

Kelakuan Mekanikal dalam Penentuan Kesesuaian Reka Bentuk Teras untuk Panel Apit

(Characterisation of Mechanical Behaviour for Suitable Core Design of Sandwich Panel using Finite Element)

Mohd Khairul Faidzi^a, Shahrum Abdullah^{b*}, Salvinder Singh Karam Singh^b & Mohamad Faizal Abdullah^a

^aJabatan Kejuruteraan Mekanikal, Fakulti Kejuruteraan,
Universiti Pertahanan Nasional Malaysia, Kem Perdana Sg. Besi, 57000 W.P. Kuala Lumpur, MALAYSIA

^bJabatan Kejuruteraan Mekanikal dan Pembuatan, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina,
Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, MALAYSIA

*Corresponding author: shahrum@ukm.edu.my

Received 17 July 2025, Received in revised form 22 October 2025
Accepted 22 November 2025, Available online 30 March 2026

ABSTRAK

Kajian ini menentukan reka bentuk teras yang sesuai bagi panel apit dalam meningkatkan kadar rintangan terhadap fenomena pelekangan. Tiga daripadanya empat jenis reka bentuk teras utama (busa, sarang madu dan kekisi) mempunyai struktur berongga yang terbuka dan/atau tertutup yang berkepadatan rendah. Ia menjejaskan integriti gabungan antara lapisan panel apabila dikenakan pembebanan yang tinggi. Geometri 3-dimensi panel apit dengan lapisan muka keluli kekuatan tinggi AR500 dan teras aloi magnesium AZ31B dibangunkan menggunakan pemodelan unsur terhingga lenturan empat titik, mengikut ASTM C393 di bawah pembebanan statik dan berkitar. Keputusan menunjukkan kegagalan mod II akibat daripada daya ricihan sesatah yang tinggi antara lapisan panel membawa kepada kegagalan mod I. Taburan kontur tegasan pada pembebanan lenturan menunjukkan teras sarang madu terdedah untuk mengalami kehancuran teras lebih 50% berbanding teras permukaan bercawak. Selain itu, pemodelan hayat lesu juga menunjukkan perbezaan hayat lesu yang ketara bagi teras sarang madu pada 50% – 70%, manakala teras permukaan bercawak hampir setara dengan teras kepingan pada 6% – 12%. Penentusahan melalui ujian menunjukkan teras cawak bersaiz kecil (diameter 6.0 mm dan kedalaman 3.0 mm) memberikan rintangan pelekangan lebih baik dengan kadar perbezaan sehingga 50%. Data kitaran hayat lesu bagi unsur terhingga dan ujian adalah setara dan dalam lingkungan garis keyakinan 90%. Kajian ini menyumbang kepada reka bentuk teras baharu yang lebih tahan terhadap pelekangan pada pembebanan tinggi.

Kata kunci: Analisis unsur terhingga; hayat lesu; lenturan; pelekangan; teras cawak

ABSTRACT

This study aims to identify a suitable core design for sandwich panels to enhance the delamination resistance. Three out of the four main types of core design (foam, honeycomb, and lattice) feature an open and/or closed low-density cavity structures. These compromise the structural integrity between panel layers when subjected to high loading. A three-dimensional geometry of the sandwich panel, incorporating high-strength AR500 steel face sheets and an AZ31B magnesium alloy core, was developed using finite element modelling of four-point bending according to ASTM C393 under both static and cyclic loading. The results indicate that Mode II failure, due to high interfacial shear forces between panel layers, leads to Mode I failure. Stress contour distribution under four-point bending condition shows that the honeycomb core is more prone to core crushing, exceeding 50%, compared to the dimpled surface core. Additionally, fatigue life modelling shows a significant difference in fatigue life for the honeycomb core at 50%–70%, whereas the dimpled surface core is nearly equivalent to the solid plate core at 6%–12%. Validation through testing shows that small-sized dimples (6.0 mm in diameter and 3.0 mm in depth) provide better delamination resistance, with

a difference percentage of up to 50%. The fatigue life cycle data from both finite element modelling and experiment were consistent and fall within the 90% confidence interval. This study contributes to the development of a novel core configuration that is more resistant to delamination under high loading.

Keyword: Finite element analysis; fatigue life; bending; delamination; dimple core

PENGENALAN

Penggunaan panel apit yang terdiri daripada gabungan bahan berkekuatan tinggi dan rendah telah menjadi pilihan terutamanya dalam industri pembuatan kenderaan berat seperti kenderaan berperisai. Bahan seperti keluli berketumpatan tinggi banyak digunakan dalam pembuatan panel kenderaan berperisai disebabkan kekuatan yang tinggi. Namun, kebergantungan bahan keluli dalam pembuatan kenderaan berperisai mengakibatkan penurunan prestasi kenderaan kerana keluli mempunyai ketumpatan yang tinggi dan membatasi pergerakan kenderaan dengan lebih berkesan (Cheng et al. 2022). Oleh itu, penggunaan panel apit diperlukan kerana ia lebih ringan, kekuatan lentur yang tinggi serta penyerapan tenaga hentaman yang baik. Prestasi panel apit ini juga bergantung kepada beberapa faktor seperti bahan yang digunakan, konfigurasi reka bentuk teras serta beban yang dikenakan (Zhou & Jing, 2024).

Analisis kegagalan panel apit yang melibatkan fenomena pelekangan pada bahagian ikatan antara lapisan panel masih dianggap masalah yang kompleks, terutama melibatkan gabungan dua panel bahan yang berbeza (Zhang et al. 2023). Pemodelan panel apit menggunakan kaedah unsur terhingga dilihat mampu memberikan penyelesaian terhadap masalah rumit yang melibatkan gabungan bahan yang berbeza. Namun begitu, sejauh mana kekuatan lekatan antara dua permukaan panel yang berbeza bagi panel apit yang menggunakan teras aloi magnesium masih perlu dikaji secara terperinci. Oleh itu, penggunaan aloi magnesium yang mempunyai konfigurasi permukaan tidak sekata yang sesuai di bawah beban berkitar adalah penting dalam memberikan rintangan terhadap fenomena pelekangan dan mengekalkan kekuatan ikatan antara dua permukaan yang berbeza. Faktor konfigurasi reka bentuk lapisan panel teras pada panel apit memainkan peranan penting dalam mempengaruhi rintangan kegagalan pelekangan (Huang et al. 2022). Oleh yang demikian, analisis yang melibatkan hubung kait antara kriteria utama yang menyebabkan pelekangan serta parameter reka bentuk teras seperti kedalaman dan diameter bagi teras bercawak adalah wajar untuk dikaji bagi menghasilkan panel apit yang mempunyai tahap rintangan yang baik terhadap pelekangan.

Sebagai elemen penambahbaikan kajian-kajian terdahulu, kaedah analisis unsur terhingga adalah satu

pilihan penyelesaian berdasarkan kepada permodelan dan ujian empat titik lentur di bawah pembebanan statik dan berkitar. Justeru, pencirian prestasi panel apit diberi penekanan dalam menentukan perbezaan konfigurasi teras yang mempengaruhi tahap pelekangan antara lapisan panel. Parameter analisis seperti taburan tegasan, ubah bentuk kekal, kitaran hayat dan nilai kerosakan panel diambil kira sebagai kriteria utama yang menyumbang kepada fenomena pelekangan. Penentusahan menerusi konfigurasi reka bentuk teras cawak yang bersaiz besar dan kecil secara ujian untuk mengesahkan kesan perbezaan konfigurasi permukaan panel teras pada prestasi keseluruhan panel apit di bawah beban lentur berkitar. Analisis statistik menerusi taburan serakan data dan aras keyakinan 90% antara data kitaran hayat lesu ujian dan analisis unsur terhingga juga dilaksanakan. Dapatan kajian ini menyumbang kepada peningkatan tahap rintangan antara lapisan panel apit di bawah pembebanan statik dan berkitar.

METODOLOGI

PENDEKATAN UJIAN LENTURAN EMPAT TITIK

Penetapan ujian lenturan empat titik sesuai digunakan kerana memberikan daya tekanan pada panel apit secara sekata dan tertumpu di antara titik daya dan titik topang tetap, dan dapat menguji panel berasaskan kepada kekuatan lenturan daripada konfigurasi teras yang berbeza (Zamani et al. 2023). Oleh itu, analisis ini dapat menentukan tahap kekuatan ikatan antara panel dan seterusnya menilai tahap rintangan terhadap pelekangan. Aliran proses bagi pencirian kelakuan mekanikal di bawah pembebanan lenturan empat titik adalah ditunjukkan dalam Rajah 1.

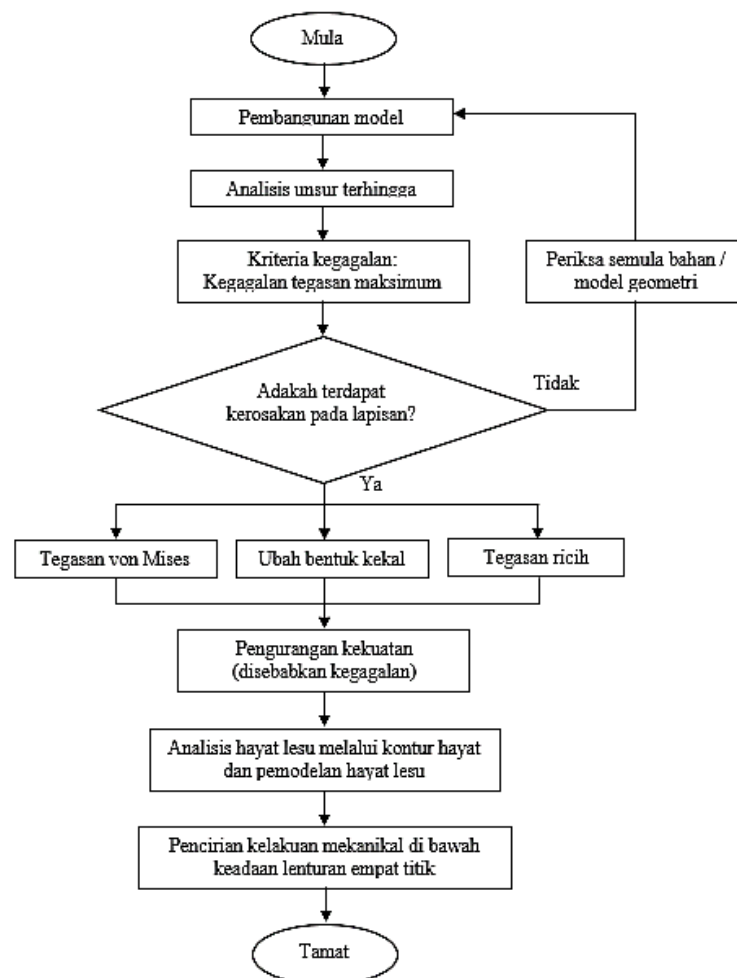
Rajah 2 menunjukkan satu panel apit berlogam untuk kegunaan panel keselamatan adalah 180 mm x 40 mm x 27 mm, dengan 1.0 mm ketebalan bahan lekatan pada lapisan gabungan atas dan bawa. Berdasarkan kajian terdahulu oleh (Faidzi et al. 2021), ketebalan panel 25 – 27 mm adalah ketebalan panel monolitik yang biasa digunakan untuk pembuatan panel perlindungan bagi kenderaan berperisai. Analisis unsur terhingga lenturan empat titik yang digunakan adalah berdasarkan kepada piawaian ASTM C393. Geometri 3-dimensi bagi spesimen panel apit untuk unsur terhingga lenturan empat titik adalah mengikut piawaian ASTM C393 dengan ukuran lapisan atas adalah 180 mm x 40 mm x 8 mm dan lapisan bawah

