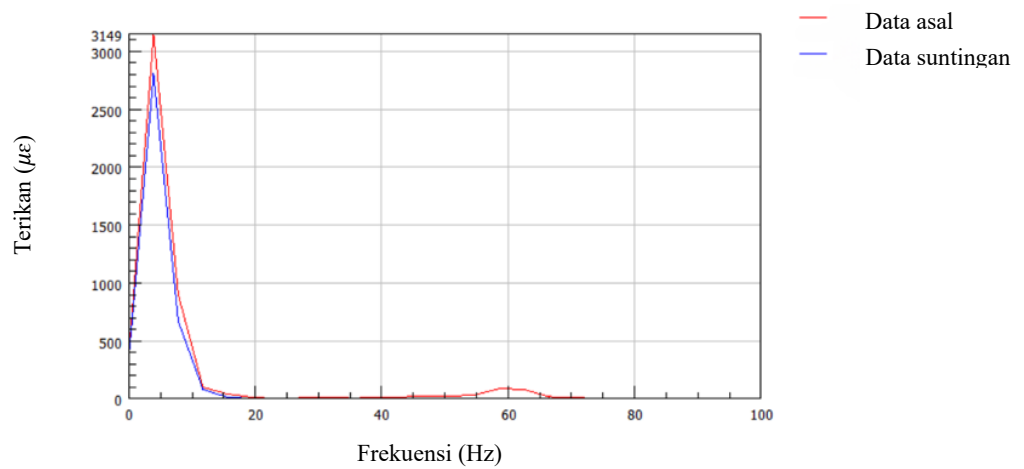
Berdasarkan graf Kuasa Ketumpatan Spektrum (PSD) yang diperolehi, didapati bahawa graf bagi data suntingan menunjukkan nilai yang lebih tinggi berbanding data asal. Keadaan ini berlaku kerana proses penyuntingan isyarat berasaskan hayat lesu bertujuan mengekalkan bahagian isyarat yang mempunyai impak tinggi terhadap kerosakan komponen, seperti segmen yang mempunyai amplitud tinggi dan frekuensi signifikan. Sebaliknya, segmen-segmen kecil yang kurang menyumbang kepada kerosakan lesu akan dibuang. Akibatnya, tenaga isyarat selepas suntingan menjadi lebih tertumpu pada frekuensi-frekuensi utama, menyebabkan nilai PSD meningkat dalam julat frekuensi tertentu. Selain itu, apabila tempoh isyarat dipendekkan selepas suntingan, tenaga isyarat diagihkan dalam tempoh masa yang lebih singkat, menjadikan kepekatan tenaga meningkat dan graf PSD kelihatan lebih tinggi. Meskipun jumlah tenaga keseluruhan mungkin berkurang selepas suntingan, nilai keamatan atau puncak tenaga pada sesetengah frekuensi menjadi lebih besar, sekaligus menghasilkan graf PSD yang lebih tinggi dan dominan berbanding data asal.



(a)



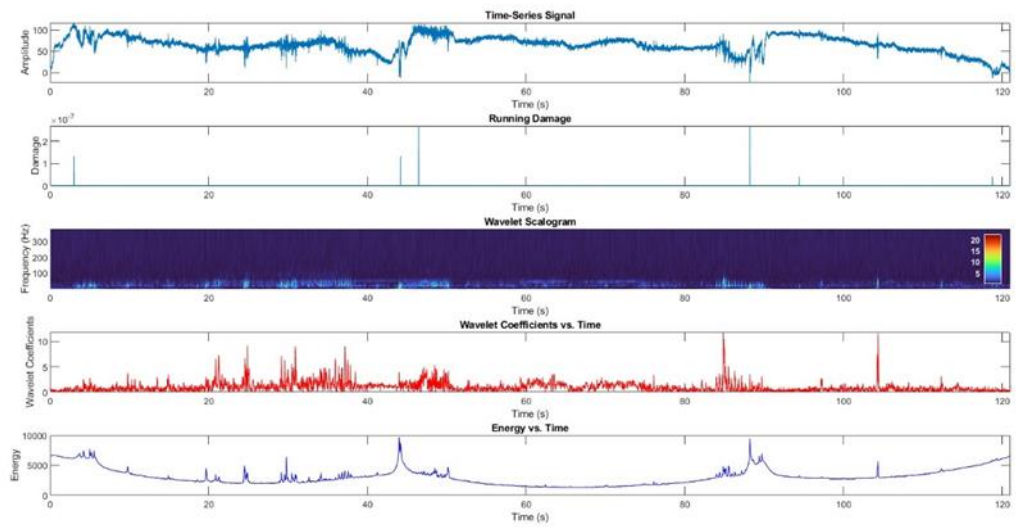
(b)



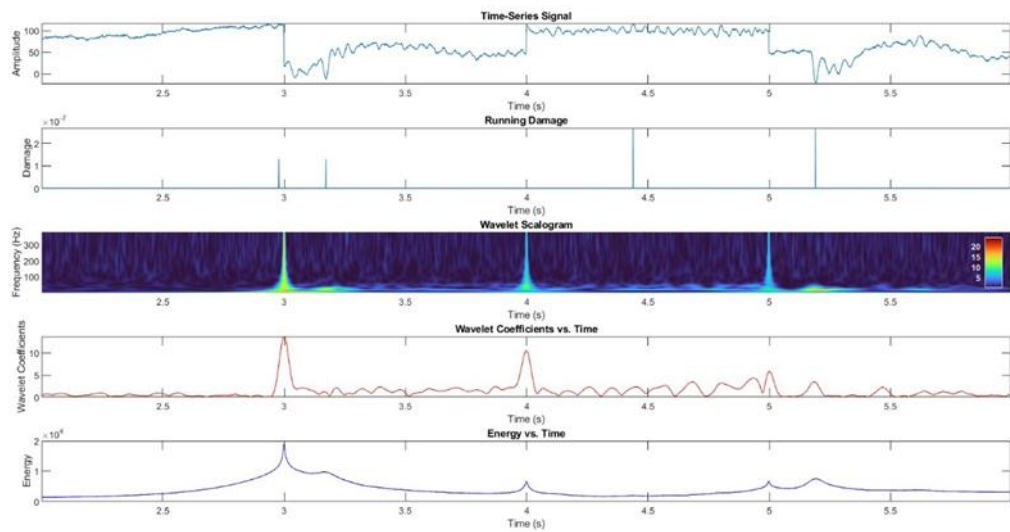
(c)

Rajah 4.10 Kuasa ketumpatan spektrum (PSD) bagi pegas gegelung: (a) Luan 1, (b) Luan 2, (c) Luan 3

Bagi komponen pegas gegelung, pola serupa dapat dilihat. Dalam Laluan 2 misalnya, tenaga PSD meningkat secara drastik daripada 16.18 kJ kepada 32.43 kJ selepas suntingan, manakala dalam Laluan 1 dan 3 perubahan lebih sederhana direkodkan. Tenaga PSD yang meningkat ini membuktikan bahawa kitaran berfrekuensi rendah yang berulang dan memberi kesan terhadap struktur masih wujud dalam isyarat yang telah ditapis. Puncak tenaga PSD lazimnya tertumpu dalam julat frekuensi 0 hingga 20 Hz, menandakan bahawa beban dari permukaan jalan seperti bonggol dan lubang memberi impak utama terhadap kerosakan lesu.

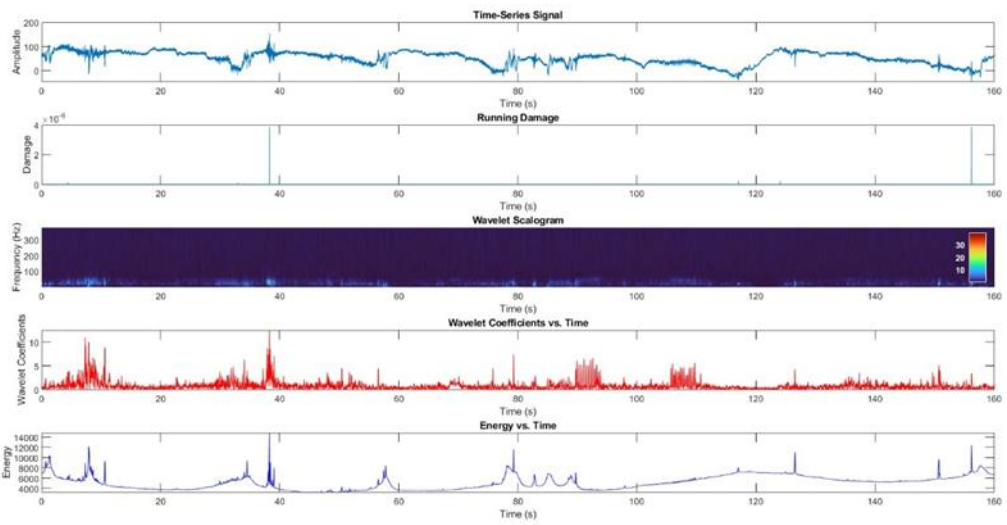


(a)

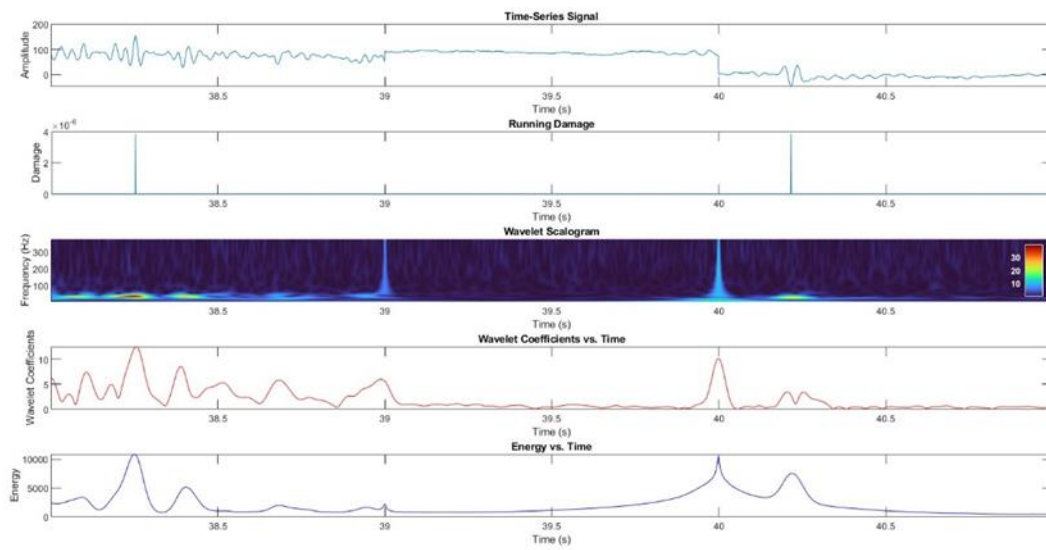


(b)

Rajah 4.11 Analisis anak-gelombang untuk lengan bawah gantungan Laluan 1: (a) Data asal, (b) Data suntingan

