

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)

Lukman Mohd Latifi, Muhammad Muaz Mubasyir*, Shahrum Abdullah & Salvinder Singh Karam Singh

Jabatan Kejuruteraan Mekanikal dan Pembuatan,
Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

*Corresponding author: p140792@siswa.ukm.edu.my

Received 26 July 2024, Received in revised form 25 October 2024
Accepted 25 November 2024, Available online 30 January 2025

ABSTRAK

Dalam kebanyakan aplikasi praktikal, keluli karbon AISI 1045 terdedah kepada pelbagai faktor luaran, salah satunya ialah getaran. Getaran ini boleh menyebabkan resonans dalam bahan tersebut, yang akhirnya membawa kepada keletihan akibat tekanan berulang. Kajian ini bertujuan untuk menyelidik tingkah laku mekanikal keluli karbon AISI 1045 apabila dikenakan beban statik dan kitaran, serta menilai bagaimana sifat keletihannya berubah pada pelbagai frekuensi ujian, dan untuk mengesahkan model matematik yang meramalkan hayat keletihan melalui analisis statistik. Bagi memastikan ujian yang tepat dan standard, geometri spesimen mengikuti piawaian ASTM E466 untuk ujian tegangan dan hayat-tekanan, serta piawaian ASTM E290 untuk ujian lenturan tiga titik. Kajian ini melibatkan satu siri ujian mekanikal, termasuk ujian tegangan, ujian hayat-tekanan, dan ujian lenturan tiga titik, yang memberikan data penting mengenai hayat kelesuan bahan di bawah pelbagai keadaan. Dengan menganalisis keputusan tersebut, penyelidik bertujuan untuk mewujudkan hubungan yang jelas antara frekuensi beban yang dikenakan dan hayat keletihan bahan tersebut. Selain itu, berdasarkan hubungan ini, mereka mencadangkan model matematik untuk meramalkan hayat keletihan keluli karbon AISI 1045 pada pelbagai frekuensi. Model ini boleh digunakan untuk menganggarkan ketahanan dan prestasi komponen yang diperbuat daripada keluli ini apabila dikenakan beban dinamik dan berubah-ubah, membantu jurutera dalam mereka bentuk sistem yang lebih boleh dipercayai serta meramalkan prestasi bahan dalam pelbagai keadaan operasi.

Kata kunci: Keluli karbon; lesu getaran; frekuensi; hayat lesu; beban berkitar

ABSTRACT

In many practical applications, AISI 1045 carbon steel is subjected to various external factors, one of which is vibration. This vibration can induce resonance in the material, ultimately leading to fatigue due to cyclic stress. The aim of this study is to investigate the mechanical behavior of AISI 1045 carbon steel when subjected to both static and cyclic loading conditions, and to assess how its fatigue properties change across different test frequencies, and to validate a mathematical model that predicts fatigue life through statistical analysis. To ensure accurate and standardized testing, the specimen geometry follows the ASTM E466 standard for tensile and stress-life tests, and the ASTM E290 standard for three-point bending tests. The study involves conducting a series of mechanical tests, including tensile tests, stress-life tests, and three-point bending tests, which provide critical data on the material's fatigue life under various conditions. By analyzing the results, the researchers aim to establish a clear relationship between the applied load frequency and the material's fatigue life. Additionally, based on this relationship, they propose a mathematical model to predict the fatigue life of AISI 1045 carbon steel across different frequencies. This model could be useful in estimating the durability and performance of components made from this steel when subjected to dynamic and fluctuating loads, helping engineers design more reliable system and predicting material performance under varying operational conditions.

Keywords: Carbon steel; vibration fatigue; frequency; fatigue life; cyclic loading

PENGENALAN

Komponen kejuruteraan dan strukturnya adalah antara aspek yang amat penting untuk direka bentuk dengan baik dan teliti bagi memastikan tiada kerugian berdasarkan faktor-faktor asas seperti keselamatan kepada pengguna, kos pembuatan, penyelenggaraan serta masa pembuatan dalam aplikasi kejuruteraan. Dalam kejuruteraan bahan, terutamanya logam menghasilkan retak dan patah semasa proses berjalan dan melibatkan kebanyakan aplikasi seperti automotif, pesawat dan loji kuasa, yang beroperasi di bawah suhu tinggi (Kamei & Khan 2021).

Walaupun terdapat pelbagai kelemahan seperti kepekaan kakisan dan ketumpatan jisimnya yang besar berbanding dengan beberapa bahan logam lain namun keluli karbon mempunyai daya saing ekonomi dan keupayaan serba bolehnya sebagai komponen mekanikal (Guenneec et al. 2023). Lesu adalah fenomena iaitu komponen kegagalan struktur apabila terdedah kepada beban kitaran. Lesu melibatkan retak bahan dan komponen struktur akibat tekanan kitaran yang mungkin berlaku dalam bentuk tegangan, mampatan atau torsional. Selain itu, lesu juga dipengaruhi oleh banyak faktor dalaman dan luaran, termasuk pemrosesan bahan dan struktur mikro, saiz dan konfigurasi geometri, beban, persekitaran dan lain-lain (H. Cui & Han 2023).

Proses retak lesu kebiasaannya terbahagi kepada tiga fasa iaitu permulaan retak dan penukleusan, pertumbuhan retak dan patah akhir. Selain itu 90% daripada kegagalan komponen kejuruteraan berpunca daripada lesu (Kopas et al. 2019). Teori kerosakan kumulatif linear Miner digunakan dalam anggaran lesu-rosak. Miner mencadangkan bahawa beban kitaran sama-jejari dan beban kitaran amplitud-berubah ubah akan menyebabkan kerosakan yang berbeza kepada bahan. Dalam kes amplitud malar, setiap kitaran akan menyebabkan kerosakan yang sama manakala dalam kes amplitud berubah, setiap satu kitaran akan menyebabkan kerosakan yang agak bebas (Zhang et al. 2023).

Ujian lesu di bawah pembebanan spektrum merupakan bidang kajian yang penting dalam bidang kejuruteraan. Kepelbagaian frekuensi ujian lesu yang dikenakan terhadap bahan logam boleh memberi kesan terhadap tingkah laku lesu bahan-bahan tersebut. Oleh kerana sifat dinamik struktur boleh diterangkan dengan tepat dalam domain frekuensi, penyelidikan menunjukkan bahawa pendekatan domain frekuensi menjadi arus perdana dalam kajian lesu getaran (Li et al. 2022) Walau bagaimanapun, di sebalik kepentingan topik ini, terdapat kekurangan penyelidikan komprehensif yang mengkaji secara holistik terhadap kesan kepelbagaian frekuensi ujian lesu pada ketahanan keluli karbon AISI 1045.

Permasalahan ini menjurus kepada objektif kajian yang dipecahkan kepada tiga objektif bagi mencapai objektif utama kajian. Objektif kajian yang pertama yang ingin dicapai bagi kajian adalah mencirikan sifat mekanikal komponen di bawah beban statik dan beban berkitar. Seterusnya, mencirikan sifat lesu komponen pada frekuensi ujian yang pelbagai menjadi objektif ujian yang kedua. Berdasarkan objektif yang telah dicapai pada objektif pertama dan kedua, menentusahkan hubungan matematik berkaitan hubungan hayat lesu dan frekuensi secara analisis merupakan objektif kajian ketiga yang ingin dicapai bagi mencapai objektif utama kajian ini.