adalah 180 mm x 40 mm x 7 mm. Bagi ukuran lapisan teras, ketebalan bagi kesemua teras adalah malar, iaitu 10 mm. Ketebalan teras yang baik untuk panel apit keselamatan adalah pada ukuran 10 – 25 mm, dan ia juga bergantung kepada jenis beban yang digunakan (Tan et al. 2023).

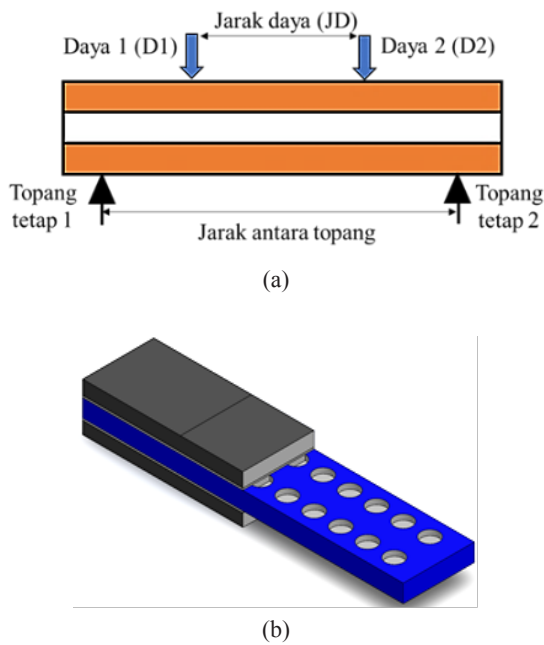
Rajah 3(a) menunjukkan teras kepingan yang mempunyai dimensi panjang 180 mm, ketebalan 10 mm dan lebar 40 mm. Bagi teras sarang madu dan bercawak, ia mempunyai dimensi panjang, ketebalan dan lebar yang sama, namun berbeza dari segi ketebalan dinding antara sel dan kedalaman. Rajah 3(b) pula menunjukkan ketebalan dinding antara sel bagi teras sarang madu adalah 2.5 mm, dengan jarak antara dinding rongga adalah 10 mm. Menurut Faidzi et al. (2021), ketebalan dinding antara sel dan keluasan dinding rongga memainkan peranan penting dalam menentukan sifat ringan dan keupayaan penyerapan tenaga mampatan. Ketebalan 1.5 – 2.5 mm bagi dinding antara sel dengan jarak 10 – 30 mm antara dinding rongga adalah julat saiz dan dimensi yang sesuai untuk menghasilkan prestasi panel apit teras sarang madu yang optimum (Siahaan et al. 2023). Bagi teras permukaan

bercawak, ia mempunyai 10 mm diameter cawak dengan kedalaman 3.0 mm, seperti dalam Rajah 3(c). Saiz diameter dan kedalaman cawak ini dipilih bagi memastikan konfigurasi bercawak dalam keadaan simetri dan sesuai dengan panjang lapisan teras. Penyusunan bentuk konfigurasi yang simetri pada lapisan teras adalah perlu bagi memastikan prestasi yang setara dan keputusan analisis yang mampan dapat dihasilkan (Zulkifli et al. 2024).

Nilai diameter yang dipilih adalah berkadar langsung dengan nilai kedalaman bagi setiap konfigurasi bercawak pada permukaan atas dan bawah lapisan teras. Kedalaman cawak yang melebihi 4.0 mm boleh menjejaskan keutuhan struktur lapisan teras apabila dikenakan beban lenturan disebabkan pengurangan ketebalan dan ketumpatan yang ketara. Konfigurasi teras bercawak dengan kedalaman kurang daripada 2.5 mm tidak diambil kira dalam analisis ini kerana ia memberikan data yang tidak ketara dan hampir menyamai dengan prestasi panel apit dengan teras kepingan.



RAJAH 1. Aliran proses pemodelan unsur terhingga



RAJAH 2. Lakaran skematik (a) panel apit berlogam dan (b) contoh teras bercawak

Dalam menentukan beban daya seperti dalam Rajah 2, sifat kekuatan tegasan lentur maksimum aloi magnesium AZ31B telah diambil kira kerana lapisan teras merupakan bahan yang mempunyai sifat kekuatan yang paling rendah berbanding lapisan atas dan bawah. Penggunaan nilai tegasan daripada bahan ringan bagi panel yang mempunyai variasi gabungan bahan berat dan ringan amatlah penting dalam memelihara keutuhan struktur lapisan teras daripada mengalami kegagalan dan memastikan panel apit masih lagi berfungsi dengan baik (Song et al. 2023). Oleh itu, pers. (1) telah digunakan berdasarkan sifat kekuatan lenturan maksimum aloi magnesium AZ31B.

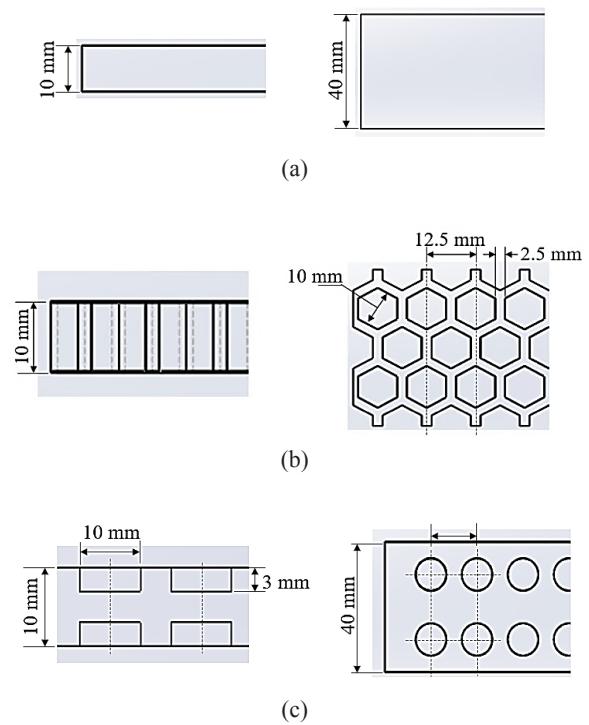
$$\sigma_{x-x,maks.} = \frac{1}{12} FL \cdot \frac{1}{2} h \cdot \left(-\frac{12}{bh^3} \right) = \frac{FL}{-2bh^2} \quad (1)$$

yang mana $\sigma_{x-x,maks}$ adalah nilai tegasan lentur maksimum pada paksi x untuk bahan aloi magnesium AZ31B, F adalah daya yang diberikan pada panel apit, L adalah panjang keseluruhan panel apit, b adalah lebar keseluruhan panel apit dan h adalah ketinggian keseluruhan panel apit.

Penggunaan saiz jejaring 1.0 mm bagi analisis unsur terhingga adalah memadai untuk menghasilkan keputusan analisis yang sesuai, tepat dan stabil. Saiz jejaring yang optimum bagi analisis unsur terhingga adalah di antara 1.0 – 3.0 mm, bergantung kepada prestasi pengkomputeran yang digunakan Faidzi et al. (2022a). Tetapan lekatan dalam unsur terhingga menggunakan jenis sentuhan terikat

sejagat bagi dua permukaan yang bersentuhan dengan bahan lekatan. Tetapan jejaring menggunakan jenis jejaring suai dengan bentuk jejaring adalah jenis tetrahedron dan heksahedron. Jejaring jenis tetrahedron digunakan pada bahagian bentuk yang kompleks dan mempunyai konfigurasi lengkung dan sudut akut. Bagi jenis heksahedron, ia sesuai digunakan pada bahagian yang tidak kompleks dan geometri tidak berlingkung.

Daya maksimum yang telah ditentukan menggunakan pers (1) adalah 53.6 kN bagi setiap daya (D1 dan D2, seperti dalam Rajah 2). Ini adalah setara dengan kajian daripada Roux et al. (2021) yang mendapati tegasan lenturan maksimum bagi aloi magnesium AZ31B boleh mencapai 60 kN. Berdasarkan kiraan daya maksimum, daya yang dikenakan dalam unsur terhingga dibahagikan mengikut pecahan peratusan 50%, 60%, 70%, 80% dan 90% daripada daya maksimum, 53.6 kN. Semua daya ini digunakan dalam unsur terhingga lenturan empat titik di bawah keadaan beban statik dan beban berkitar amplitud malar.