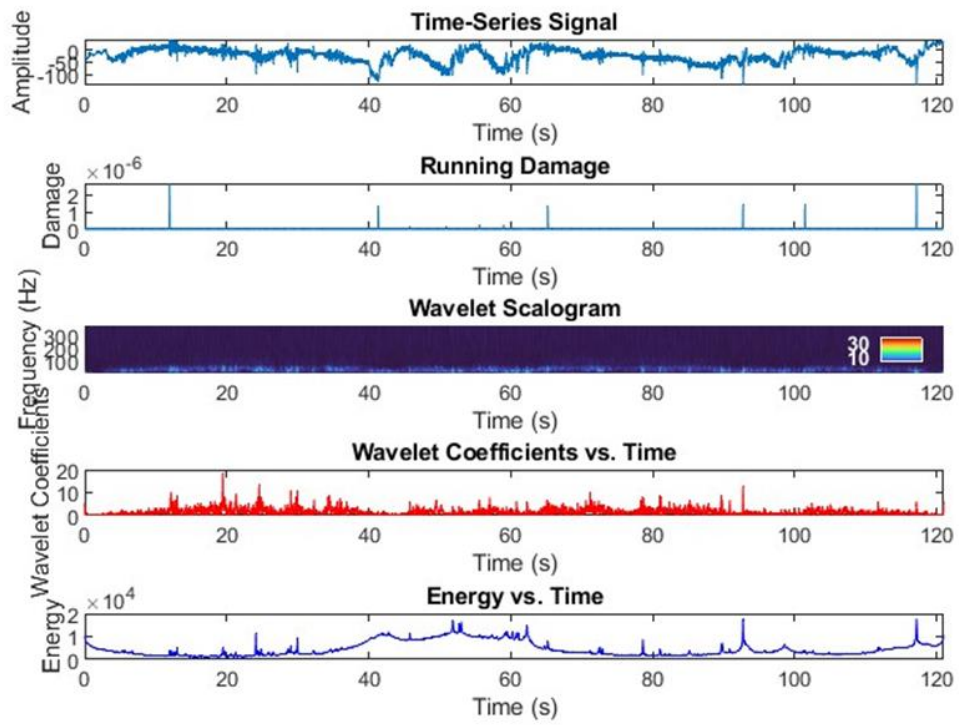


(a)

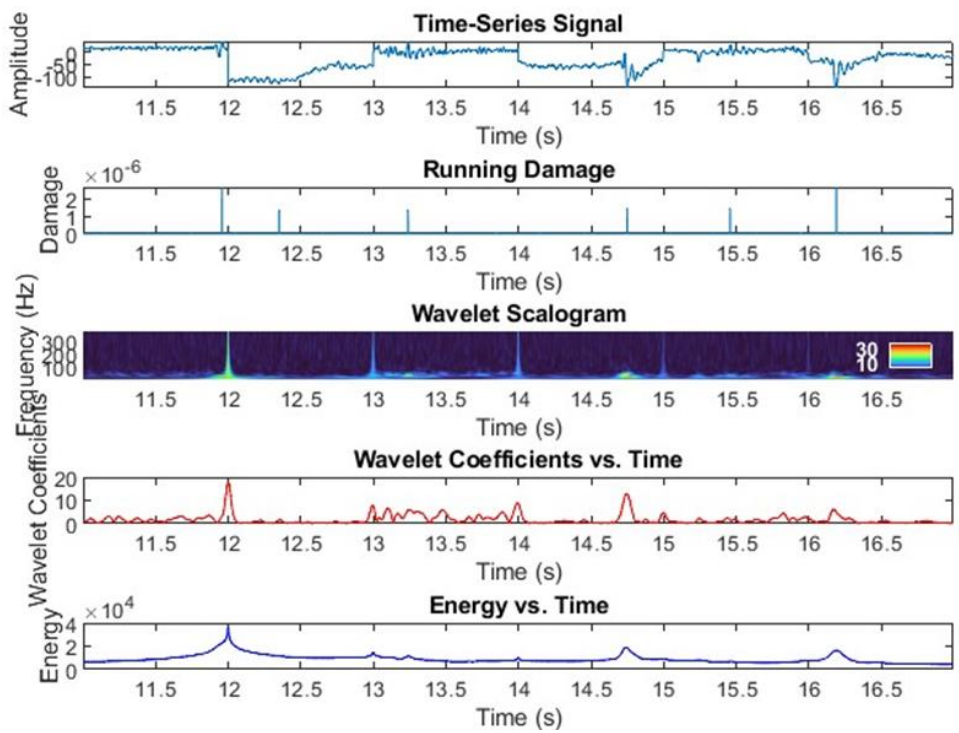


(b)

Rajah 4.12 Analisis anak-gelombang untuk lengan bawah gantungan Lalan 2: (a) Data asal, (b) Data suntingan



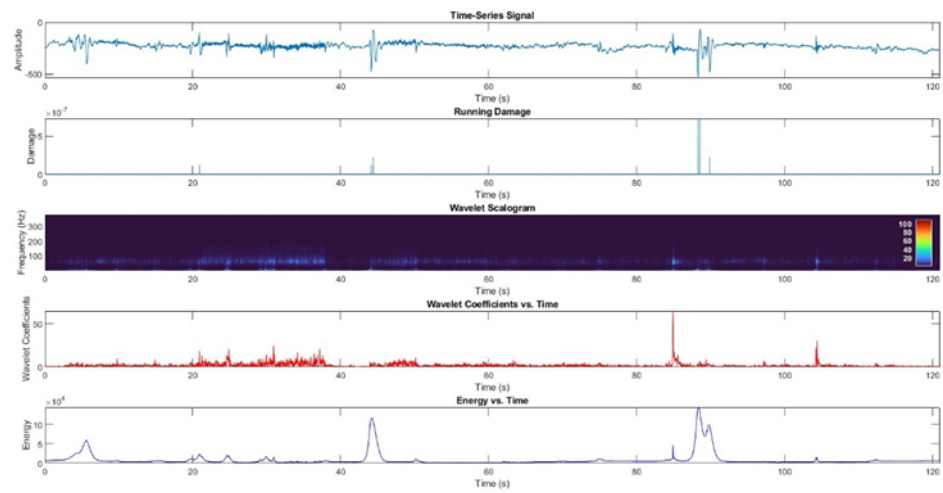
(a)



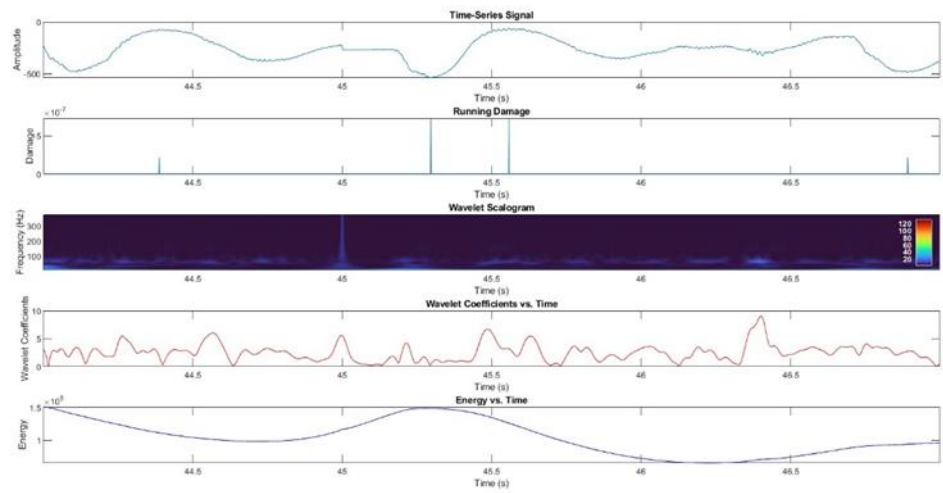
(b)

Rajah 4.13 Analisis anak-gelombang untuk lengan bawah gantungan Laluan 3: (a) Data asal, (b) Data suntingan

Sementara itu, analisis gelombang anak pula menunjukkan pola yang berbeza, di mana tenaga gelombang anak selepas suntingan menunjukkan penurunan yang ketara untuk semua laluan dan komponen. Sebagai contoh, tenaga wavelet bagi lengan bawah gantungan Laluan 1 menurun daripada 377.50 kJ kepada 15.78 kJ, manakala bagi Laluan 2 dan 3 masing-masing menurun daripada 814.36 kJ kepada 6.19 kJ dan daripada 551.47 kJ kepada 53.50 kJ. Ini menunjukkan bahawa proses suntingan berjaya mengurangkan jumlah kejadian regangan kecil dan tidak berkala yang tidak menyumbang secara signifikan kepada kerosakan, dan hanya mengekalkan kitaran beban yang mempunyai tenaga tertinggi.

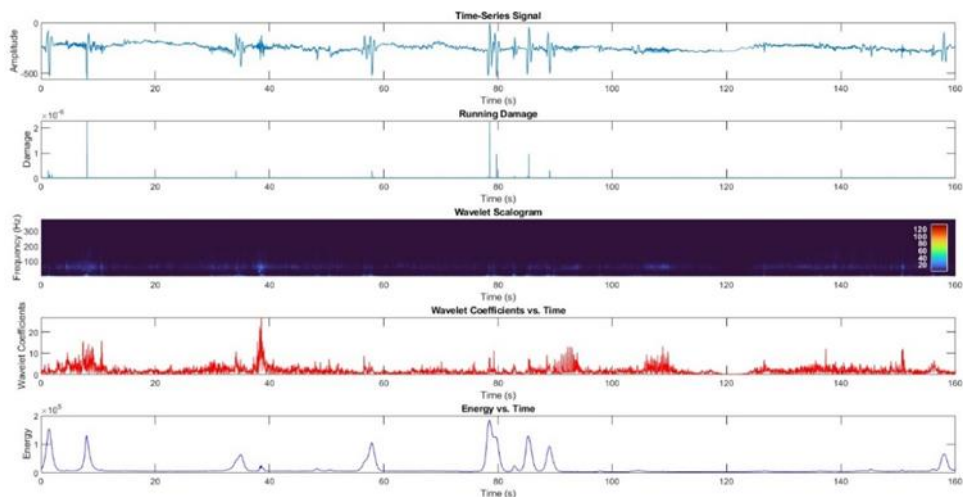


(a)

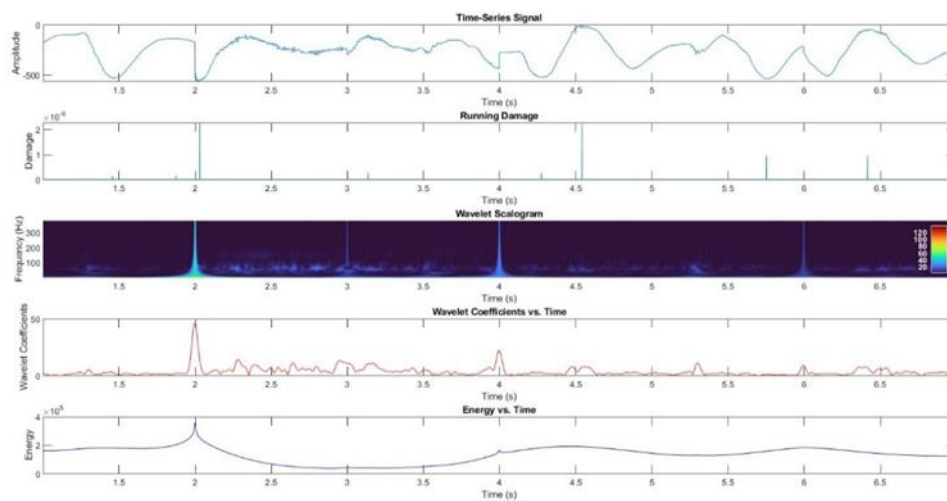


(b)