Bagi mencapai ketiga-tiga objektif kajian, skop kajian dijelaskan di mana, ujian mekanikal iaitu ujian tegangan, ujian hayat-tegangan dan ujian 3 titik lenturan akan dijalankan pada Keluli Karbon S45C (AISI 1045). Ujian tersebut akan dijalankan berdasarkan piawaian yang ditetapkan oleh ASTM. Bagi ujian tegangan dan ujian hayat-tegangan, piawaian ASTM E466 digunakan dan bagi ujian 3 titik lenturan pula, piawaian berdasarkan ASTM E290 akan digunakan. Data-data dari tolok terikan, dan meter pecutan akan diambil semasa ujian lenturan 3 titik dijalankan. Ujian mekanikal, ujian berkitar lenturan 3 titik ini dikenakan frekuensi dari julat 1-10Hz bagi melihat kesan frekuensi terhadap ketahanan keluli karbon tersebut. Analisis berkaitan data-data ini akan dijalankan bagi memperincikan analisis berkaitan hayat lesu dan frekuensi. Pendekatan ini adalah bagi melihat kesan frekuensi tersebut secara hubungan matematik.

Berdasarkan hubungan tersebut, Cadangan model matematik diterbitkan bagi meramalkan hayat lesu berdasarkan frekuensi ujian yang pelbagai. Hubungan korelasi dan analisis statistik dijalankan bagi melihat kekuatan korelasi antara data-data berkaitan hayat lesu dan frekuensi.

Kebanyakan kajian menunjukkan kepentingan kajian terhadap lesu di mana berdasarkan kajian Cui et al. (2020), Bahan boleh mengalami lesu mekanikal apabila tertakluk kepada beban kitaran pada tahap tegangan jauh lebih rendah daripada kekuatan tegangan muktamad (Ultimate Tensile Strength, UTS), dan memahami tingkah laku ini adalah penting untuk menilai kebolehpercayaan dinamik jangka panjang. Selain itu, pertumbuhan retak dalam struktur bergantung kepada amplitud, nisbah tegangan, dan beban frekuensi (Huang et al. 2008).

Lengkung S-N dirumuskan buat kali pertama oleh Basquin pada tahun 2010 dan persamaan tersebut dikenali sebagai model Basquin (Murakami & Endo 2023). Beberapa model lengkung S-N awal telah dirumuskan secara intuitif untuk mewakili data lesu dalam koordinat log-log seperti berikut (Kim Ho Sung 2019).

$$\sigma_{max} = \alpha(N_f)^\beta \tag{1}$$

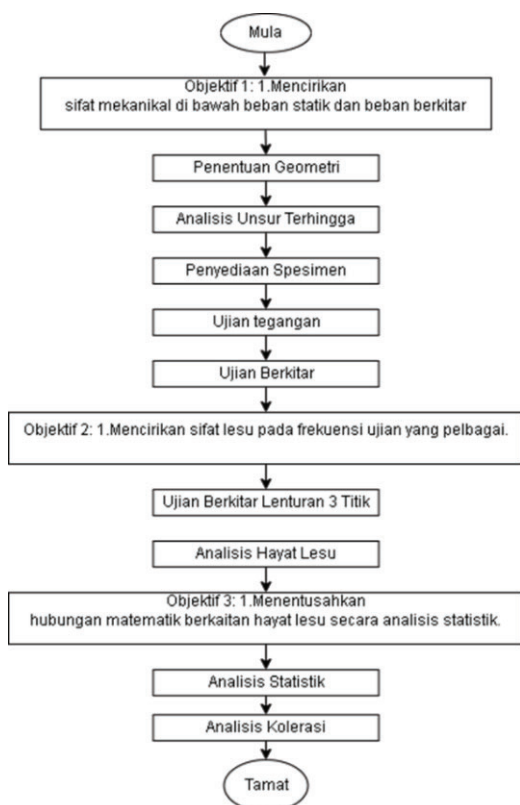
$\sigma_{max} = \alpha(N_f)^\beta$ adalah tekanan puncak yang dikenakan α dan β parameter penyesuaian model dan N_f adalah bilangan kitaran pada kegagalan.

Hong et al. (2023) menekankan kepentingan mempertimbangkan kesan kadar terikan apabila menilai tingkah laku lesu bahan di bawah beban frekuensi yang berbeza. Di mana, frekuensi antara 0.2 hingga 140 Hz, kebergantungan beban frekuensi adalah disebabkan oleh kesan kadar terikan pada kekuatan alah bahan.

KAEDAH KAJIAN

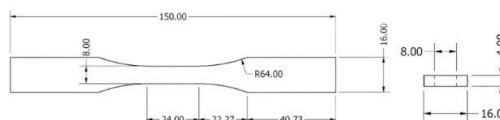
MENCIRIKAN SIFAT MEKANIKAL DI BAWAH BEBAN STATIK DAN BEBAN BERKITAR

Di dalam bab ini langkah-langkah serta kaedah yang akan digunakan bagi melihat dan mengkaji kesan kepelbagaian frekuensi ujian lesu terhadap ketahanan plat logam S45C (AISI 1045) akan ditunjukkan dan diterangkan. Secara amnya, terdapat 3 peringkat dalam kaedah kajian ini bagi memastikan tiga objektif kajian berjaya dicapai.

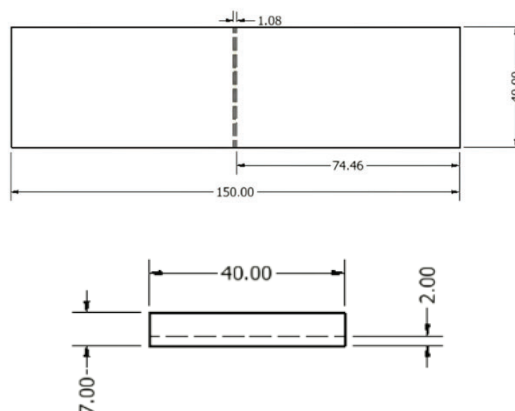


RAJAH 1. Carta alir bagi keseluruhan kaedah ujian.

Berdasarkan objektif yang pertama, iaitu mencirikan sifat mekanikal di bawah beban statik dan beban berkitar, spesimen disediakan mengikut piawaian dan standard bagi setiap ujian yang dijalankan. Bagi ujian tegangan dan ujian berkitar, ASTM yang digunakan bagi spesimen ini adalah, ASTM E466. Panjang keseluruhan spesimen keluli S45C (AISI 1045) adalah 150mm dan panjang tolok adalah 24mm. Bagi specimen ujian berkitar lenturan 3 pula, ASTM E290 digunakan di mana, Panjang keseluruhan spesimen adalah 150mm dengan lebar 40mm dan tebal spesimen adalah 7mm. Spesimen ini juga mempunyai ‘notch’ dengan ketinggian 2mm dan sudut 30°. Rajah 2 menunjukkan geometri spesimen bagi ujian tegangan dan ujian berkitar manakala Rajah 3 menunjukkan geometri spesimen ujian berkitar lenturan 3 titik.

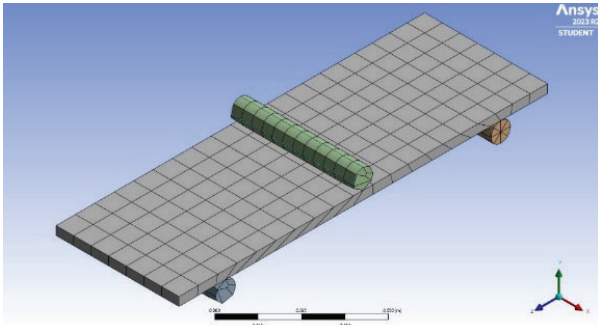


RAJAH 2. Geometri Spesimen Ujian tegangan dan ujian berkitar (mm).