RAJAH 3. Lakaran skematik teras (a) kepingan, (b) sarang madu dan (c) bercawak

PENENTUSAHAN TAHAP RINTANGAN PELEKANGAN

Penentusahan tahap rintangan terhadap pelekangan untuk panel apit berlogam ditentukan menerusi ujian lenturan empat titik. Proses penentusahan ini penting bagi mengesahkan keputusan analisis unsur terhingga dan data

analitik oleh PKBK. Proses pemotongan bahan kajian dilakukan menggunakan mesin pemotong kawalan berangka terkomputer (KBT) jenis jet air. Pemotongan menggunakan mesin KBT ini penting dalam menjamin ketepatan pemotongan terutama pada bahagian yang kompleks (Jeyaprakash et al. 2020). Selesai pemotongan, lapisan permukaan atas dan bawah bagi setiap spesimen digosok menggunakan kertas pasir jenis kasar (180 grit) dan halus (1500 grit). Kemudian, cecair pembersihan digunakan bagi membersihkan permukaan lapisan terutamanya pada permukaan lekatan sehingga berkilat dan tidak tercemar, seperti dalam Rajah 4. Proses kemas ini penting dalam memastikan permukaan lekatan antara panel bebas daripada sebarang pencemaran, habuk dan kotoran untuk menjamin lekatan yang optimum (Rudawska, 2022).

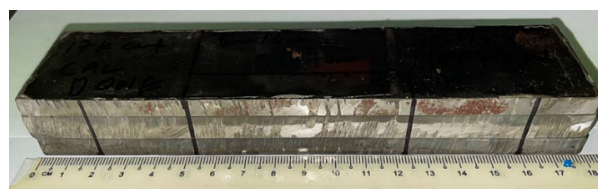
Proses cantuman antara lapisan teras dengan lapisan atas dan bawah dilakukan menggunakan penembak pukul dan resin epoksi jenis Permabond ET538. Proses cantuman dimulai pada satu bahagian lekatan lapisan teras dengan tempoh pengawetan untuk lapisan lekatan untuk menjadi optimum adalah antara lima hingga tujuh hari. Bahan lekatan diisi memenuhi setiap ruang cawak, sebelum disapukan pada keseluruhan permukaan lapisan teras. Rajah 5 menunjukkan panel apit berlogam yang telah melalui proses cantuman dengan jumlah tempoh pengawetan lapisan lekatan selama 6 hari.

Terdapat dua jenis konfigurasi permukaan bercawak yang diuji; konfigurasi A1 (dengan diameter 6.0 mm dan kedalaman 3.0 mm) dan konfigurasi A2 (dengan diameter 8.0 mm dan kedalaman 4.0 mm). Dua jenis spesimen ini dipilih bagi memberikan perbezaan dapatan yang ketara untuk tujuan penentuan konfigurasi yang sesuai bagi panel apit. Spesimen panel apit berlogam kemudiannya diuji secara lenturan empat titik, di bawah pembebanan lentur berkitar, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6.

Spesimen panel apit diuji di bawah beban lentur berkitar secara amplitud malar (*Constant amplitude loading*, CAL) pada keadaan 50% dan 70% daripada beban lentur maksimum, yang telah dinilai menerusi pers. (1). Nisbah tegasan (R) pada keadaan 70% daripada beban lentur maksimum ditetapkan pada $R = 1.4$ untuk semua spesimen, dengan nilai daya (minimum-maksimum) yang dikenakan adalah -37,528 hingga -26,806 N. Manakala nisbah tegasan (R) pada keadaan 50% daripada beban lentur maksimum adalah $R = 1.1$ dengan nilai daya -29,487 hingga -26,806 N.



RAJAH 4. Contoh spesimen yang telah siap untuk dicantum



RAJAH 5. Sampel panel apit yang telah melalui proses cantuman menggunakan bahan lekatan daripada Permabond ET 538

Kedua-dua keadaan pembebanan ini dipilih kerana ia berada dalam julat pembebanan yang berupaya memberikan perubahan keadaan kerosakan yang bererti terhadap spesimen yang diuji (Schieppati et al. 2021). Tetapan nilai daya yang negatif ini perlu untuk menguji spesimen panel apit agar sentiasa berada dalam keadaan lentur yang optimum. Tetapan nilai frekuensi pada mesin adalah 10 Hz dan ia sesuai bagi menguji panel apit jenis berlogam tanpa mengakibatkan kerosakan awal pada lapisan lekatan panel apit ketika beban dikenakan (Latifi et al. 2025; Isahak et al. 2021).

Jumlah hayat lesu yang ditentukan ketika proses analisis unsur terhingga dijadikan panduan bagi menentukan kegagalan pelekangan pada panel apit ketika proses ujian dilakukan. Pemerhatian dilakukan pada kawasan jarak di antara titik daya dan topang tetap kerana ia menjadi kawasan tumpuan tegasan dan ubah bentuk kekal akibat daripada beban berterusan yang diberikan (Faidzi et al. 2022b). Ketika ujian mencapai jumlah hayat lesu

sepertimana yang ditentukan menerusi analisis unsur terhingga, mesin dihentikan bagi mengeluarkan spesimen yang diuji untuk melalui proses pemotongan secara keratan rentas.

Pemerhatian kesan pelekangan menggunakan mikroskop adalah penting bagi memastikan kesan pelekangan adalah bukan disebabkan oleh kaedah pemotongan yang dijalankan. Analisis kesan pelekangan pada kawasan rentas bagi setiap spesimen yang dipotong ditentukan menerusi kadar julat pelekangan pada setiap lapisan lekatan dan kesan kegagalan seperti keretakan matriks pada kawasan lekatan. Hasil daripada analisis ujian dan unsur terhingga ini, ia dibentangkan secara statistik menerusi kaedah penilaian serakan data dan pekali penentuan, R^2 . Selain itu, analisis selang keyakinan 90% juga dilaksanakan. Taburan serakan titik data yang berada dalam lingkungan garisan selang keyakinan 90% menandakan bahawa data yang diperolehi adalah boleh dipercayai dan mengesahkan dapatan data yang diperolehi (Chin et al. 2023).

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

ANALISIS UNSUR TERHINGGA LENTURAN EMPAT TITIK

Rajah 7 menunjukkan taburan kontur tegasan von Mises pada bahagian lekatan panel apit dengan konfigurasi teras kepingan, sarang madu dan lapisan bercawak. Panel apit dengan konfigurasi teras sarang madu mengalami taburan kontur tegasan von Mises yang ketara pada bahagian lekatan berbanding panel dengan teras kepingan dan lapisan bercawak. Hal yang demikian disebabkan oleh kebergantungan pada bahan lekatan dalam memberikan kekuatan ikatan di antara panel kerana teras sarang madu mempunyai ruang rongga yang terbuka berbanding teras lain (Larson et al. 2023). Ruang rongga yang terbuka ini memberikan kelebihan daripada sudut keluasan ruang kerana sifat bahan lekatan yang memenuhi setiap keluasan ruang rongga yang terbuka. Namun, ciri-ciri rongga yang terbuka ini menjadikan ia terdedah kepada fenomena pelekangan dan perubahan ubah bentuk kekal yang ketara kerana sifat ketumpatan teras yang berkurangan (Varghese & Varghese, 2022). Oleh itu, faktor lain seperti taburan kontur tegasan ricihan dan ubah bentuk kekal juga perlu diambil kira dalam menentukan keupayaan panel apit.

Rajah 8 menunjukkan taburan kontur tegasan ricihan pada bahagian lekatan untuk panel apit dengan konfigurasi teras kepingan, sarang madu dan lapisan bercawak. Berdasarkan kepada kedua-dua rajah ini, jelas menunjukkan bahawa panel apit dengan teras kepingan dan sarang madu berupaya untuk mengalami keadaan pelekangan dengan

lebih awal berbanding panel apit dengan teras permukaan bercawak. Perbandingan Rajah 7 dan 8 juga memberikan gambaran bahawa tahap kegagalan lekatan panel apit dipengaruhi oleh reka bentuk konfigurasi pada lapisan teras panel apit. Hal yang demikian dapat dilihat menerusi taburan kontur tegasan ricihan pada bahagian lekatan yang mendominasi taburan berbanding lapisan lekatan pada teras bercawak. Berdasarkan keadaan ini, ricihan pada bahagian lekatan yang tinggi mewujudkan mod kegagalan tahap II, iaitu kegagalan disebabkan oleh daya ricihan pada bahagian lapisan lekatan. Ia menyatakan bahawa bagi panel apit di bawah beban lentur, kesan ricihan yang tinggi sering dialami di kawasan di antara topang tetap dan titik daya yang dikenakan. Hasil kegagalan mod II juga mendorong kepada kegagalan pelekangan di antara lapisan panel, yang merupakan kegagalan mod I, seperti yang dibincangkan dalam kajian Yao et al. (2022).

Jadual 1 menunjukkan data analisis bagi nilai ketumpatan lapisan teras kepingan, sarang madu dan lapisan bercawak yang mempunyai pengaruh yang bererti terhadap ubah bentuk kekal pada panel apit apabila diberikan pembebanan. Keadaan ini disebabkan oleh faktor ketumpatan pada lapisan teras. Teras sarang madu adalah berketumpatan 1.7 g/cm³ (berat 49.7 g) manakala teras bercawak adalah berketumpatan 1.81 g/cm³ (berat 111.6 g). Sebagai perbandingan dengan teras kepingan berketumpatan 1.85 g/cm³ (berat 129.6 g), berat teras sarang madu adalah 62% lebih ringan manakala berat teras bercawak adalah 14% lebih ringan. Oleh yang demikian, ubah bentuk kekal bagi panel apit dengan teras sarang madu adalah lebih tinggi berbanding panel apit dengan teras permukaan bercawak.

Berdasarkan kajian oleh Bohara et al. (2022), perubahan sifat ketumpatan pada konfigurasi teras mempengaruhi sifat ketahanan ubah bentuk kekal apabila beban dikenakan. Kewujudan ruang rongga secara terbuka seperti teras sarang madu memberikan sifat ringan, namun membawa kepada kegagalan yang lebih teruk seperti kehancuran teras dan pelekangan terutama apabila dikenakan pembebanan seperti beban berkitar (Ma et al. 2022).