Rajah 4.14 Analisis anak-gelombang untuk pegas gegelung Laluan 1: (a) Data asal, (b) Data suntingan

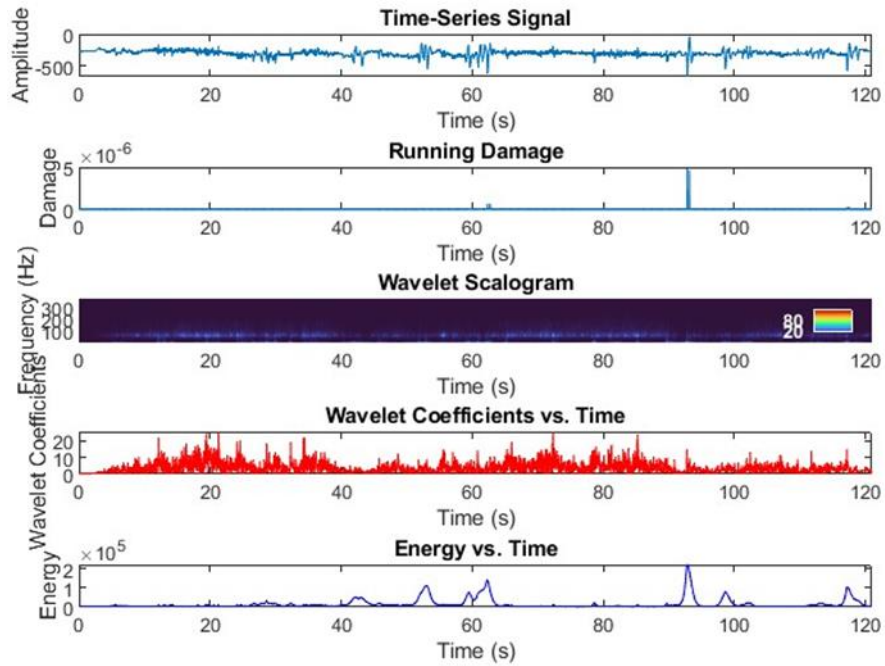


(a)

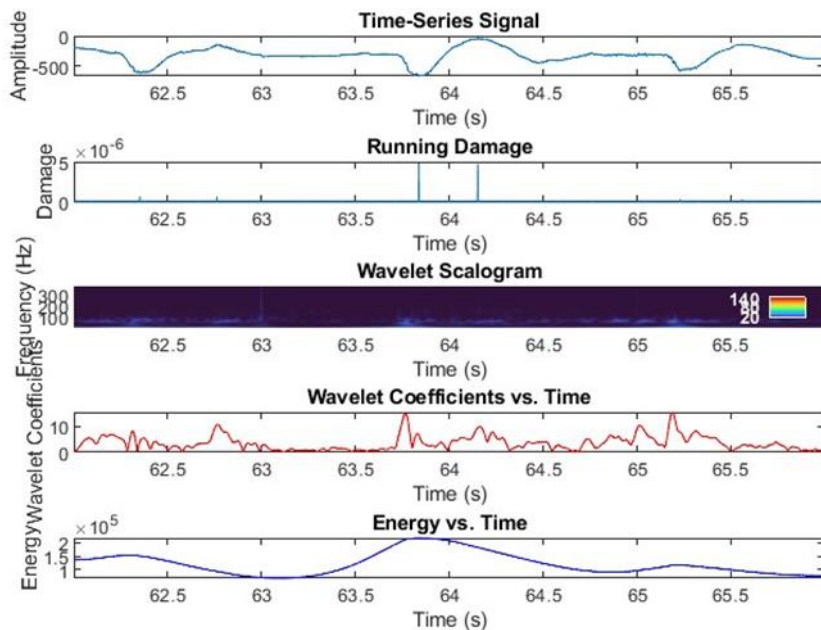


(b)

Rajah 4.15 Analisis anak-gelombang untuk pegas gegelung Laluan 2: (a) Data asal, (b) Data suntingan



(a)



(b)

Rajah 4.16 Analisis anak-gelombang untuk pegas gegelung Lualan 3: (a) Data asal, (b) Data suntingan

Dalam pegas gegelung, penurunan tenaga wavelet juga sangat ketara. Dalam Lualan 1, tenaga anak-gelombang menurun daripada 1,058.37 kJ kepada 311.12 kJ, dan dalam Lualan 2 daripada 2,109.27 kJ kepada 811.41 kJ. Lualan 3 juga menunjukkan

pengurangan daripada 1,889.72 kJ kepada 482.29 kJ. Pengurangan ini menggambarkan bahawa puncak tenaga utama yang berkaitan dengan kerosakan sebenar masih dikekalkan, namun kitaran tidak penting yang mendominasi isyarat asal telah berjaya disingkirkan melalui penapisan berasaskan lesu. Dalam graf anak-gelombang diterjemahkan sebagai penumpuan puncak tenaga pada masa-masa tertentu, yang membolehkan jurutera mengenal pasti lokasi masa sebenar regangan berimpak tinggi dengan lebih jelas.

Secara keseluruhannya, gabungan PSD dan wavelet memberi gambaran dua arah terhadap isyarat regangan iaitu satu dari aspek spektrum frekuensi dan satu lagi dari aspek masa. Peningkatan tenaga PSD selepas suntingan menunjukkan bahawa kandungan frekuensi berbahaya kekal utuh, manakala penurunan tenaga anak-gelombang menunjukkan isyarat telah menjadi lebih bersih dan terfokus. Perbandingan ini membuktikan bahawa suntingan data bukan sahaja membantu menapis data, tetapi juga mempertingkatkan kejelasan dan keupayaan penilaian kerosakan berdasarkan tenaga sebenar yang bertindak pada komponen kenderaan dalam laluan pemanduan sebenar.

4.4 PERBANDINGAN MELALUI PEMETAAN RADAR PARAMETER

Pemetaan radar ialah satu kaedah visualisasi data berasaskan carta radar yang sangat berkesan dalam membandingkan pelbagai parameter secara serentak. Dalam konteks kajian ini, pemetaan radar digunakan untuk menilai dan membezakan ciri-ciri isyarat terikan serta tingkah laku lesu dua komponen utama sistem gantungan, iaitu lengan bawah gantungan dan pegas gegelung, apabila diuji dalam tiga jenis laluan pemanduan yang berbeza. Pendekatan ini memudahkan perbandingan menyeluruh kerana semua parameter utama yang dianalisis boleh digambarkan dalam satu paparan grafik, sekali gus mempercepatkan proses interpretasi dan penilaian risiko kerosakan struktur.

Lima parameter utama telah dipilih untuk dimasukkan ke dalam pemetaan radar, iaitu nilai purata regangan (min), punca min kuasa dua (RMS), kurtosis, tenaga kuasa ketumpatan spektrum (*Power Spectral Density*, PSD) dan nilai hayat lesu. Kelima-lima parameter ini mewakili ciri statistik dan mekanikal penting dalam menilai kesan beban berulang ke atas komponen struktur. Nilai min memberikan gambaran terhadap

kecenderungan regangan secara keseluruhan, RMS menunjukkan magnitud tenaga purata isyarat, kurtosis mencerminkan kehadiran beban ekstrem atau hentakan secara mendadak, manakala tenaga PSD menunjukkan pengagihan tenaga dalam domain frekuensi. Nilai hayat lesu pula mewakili jangkaan ketahanan komponen terhadap kerosakan akibat lesu bahan dalam tempoh masa tertentu.

Selain daripada lima parameter utama yang dianalisis dalam pemetaan radar, kajian ini turut menggunakan graf serakan berdasarkan nilai hayat lesu untuk memperkukuh analisis dan penilaian terhadap prestasi lesu pada struktur. Graf serakan ini dihasilkan dengan memplot nilai hayat lesu yang diperolehi daripada perisian nCode GlyphWorks bersama keputusan daripada kaedah tambahan seperti Morrow dan *Smith-Watson-Topper* (SWT). Melalui visualisasi ini, hubungan antara pelbagai pendekatan pengiraan hayat dapat diperhatikan, sekali gus membantu dalam mengenal pasti kesesuaian dan kebolehpercayaan nilai jangkaan hayat yang diperolehi daripada setiap laluan dan komponen.

Kaedah ini membolehkan penyelidik mengenal pasti taburan secara konsisten atau ketaksamaan antara nilai hayat lesu yang dikira berdasarkan pendekatan yang berbeza. Sebagai contoh, jika nilai hayat lesu daripada kaedah Morrow dan SWT berada pada julat yang hampir serupa, ini menunjukkan ketepatan ramalan dan kekukuhan data terikan yang digunakan. Sebaliknya, jika terdapat perbezaan yang ketara, ia mungkin menunjukkan kehadiran unsur beban luar biasa, kekasaran permukaan jalan yang tidak dijangka, atau ketidaksesuaian parameter bahan. Dalam konteks ini, graf serakan berfungsi sebagai alat sokongan visual yang penting dalam membandingkan hasil simulasi dan membezakan kepekaan kaedah analisis terhadap jenis beban tertentu.

Dengan itu, penggunaan graf serakan yang dibina daripada nilai hayat lesu ini bukan sekadar berperanan sebagai persembahan visual, malah ia turut membantu dalam menilai keberkesanan pendekatan suntingan data dan transformasi gelombang, serta kecenderungan komponen terhadap lesu dalam pelbagai jenis permukaan jalan. Hasil daripada visualisasi ini menyumbang secara langsung kepada pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap corak lesu sebenar yang dialami oleh komponen automotif dalam keadaan pemanduan dunia sebenar.

4.4.1 Hasil Analisis Serakan Isyarat Terikan

Analisis serakan yang dijalankan dalam kajian ini berfungsi sebagai alat visual untuk memaparkan perbandingan nilai hayat lesu yang diperolehi daripada pelbagai kaedah, khususnya antara pendekatan nCode GlyphWorks, Morrow dan *Smith-Watson-Topper* (SWT). Semua rajah serakan dibina menggunakan nilai hayat lesu komponen lengan bawah gantungan dan pegas gegelung, yang diuji merentasi tiga jenis laluan pemanduan. Tujuan utama rajah ini adalah untuk mengenal pasti pola penyebaran nilai hayat, tahap konsistensi antara kaedah, serta kesan proses suntingan terhadap kestabilan ramalan hayat lesu struktur.