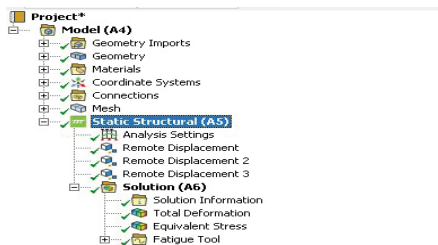
RAJAH 3. Geometri Spesimen Ujian 3 Titik Lenturan (mm).

Setelah proses penyediaan spesimen telah selesai, analisis unsur terhingga dijalankan menggunakan perisian ANSYS 2023 R2. *mesh* bagi specimen AISI 1045 dijana untuk memudahkan geometri kompleks menjadi elemen yang lebih kecil dan lebih mudah diurus. Rajah 4 menunjukkan hasil mesh bagi geometri bahan AISI 1045.



RAJAH 4. Hasil *mesh* bagi geometri bahan AISI 1045

Kemudian, geometri ini akan dianalisis bagi melihat corak tegasan yang dihasilkan dan beberapa parameter ditetapkan dalam perisian ANSYS 2023 R2. Rajah 5 menunjukkan analisis yang dijalankan pada geometri ini.



RAJAH 5. Analisis yang dijalankan.

Setelah analisis unsur terhingga dijalankan, ujian mekanikal iaitu ujian tegangan, ujian hayat-tegangan dijalankan untuk mengkaji dan melihat sifat lesu komponen logam. Ujian tegangan ini dijalankan menggunakan mesin ZWICK 100 kN dengan kadar terikan yang digunakan adalah $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Data kekuatan tegangan muktamad UTS, dicerap dan digunakan bagi ujian berkisar. Data-data sifat mekanikal seperti kekuatan alah dan modulus elastik juga diambil daripada ujian tegangan pada mesin tensile ZWICK 100kN.

Ujian hayat tegangan pula dijalankan bagi mencirikan kelakuan lesu keluli AISI 1045. Ujian ini dijalankan dengan menggunakan mesin *Servohydraulic Universal Testing* 100kN. Nilai tegasan yang akan digunakan untuk ujian ini adalah berdasarkan nilai kekuatan tegangan muktamad yang diperolehi dari ujian tegangan iaitu $0.6 \sigma_{UTS}$, $0.65 \sigma_{UTS}$, $0.7 \sigma_{UTS}$, dan $0.8 \sigma_{UTS}$. Ujian dijalankan pada nisbah tegasan 0.1 dan frekuensi 10 Hz. Ujian ini akan dijalankan sehingga spesimen tersebut gagal dan bagi mendapatkan input parameter ujian ini, perisian Instron Wavematrix digunakan. Lengkung hayat tegasan dibina daripada bilangan kitaran yang diperolehi daripada ujian berkisar yang dijalankan pada mesin *Servohydraulic Universal Testing* 100kN.

MENCIRIKAN SIFAT LESU PADA FREKUENSI UJIAN YANG PELBAGAI

Pada peringkat ini, ujian berkisar lenturan 3 titik dijalankan bagi pada spesimen keluli karbon AISI 1045. Spesimen dikenakan frekuensi ujian yang pelbagai, julat dari 1 hingga 10 Hz. Data-data daripada tolok terikan dan meter pecutan diambil semasa ujian dijalankan. Bagi ujian 3 titik lenturan, akan dijalankan berdasarkan ASTM E290 di mana berdasarkan ASTM ini, jarak antara penyokong (C) hendaklah tiga kali ketebalan (t) ditambah dua kali jejari pelocok, dengan toleransi setengah ketebalan. Jejari yang digunakan bagi pelocok yang digunakan adalah 16mm, dan jarak antara penyokong sekitar 84mm (Dowding et al. 2020).

Ujian ini akan dijalankan menggunakan mesin Universal Testing Machine 100kN (Instron 8801) dan data mengenai kekekuatan lenturan diambil. Data terikan dan data getaran diambil menggunakan tolok terikan dan meter pecutan, yang mana kedua-duanya disambungkan kepada alatan Dewesoft dan data dicerap melalui komputer riba dengan menggunakan aplikasi Dewesoft X. 2 Saluran digunakan dalam aplikasi Dewesoft X bagi pencerapan data tolok terikan dan meter pecutan. Spesimen dikenakan frekuensi ujian yang pelbagai iaitu pada frekuensi 2 Hz, 4 Hz, 6 Hz, 8 Hz dan 10 Hz dengan nisbah tegasan -1. Tegasan yang dikenakan adalah pada $0.5 \sigma_{UTS}$, $0.5 \sigma_{UTS}$, dan $0.6 \sigma_{UTS}$, $0.6 \sigma_{UTS}$. Rajah 9 menunjukkan, penggunaan mesin Universal Testing Machine 100 kN (Instron 8801) sewaktu ujian lenturan 3 titik dijalankan.

MENETUSAHKAN HUBUNGAN MATEMATIK

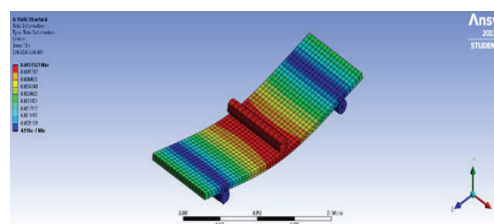
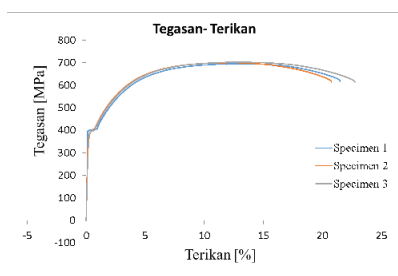
Bagi menentusahkan hubungan matematik yang dijalankan, pendekatan secara statistik digunakan seperti parameter statistik pekali penentuan (R^2) (R^2) ralat kuasa dua min dan ralat punca kuasa dua min digunakan. Korelasi bagi data-data yang diperolehi daripada ujian yang dijalankan. Hubungan seperti korelasi positif, korelasi negatif atau tiada korelasi akan dikaji melalui pendekatan ini. Hubungan korelasi adalah kaedah statistik yang digunakan untuk mengukur kekuatan hubungan linear antara dua pemboleh ubah dan mengira perkaitannya. Seterusnya cadangan model matematik daripada hasil analisis ini dibangunkan bagi melihat kesan frekuensi terhadap hayat lesu secara model matematik.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

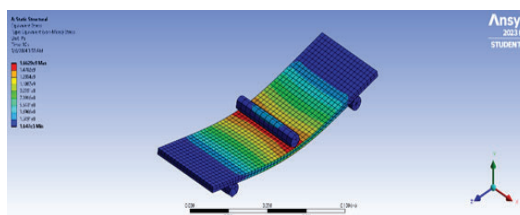
ANALISIS UNSUR TERHINGGA

Dalam konteks ini, objektif utama adalah untuk mengenal pasti titik panas bagi kawasan yang mengalami kepekatan tegangan tertinggi, di mana meter pecutan dan tolok terikan harus diletakkan. Setelah proses simulasi analisis unsur terhingga dijalankan, jumlah ubah bentuk, tegangan Von-Mises, hayat lesu dan kerosakan lesu ditentukan bagi

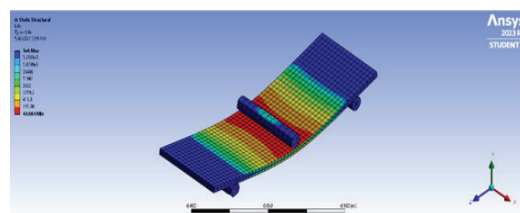
spesimen 3 titik lenturan. Rajah 6 (a) dan Rajah 6 (b) menunjukkan keputusan analisis kontur jumlah ubah bentuk dana juga hasil analisis kontur tegangan Von- Mises bagi ujian 3 titik lenturan. Manakala, bagi analisis unsur terhingga bagi hayat lesu dapat dilihat dalam Rajah 6 (c). Rajah 6 (d) pula menunjukkan kerosakan lesu yang terhasil pada spesimen 3 titik lenturan melalui analisis unsur terhingga. Nilai maksimum bagi jumlah ubah bentuk, tegangan Von- Mises, hayat lesu dan kerosakan lesu dapat dilihat tertumpu pada bahagian tengah spesimen.