Analisis seterusnya pada bahagian lapisan teras diterjemahkan menerusi data analisis garisan kecerunan berdasarkan konsep lengkung hayat sasaran maya (LHSM), sebagaimana dalam Jadual 2. Jadual 2 menunjukkan data kitaran hayat lesu pada bahagian titik panas pada lapisan teras yang berbeza. Terdapat trend penurunan kitaran hayat lesu yang hampir sama bagi setiap aras pembebanan yang diberikan. Trend ini dapat dilihat dengan lebih jelas dalam bentuk graf, sebagaimana yang ditunjuk dalam Rajah 9. Graf pemodelan data analisis garisan kecerunan menunjukkan trend penentuan tahap kerosakan lesu daripada lapisan teras di ambil kira ketika pembebanan

berkitar di bawah keadaan 50%, 60%, 70%, 80% dan 90% daripada pembebanan lentur maksimum. Konsep ini sesuai dalam menentukan tahap garisan lengkung kecerunan, berdasarkan kepada kedudukan garisan terbitan yang berhampiran dengan garisan rujukan bagi menerangkan hubungan kait di antara kerosakan terkumpul dan jumlah kitaran hayat (Bjørheim et al. 2022). Garisan kecerunan bagi panel apit dengan teras kepingan dijadikan garisan rujukan dalam menentukan jarak titik tertumpu dan tahap kecerunan garisan terbitan bagi tujuan perbandingan.

Oleh itu, dapat dinyatakan bahawa garisan kecerunan terbitan bagi panel apit dengan teras permukaan bercawak adalah hampir selari dengan garisan kecerunan rujukan panel apit dengan teras kepingan. Malah, ia berada dalam

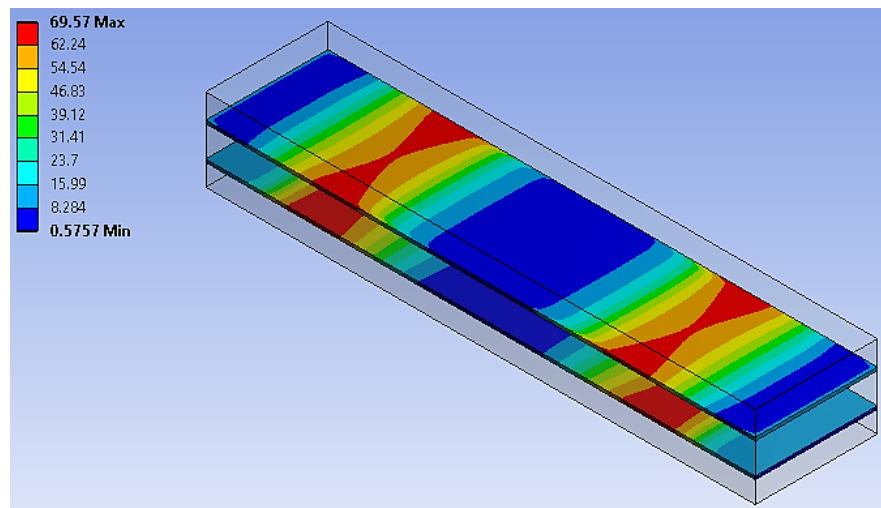
satu garisan kelompok, dengan titik tertumpu pada kitaran rendah dan kitaran tinggi adalah berdekatan satu sama lain. Bagi garisan kecerunan terbitan panel apit dengan teras sarang madu, titik tertumpu pada kitaran rendah dan kitaran tinggi berada jauh daripada titik tertumpu garisan kecerunan rujukan. Perbezaan kitaran hayat lesu bagi setiap aras bebanan untuk panel apit dengan teras bercawak adalah 6 – 12% dengan teras kepingan, berbanding panel apit dengan teras sarang madu 50 – 70%. Berdasarkan kajian oleh Faidzi et al. (2022a), titik tertumpu yang berada jauh daripada garisan kecerunan rujukan dan mempunyai kecerunan yang selari atau hampir dengan dengan garisan kecerunan rujukan menunjukkan had hayat lesu tercapai lebih awal.



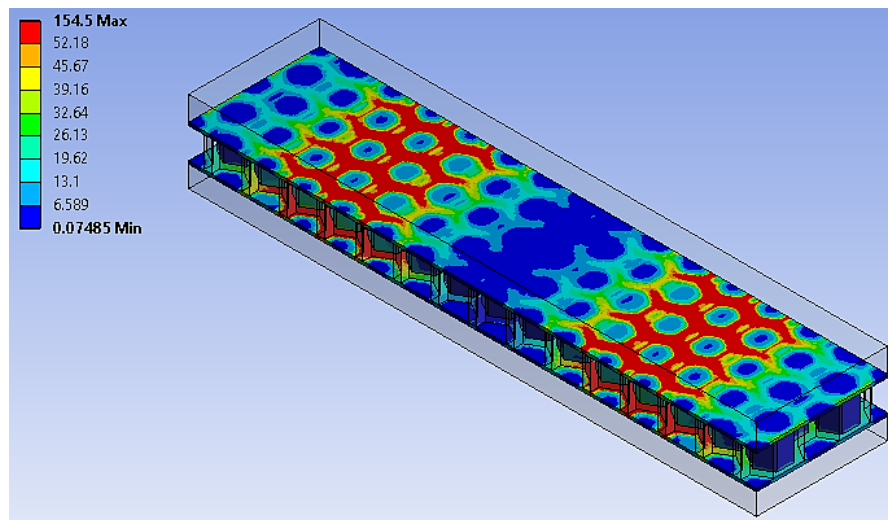
RAJAH 6. Ujian lenturan empat titik berasaskan kepada pembebanan berkitar

JADUAL 1. Data analisis ketumpatan dan berat bagi setiap panel apit dengan lapisan teras yang berbeza

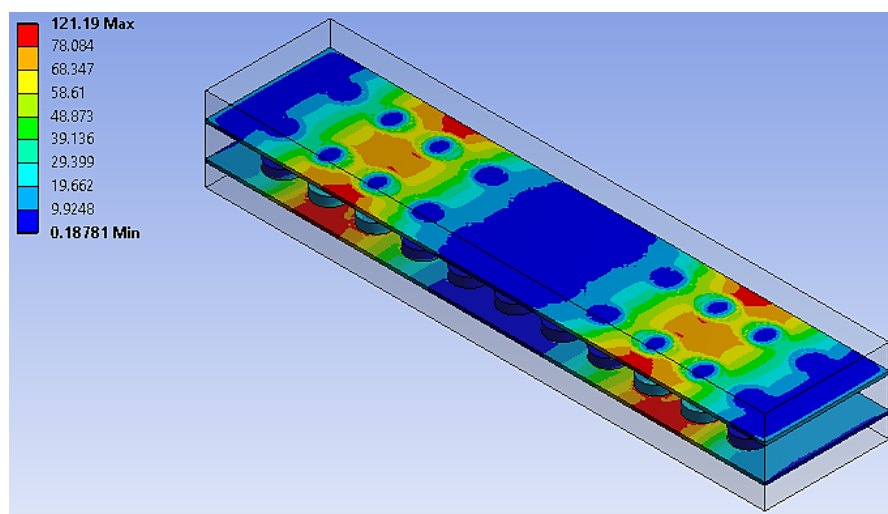
Perbezaan (%)	Ketumpatan lapisan teras (g/cm ³)	Berat (g)	Perbezaan (%)
Kepingan	1.85	129.6	-
Sarang madu	1.70	49.7	62
Lapisan bercawak	1.81	111.6	14



(a)

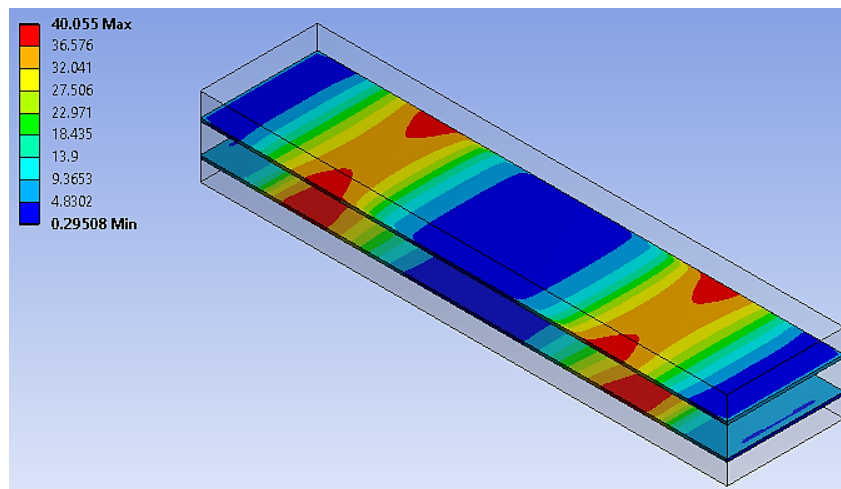


(b)

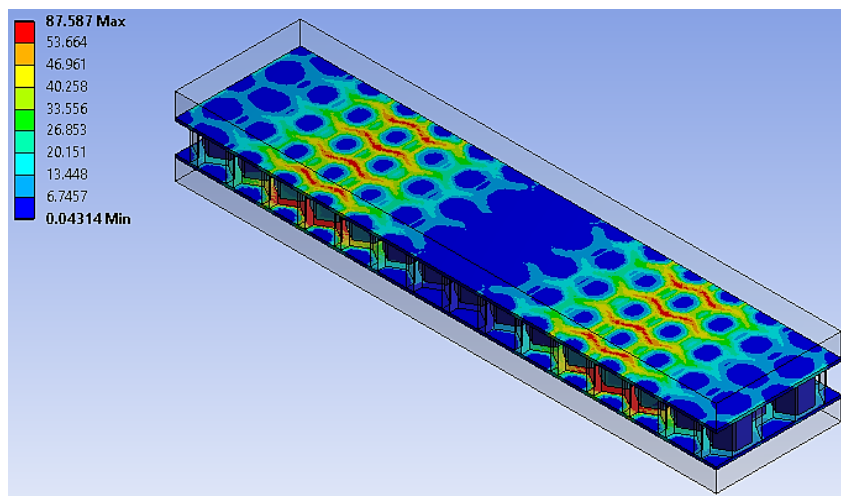


(c)