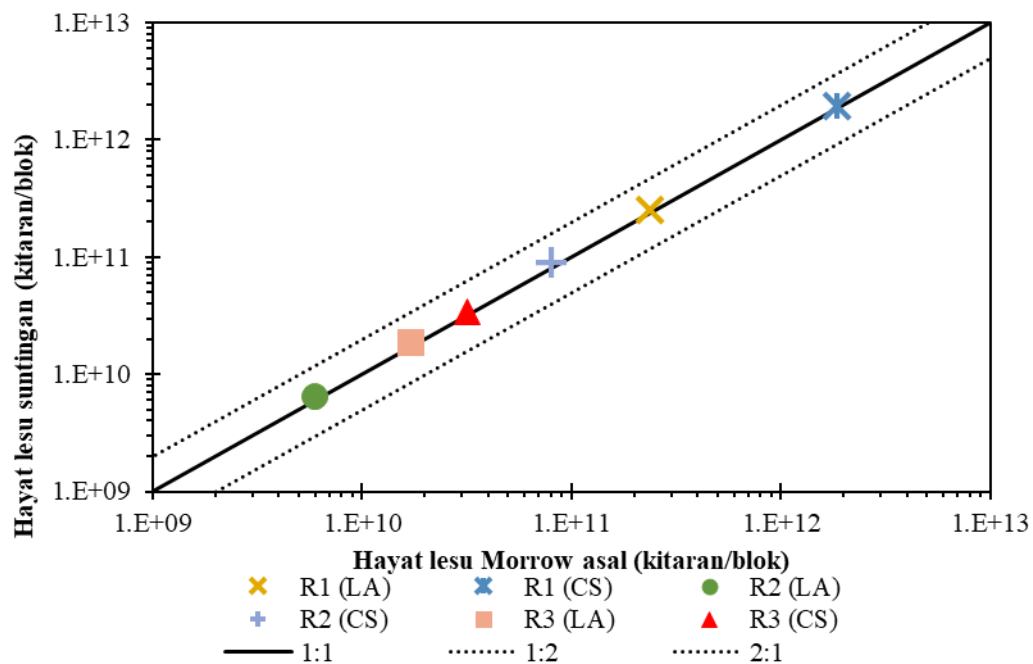
Dalam Rajah Serakan Morrow, nilai hayat lesu menunjukkan peningkatan kecil tetapi konsisten selepas suntingan untuk semua laluan dan bagi kedua-dua komponen. Sebagai contoh, bagi lengan bawah gantungan dalam Laluan 1, nilai meningkat daripada 2.38×10^{11} kepada 2.52×10^{11} kitaran, manakala dalam Laluan 2, peningkatan dicatat daripada 5.92×10^9 kepada 6.52×10^9 . Dalam Laluan 3, peningkatan dari 1.72×10^{10} kepada 1.86×10^{10} menunjukkan bahawa proses suntingan tidak menjejaskan ketepatan ramalan hayat, malah menyumbang kepada kestabilan dapatan. Untuk pegas gegelung, nilai Morrow juga meningkat dalam semua laluan, seperti dari 1.85×10^{12} kepada 1.94×10^{12} dalam Laluan 1, membuktikan bahawa beban dominan telah dikekalkan selepas suntingan.

Jadual 4.12 Nilai data serakan bagi komponen lengan bawah gantungan

Komponen	Laluan (Data)	Hayat lesu (Coffin-Manson)	Hayat lesu (Morrow)	Hayat lesu (SWT)
Lengan bawah gantungan	1 (A1)	3.89×10^{10}	2.38×10^{11} - 2.52×10^{11}	5.60×10^{10} - 6.08×10^{10}
	2 (A2)	5.23×10^9	5.92×10^9 - 6.52×10^9	2.50×10^9 - 2.76×10^9
	3 (A3)	2.43×10^9	1.72×10^{10} - 1.86×10^{10}	7.07×10^{10} - 7.73×10^{10}

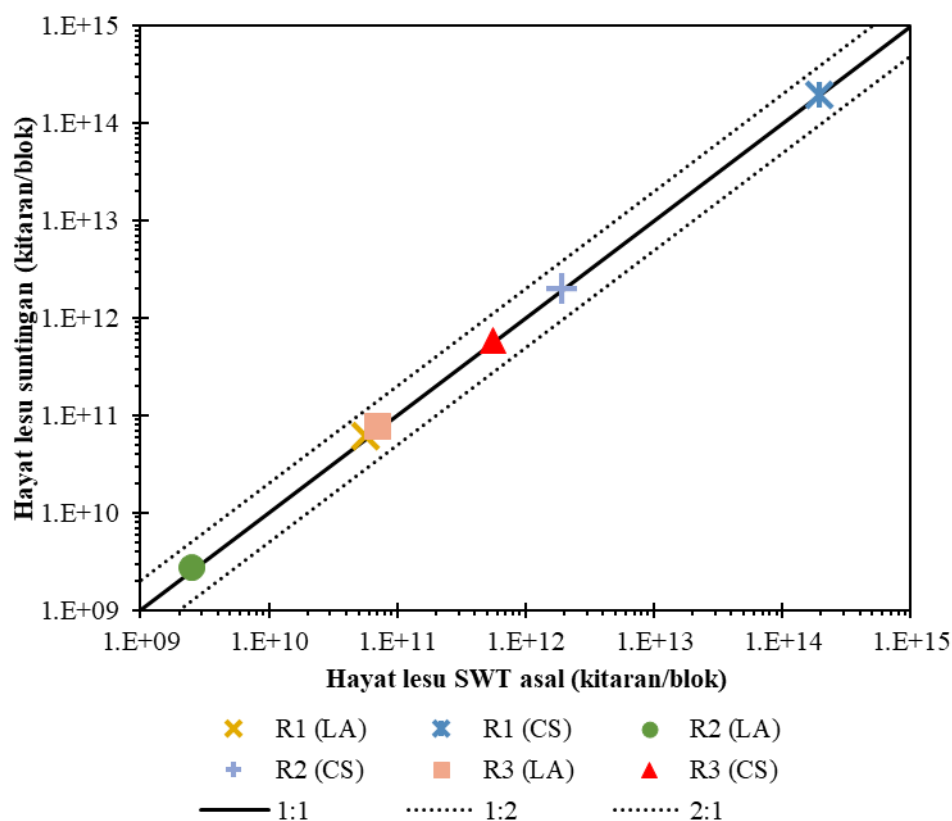
Jadual 4.13 Nilai data serakan bagi komponen pegas gegelung

Komponen	Laluan (Data)	Hayat lesu (Coffin-Manson)	Hayat lesu (Morrow)	Hayat lesu (SWT)
Pegas gegelung	1 (B1)	7.06×10^9	1.85×10^{12} - 1.94×10^{12}	1.93×10^{14} (kekal)
	2 (B2)	2.38×10^9	8.00×10^{10} - 8.90×10^{10}	1.90×10^{12} - 2.03×10^{12}
	3 (B3)	9.11×10^8	3.17×10^{10} - 3.44×10^{10}	5.56×10^{11} - 5.82×10^{11}



Rajah 4.17 Data serakan kaedah Morrow

Dalam Rajah Serakan SWT, peningkatan yang hampir serupa direkodkan. Hayat bagi lengan bawah dalam Laluan 1 meningkat daripada 5.60×10^{10} kepada 6.08×10^{10} , manakala dalam Laluan 3, nilai SWT bertambah daripada 7.07×10^{10} kepada 7.73×10^{10} . Untuk pegas gegelung, SWT dalam Laluan 1 kekal sangat tinggi dan stabil iaitu 1.93×10^{14} sebelum dan selepas suntingan. Dalam Laluan 2 dan 3 pula, peningkatan nilai SWT selepas suntingan mencerminkan bahawa kitaran beban yang menyumbang kepada lesu telah kekal dalam isyarat akhir.



Rajah 4.18 Data serakan kaedah SWT

Berdasarkan pemerhatian bagi kedua-dua data, didapati bahawa kesemua titik data terletak di antara dua garis rujukan iaitu 1:2 dan 2:1, yang secara konvensional digunakan untuk menunjukkan julat kesepakatan yang boleh diterima antara dua kaedah pengiraan. Kehadiran titik-titik dalam julat ini membuktikan bahawa perbezaan antara kaedah pengiraan hayat lesu adalah kecil dan masih dalam tahap relevan. Dengan kata lain, nilai hayat yang diperoleh menggunakan kaedah Morrow dan SWT tidak terjajar terlalu jauh daripada nilai hayat lesu pengiraan di nCode, sekali gus memperlihatkan ketepatan dan kepercayaan tinggi terhadap dapatan kajian.

Tambahan pula, selepas proses suntingan, titik-titik data dalam rajah serakan didapati lebih rapat dan tersusun, berbanding sebelum suntingan yang mempunyai sedikit variasi, khususnya dalam komponen pegas gegelung di laluan berlubang. Fenomena ini membuktikan bahawa suntingan data berjaya mengurangkan gangguan isyarat dan menjadikan unjuran hayat lebih seragam, tanpa mengabaikan maklumat kritikal mengenai beban lesu. Dalam konteks kejuruteraan, kestabilan antara kaedah ini

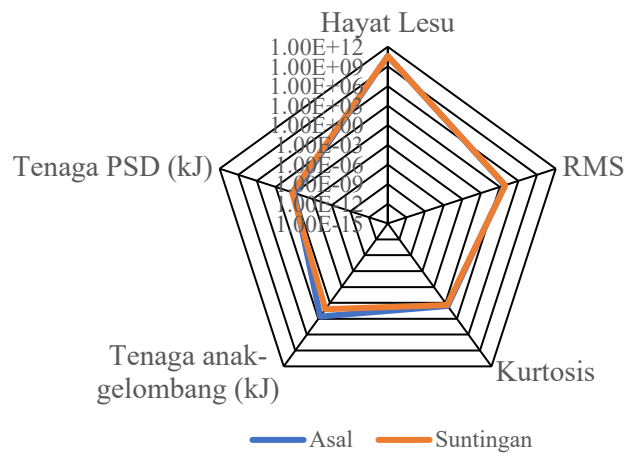
amat penting bagi memastikan bahawa keputusan hayat lesu boleh dipercayai dan konsisten walaupun model simulasi atau pendekatan pengiraan berbeza digunakan.

Secara keseluruhannya, analisis serakan menunjukkan bahawa pendekatan pengiraan hayat lesu dalam kajian ini adalah saling menyokong antara satu sama lain. Data selepas suntingan bukan sahaja menghasilkan nilai yang lebih bersih dan terfokus, malah membolehkan keputusan dari pelbagai kaedah seperti Morrow dan SWT untuk dibandingkan dengan tepat. Ini menjadikan analisis serakan bukan sekadar alat visualisasi, tetapi juga mekanisme pengesahan silang (*cross-validation*) terhadap kesahan dan kebolehpercayaan hasil kajian lesu struktur dalam persekitaran pemanduan sebenar.

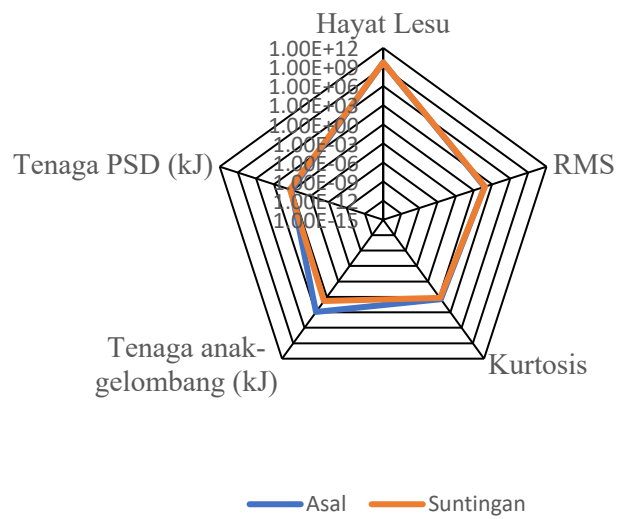
4.4.2 Pemetaan Carta Radar Statistik dan Hayat Lesu

Pemetaan carta radar merupakan kaedah visualisasi berasaskan carta jejari yang digunakan untuk membandingkan pelbagai parameter secara serentak antara komponen dan laluan pemanduan. Dalam kajian ini, carta radar digunakan bagi menganalisis dua komponen utama sistem gantungan kenderaan. Kaedah ini membolehkan pemerhatian menyeluruh terhadap kesan perubahan statistik isyarat terikan dan hayat lesu sebelum dan selepas proses suntingan.