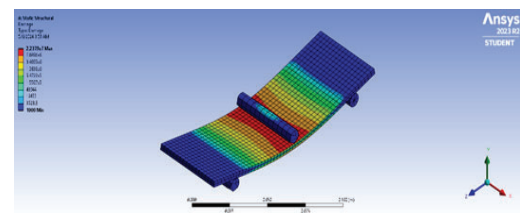
(a)



(b)



(c)



(d)

RAJAH 6. Analisis unsur terhingga (a) Kontur jumlah ubah bentuk, (b) Kontur tegangan Von-Misses, (c) Kontur analisis hayat lesu, (d) Kontur bagi kerosakan lesu.

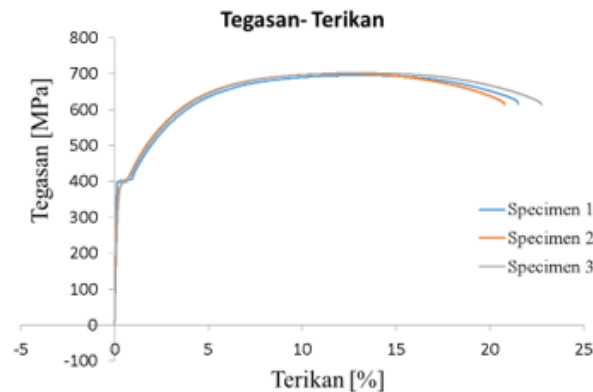
Titik panas atau hotspot dikenal pasti pada kawasan yang mempunyai tegangan yang lebih tinggi berbanding dengan kawasan sekitarnya. Kawasan ini adalah kritikal

kerana mereka berkemungkinan besar akan memulakan kegagalan atau mempamerkan ubah bentuk yang ketara di bawah pembebanan.

PENCIRIAN SIFAT MEKANIKAL BAGI KELULI KARBON AISI 1045

Ujian tegangan dijalankan ke atas spesimen yang telah disediakan bagi menentukan sifat asas mekanikal bahan seperti kekuatan alah, kekuatan tegasan muktamad dan

modulus elastik. Sifat monotonik ini diperlukan bagi menentukan nilai tegasan yang akan digunakan bagi uji kaji lesu terhadap bahan keluli karbon AISI 1045. Ujian ini dijalankan secara berulang sebanyak tiga kali kerana, pengulangan membantu dalam mencapai ukuran yang tepat. Rajah 7 menunjukkan hasil ujian tegangan.



RAJAH 7. Lengkung tegangan-terikan ketiga-tiga spesimen keluli karbon AISI 1045.

Hasil ujian tegangan bagi bahan keluli karbon AISI 1045 dirumuskan seperti dalam Jadual 1. Berdasarkan Jadual 1, nilai kekuatan alah (σ_y) adalah bagi spesimen 1, spesimen 2 dan spesimen 3 adalah 402 MPa, 393 MPa, dan 396. Nilai purata bagi kekuatan alah berdasarkan ketiga-tiga ujian yang dijalankan adalah 397 MPa yang mana apabila nilai tegasan yang dikenakan pada keluli melebihi nilai (σ_y), keluli karbon ini tidak akan kembali kepada bentuk asal apabila tegasan tidak dikenakan dan mengalami ubah bentuk plastik.

Bagi kekuatan tegasan muktamad (σ_{UTS}), atau tegasan maksimum yang dapat ditampung bagi bahan keluli

karbon ini adalah 695 Mpa bagi spesimen 1, 700 MPa bagi spesimen 2, 702 MPa bagi spesimen 3 dan nilai purata bagi kekuatan tegasan muktamad (σ_{UTS}), adalah 699 MPa. Keluli karbon ini mengalami keadaan perleheran atau 'necking' apabila nilai tegasan melebihi nilai (σ_{UTS}). Di mana, keluli karbon ini akan mengalami patah setelah nilai tegasan mengalami penurunan dan kegagalan penuh berlaku secara purata pada nilai tegasan patah (σ_f), iaitu pada 614 MPa. Berdasarkan ujian tegangan ini juga dapat dianalisis bahawa, bahan keluli karbon ini mengalami purata pemanjangan sebanyak 12.8% dan menghasilkan nilai purata modulus elastik (E) pada 225 Gpa.

JADUAL 1. Dapatan pencirian sifat mekenikal bahan keluli karbon AISI 1045 dari ujian tegangan.

Siri	Modulus Elastik (GPa)	Kekuatan Alah (MPa)	Kekuatan Tegasan Muktamad (MPa)	Pemanjangan (%)	Tegasan patah (MPa)
Spesimen 1	228	402	695	13.1	615
Spesimen 2	228	393	700	12.4	614
Spesimen 3	220	396	702	12.8	613
Purata	225	397	699	12.8	614

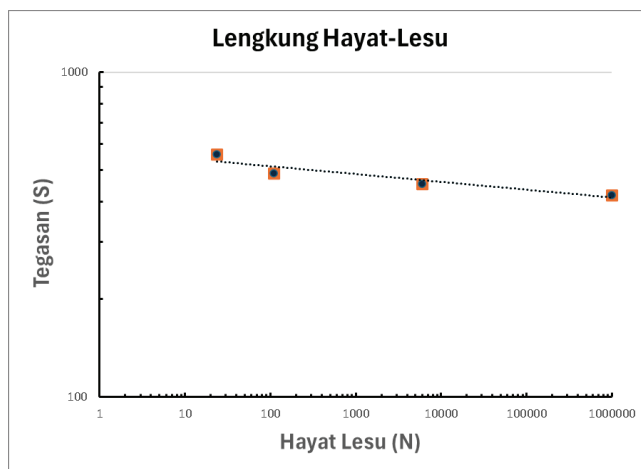
ANALISIS KELAKUAN LESU KELULI KARBON AISI 1045 MENGGUNAKAN PENDEKATAN HAYAT-TEGASAN

Pencirian kelakuan lesu bagi keluli karbon AISI 1045 diperolehi berdasarkan kitaran hayat lesu, N_f yang terhasil

daripada lengkung hayat-tegasan (S-N). Nilai kitaran sehingga kegagalan berlaku dirujuk sebagai N_f , yang mana nilai kitaran, N berkadar secara songsang terhadap magnitud tegasan. Amplitud tegasan yang digunakan bagi menghasilkan lengkung S-N adalah berdasarkan amplitud tegasan $0.6 \sigma_{UTS}$, $0.65 \sigma_{UTS}$, $0.7 \sigma_{UTS}$ dan $0.8 \sigma_{UTS}$. Jadual

2 menunjukkan hasil kitaran yang dicapai oleh keluli karbon AISI 1045 melalui ujian hayat lesu. Rajah 8 pula

menunjukkan lengkung S-N bagi bahan keluli karbon AISI 1045.



RAJAH 8. Lengkung S-N bagi bahan keluli karbon AISI1045.