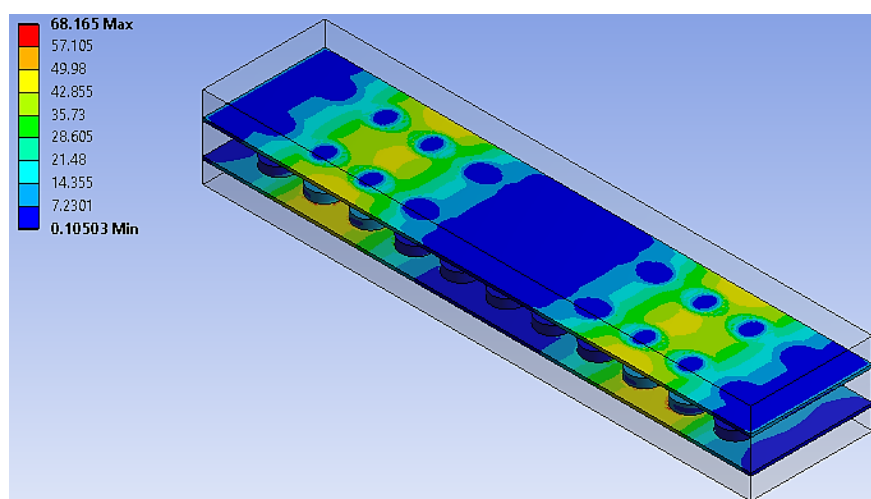
RAJAH 7. Taburan tegasan von Mises (MPa) pada panel bahagian lekatan untuk teras: (a) kepingan, (b) sarang madu, (c) bercawak



(a)



(b)

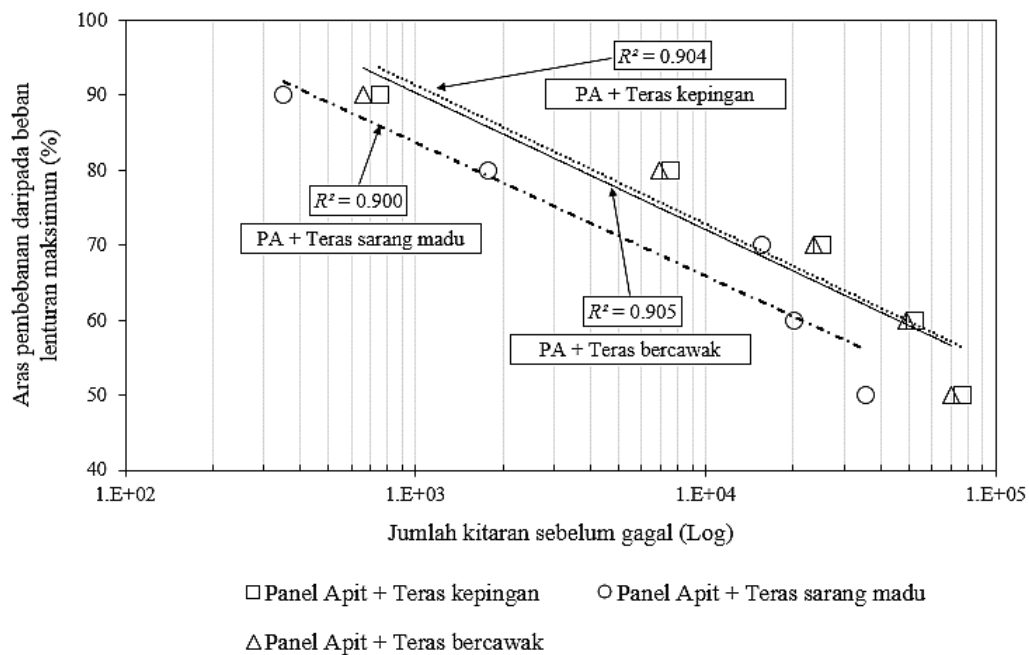


(c)

RAJAH 8. Taburan tegasan ricihan (MPa) pada panel bahagian lekatan untuk teras: (a) kepingan, (b) sarang madu, (c) bercawak

JADUAL 2. Data kitaran hayat lesu pada bahagian titik panas lapisan teras

Aras bebanan (N)	Aras bebanan (%)	Jenis panel apit		
		Panel apit + teras kepingan (Kitaran)	Panel apit + teras sarang madu (Kitaran)	Panel apit + teras bercawak (Kitaran)
26850	50	76,325	35,621	70,366
32167	60	52,523	20,144	48,952
37528	70	25,156	15,625	23,654
42889	80	7,552	1,785	6,895
48250	90	752	350	659



RAJAH 9. Garisan kecerunan konsep lengkung hayat sasaran maya (LHSM) pada titik panas lapisan teras

Nilai pekali penentuan, R^2 bagi ketiga-tiga garisan kecerunan adalah melebihi 0.900, iaitu 0.904 untuk teras kepingan, 0.905 untuk teras bercawak dan 0.900 untuk teras sarang madu. Berdasarkan ketiga-tiga nilai R^2 ini, ia menonjolkan ketepatan dan kebolehpercayaan yang baik bagi pemodelan plot hayat lesu ini berdasarkan analisis garisan kecerunan di titik panas pada kawasan kritikal lapisan teras yang berbeza konfigurasi. Nilai R^2 melebihi 0.85 adalah nilai yang boleh diterima dan dipercayai hasil ketepatan sesuatu analisis (Chin et al. 2023). Oleh itu, berdasarkan analisis pada taburan tegasan, ubah bentuk kekal serta hayat lesu yang dijalankan, dapat disimpulkan gabungan panel apit dengan teras bercawak berkeupayaan dalam meningkatkan rintangan terhadap keadaan pelekangan di bawah pembebanan lentur secara statik dan berkitar.

PENENTUSAHAN TAHAP RINTANGAN PELEKANGAN

Rajah 10 menunjukkan mekanisma kegagalan secara dekat pada permukaan blok keratan rentas dengan potongan melintang bagi panel apit dengan konfigurasi teras bercawak A2 ketika pembebanan berkitar, di bawah 70% daripada beban lentur maksimum. Hasil pemerhatian terhadap sampel potongan spesimen ujian mendapati bahawa kesan ricihan ini adalah berpunca daripada kesan keretakan matriks (lapisan lekatan), iaitu di antara lapisan atas dan bawah bahagian lekatan teras bercawak. Pada bahagian atas lapisan lekatan, terdapat unsur keretakan matriks dengan kelebaran 55 – 91 μm . Pada bahagian bawah lapisan lekatan, terdapat kesan pelekangan yang ketara dengan kelebaran 20 – 30 μm .

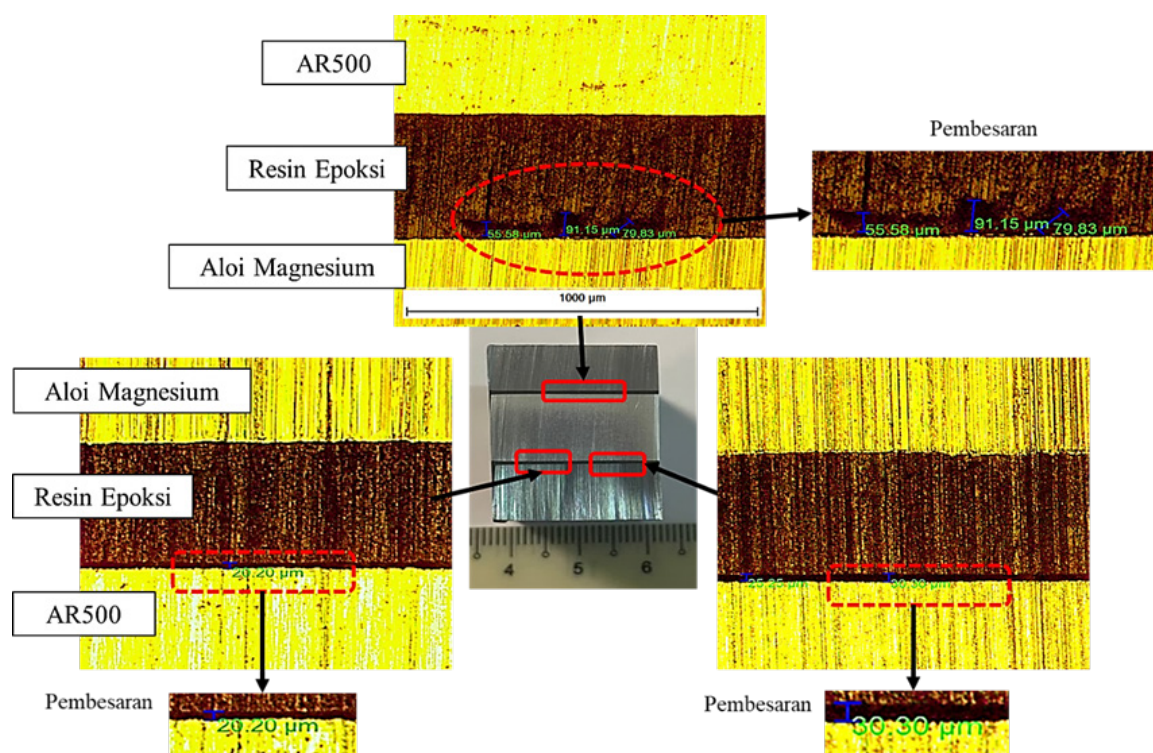
Menerusi Rajah 10, mekanisma kegagalan secara dekat pada permukaan blok keratan rentas dengan potongan melintang bagi panel apit dengan konfigurasi teras bercawak A1 ketika pembebanan berkitar, di bawah keadaan 70% daripada beban lentur maksimum. Berbeza dengan hasil daripada Rajah 10, analisis dalam Rajah 11 menunjukkan tiada unsur keretakan matriks yang ketara pada bahagian atas lapisan lekatan. Namun terdapat titik pelekangan selebar 5 – 7 μm . Pemerhatian pada bahagian bawah lapisan lekatan pula menunjukkan kesan pelekangan yang ketara, namun dengan skala kelebaran yang lebih kecil iaitu 10 – 12 μm . Hasil ini adalah setara dengan kajian yang lepas yang menyatakan kegagalan mod II berlaku pada bahagian lekatan, iaitu antara titik daya dan topang tetap sebelum kegagalan mod I terjadi (Demir et al. 2021). Ia terjadi disebabkan oleh peningkatan tegasan ricihan pada kawasan tersebut kerana menerima pembebanan tinggi secara berulang yang membawa kepada fenomena pelekangan.