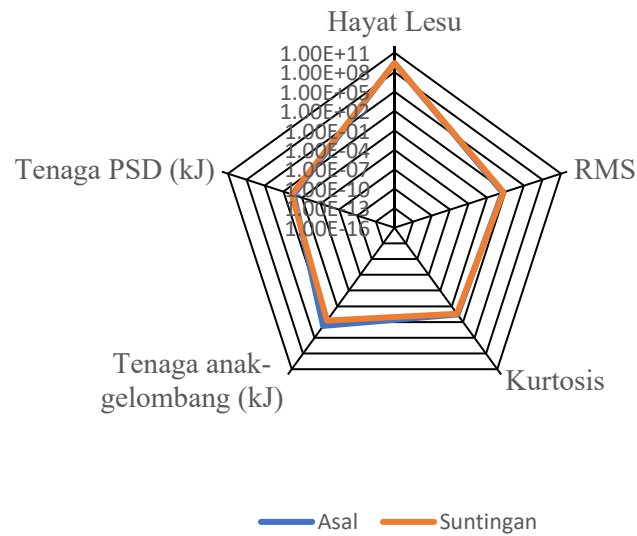
Sebanyak enam parameter utama dipaparkan dalam setiap carta radar, iaitu nilai purata (*min*), punca min kuasa dua (*RMS*), kurtosis, tenaga kuasa ketumpatan spektrum (*PSD*), tenaga anak-gelombang (*wavelet*) dan nilai hayat lesu. Setiap parameter mewakili aspek penting dalam penilaian regangan dan lesu struktur iaitu nilai *min* dan *RMS* yang mencerminkan magnitud isyarat, kurtosis mengukur kehadiran puncak beban ekstrem, manakala tenaga *PSD* dan anak-gelombang masing-masing menunjukkan kandungan tenaga dalam domain frekuensi dan masa. Nilai hayat lesu pula menunjukkan unjuran ketahanan komponen terhadap kerosakan akibat beban berulang.



(a)



(b)

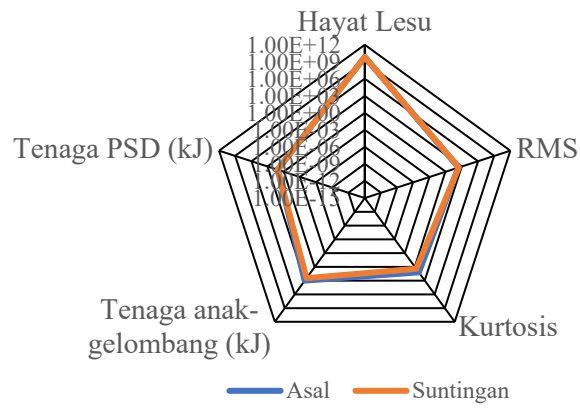


Rajah 4.19 Carta radar bagi lengan bawah gantungan: (a) Laluan 1, (b) Laluan 2, (c) Laluan 3

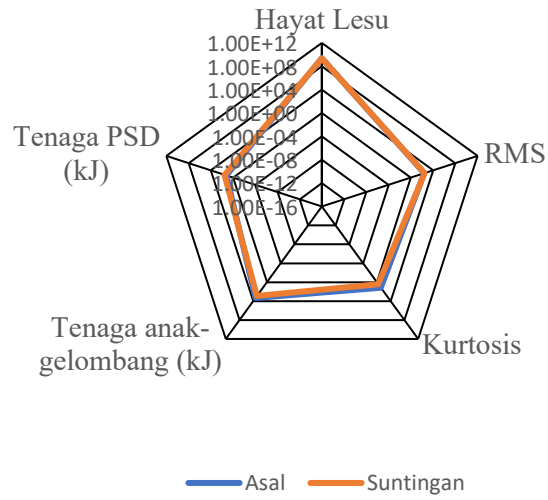
Bagi komponen lengan bawah gantungan, carta radar menunjukkan bentuk yang lebih terkawal dan seimbang, terutamanya dalam Laluan 1. Nilai kurtosis yang sederhana, digabungkan dengan nilai RMS dan tenaga PSD yang stabil, menjelaskan bahawa beban yang diterima adalah terkawal dan konsisten. Selepas proses suntingan, bentuk carta radar menjadi lebih tirus pada paksi kurtosis dan lebih menonjol pada RMS serta PSD, menandakan bahawa kitaran kecil dan tidak signifikan telah berjaya disingkirkan, manakala kitaran dominan yang menyumbang kepada lesu kekal dikekalkan. Dalam Laluan 2 dan 3, carta radar bagi lengan bawah gantungan menunjukkan bentuk yang tidak simetri sebelum suntingan, tetapi menjadi lebih seragam selepas suntingan, menggambarkan kesan penapisan data dalam menstabilkan ciri isyarat.

Jadual 4.14 Nilai carta radar bagi komponen lengan bawah gantungan

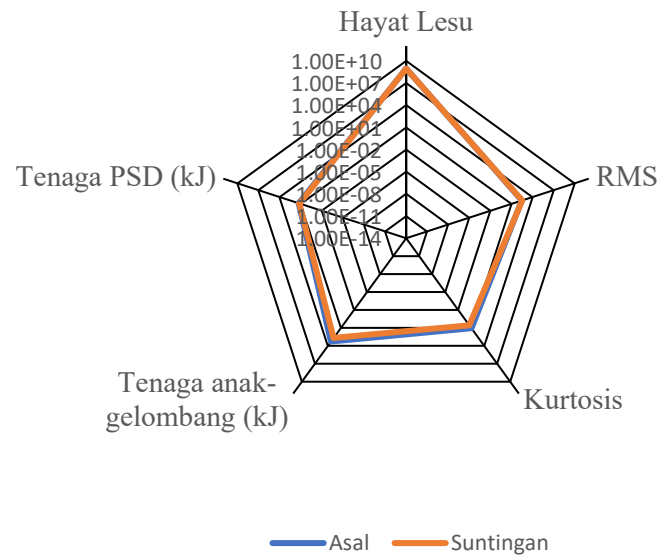
Laluan	Kategori	Min ($\mu\epsilon$)	RMS	Kurtosis	PSD(kJ)	Wavelet(kJ)
1	Asal	1.23×10^3	6,786	3.81	1.08	377.50
	Suntingan	1.27×10^3	7,847	2.62	2.27	15.78
2	Asal	14.7	57.98	2.71	1.45	814.36
	Suntingan	14.0	68.30	1.66	2.44	6.19
3	Asal	13.7	33.43	3.74	2.29	551.47
	Suntingan	12.9	48.66	2.65	4.53	53.50



(a)



(b)



(c)

Rajah 4.20 Carta radar bagi pegas gegelung: (a) Laluan 1, (b) Laluan 2, (c) Laluan 3

Bagi pegas gegelung, carta radar menunjukkan bentuk yang lebih besar dan terbuka dalam semua laluan, mencerminkan bahawa komponen ini menerima beban hentakan yang lebih tinggi dan tidak tetap. Dalam Laluan 2 dan 3 khususnya, nilai RMS, tenaga PSD dan tenaga anak-gelombang sangat menonjol, menandakan pengumpulan tenaga regangan yang tinggi akibat hentakan mendadak seperti bonggol atau lubang pada jalan. Selepas suntingan, bentuk carta radar menunjukkan pengurangan pada paksi kurtosis, tetapi nilai RMS dan tenaga masih kekal tinggi, sekali gus membuktikan bahawa proses suntingan tidak menjejaskan kitaran beban utama yang menyumbang kepada kerosakan. Dalam masa yang sama, nilai hayat lesu yang kekal dan meningkat selepas suntingan menunjukkan bahawa data yang telah ditapis lebih mewakili keadaan lesu sebenar.

Jadual 4.15 Nilai carta radar bagi komponen pegas gegelung

Laluan	Kategori	Min ($\mu\epsilon$)	RMS	Kurtosis	PSD(kJ)	Wavelet(kJ)
1	Asal	81.6	232.28	17.34	13.22	1,058.37
	Suntingan	78.0	281.17	2.84	13.48	311.12
2	Asal	94.5	251.34	14.06	16.18	2,109.27
	Suntingan	89.4	288.40	2.51	32.43	811.41
3	Asal	112	300.94	11.02	18.66	1,889.72
	Suntingan	108	338.79	3.62	14.93	482.29

Secara keseluruhan, carta radar membuktikan bahawa data selepas suntingan menjadi lebih padat, bersih dan representatif, terutama dalam mengenal pasti kitaran berimpak tinggi yang dominan dalam isyarat. Nilai RMS dan PSD yang meningkat menunjukkan pengumpulan tenaga yang lebih tertumpu, manakala penurunan kurtosis menandakan kestabilan bentuk isyarat. Bentuk carta radar juga membolehkan perbandingan visual yang mudah antara komponen dan laluan di mana Laluan 3 menghasilkan carta paling agresif, dan Laluan 1 menunjukkan carta paling simetri dan selamat. Kaedah visual ini sangat berkesan dalam membantu jurutera membuat keputusan yang penuh dengan maklumat berkaitan dengan ketahanan struktur, reka bentuk, serta keutamaan penyelenggaraan berdasarkan risiko lesu sebenar.

4.5 RINGKASAN

Bab ini telah membincangkan hasil analisis menyeluruh terhadap isyarat terikan yang diperoleh daripada dua komponen sistem gantungan kenderaan iaitu lengan bawah gantungan dan pegas gegelung, melalui tiga laluan pemanduan berbeza. Analisis dilakukan dengan tujuan untuk mencirikan sifat-sifat statistik isyarat, menilai hayat lesu, dan seterusnya membandingkan perubahan isyarat sebelum dan selepas proses suntingan berasaskan lesu. Beberapa kaedah digunakan secara bersepadu dalam bab ini termasuk analisis statistik, penilaian hayat menggunakan perisian nCode GlyphWorks, transformasi anak-gelombang, kuasa ketumpatan spektrum (PSD), serta pemetaan visual melalui carta radar dan graf serakan.

Hasil analisis statistik menunjukkan bahawa nilai RMS dan kurtosis memainkan peranan penting dalam mengenal pasti magnitud dan kehadiran regangan ekstrem dalam isyarat. Selepas proses suntingan, nilai RMS meningkat manakala kurtosis menurun, membuktikan bahawa kitaran kecil dan tidak signifikan telah berjaya disingkirkan, dan hanya beban berimpak tinggi yang kekal dianalisis. Penilaian hayat lesu juga menunjukkan bahawa nilai hayat selepas suntingan tidak berkurang, malah dalam beberapa kes ianya meningkat, terutama apabila beban utama telah ditapis dan isyarat menjadi lebih bersih serta dapat dilihat terhadap keadaan sebenar lesu.