JADUAL 2. Pencirian beban muktamad dan bilangan kitaran bagi keluli karbon AISI 1045.

Perkara	Beban Muktamad (kN)			
Bilangan kitaran	80% = 17. 89	70% = 15. 66	65% = 14. 54	60% = 13. 42
	23.5	108.5	5953	1000000

Berdasarkan Jadual 2, pada $0.6 \sigma_{UTS}$ atau bersamaan 13.42 kN, hayat lesu bagi keluli karbon AISI 1045 telah mencapai had lesu bagi keluli karbon iaitu mencapai 1×10^6 bagi kitaran hayat lesu. Manakala pada $0.65 \sigma_{UTS}$ atau bersamaan dengan 14.54 kN pula, bilangan kitaran menurun dan mencapai kitaran sebanyak 5953 kitaran. Seterusnya bagi tegasan $0.7 \sigma_{UTS}$ atau 15.66 kN, sebanyak 108.5 kitaran dan pada tegasan $0.8 \sigma_{UTS}$ yang juga bersamaan dengan 17.89 kN, kitaran lesu hanya mencapai 23.5 kitaran sahaja. Hasil ujian ini menunjukkan peningkatan beban muktamad yang dikenakan ke atas spesimen ujian akan menurunkan hayat lesu bagi bahan tersebut.

ANALISIS PERBANDINGAN KELAKUAN LESU KELULI KARBON SECARA UJI KAJI DAN HASIL UJIAN YOUSFI ET AL. (2022)

Rajah 9 menunjukkan hasil perbandingan data hayat lesu yang diperolehi daripada ujian dan data yang diperolehi daripada kajian yang dijalankan oleh Yousfi et al. (2022). Perbandingan data lesu antara kajian eksperimen yang dijalankan dengan kajian yang dijalankan oleh Yousfi et al. (2022) menunjukkan tahap kejituan yang baik. Majoriti titik data eksperimen sejajar rapat dengan garis min, menunjukkan bahawa prosedur dan keadaan eksperimen

diuruskan dengan sewajarnya dan setanding dengan yang terdapat dalam kajian Yousfi et al. (2022). Kehadiran data-data dalam lingkungan 2:1 dan 1:2 daripada garis min, menyokong kebolehpercayaan hasil uji kaji, menunjukkan sebarang sisihan adalah berada dalam keragaman yang dijangkakan.



RAJAH 9. Perbandingan hasil data uji kaji melawan data rujukan (Yousfi et al. 2022)

Dalam ujian lesu, lengkung S-N adalah parameter yang penting untuk memahami hubungan antara tegasan kitaran σ dan bilangan kitaran kepada kegagalan, N_f . Persamaan $\sigma = AN_f^B$ sering digunakan untuk menerangkan hubungan tersebut. Jadual 3 menunjukkan hasil data perbandingan bagi nilai A, B dan σ_f' antara keputusan eksperimen dan data yang diperolehi oleh Yousfi et al. (2022).

JADUAL 3. Perbandingan nilai A, B dan σ_f^i antara Keputusan uji kaji dan data Yousfi et al. (2022)

Siri	Uji kaji	Yousfi et al 2022	Peratus perbezaan %
A	137.84	1530.5	91
B	-0.44	-0.11	120
σ_f^i	187.55	1651	88

Perbandingan antara data eksperimen dan Yousfi et al. (2022) mendedahkan perbezaan ketara dalam parameter lesu. Perbandingan bagi data yang diperolehi berdasarkan eksperimen mempunyai peratus perbezaan pada 91% bagi nilai A, manakala nilai B dan σ_f^i adalah sebanyak 120% dan 88%. Perbezaan ini boleh dikaitkan dengan pelbagai faktor seperti faktor suhu penyelidikan dijalankan. Hal ini kerana, pada suhu yang lebih sifat bahan keluli karbon akan berubah menjadi lebih rapuh (Riza et al. 2022). Faktor seperti kumpulan penghasilan spesimen juga memainkan faktor bagi hasil keputusan uji kaji kerana setiap pembuatan spesimen menjalani dan mempunyai sifat bahan yang berbeza.

ANALISIS HAYAT LESU PADA FREKUENSI UJIAN YANG PELBAGAI

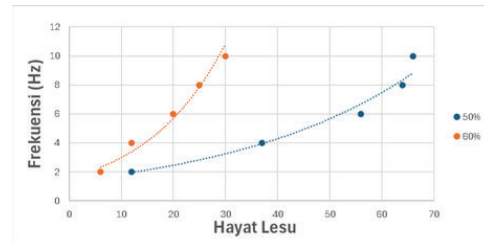
Kitaran beban frekuensi memainkan peranan penting dalam menentukan hayat lesu keluli karbon AISI 1045 dan komponen yang menggunakan bahan keluli karbon AISI 1045. Amplitud tegasan yang digunakan bagi menentukan sifat keluli karbon AISI 1045 pada ujian frekuensi yang pelbagai ini adalah pada $0.5 \sigma_{UTS}$ dan $0.6 \sigma_{UTS}$, di mana pada kedua-dua ujian, spesimen dijalankan pada frekuensi 2 Hz, 4 Hz, 6 Hz, 8 Hz dan 10 Hz.

JADUAL 4. Hasil data ujian berkitar 3 titik lenturan

Frekuensi	Bilangan Kitaran	
	$0.5 \sigma_{UTS}$	$0.6 \sigma_{UTS}$
2	12	6
4	37	12
6	56	20
8	64	25
10	66	30

Jadual 4 menunjukkan bilangan kitaran yang dicapai oleh keluli karbon AISI 1045 pada frekuensi 2 Hz, 4 Hz, 6 Hz, 8 Hz dan 10 Hz serta amplitud tegasan $0.5 \sigma_{UTS}$ dan $0.6 \sigma_{UTS}$. Berdasarkan Jadual 4, lengkung hayat-lesu

diplotkan mengikut amplitud tegasan yang dikenakan pada spesimen ujian berkitar 3 titik lenturan bagi bahan AISI 1045. Rajah 10 menunjukkan lengkung hayat lesu bagi kedua-dua ujian yang dijalankan.



RAJAH 10. Lengkung frekuensi melawan hayat lesu pada $0.5 \sigma_{UTS}$ dan $0.6 \sigma_{UTS}$

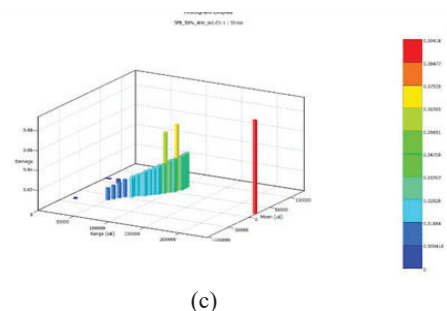
Berdasarkan Rajah 10, dapat diperhatikan bahawa hayat lesu bahan keluli karbon AISI 1045 berkurang apabila frekuensi yang dikenakan semakin rendah. Hal ini kerana, pada frekuensi yang lebih rendah, setiap beban kitaran mengambil lebih banyak masa untuk melengkapkan satu kitaran. Tempoh masa lanjutan setiap kitaran ini membolehkan lebih banyak mekanisme kerosakan yang bergantung kepada masa untuk bertindak yang juga mengakibatkan lebih banyak masa untuk gelongsoran sempadan bijian berlaku, yang boleh menyebabkan pembentukan lompong dan retakan mikro di sepanjang sempadan bijian (Weber & Anders, 2021).