Berdasarkan perbandingan hasil dapatan di antara Rajah 10 dan 11, dapat dinyatakan bahawa panel apit dengan konfigurasi teras bercawak yang lebih besar cenderung untuk mengalami kesan pelekangan dengan ketara berbanding konfigurasi teras bercawak yang lebih kecil seperti A2. Selain itu, kewujudan unsur keretakan matriks yang ketara pada lapisan lekatan seperti dalam

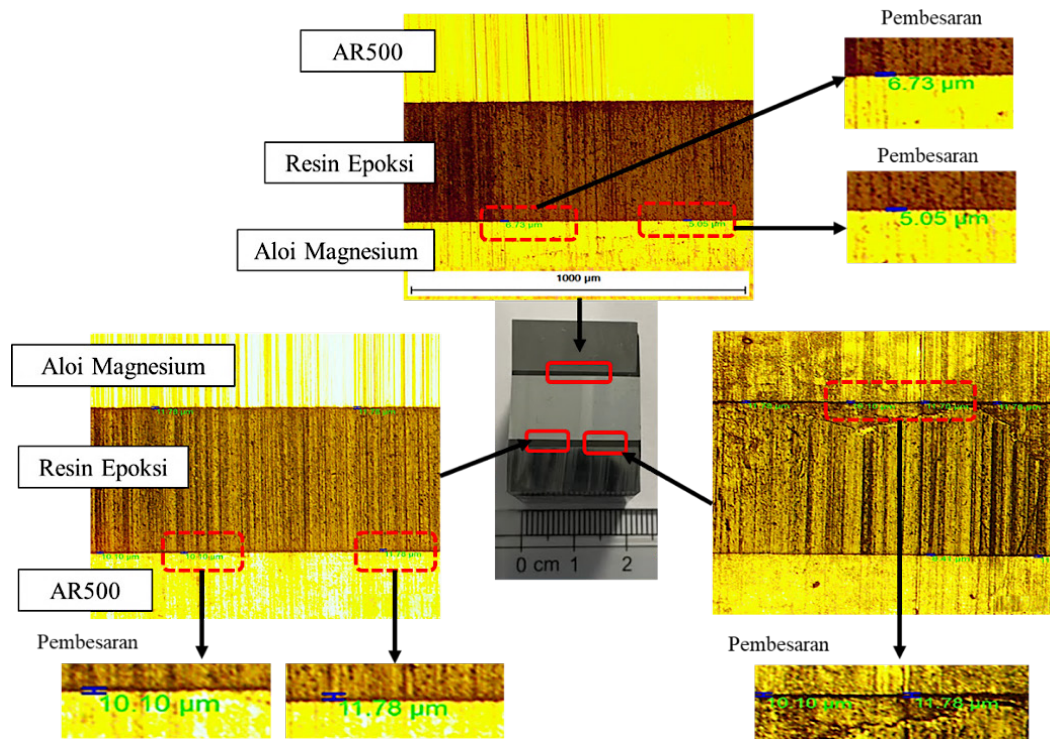
Rajah 10 juga mempengaruhi keutuhan struktur panel apit sekiranya pembebanan tinggi secara berkitar yang mana ia menjejaskan kekuatan ikatan di antara panel serta fungsinya (Zamani et al. 2023).

Rajah 12 menunjukkan mekanisma kegagalan secara dekat pada permukaan blok keratan rentas dengan potongan melintang bagi panel apit dengan konfigurasi teras bercawak A2 ketika pembebanan berkitar, di bawah keadaan 50% daripada beban lentur maksimum. Berdasarkan rajah ini, terdapat unsur keretakan matriks pada bahagian atas lapisan lekatan, namun tidak begitu ketara disebabkan oleh pembebanan berkitar yang diberikan adalah 50% daripada beban lentur maksimum. Kesan pelekangan masih lagi mendominasi bahagian bawah lapisan lekatan dengan skala kelebaran adalah 15 – 26 μm .

Rajah 13 menunjukkan mekanisma kegagalan secara dekat pada permukaan blok keratan rentas dengan potongan melintang bagi panel apit dengan konfigurasi teras bercawak A1 ketika pembebanan berkitar, di bawah keadaan 50% daripada beban lentur maksimum. Berdasarkan rajah ini, kesan keretakan matriks yang tidak begitu ketara dapat dilihat pada lapisan atas kawasan ikatan di antara panel, dengan skala kelebaran adalah 21 μm . Namun, pada lapisan bawah kawasan ikatan, terdapat kesan titik pelekangan dengan skala kelebaran bukaan pelekangan adalah 3 – 13 μm .



RAJAH 10. Mekanisma kegagalan pada blok keratan rentas potongan melintang (pandangan sisi) di kawasan penumpuan tegasan untuk panel apit dengan cawak konfigurasi A2 pada keadaan 70% daripada beban lentur maksimum



RAJAH 11. Mekanisma kegagalan secara blok keratan rentas potongan melintang (pandangan sisi) di kawasan penumpuan tegasan untuk panel apit dengan cawak konfigurasi A1 pada keadaan 70% daripada beban lentur maksimum

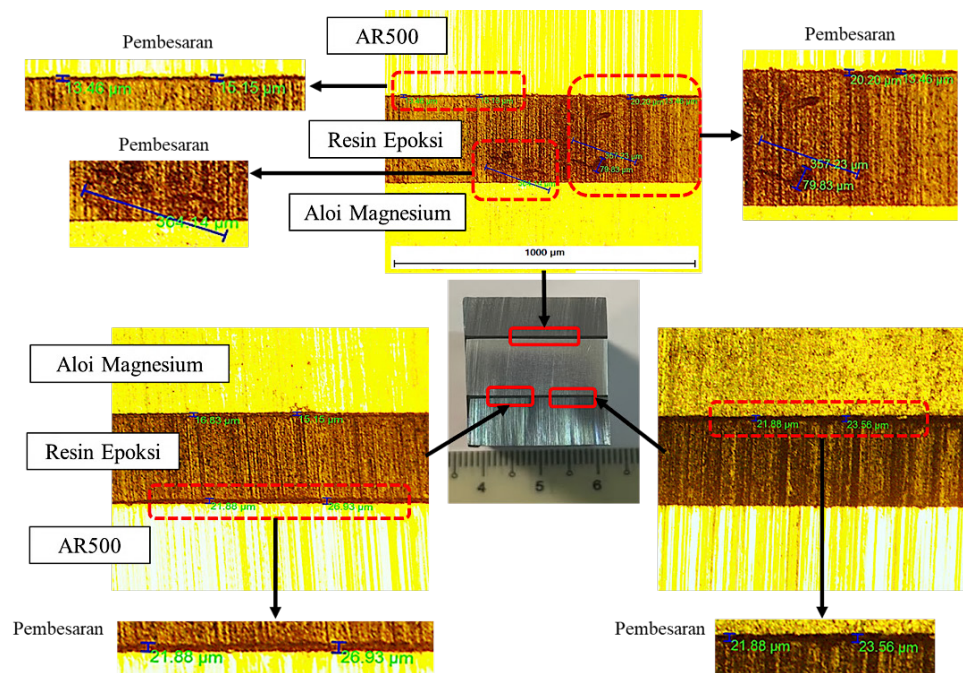
Perbandingan hasil analisis di antara Rajah 12 dan 13, mendapati bahawa kesan keretakan matriks dan kadar pelekangan yang tinggi didominasi oleh konfigurasi teras bercawak yang bersaiz besar (A2) ketika pembebanan berkisar, di bawah keadaan 50% daripada beban lentur maksimum. Konfigurasi teras bercawak yang bersaiz kecil (A1) mengalami kesan pelekangan dan taburan keretakan matriks yang minimum di bawah keadaan pembebanan yang sama. Sifat bahan lekatan yang memenuhi ruang bercawak memainkan peranan penting dalam menghasilkan kesan tegasan ricih maksimum yang membawa kepada kerosakan awal seperti keretakan matriks kerana pada lapisan lekatan ia dipengaruhi perbezaan konfigurasi bercawak (Demir et al. 2021).

Jadual 3 menunjukkan hasil data pelekangan dengan nilai minimum dan maksimum daripada spesimen panel

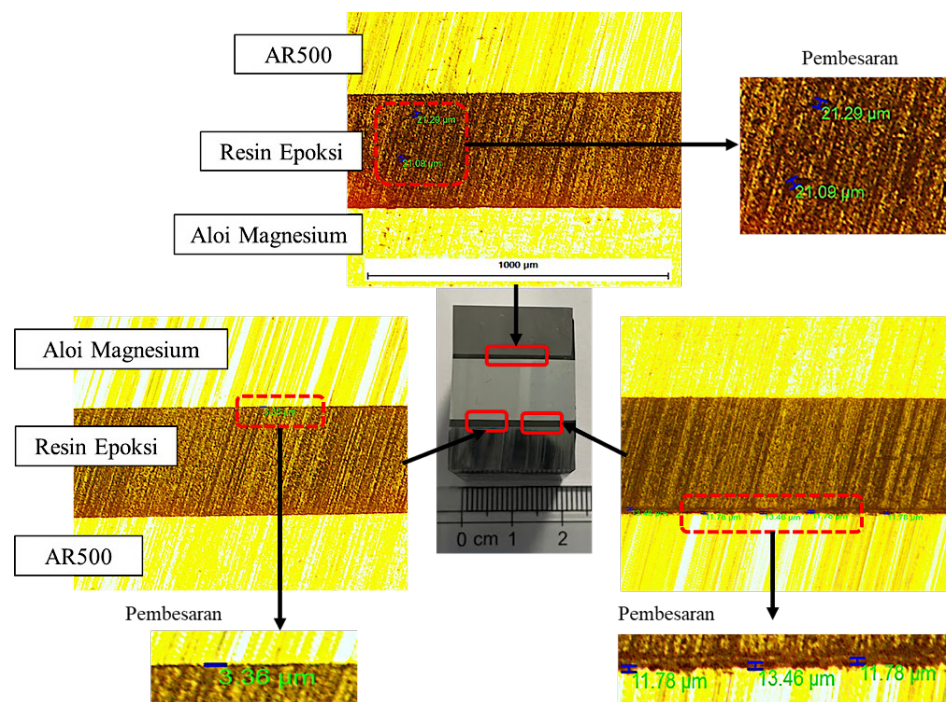
apit yang menjalani ujian lentur empat titik. Bagi melihat gambaran yang lebih jelas, data dalam Jadual 3 diterjemahkan dalam bentuk analisis graf seperti Rajah 14 dan 15. Rajah 14 menunjukkan analisis nilai pelekangan secara maksimum dan minimum untuk panel apit dengan konfigurasi teras bercawak yang berbeza pada pembebanan berkisar, di bawah keadaan 70% daripada beban lentur maksimum. Dapat dinyatakan bahawa konfigurasi teras bercawak A1 berupaya untuk mengurangkan kadar pelekangan dengan perbezaan 33 – 38% berbanding konfigurasi teras bercawak dengan saiz dan dimensi yang lebih besar seperti A2. Nilai perbezaan ini adalah setara dengan kajian lepas (20 – 30%) dan berupaya mengekalkan prestasi panel apit tanpa menjejaskan ikatan antara lapisan panel (Ma et al. 2022).