Pendekatan visual turut menyokong dapatan ini. Graf serakan menunjukkan bahawa nilai hayat lesu pada nCode, Morrow dan SWT berada dalam julat konsisten,

malah semua titik terletak antara garis 1:2 dan 2:1, yang menandakan tahap kesepakatan yang tinggi antara ketiga-tiga pendekatan. Begitu juga dengan carta radar, yang memaparkan profil parameter bagi setiap komponen dan laluan secara menyeluruh. Bentuk carta radar yang lebih seimbang dan tirus selepas suntingan menunjukkan keberkesanan proses tersebut dalam menjadikan isyarat lebih stabil dan padat, tanpa kehilangan kandungan tenaga yang kritikal. Laluan 3 dikenal pasti sebagai laluan yang paling sukar kerana menghasilkan bentuk carta radar yang paling ekstrem dan nilai hayat lesu yang paling rendah, terutamanya bagi pegas gegelung.

Secara keseluruhan, Bab 4 berjaya menunjukkan bahawa analisis statistik, transformasi isyarat dan visualisasi grafik dapat digunakan secara komprehensif untuk menilai kerosakan lesu. Proses suntingan data berdasarkan kitaran lesu telah terbukti dapat membersihkan isyarat tanpa menjejaskan hasil hayat, malah meningkatkan kecekapan pemodelan lesu. Gabungan kaedah kuantitatif dan visual dalam bab ini memberikan kefahaman mendalam terhadap tingkah laku isyarat regangan dalam situasi dunia sebenar dan menyokong objektif kajian yang ingin mengenal pasti potensi kerosakan lebih awal pada komponen automotif melalui pencirian isyarat terikan.

Walaupun analisis pembelajaran mesin belum dilaksanakan secara menyeluruh dalam kajian ini, terdapat potensi besar untuk mengintegrasikan teknik seperti pengelompokan dan pengelasan bagi memperkayakan lagi analisis isyarat terikan. Parameter seperti min, RMS, sisihan piawai, kurtosis, hayat lesu dan tenaga anak-gelombang boleh dijadikan sebagai ciri input kepada algoritma pembelajaran mesin seperti *K-Means Clustering* dan *Support Vector Machine (SVM)*. Kaedah pengelompokan berupaya mengesan corak semula jadi dalam data, contohnya membezakan isyarat dari permukaan jalan yang berbeza, manakala teknik pengelasan boleh membantu mengenal pasti tahap risiko kerosakan komponen secara automatik berdasarkan ciri set data. Sekiranya kaedah ini diterapkan, ia berpotensi meningkatkan kecekapan dalam pemantauan keadaan komponen dengan membolehkan sistem ramalan yang lebih pintar dan adaptif. Oleh itu, integrasi pembelajaran mesin merupakan salah satu hala tuju yang disyorkan untuk kajian lanjutan dalam bidang pencirian isyarat dan pemantauan kesihatan kenderaan.

BAB V

KESIMPULAN DAN CADANGAN

5.1 PENGENALAN

Secara keseluruhan, kajian ini memfokuskan kepada pencirian isyarat terikan yang diperoleh daripada komponen sistem gantungan kenderaan, iaitu lengan bawah gantungan dan pegas gegelung, dengan menggunakan parameter statistik dan transformasi anak-gelombang. Tujuan utama kajian adalah untuk mengenal pasti ciri-ciri isyarat yang dapat digunakan sebagai petunjuk awal kepada kerosakan lesu melalui pendekatan pemprosesan isyarat dan pemetaan radar. Matlamat ini dicapai melalui tiga komponen utama iaitu:

1. Pencirian isyarat terikan pada komponen automotif melalui parameter statistik seperti min, punca min kuasa dua (RMS), nilai puncak, kurtosis dan hayat lesu bagi mengenal pasti tingkah laku beban yang dikenakan terhadap komponen sistem gantungan kenderaan dalam pelbagai keadaan permukaan jalan..
2. Analisis kesan suntingan berasaskan hayat lesu terhadap kecekapan penyingkiran data tidak relevan serta impaknya ke atas nilai parameter yang diperoleh serta penggunaan analisis anak-gelombang untuk mengenal pasti julat frekuensi dominan dan membandingkan komposisi isyarat sebelum dan selepas suntingan.
3. Pembangunan pemetaan radar telah digunakan sebagai pendekatan visual yang efektif dalam membandingkan corak parameter statistik antara data asal dan data yang telah disunting. Kaedah ini memudahkan pengesanan perbezaan tingkah

laku beban dan ciri isyarat yang berpotensi menjadi petunjuk awal kepada kerosakan atau degradasi komponen gantungan.

Ketiga-tiga objektif ini menjadi teras utama dalam mengenal pasti potensi kaedah analisis isyarat untuk tujuan pemantauan keadaan sistem gantungan kenderaan.

5.1.1 Pencirian Isyarat Terikan bagi Komponen Gantungan

Daripada ujian pemanduan di tiga laluan berbeza, analisis statistik terhadap lengan bawah gantungan dan pegas gelung menunjukkan perbezaan ketara dari segi tingkah laku isyarat. Lengan bawah gantungan mencatat nilai RMS dan kurtosis yang lebih tinggi terutama di laluan tidak rata, menandakan pendedahan kepada beban purata tinggi dan kejutan mendadak. Sebaliknya, pegas gelung menunjukkan isyarat yang lebih konsisten, namun tetap terkesan oleh perubahan permukaan jalan. Nilai hayat lesu turut menunjukkan perbezaan ketara, di mana komponen pada laluan tidak rata mengalami hayat lesu lebih pendek, membuktikan kesan langsung beban tidak sekata terhadap kehausan bahan. Penjelmaan anak-gelombang dapat mengasingkan frekuensi rendah iaitu beban statik dan frekuensi tinggi iaitu beban hentakan, memperlihatkan kebolehnya mengenal pasti tingkah laku beban secara masa-frekuensi. Hasil ini mengesahkan bahawa pendekatan statistik dan anak-gelombang dapat mencirikan isyarat terikan secara berkesan untuk pemantauan awal kerosakan komponen gantungan.

5.1.2 Kesan Suntingan Data Mengikut Kriteria Hayat Lesu

Suntingan data berasaskan kriteria hayat lesu telah dilakukan untuk menyingkirkan isyarat yang tidak menyumbang kepada kerosakan, seperti beban kecil semasa kenderaan statik atau bergerak perlahan. Hasil suntingan menunjukkan penurunan ketara dalam nilai RMS dan hayat lesu bagi kedua-dua komponen gantungan, membuktikan bahawa beban tidak kritikal berjaya disaring keluar. Dalam masa yang sama, nilai kurtosis meningkat, menandakan isyarat selepas suntingan lebih memaparkan beban ekstrem yang memberi kesan besar terhadap permulaan kerosakan. Suntingan ini juga menghasilkan isyarat yang lebih bersih dan padat, membolehkan

pemodelan hayat lesu menggunakan perisian nCode menjadi lebih tepat dan konsisten. Secara keseluruhan, pendekatan ini berjaya meningkatkan keupayaan analisis untuk menumpukan kepada beban dinamik utama yang dapat menyumbang kepada kerosakan, sekali gus menyokong penggunaannya dalam sistem pemantauan keadaan automotif secara lebih berkesan.

5.1.3 Pemetaan Carta Radar Sebagai Alat Visual Analitik

Pemetaan carta radar digunakan untuk membandingkan parameter isyarat terikan antara data asal dan data suntingan secara serentak, melibatkan nilai purata, RMS, puncak, kurtosis dan hayat lesu. Hasil pemetaan menunjukkan corak visual yang jelas antara ketiga-tiga laluan, di mana laluan tidak rata menghasilkan graf radar yang lebih luas, mencerminkan beban dan variasi yang lebih besar. Data suntingan pula menunjukkan pengurangan dalam nilai RMS dan hayat lesu, tetapi peningkatan nilai kurtosis, menandakan beban ekstrem lebih dominan selepas suntingan. Perbezaan visual ini memudahkan pengenalpastian komponen yang terdedah kepada beban tinggi atau berisiko mengalami kerosakan awal. Pemetaan carta radar terbukti berkesan sebagai alat bantu analitik yang menyokong dapatan statistik dan memberikan gambaran intuitif terhadap tingkah laku beban. Kaedah ini berpotensi untuk dimanfaatkan dalam sistem pemantauan berasaskan keadaan secara visual, terutamanya apabila melibatkan pelbagai parameter dan lokasi penderia dalam sistem automotif.

5.2 SUMBANGAN KEILMUAN

Kajian ini menyumbang secara langsung kepada pengembangan ilmu dalam bidang kejuruteraan mekanikal, khususnya dalam aspek pemantauan keadaan komponen automotif melalui pencirian isyarat terikan. Melalui pendekatan bersepadu antara analisis statistik, suntingan berasaskan hayat lesu dan transformasi anak-gelombang, kajian ini telah membuktikan bahawa isyarat terikan daripada komponen seperti lengan bawah gantungan dan pegas gegelung mengandungi maklumat penting yang boleh digunakan untuk mengenal pasti potensi kerosakan lesu. Proses suntingan data berasaskan hayat lesu bukan sahaja meningkatkan kualiti isyarat dengan menyingkirkan komponen yang tidak signifikan, malah apabila digabungkan dengan analisis anak-

gelombang, ia berjaya mendedahkan corak frekuensi dominan yang berkait rapat dengan beban dinamik.

Selain itu, penggunaan pemetaan radar dalam kajian ini juga menyumbang suatu kaedah visualisasi baharu yang membolehkan perbandingan pelbagai parameter dijalankan secara serentak, sekali gus mempercepatkan proses diagnosis dan pemantauan komponen kritikal. Gabungan kaedah ini membentuk satu pendekatan holistik yang berpotensi besar untuk diaplikasikan dalam pembangunan sistem pemantauan berasaskan keadaan (CBM) bagi industri automotif. Sumbangan ini diharap dapat menjadi asas kepada penyelidikan lanjutan dan pembangunan sistem pengesanan awal kerosakan yang lebih pintar dan efisien.

5.3 CADANGAN

Berdasarkan dapatan kajian ini, beberapa cadangan dapat disyorkan untuk penyelidikan masa hadapan agar penemuan dapat diperluas dan dipertingkatkan:

1. Kajian boleh diperluaskan kepada bahagian komponen gantungan lain seperti penyerapan hentakan, sambungan bebola, dan peredam gegelung bagi mendapatkan gambaran lengkap tingkah laku sistem gantungan.
2. Penggunaan sensor masa nyata dan IoT untuk pengumpulan data langsung semasa pemanduan dapat meningkatkan kecekapan sistem pemantauan keadaan dan aplikasi dunia sebenar.
3. Ciri-ciri statistik dan spektrum anak-gelombang boleh digunakan sebagai input kepada model kecerdasan buatan untuk klasifikasi atau ramalan tahap kerosakan secara automatik.