Untuk menghuraikan lebih lanjut, hubungan antara beban frekuensi dan hayat lesu secara semula jadi dikaitkan dengan kadar terikan, iaitu kadar di mana bahan berubah bentuk di bawah keadaan beban berkitar (Sapieta et al. 2016). Apabila beban frekuensi rendah, setiap kitaran aplikasi beban dan penyingkiran beban berpanjangan. Sebaliknya, pada beban frekuensi yang lebih tinggi, masa yang tersedia untuk proses ubah bentuk berlaku dikurangkan dengan ketara. Aplikasi beban dan penyingkiran tegasan tidak membenarkan masa yang mencukupi untuk perubahan mikrostruktur yang meluas berlaku. Akibatnya, bahan mengekalkan kekuatan alah yang lebih tinggi kerana kadar terikan berkurang.

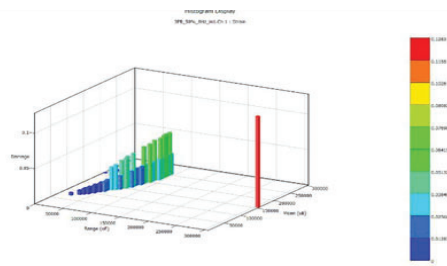
Selain itu, dapat diperhatikan bahawa kecerunan yang lebih tinggi pada $0.6 \sigma_{UTS}$ berbanding $0.5 \sigma_{UTS}$ adalah kerana pada amplitud tegasan yang lebih tinggi, setiap kitaran beban memberikan lebih banyak kerosakan kepada bahan. Amplitud tegasan yang lebih tinggi membawa kepada ubah bentuk plastik yang lebih besar, peningkatan pergerakan dislokasi, dan perubahan mikro struktur yang lebih ketara (Mohamad et al. 2012). Selain itu, tahap tegasan yang lebih tinggi menyebabkan permulaan dan perambatan retak lesu lebih cepat berlaku.

ANALISIS HISTOGRAM BERDASARKAN TERIKAN YANG DICERAP

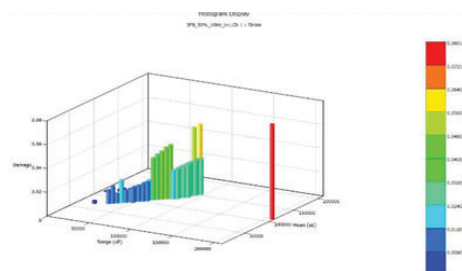
Dalam kajian ini, histogram digunakan untuk menganalisis taburan terikan dan pelepasan tenaga spesimen keluli karbon yang diuji pada pelbagai frekuensi iaitu pada 2 Hz, 4 Hz, 6 Hz, 8 Hz, dan 11 Hz dan tahap tegasan $0.5 \sigma_{UTS}$ dan $0.6 \sigma_{UTS}$. Rajah 11 (a) hingga (e) menunjukkan histogram bagi data terikan bagi spesimen yang dikenakan frekuensi 2 Hz, 4 Hz, 6 Hz, 8 Hz, dan 10 Hz dan tahap tegasan $0.5 \sigma_{UTS}$. Berdasarkan Rajah 11 (a) hingga (e), menunjukkan nilai terikan yang agak rendah. Ini menunjukkan kurang ubah bentuk plastik setiap kitaran. Walaupun nilai terikan yang lebih rendah, pelepasan tenaga bagi setiap kitaran adalah lebih tinggi disebabkan oleh tempoh yang lebih lama bagi setiap kitaran. Masa yang panjang di bawah beban ini membolehkan mekanisme kerosakan bergantung pada masa yang lebih panjang, seperti pengenduran tegasan, bertindak. Apabila frekuensi meningkat, masa kitaran yang lebih pendek menghadkan mekanisme ini, walaupun nilai terikan dan ubah bentuk plastik setiap kitaran meningkat (Jamli et al. 2012). Masa yang dikurangkan untuk pengumpulan kerosakan setiap kitaran ini membawa kepada hayat lesu yang lebih lama, yang memuncak hingga hayat lesu paling lama iaitu pada 10 Hz. Masa kitaran yang sangat singkat bermakna kerosakan kumulatif yang minimum bagi setiap kitaran. Mekanisme yang bergantung kepada masa seperti rayapan mempunyai sedikit atau tiada kesan kerana masa di bawah beban yang tidak mencukupi (Sadek et al. 2018).



(c)

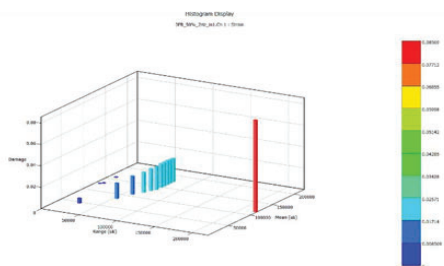


(d)

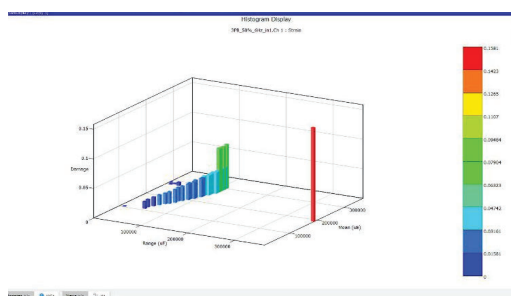


(e)

RAJAH 11. Histogram kerosakan kumulatif dan tahap tegasan $0.5 \sigma_{UTS}$. (a) pada 2 Hz, (b) pada 4 Hz, (c) pada 6 Hz, (d) pada 8 Hz, dan (e) pada 10 Hz.

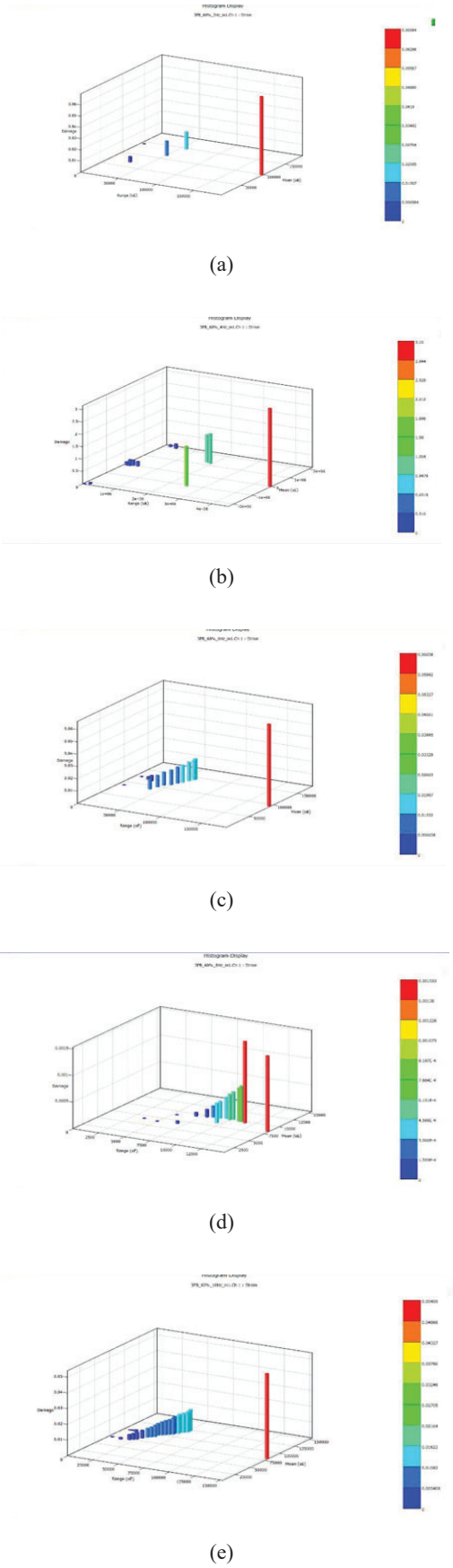


(a)