JADUAL 3. Data pelekangan (minimum dan maksimum) hasil daripada ujian

Jenis nilai pelekangan	Jenis konfigurasi bercawak	50% daripada $\sigma_{x-x,maks.}$	70% daripada $\sigma_{x-x,maks.}$
Minimum	Konfigurasi A1	3.36 μm	10.10 μm
Maksimum	Konfigurasi A1	13.46 μm	12.00 μm
Minimum	Konfigurasi A2	21.88 μm	20.20 μm
Maksimum	Konfigurasi A2	26.93 μm	30.30 μm



RAJAH 12. Mekanisma kegagalan secara blok keratan rentas potongan melintang (pandangan sisi) di kawasan penumpuan tegasan untuk panel apit dengan cawak konfigurasi A2 pada keadaan 50% daripada beban lentur maksimum



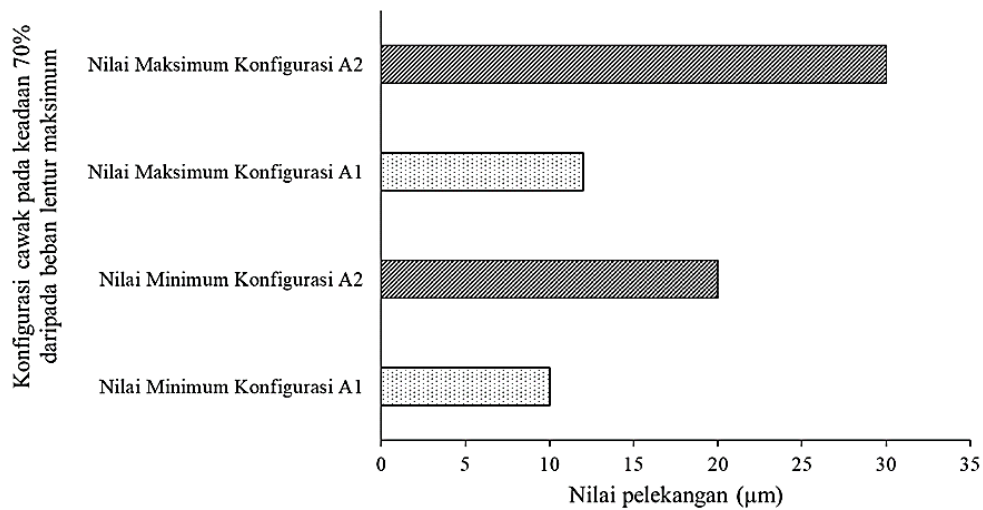
RAJAH 13. Mekanisma kegagalan secara blok keratan rentas potongan melintang (pandangan sisi) di kawasan penumpuan tegasan untuk panel apit dengan cawak konfigurasi A1 pada keadaan 50% daripada beban lentur maksimum

Jurang perbezaan yang besar, $10.0 - 20.0 \mu\text{m}$ bagi nilai pelekatan secara maksimum dan minimum didapati apabila panel apit dengan konfigurasi teras bercawak yang

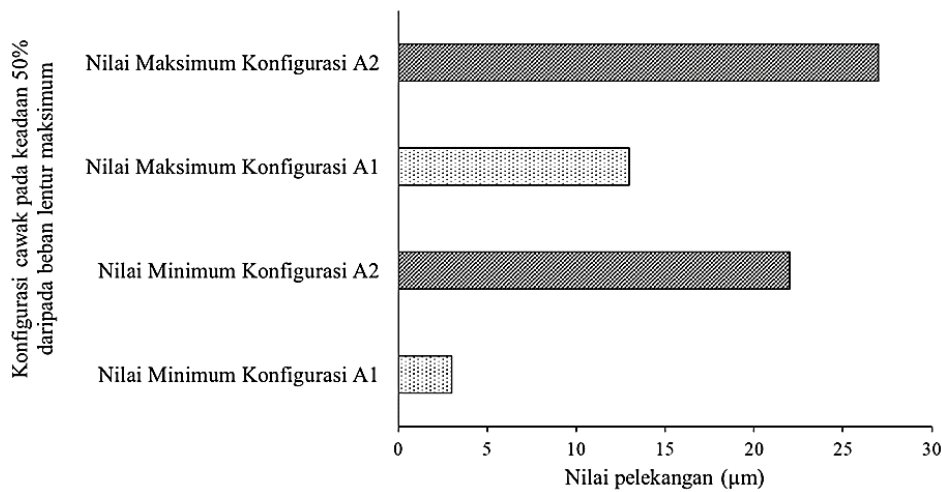
berbeza dikenakan pembebanan berkitar, di bawah keadaan 50% daripada beban lentur maksimum, seperti dalam Rajah 15. Dapat dinyatakan bahawa konfigurasi teras bercawak

A1 berupaya untuk mengurangkan kadar pelekangan dengan perbezaan 50 – 80%. Keadaan ini adalah setara sebagaimana yang ditunjukkan dalam Rajah 14, dengan nilai perbezaan yang lebih ketara. Perbezaan nilai pelekangan yang ketara ini dipengaruhi oleh kesan kerosakan awal iaitu keretakan matriks pada lapisan lekatan. Konfigurasi teras bercawak dengan saiz dan dimensi yang lebih besar seperti A2 cenderung untuk mengalami keretakan matriks yang lebih teruk pada lapisan lekatan. Hasil ini setaraf dengan kajian terdahulu oleh Ma et al. (2022), permulaan fenomena pelekangan di bawah beban lentur ini terhasil menerusi kesan ricihan yang tinggi di antara lapisan lekatan, yang memacu keretakan matriks pada lapisan lekatan dan cenderung untuk mengalami fenomena pelekangan.

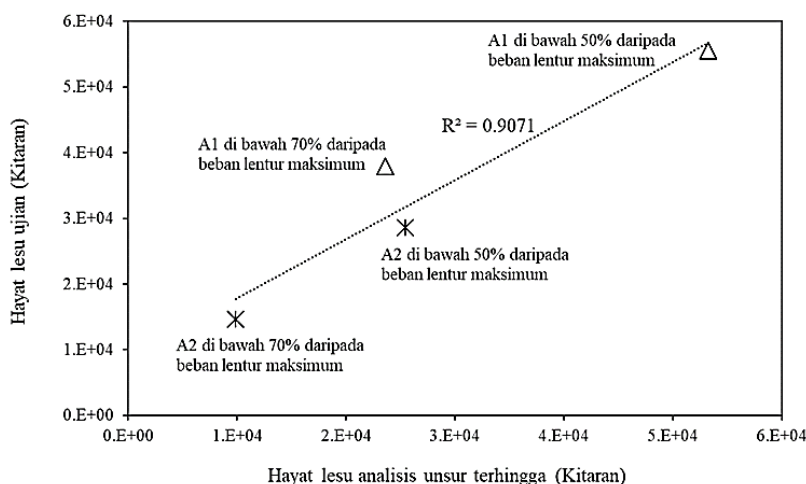
Bagi mendapatkan gambaran yang lebih baik dan dipercayai, nilai penentuan diperlukan bagi menghuraikan ketepatan hasil data yang diperolehi. Rajah 16 menunjukkan kitaran hayat lesu bagi panel apit dengan dua jenis spesifikasi konfigurasi bercawak yang mempunyai prestasi yang paling baik dan paling kurang baik dalam meningkatkan rintangan pelekangan. Analisis pekali penentuan menunjukkan perkaitan yang melebihi 0.90, iaitu $R^2 = 0.907$ bagi kedua-dua jenis panel apit pada pembebanan berkitar, di bawah keadaan 50% dan 70% daripada beban lentur maksimum. Justeru, hasil data yang diperolehi daripada ujian dan analisis unsur terhingga adalah boleh dipercayai dan berketepatan tinggi.



RAJAH 14. Perbandingan nilai pelekangan maksimum dan minimum untuk konfigurasi teras bercawak A1 dan A2 pada keadaan 70% daripada beban lentur maksimum



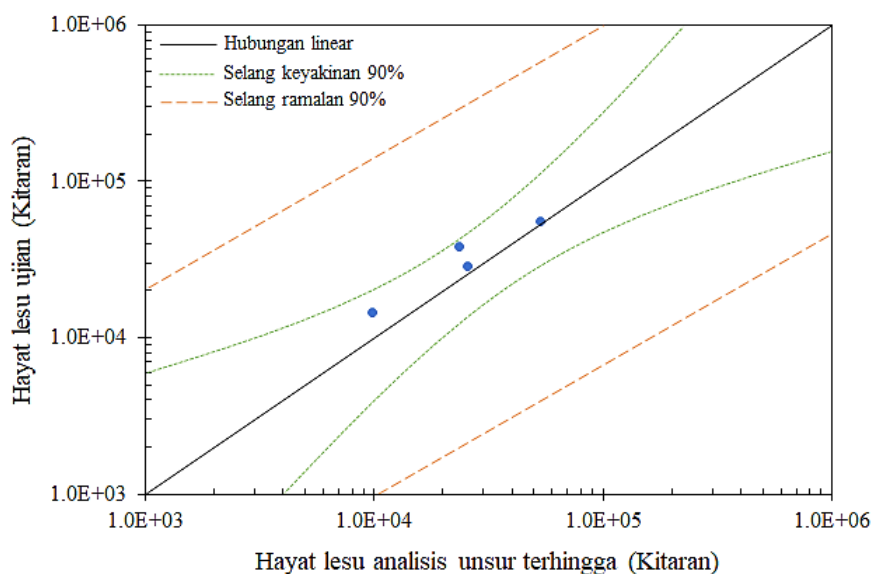
RAJAH 15. Perbandingan nilai pelekangan maksimum dan minimum untuk konfigurasi teras bercawak A1 dan A2 pada keadaan 50% daripada beban lentur maksimum