RUJUKAN

- Abdullah, S., Ariffin, A. K., & Rahman, M. M. (2012). "FEA Based Fatigue Life Assessment of an Automobile Lower Suspension Arm Using Various Strain-Life Models." ResearchGate.
- Abdullah, S., et al. (2015). "Fatigue Failure Behaviour Study of Automotive Lower Suspension Arm." ResearchGate.
- Abdullah, S., et al. (2019). "Determining Optimal Suspension System Parameters for Pegas Fatigue Life Using Design of Experiment." *Mechanics & Industry*, 20(6), 605-618.
- Abhishek, K., & Singh, R. (2018). Application of wavelet transform for vibration analysis of mechanical systems. *Journal of Vibration and Acoustics*, 140(6), 061004. doi:10.1115/1.4040203
- Abolorunke, F. (2016). A technical report on Student Industrial Work Experience Scheme (S.I.W.E.S) undertaken at Special Gift Technical Services, Gudu District, FCT Abuja. University of Benin.
- Ahmed, K., Khan, M., & Lee, D. (2020). "Smart Materials for Enhanced Fatigue Resistance in Automotive Suspension Systems." *Advanced Engineering Materials*, 22(5), 207-215.
- Ahmed, K., Khan, M., & Lee, D. (2020). "Smart Sensors for Fatigue Detection in Vehicle Suspension Systems." *Sensors*, 20(15), 4203.
- Ahmed, K., Khan, M., & Lee, D. (2021). "Frequency Domain Analysis for Enhanced Fault Detection in Automotive Systems." *Sensors*, 21(4), 432.
- Ahmed, K., Khan, M., & Lee, D. (2021). "Improved Damage Detection in Suspension Systems Using Frequency-Domain Analysis." *Journal of Mechanical Sciences and Engineering*, 58(4), 1012–1030.
- Alavi, S. M., & Shafiee, M. (2017). Fatigue analysis of automotive suspension components using wavelet-based methods. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(3), 1345-1352. doi:10.1007/s12206-017-0223-3
- Arslan, E., & Genel, K. (2023). Failure analysis of automotive helical pegas. *Engineering Failure Analysis*, 149, 107569. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107569>
- Avci, M., & Yıldırım, K. (2019). Condition monitoring of automotive suspension systems: A wavelet transform approach. *Vehicle System Dynamics*, 57(10), 1563-1579. doi:10.1080/00423114.2019.1653542
- Bai, Q., & Bai, Y. (2014). Fatigue and Fracture. *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*, 283–318. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386888-6.00012-2>

- Barbosa, R. S. (2011). Vehicle dynamic response due to pavement roughness. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 33(3), 302-307.
- Bathias, C. (2011). "Fatigue Testing Beyond 10^7 Cycles: Some Basic Considerations." *International Journal of Fatigue*, 23(2), 143–150.
- Benasciutti, D., & Tovo, R. (2018). Frequency-based analysis of random fatigue loads: Models, hypotheses, reality. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 49(3), 345–367. <https://doi.org/10.1002/mawe.201700190>
- Benhamou, A., Zhang, Y., & He, Q. (2019). "Fatigue Damage Analysis Using Power Spectral Density for Automotive Suspension Systems." *Journal of Vibration and Control*, 25(8), 1125–1140.
- Benzvi, D. (2021). Multiple least mean kurtosis adaptive filters for blind source separation. *Signal, Image and Video Processing*, 15(3), [halaman jika ada]. <https://doi.org/10.1007/s11760-020-01808-y>
- Bianchi, F., Speziali, S., Marini, A., Proietti, M., Menculini, L., Garinei, A., Bellani, G., & Marconi, M. (2022). Real-time oil leakage detection on aftermarket motorcycle damping system with convolutional neural networks. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.05192>
- Caporaso, T., Grazioso, S., Di Gironimo, G., & Lanzotti, A. (2020). Biomechanical indices represented on radar chart for assessment of performance and infringements in elite race-walkers. *Sports Engineering*, 23(1). <https://doi.org/10.1007/s12283-019-0317-2>
- Chatti, K., & Lee, D. (2002). Effect of surface roughness on truck dynamic loading and pavement damage. *7th International Symposium on Heavy Vehicle Weights & Dimensions*, Delft, The Netherlands. Michigan State University.
- Chin, C. H., Abdullah, S., Ariffin, A. K., Singh, S. S. K., & Arifin, A. (2024). A review of the wavelet transform for durability and structural health monitoring in automotive applications. *Alexandria Engineering Journal*, 99(2024), 204–216. [doi:10.1016/j.aej.2024.04.069](https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.04.069)
- Chin, C. H., Abdullah, S., Singh, S. S. K., Schramm, D., & Ariffin, A. K. (2022). Strain generation for fatigue-durability predictions considering load sequence effect of random vibration loading. *International Journal of Fatigue*, 165, 107242. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107242>
- Choi, H., & Lee, S. (2020). Fatigue life prediction of automotive components under dynamic loading using wavelet transform. *International Journal of Fatigue*, 132, 105406. [doi:10.1016/j.ijfatigue.2019.105406](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105406)
- Coffin, L. F. (1954). "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal." *Transactions of the ASME*, 76, 931-950.

- Datta, S., Bishop, N., Sweitzer, K., & Atkins, A. (2017). Simultaneous durability assessment and relative random analysis under base shake loading conditions. SAE Technical Paper Series. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0339>
- Daubechies, I. (1992). Ten Lectures on Wavelets. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Dimitris, B., Hans W., C., & Stavros G., P. (2016). Data mining and mathematical programming for decision support: A review. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 67(3), 606–634. doi:10.1002/asi.23474
- Djokovic, J., Nikolic, R., Hadzima, B., Arsic, D. & Triko, L. 2018. Working life estimate of the tubular T-joint by application of the LEFM concept. *Procedia Structural Integrity* 13: 334-339. doi: 10.1016/j.prostr.2018.12.056
- Dowling, N. E. (2019). *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. Pearson.
- Duarte, F. S. L. G., Rios, R. A., Hruschka, E. R., & de Mello, R. F. (2019). Decomposing time series into deterministic and stochastic influences: A survey. *Digital Signal Processing*, 94, 102582. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2019.102582>
- Fatemi, A., & Yang, L. (1998). "Cumulative fatigue damage and life prediction theories: A survey of the state of the art for homogeneous materials." *International Journal of Fatigue*, 20(1), 9-34.
- Fujii, H., Sato, Y., & Okada, K. (2016). "Fatigue Life Prediction of Suspension Components for Automotive Applications." *International Journal of Fatigue*, 92, 53-62.
- Fujimoto, K. (2023, July 13). Goodman Diagram - ULTMECHE. ULTMECHE. <https://ultmeche.com/goodman-diagram/>
- Funtasticko.net. (2013). Kereta dan sistem suspensi. Retrieved from <https://www.funtasticko.net/kereta-dan-sistem-suspensi>
- Furlan, M., & Puglisi, G. (2021). Nonstationary signal analysis in automotive engineering using wavelet methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 146, 107024. doi: 10.1016/j.ymsp.2020.107024
- Gao, Z., Yang, S., Meng, X., Wang, Z., & Peng, Z. (2021). Study on fatigue crack growth of electron beam selective melting of titanium alloy. *Materials Research Express*, 8(096521). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac2444>
- Ghosal, P., & Chakraborty, A. (2017). Fatigue damage detection in automotive structures using wavelet transforms. *Applied Mathematical Modelling*, 41, 139-154. doi: 10.1016/j.apm.2016.09.039
- Gillespie, T. D. (2022). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers.

- Giri, P., & Narayan, J. (2018). Vibration analysis for fatigue detection in automotive suspension systems using wavelet transform. *Mechanical Engineering Journal*, 19(4), 78-89. doi:10.1299/mej.18-00348
- Goedel, F., Mezzomo, G. P. & Pravia, Z. M. C. 2018. Fatigue lifespan of a fillet welded joint - Hybrid approach to obtain the S-N curve with a reduced number of tests. *Latin American Journal of Solids and Structures* 15(10). doi: 10.1590/1679-78255194
- Graspenengineering. (n.d.). Fatigue Analysis Concepts and Definitions. <https://www.graspenengineering.com/fatigue-analysis-concepts-and-definitions/>
- Gunawan, H. (2017). Analisis Fourier dan Wavelet. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung.
- Gupta, R., & Patel, S. (2020). Wavelet-based analysis for early detection of fatigue in mechanical components. *Materials Science and Engineering A*, 798, 139999. doi: 10.1016/j.msea.2020.139999
- Hasif, M. (2015). Flexible Pavement Thickness Design. Retrieved from <https://fr.scribd.com/doc/260099041/Rekabentuk-Ketebalan-Turapan-Lentur>
- He, R., Peng, H., Liu, F., Khan, M. K., Chen, Y., He, C., Wang, C., Wang, Q., & Liu, Y. (2022). Crack initiation mechanism and life prediction of Ti60 titanium alloy considering stress ratios effect in very high cycle fatigue regime. *Materials*, 15(8), 2800. <https://doi.org/10.3390/ma15082800>
- Hu, L., & Zhang, J. (2021). Wavelet transform-based method for predicting fatigue life of automotive components. *Journal of Vibration and Acoustics*, 143(2), 021014. doi:10.1115/1.4051552
- Hussein, A. W., & Kadhim, M. (2020). Mechanical behavior of the materials: Fatigue: Stress life method of smooth members
- Juang, Y.-T., Kuo, T.-S., & Hsu, C.-F. (1987). New approach to time-domain analysis for stability robustness of dynamic systems. *International Journal of Systems Science*, 18(7), 1363-1376. <https://doi.org/10.1080/00207728708967116>
- Jung, J., & Lee, J. (2019). Early-stage fatigue detection in automotive chassis components using wavelet transform. *Structural Health Monitoring*, 18(3), 670-680. doi:10.1177/1475921718772314
- Kaľavský, A., Niesłony, A., & Róbert Huňady. (2023). Influence of PSD Estimation Parameters on Fatigue Life Prediction in Spectral Method. *Materials*, 16(3), 1007–1007. <https://doi.org/10.3390/ma16031007>
- Karami, S., & Alavi, S. (2018). Vibration analysis of suspension components in automotive systems using wavelet. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(3), 1345-1352. doi:10.1007/s12206-017-0223-3

- Kumar, R., Singh, A., & Patel, D. (2020). Advancements in fatigue monitoring using wavelet-based techniques: A focus on automotive applications. *Mechanical Engineering Review*, 67(4), 589-601. doi:10.1299/mecheng.19-00677
- Latifi, L. M., Mubasyir, M. M., Abdullah, S., & Singh, S. S. K. (2025). Kesan kepelbagaian frekuensi ujian lesu terhadap ketahanan plat keluli karbon AISI 1045 di bawah pembebanan spektrum (Effect of varying frequency of fatigue test on durability of AISI 1045 carbon steel plate under spectral loading). *Jurnal Kejuruteraan*, 37(1), 369-381. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37\(1\)-25](https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37(1)-25)
- Liu, J., Yang, K., & Cheng, F. (2023). Hybrid time-frequency analysis techniques for predicting fatigue life in automotive applications. *Automotive Materials and Design Journal*, 10(2), 245-260. doi:10.1016/j.amdj.2023.04.012
- Makmal Integriti Struktur | Centre for Automotive Research. (2015, December 21). Centre for Automotive Research | FKAB, UKM. <https://www.ukm.my/car/ms/makmal-integriti-struktur-2/>
- Mallat, S. (2009). *A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way*. Academic Press.
- Manouchehrynia, R., Abdullah, S., Singh, S. S. K., & Correia, J. A. F. O. (2023). Reliability-based fatigue life assessment using random road load condition and local damage criteria. *Engineering Failure Analysis*, 149, 107157. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107157>
- Manson, S. S., & Halford, G. R. (2020). "Fatigue and Fracture: Understanding the Basics." *ASM Handbook*, Volume 19. ASM International.
- Manson, S. S., & Halford, G. R. (2020). *Fatigue and Durability of Metals at High Temperatures*. ASM International.
- Matsuishi, M., & Endo, T. (1968). "Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress." *Japan Society of Mechanical Engineers*, 68(2), 37-44.
- Miazek, P., Żmudzińska, A., Karczmarek, P., & Kiersztyn, A. (2024). Human behavior analysis using radar data: A survey. *IEEE Access*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3474100>
- Michael, W., Klaus, S., & Michael, R. (2021). Application of advanced machine learning methods for accurate disturbance classification in power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 129, 106785. doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106785
- Miner, M. A. (1945). "Cumulative Damage in Fatigue." *Journal of Applied Mechanics*, 12, 159-164.
- Minnesota Department of Health. (n.d.). Radar chart. Retrieved February 1, 2025, from <https://www.health.state.mn.us>