(b)

Bagi eksperimen yang dijalankan pada $0.6 \sigma_{UTS}$, nilai terikan adalah lebih rendah berbanding dengan ujian yang dijalankan pada $0.5 \sigma_{UTS}$. Walaupun begitu, bilangan kitaran kepada kegagalan juga lebih rendah untuk $0.6 \sigma_{UTS}$ berbanding $0.5 \sigma_{UTS}$. Pemerhatian ini boleh dijelaskan dengan mempertimbangkan kesan tahap tekanan yang lebih tinggi terhadap tingkah laku lesu, ketegangan, dan pelepasan tenaga. Rajah 12 (a) hingga (e) menunjukkan histogram kerosakan kumulatif bagi spesimen keluli karbon AISI 1045 pada frekuensi 2 Hz, 4 Hz, 6 Hz, 8 Hz dan 10 Hz pada tegasan $0.6 \sigma_{UTS}$.

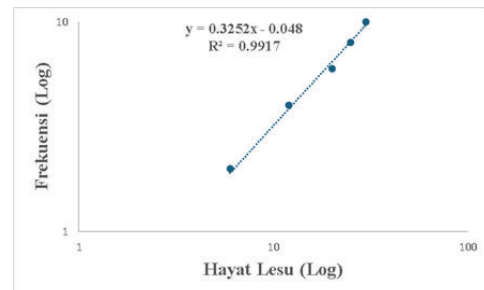
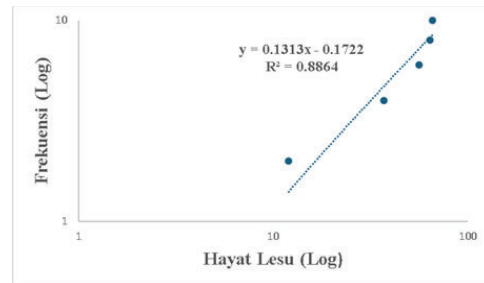


RAJAH 12. Histogram kerosakan kumulatif dan tahap tegasan $0.6 \sigma_{UTS}$ (a) pada 2 Hz, (b) pada 4 Hz, (c) pada 6 Hz, (d) pada 8 Hz, (e) pada 10 Hz.

Perwakilan visual dalam histogram menunjukkan bahawa walaupun ketegangan meningkat, taburan kerosakan keseluruhan bagi setiap kitaran menjadi kurang pada frekuensi yang lebih tinggi disebabkan oleh tempoh yang lebih pendek bagi setiap kitaran. Berdasarkan analisis histogram bagi Rajah 12 (a) hingga (e), menjadi jelas bahawa pada frekuensi yang lebih rendah, nilai terikan lebih tertumpu, membawa kepada julat histogram yang sempit dan kerosakan yang lebih tinggi bagi setiap kitaran. Pada frekuensi yang lebih tinggi, nilai terikan lebih tersebar, menghasilkan julat histogram yang lebih luas dan kerosakan yang lebih rendah bagi setiap kitaran (Barnwal et al. 2020).

PENENTUSAHAN BERDASARKAN HUBUNGAN MATEMATIK

Dalam kajian ini, analisis korelasi digunakan untuk mengesahkan hubungan antara hayat lesu dan frekuensi, yang merupakan dua pemboleh ubah kritikal dalam penyelidikan ini. Data diwakili pada plot log-log, dengan paksi-x menandakan hayat lesu dan paksi-y mewakili frekuensi. Rajah 13 (a) dan Rajah 13 (b) menunjukkan hubungan di antara kedua-dua pemboleh ubah iaitu frekuensi dan hayat lesu.



RAJAH 13. Hubungan antara frekuensi dan hayat lesu (a) pada $0.5 \sigma_{UTS}$ dan (b) pada $0.6 \sigma_{UTS}$

Berdasarkan Rajah 13 (a), hubungan antara frekuensi dan hayat lesu untuk ujian berkisar 3 titik lenturan yang dijalankan pada $0.5 \sigma_{UTS}$, nilai pekali korelasi (R^2) sebanyak 0.8864. Nilai R^2 yang tinggi ini menandakan korelasi positif yang kuat antara kedua-dua pembolehubah, menunjukkan bahawa sebahagian besar varian dalam frekuensi boleh dijelaskan oleh varian dalam hayat lesu. Nilai $R^2 = 0.8864$ menunjukkan bahawa kira-kira 88.64% daripada kebolehubahan dalam data frekuensi diambil kira oleh perubahan dalam hayat lesu. Kolerasi kuat ini menyokong hipotesis bahawa pembolehubah ini mengikuti hubungan hukum kuasa dan mengesahkan kesahihan model, dan kaitan saintifik.

Bagi Rajah 13 (b) pula menunjukkan, hubungan antara frekuensi dan hayat lesu untuk ujian yang dijalankan pada $0.6 \sigma_{UTS}$, dapat diperhatikan bahawa nilai pekali korelasi yang lebih tinggi iaitu $R^2 = 0.9917$. Nilai R^2 yang sangat tinggi ini menunjukkan korelasi positif yang lebih kuat antara kedua-dua pembolehubah, dengan kira-kira 99.17% daripada varian dalam frekuensi dijelaskan oleh varian dalam hayat lesu pada tahap tegasan yang lebih tinggi ini. R^2 sebanyak 0.9917 menunjukkan bahawa model linear log-log bagi ujian yang dijalankan pada tahap tegasan $0.6 \sigma_{UTS}$, menyediakan penyesuaian yang hampir sempurna untuk data pada $0.6 \sigma_{UTS}$.

Korelasi hampir sempurna ini menunjukkan bahawa hubungan antara hayat lesu dan frekuensi adalah sangat konsisten merentas julat data yang diperhatikan. Baki 0.83% varian, adalah minimum dan berkemungkinan disebabkan oleh ralat percubaan kecil atau faktor tidak terukur yang boleh diabaikan. Analisis korelasi, dengan nilai $R^2 = 0.8864$ pada $0.5 \sigma_{UTS}$ dan $R^2 = 0.9917$ pada $0.6 \sigma_{UTS}$, mengesahkan hubungan hipotesis antara hayat lesu dan frekuensi sekali gus menyediakan asas yang kukuh untuk pemodelan ramalan menerusi hubungan matematik.

CADANGAN MODEL MATEMATIK BAGI PENILAIAN HAYAT LESU BERDASARKAN FREKUENSI

Kajian ini mendedahkan bahawa apabila frekuensi meningkat, hayat lesu bahan juga meningkat. persamaan 2 adalah model matematik yang dibangunkan Bagi mengukur hubungan antara frekuensi dan hayat lesu.

$$f = CN_f^D \quad (2)$$

Di mana N_f mewakili hayat lesu (dalam kitaran) dan f mewakili frekuensi (dalam Hz). Manakala pemalar A dan B adalah parameter yang ditentukan melalui penyesuaian data empirikal, merangkum ciri khusus bahan dan keadaan beban (Huang et al. 2012).

Persamaan 1 mencerminkan data eksperimen yang diperhatikan di mana peningkatan frekuensi berkorelasi dengan peningkatan dalam hayat lesu. Hubungan ini adalah berdasarkan frekuensi yang lebih tinggi membawa kepada kitaran lesu yang lebih tinggi, menyebabkan hayat lesu bagi bahan keluli karbon AISI 1045 meningkat.