- Mohamed, M. A. A., Eltamaly, A. M., & Alolah, A. I. (2018). Optimal placement and sizing of distributed generation and capacitor banks in distribution systems using water cycle algorithm. *Applied Energy*, 210, 211-228. doi:10.1016/j.apenergy.2017.10.118
- Mohamed, R., Mohamed, A., & Hussain, A. (2002). Pembangunan satu kaedah cekap dalam pengesanan dan pengelasan gangguan kualiti kuasa. *Jurnal Teknologi*, 37(D), 143–154.
- Morgado, T.L.M.2016. Failure of steel couplings used in railway transport. Handbook of material failure analysis with case studies from the aerospace and automotive industries. Elsevier Ltd. Doi: 10.1016/B978-0-12-800950-5.00020-X
- Morrow, J. D. (1965). "Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals." *Internal Friction, Damping, and Cyclic Plasticity*. ASTM International.
- Oh, C.-S. (2001). Aplikasi transformasi anak-gelombang dalam penyuntingan sejarah lesu. *International Journal of Fatigue*, 23(3), 241-250. (researchgate.net)
- Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2010). *Discrete-Time Signal Processing*. Pearson.
- Panjaitan, R. P. (2021). Analisis kecelakaan lalu lintas di Jalan Pemda Perawang Barat dengan menggunakan metode angka ekivalen kecelakaan dan metode upper control limit [Tugas akhir, Universitas Islam Riau]. Universitas Islam Riau.
- Paris, P., & Erdogan, F. (1963). "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws." *Journal of Basic Engineering*, 85(4), 528–534.
- Plante, T., Nejadpak, A., & Yang, C. X. (2015, November). Vibration analysis: Fault detection and failure prediction. In *Proceedings of IEEE AUTOTESTCON 2015 National Harbor, Maryland*
- Putra, T. E., & Husaini. (2018). Investigating the road surface effect to the fatigue life of an automotive coil pegas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 352(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/352/1/012016>
- Putra, T. E., Husaini, & Iqbal, M. (2021). Automotive suspension component behaviors driven on flat and rough road surfaces. *Heliyon*, 7(7), e07528. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07528>
- Rahman, M., Abdullah, S., & Hassan, R. (2022). Wavelet-based approaches in fatigue damage monitoring: A review. *International Journal of Fatigue*, 163, 106855. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106855
- Rajamani, R. (2012). *Vehicle Dynamics and Control*. Pegaser.
- Randall, R. B. (2011). *Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace, and Automotive Applications*. Wiley.
- Rangam, K. (2020, March 31). Automobile Suspension (Car Suspension) Explained. The GoMechanic Blog. <https://gomechanic.in/blog/car-suspension-explained/>

- Rao, S. S. (2018). *Mechanical Vibrations*. Pearson.
- Reza-Kashyzadeh, K., Ostad-Ahmad-Ghorabi, M. J., & Arghavan, A. (2013). Study effects of vehicle velocity on a road surface roughness simulation. *Applied Mechanics and Materials*, 372, 650–656. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.372.650>
- Santharaguru, N., Abdullah, S., Chin, C. H., & Singh, S. S. K. (2022). Failure behaviour of strain and acceleration signals using various fatigue life models in time and frequency domains. *Engineering Failure Analysis*, 139, 106454. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106454>
- Schijve, J. (2009). *Fatigue of Structures and Materials*. Pegaser.
- Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G., & Nisbett, K. J. (2020). *Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Education.
- Smith, J., Patel, R., & Kumar, S. (2020). "Fatigue Analysis in Suspension Components: A Comprehensive Review." *Journal of Automotive Engineering*, 54(2), 120-135.
- Smith, J., Patel, R., & Kumar, S. (2020). "Fatigue Life Prediction in Automotive Components." *Journal of Materials Science*, 54(3), 1001-1015.
- Smith, T., Zhao, J., & Nguyen, P. (2023). Fatigue life analysis of automotive components under variable loading conditions. *Journal of Engineering Failure Analysis*, 128, 104985. doi:10.1016/j.jengfailan.2023.104985
- Sornette, D., Magnin, T., & Brechet, Y. (1992). The physical origin of the Coffin-Manson law in low-cycle fatigue. *Europhysics Letters*, 20(5), 433–438. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/20/5/009>
- Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2000). *Metal Fatigue in Engineering*. John Wiley & Sons.
- Sun, L., Liu, M., Wang, Z., Wang, C., & Luo, F. (2023). Kajian mengenai kaedah pembinaan semula spektrum beban bagi bracket pemasangan sistem ekzos traktor hibrid berdasarkan teknik MOPSO-Wavelet. *Agriculture*, 13(10), 1919.
- Suresh, S. (2018). *Fatigue of Materials*. Cambridge University Press.
- Taizhou Shuangyi Auto Bahagian Co.,Ltd. (2023, July 25). Kebaikan dan keburukan MacPherson, double wishbone, dan sistem suspensi berbilang pautan - Pengetahuan. Clutchcylinder.com; TAIZHOU SHUANGYI AUTO BAHAGIAN CO.,LTD. <https://my.clutchcylinder.com/info/advantages-and-disadvantages-of-macpherson-do-85783398.html>
- Tan, H. Y., Chan, K. M., & Lee, C. (2022). "AI-Based Prediction Models for Vehicle Suspension Fatigue Analysis." *Applied Intelligence*, 52(6), 4739–4753.

- Tomposné Szüle, V. (2019). Fatigue analysis approaches for vehicle components made of rubber. *Trans Motauto World*.
- Velasquez Arriaza, O., Tumurkhuyagc, Z., & Kim, D.-W. (2018). Chatter identification using multiple sensors and multi-layer neural networks. *Procedia Manufacturing*, 17, 150–157. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.030>
- Wang, J., Zhang, H., & Wu, X. (2021). "PSD-Based Fatigue Life Prediction in Automotive Components Under Random Loading." *International Journal of Fatigue*, 146, 106204.
- Wang, Q., Lin, C., & Zhang, Y. (2023). "Adaptive Suspension Systems for Electric Vehicles: A New Approach." *Automotive Innovation*, 6(1), 45-58.
- Wang, Y., Lin, C., & Zhang, Y. (2021). "High-Cycle Fatigue Analysis in Automotive Suspension Systems." *Engineering Failure Analysis*, 122, 105283.
- Wang, Y., Liu, X., & Huang, Z. (2021). Application of wavelet transform in the analysis of mechanical signals: A review. *International Journal of Vehicwangle Systems and Dynamics*, 59(7), 1012-1030. doi:10.1080/17455930.2021.1946341
- Yang, J., Zhou, X., & Liu, P. (2020). "Statistical Methods for Fatigue Analysis of Suspension Systems." *Journal of Mechanical Engineering*, 45(3), 123-135.
- Yang, X., Zhang, Y., & Li, J. (2020). "Statistical Signal Processing for Fatigue Analysis in Vehicle Suspension Components." *International Journal of Automotive Engineering*, 45(3), 267–280.
- Yang, Z., Zhu, D., Gao, Q., Gong, L., & Xu, D. (2020). Fatigue life analysis of vehicle systems under non-Gaussian excitation. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 17(2), 7956-7966. doi:10.15282/ijame.17.2.2020.16.0621
- Yusuff, M. A. (2014). Penilaian taburan hayat lesu komponen automotif dengan bebanan ekstrem melalui pendekatan ciri hayat taburan dan fungsi kebolehharian (Tesis Doktor Falsafah). Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi.
- Zakaria, K. A. (2014). Kesan pembebanan spektrum dan suhu terhadap hayat lesu aloi aluminium AA6061 dan AA7075 (Unpublished master's thesis). Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia. <https://ptslldigital.ukm.my/jspui/handle/123456789/486959>
- Zakaria, K. A., Idris, M. I. F., Dhar Malingam, S., Salleh, S., Sanusi, N., & Mohd Daud, M. A. (2018). Fatigue strain signal characteristic and damage of automobile suspension system. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(1), 221-225. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/322732493_Fatigue_strain_signal_characteristic_and_damage_of_automobile_suspension_system

- Zakaria, N. M., Md. Jaffary, M. F., Hassan, M. K., Hamim, A., Md. Yusoff, N. I., & Mohd Nayan, K. A. (2015). Penentuan sifat kekukuhan dan ketebalan lapisan permukaan berasfalt menggunakan kaedah pencarian resonan tambahan (ERS). Jabatan Kejuruteraan Awam dan Struktur, Universiti Kebangsaan. Retrieved from <https://journals.utm.my/jurnalteknologi/article/download/4080/3588/14786>
- Zhang, L., & Liu, W. (2019). A study on the effects of road roughness on vehicle suspension system using wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 118, 482-496. doi: 10.1016/j.ymssp.2018.09.035
- Zhi, S., Liu, H., & Liu, X. (2024). Improved equivalent strain method for fatigue life of automobile aluminum alloy. *World Electric Vehicle Journal*, 15(5), 200.
- Zhou, W., Gao, L., & Tang, H. (2021). Time-domain analysis of fatigue signals in mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 174, 109211. doi: 10.1016/j.ymssp.2021.109211
- Zhou, Y., Wang, L., & Zhao, H. (2021). "Finite Element Analysis in Coil Pegas Fatigue." *International Journal of Mechanical Sciences*, 189, 106301.
- Zhou, Y., Wang, L., & Zhao, H. (2021). "Material Fatigue Analysis in Automotive Suspension Systems." *International Journal of Mechanical Sciences*, 189, 106301.
- Zoroufi, M., & Fatemi, A. (2016). Fatigue behavior of vehicle suspension components (forged steel and cast aluminium steering knuckles) under constant-amplitude load-controlled fatigue tests. *Journal of Applied Sciences*, 6(9), 316-328. doi:10.3923/jas.2016.316.328
- Zubairi, S. I., Mat Lazim, M. A., Md Jamil, M. S., & Yusop, R. M. (2017). Konsep swapemulihan berdasarkan rangsangan terma | Thermal response via self-healing concept. In *Swapemulihan Polimer | Self-Healing Polymer* (pp. 122–159). Penerbit UKM.