Sebaliknya, frekuensi yang lebih rendah menyebabkan hayat lesu bahan berkurang. Model matematik ini dihasilkan adalah bertujuan untuk menyediakan rangka kerja ramalan yang merangkum arah aliran yang dapat diperhatikan, menawarkan cerapan tentang cara frekuensi yang berbeza-beza mempengaruhi ketahanan dan hayat lesu komponen kejuruteraan di bawah beban kitaran.

KESIMPULAN

Secara keseluruhan, kajian ini memfokuskan tentang kesan kepelbagaian frekuensi ujian lesu terhadap ketahanan plat keluli karbon AISI 1045 apabila dikenakan beban berkisar. Berdasarkan objektif kajian ini yang dimulai dengan mencirikan sifat mekanikal di bawah pembebanan statik dan pembebanan berkisar, perbincangan pertama membincangkan tentang sifat mekanikal bahan keluli karbon AISI 1045 berdasarkan ujian mekanikal yang dijalankan iaitu ujian tegangan dan ujian berkisar atau ujian hayat lesu di mana maklumat seperti kekuatan tegangan muktamad, kekuatan alah dan bilangan kitaran yang dicapai sebelum kegagalan berlaku diperolehi. Berdasarkan objektif kajian yang kedua pula iaitu mencirikan sifat lesu komponen pada frekuensi ujian yang pelbagai di mana ujian mekanikal seperti ujian berkisar lenturan 3 titik dijalankan ke atas spesimen keluli karbon AISI 1045 pada frekuensi ujian yang pelbagai. Dapatan hasil kajian dianalisis bagi mencirikan kesan frekuensi terhadap hayat lesu bahan keluli karbon AISI 1045. Objektif terakhir bagi kajian ini yang memfokuskan pada menentusahkan hubungan matematik berkaitan hayat lesu secara analisis statistik telah dianalisis melalui analisis regrasi dan hubungan korelasi bagi data-data hayat lesu. Hubungan korelasi menunjukkan data-data hayat lesu menunjukkan korelasi yang positif dan kuat bagi hubungan antara frekuensi dan hayat lesu. Berdasarkan hubungan antara frekuensi dan hayat lesu tersebut, sebuah model matematik dibangunkan.

PENGAKUAN

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia atas sokongan kewangan mereka di bawah geran FRGS/1/2023/TK10/UKM/01/3.

PENGISYTIHARAN MINAT BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Barnwal, V. K., Lee, S. Y., Choi, J., Kim, J. H., & Barlat, F. 2020. Fracture assessment in dual phase and transformation-induced plasticity steels during 3-point bending. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 110.
- Cui, H. & Han, Q. 2023, October 1. Fatigue Damage Mechanism and Fatigue Life Prediction of Metallic Materials. *Metals*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
- Cui, T., Mukherjee, S., Sudeep, P. M., Colas, G., Najafi, F., Tam, J., Ajayan, P. M., et al. 2020. Fatigue of graphene. *Nature Materials* 19(4): 405–411.
- Dowding, R., Pinna, C., Ghadbeigi, H., & Farrugia, D. 2020. Analyzing the properties promoting shear bands and damage initiation in 3-point bending of ultra-high strength steel. Vol. 50, Issue 18th *International Conference on Metal Forming*, 570–573.
- Guennecc Benjamin, Kinoshita Takahiro, Horikawa Noriyo, Oguma Noriyasu & Sakai Tatsuo. 2023. Loading frequency effect on the fatigue endurance of structural carbon steels: Estimation based on dislocation motion theory and experimental verification of the model. *International Journal of Fatigue* Volume 172.
- Hong, Y., Hu, Y., & Zhao, A. 2023. Effects of loading frequency on fatigue behavior of metallic materials—A literature review. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 46(8): 3077–3098
- Huang Xiaoping, Torgeir Moan & Cui Weicheng. 2008. An engineering model of fatigue crack growth under variable amplitude loading. *International Journal of Fatigue* 2–10.
- Huang, Y. Y., Hu, X. P., & Liao, T. H. 2012. Fracture Mechanics Analysis of the Dynamic Stress Intensity Factor of 3-Point Bending Specimen Suffering Cyclic Loads. In X. D. Wang, (Vols. 143–144, *Issue International Conference on Electrical Information and Mechatronics (ICEIM)*, pp. 503–507).
- Jamli, M. R., Ariffin, A. K., Wahab, D. A., Ismail, A. E., & Shah, I. A. 2012. Sensitivity of modeling in sheet metal three-point cyclic bending. In *Trends In Automotive Research*, Vol. 165, edited by S. Abdullah, R. Zulkifli, S. M. Haris, M. Z. Nuawi, Z. M. Nopiah, A. Ariffin, & W. Mahmood. *Issue Regional Conference on Automotive Research (ReCAR)*, pp. 187.
- Kamei, K. & Khan, M. A. 2021, February 1. Current challenges in modelling vibrational fatigue and fracture of structures: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
- Kopas, P., Sága, M., Handrik, M., Vaško, M. & Jakubovičová, L. 2019. Fatigue characteristics of welded high strength steel in the low cycle region of loading. *MATEC Web of Conferences* 254: 07002.
- Li, F., Wu, H., Liu, C., Wu, P. & Zeng, J. 2022. Vibration fatigue analysis of high-speed railway vehicle carbody under shaking condition. *Vehicle System Dynamics* 60(6): 1867–1887.
- Mohamad, F., Hossein, H., Farzad, P., & Mehdi, A. 2012. Composite Materials Damage Characterization under Quasi-static 3-Point Bending Test Using Fuzzy C-Means Clustering. In W. Fan (Ed.), *Mechanical and Aerospace Engineering*, PTS 1-7, Vols. 110–116, *Issues 2nd International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE 2011)*, pp. 1221.
- Riza, N. S. M., Zainuri, N. A., Nuawi, M. Z., Razali, N., & Othman, H. 2022. Characterization of mechanical material properties with fractal analysis. *Jurnal Kejuruteraan* 5(2): 111–118.
- Sadek, M., Bergström, J., Hallbäck, N., & Burman, C. 2018. 20 kHz 3-point bending fatigue of automotive steels. (Vol. 165, Issue 12th *International Fatigue Congress (FATIGUE)*).
- Sapieta, M., Dekys, V., & Sapietová, A. 2016. Thermal-stress analysis of beam loaded by 3 point bending. In J. Vavro, D. Ondrusova, M. Pajtasova, & F. Peslova (Eds.), *20TH INTERNATIONAL CONFERENCE MACHINE MODELING AND SIMULATIONS, MMS 2015*, Vol. 136, *Issues 20th International Slovak-Polish Conference on Machine Modeling and Simulations (MMS)*, pp. 216–219.
- Weber, F., & Anders, S. 2021. Comparison of 3-point and 4-point bending tests for the determination of the residual flexural strength. *BETON- UND STAHLBETONBAU* 116: 48–58.
- Y. Murakami & M. Endo. 2023. Prediction model of S-N curve without fatigue test or with a minimum number of fatigue test. *Engineering Failure Analysis* Volume 154.

Yousfi, H., Brioua, M. and Benbouta, R. 2022. Study and prediction of the fatigue life of aisi 1045 steel structures under rotational bending stresses, U.P.B. *Sci. Bull., Series D*. 84(2).

Zhang, L., Jiang, B., Zhang, P., Yan, H., Xu, X., Liu, R., Tang, J., et al. 2023, June 1. Methods for fatigue-life estimation: A review of the current status and future trends. *Nanotechnology and Precision Engineering*. American Institute of Physics Inc.