RAJAH 16. Pekali penentuan (R^2) berdasarkan kitaran hayat lesu daripada ujian dengan analisis unsur terhingga bagi panel apit dengan konfigurasi bercawak A1 dan A2 pada pembebanan berkitar di bawah keadaan 50% dan 70% daripada beban lentur maksimum

Bagi meningkatkan kebolehpercayaan terhadap hasil dapatan data ujian dan analisis unsur terhingga, pemeriksaan aras selang keyakinan 90% bagi membandingkan taburan kitaran hayat lesu hasil ujian dan analisis unsur terhingga telah dilakukan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 17. Berdasarkan rajah ini, dinyatakan bahawa data taburan kitaran hayat lesu pada pembebanan berkitar, di bawah keadaan 50% dan 70% daripada beban lentur maksimum adalah baik dan set data berada 100% dalam lingkungan garisan had sempadan keyakinan dan ramalan bagi kedua-dua analisis aras selang keyakinan 90%. Tambahan lagi,

tiada data yang terpercil atau terkeluar daripada garisan had sempadan selang keyakinan. Pengesanan titik data terpercil ini penting kerana penyingkirannya adalah berisiko dan boleh menyebabkan kesilapan dalam penilaian hayat lesu (Ke et al. 2023). Seterusnya, ia memberikan pengesanan kepada ketepatan data hasil ujian dan analisis unsur terhingga yang mana ia memberikan pilihan spesifikasi yang tepat bagi konfigurasi teras bercawak yang sesuai untuk panel apit dalam mengurangkan kadar pelekangan di bawah pembebanan lentur berkitar



RAJAH 17. Analisis aras selang keyakinan 90% untuk perbandingan data kitaran hayat lesu daripada ujian dan analisis unsur terhingga pada pembebanan berkitar di bawah 50% dan 70% daripada beban lentur maksimum

KESIMPULAN

Lapisan teras memainkan peranan penting dalam mengekalkan keutuhan integriti panel apit berlogam. Kegagalan mod II akibat daya ricihan sesatah yang tinggi antara lapisan panel membawa kepada kegagalan mod I, iaitu pelekangan antara lapisan panel. Perbezaan ketumpatan lapisan teras ini mempengaruhi kekuatan ikatan antara lapisan panel apit dengan teras sarang madu mempunyai taburan kesan ricihan tertinggi pada 87.5 MPa (kontur berwarna jingga-merah) berbanding teras permukaan bercawak pada 68.2 MPa dan teras kepingan pada 40.9 MPa di lapisan lekatan. Taburan kontur kerosakan lesu pembebanan lenturan juga menunjukkan teras sarang madu terdedah untuk mengalami kehancuran teras lebih 50% di antara titik daya dan topang tetap berbanding teras permukaan bercawak. Pemodelan hayat lesu menunjukkan perbezaan yang ketara bagi teras sarang madu pada 50 – 70%, manakala teras permukaan bercawak hampir setara dengan teras kepingan pada 6 – 12%. Panel apit dengan teras sarang madu menunjukkan ubah bentuk kekal yang ketara pada 56 – 70% berbanding teras permukaan bercawak pada 10 – 15%.

Dua jenis reka bentuk teras bercawak dipilih bagi menonjolkan perbezaan kewujudan permukaan bercawak dan menentukan keputusan. Konfigurasi teras bercawak dengan saiz yang lebih kecil (A1) menghasilkan rintangan pelekangan dengan lebih baik berbanding yang bersaiz besar (A2). Analisis pekali penentuan, $R^2 = 0.907$ diperolehi di antara hasil ujian dan analisis unsur terhingga di bawah dua keadaan pembebanan lentur berkitar yang berbeza. Analisis garisan had sempadan aras selang keyakinan 90% juga mendapati set data taburan hayat lesu ujian dan analisis unsur terhingga menunjukkan hubung kait linear yang baik. Justeru, hasil dapatan ini menyumbang kepada peningkatan tahap rintangan pelekangan antara permukaan panel apit di bawah pembebanan yang lampau.

PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia dan Universiti Pertahanan Nasional Malaysia di atas sokongan kewangan di bawah geran penyelidikan ini (FRGS/1/2023/TK10/UKM/01/3) dan (FRGS/1/2023/TK09/UPNM/02/1).

PENGISYTIHARAN MINAT BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Bjørheim, F., Pavlou, D. G. & Siriwardane, S. C. 2022. Nonlinear fatigue life prediction model based on the theory of the S-N fatigue damage envelope. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 45(5): 1480 – 1493.
- Bohara, R. P., Linforth, S., Ghazlan, A., Nguyen, T., Remennikov, A. & Ngo, T. 2022. Performance of an auxetic honeycomb-core sandwich panel under close-in and far-field detonations of high explosive. *Composite Structures* 280: 114907.
- Cheng, Y.H., Wu, H., Zhao, R.G. & Zhou, F. 2022. Mechanical characteristics and ballistic behaviors of high strength and hardness armor steels. *Journal of Constructional Steel Research* 197: 107502.
- Chin, C.H., Abdullah, S., Singh, S.S.K., Ariffin, A.K. & Schramm, D. 2023. On the need to evaluate the probabilistic of fatigue life assessment of random strain loading considering load sequence effects. *Engineering Failure Analysis* 145: 107013.
- Demir, K., Gavgali, E., Yetim, A.F. & Akpınar, S. 2021. The effects of nanostructure additive on fracture strength in adhesively bonded joints subjected to fully reversed four-point bending fatigue load. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 110: 102943.
- Faidzi, M.K., Abdullah, S., Abdullah, M.F., Azman, A.H., Hui, D. & S.S.K. Singh. 2021. Review of current trends for metal-based sandwich panel: Failure mechanisms and their contribution factors. *Engineering Failure Analysis* 123:105302.
- Faidzi, M.K., Abdullah, S., Abdullah, M.F., Azman, A.H., Singh, S.S.K. & Hui, D. 2022a. Geometrical effects of different core designs on metal sandwich panel under static and fatigue condition. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 44: 111.
- Faidzi, M.K., Abdullah, S., Singh, S.S.K., Abdullah, M.F., Azman, A.H. & Correia, J.A.F.O. 2022b. Fatigue damage assessment of metal sandwich panels under four-point bending cyclic loading conditions. *International Journal of Fatigue* 164: 107172.
- Huang, K., Ye, H., Yu, Z. & Zhou, X. 2022. Energy absorption properties of composite sandwich tubes with pre-folded cores. *Composite Structures* 294: 115737.
- Isahak, A.H., Abdullah, M.F., Faidzi, M.K., Yusof, W.Y.W., Abdullah, S., Alia, A. & Mubasyir, M.M. 2021. Impact of Crack Growth Behavior on High Strength Steel and Sandwich Metal Panel Using the Constant Stress Ratio, Frequency and Thickness. *Jurnal Kejuruteraan SI* 4(2): 9-15.
- Jeyaprakash, N., Yang, C-H. & Raj Kumar, D. 2020. Minimum cutting thickness and surface roughness achieving during micromachining of aluminium 19000 using CNC machine. *Materials Today: Proceedings* 21(1): 755 – 761.

- Ke, L., Zhu, F., Chen, Z., Feng, Z., Zhou, J. & Li, Y. 2023. Fatigue failure mechanisms and probabilistic SN curves for CFRP–steel adhesively bonded joints. *International Journal of Fatigue* 168: 107470.
- Larson, R., Bergan, A., Leone, F. & Kravchenko, O. G. 2023. Influence of stochastic adhesive porosity and material variability on failure behavior of adhesively bonded composite sandwich joints. *Composite Structures* 306: 116608.
- Latifi, L.M., Mubasyir, M.M., Abdullah, S. & Singh, S.S.K. 2025. Effect of Varying Frequency of Fatigue Test on Durability of AISI 1045 Carbon Steel Plate Under Spectral Loading. *Jurnal Kejuruteraan* 37(1) 2025: 369-381.
- Ma, M., Yao, W., Jiang, W., Jin, W., Chen, Y., Li, P. & Huang, J. 2022. Fatigue of composite honeycomb sandwich panels under random vibration load. *Composite Structures* 286: 115296.
- Roux, É., Baland, P. & Charleux, L. 2021. Effect of tension-compression asymmetry of AZ31B magnesium alloys on four-point bending. *Mechanics Research Communications* 114: 103672.
- Rudawska, A. 2022. The effect of protective and decorative coatings on the strength of adhesive joints of hot-dip galvanized steel sheets. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 117, Part B: 103004.
- Schieppati, J., Schritteser, B., Wondracek, A., Robin, S., Holzner, A. & Pinter, G. 2021. Effect of mechanical loading history on fatigue crack growth of non-crystallizing rubber. *Engineering Fracture Mechanics* 257: 108010.
- Siahaan, M. Y. R., Siregar, R. A. & Tanjung, F. A. 2023. Investigating the Flexural Strength of Aluminium Honeycomb Sandwich Panels at Varying Angle of Impact Loads. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering* 11(4s): 322–327.
- Song, S., Xiong, C., Yin, J., Deng, H., Cui, K. & Han, C. 2023. Flexural behavior, failure analysis, and optimization design of a hybrid composite Kagome honeycomb sandwich structure. *Thin-Walled Structures* 187: 110743.
- Tan, M., Zhang, X., Xiong, W., Liu, C., Han, G. & Li, Y. 2023. Influence of layered back plate on the ballistic performance of ceramic armor. *Composite Structures* 308: 116688.
- Varghese, R. M. & Varghese, K. M. 2022. Comparative study on the blast load response of woven and lattice core metallic sandwich panels. *Materials Today: Proceedings* 65: 1343 – 1347.
- Yao, Y., Shi, P., Chen, M., Chen, G., Gao, C., Boisse, P. & Zhu, Y. 2022. Experimental and numerical study on Mode I and Mode II interfacial fracture toughness of co-cured steel-CFRP hybrid composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 112: 103030.
- Zamani, P., Jaamialahmadi, A. & Da Silva, L.F. 2023. Fatigue life evaluation of Al-GFRP bonded lap joints under four-point bending using strain-life criteria. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 122: 103338.
- Zhang, X., Ju, Y., Zhu, A. & Zou, T. 2023. Fatigue behavior of single-lap adhesive joints with similar and dissimilar adherends under cyclic loading: a combined experimental and simulation study. *Materials Today Communications* 37: 107215.
- Zhou, X. & Jing, L. 2024. Low-velocity impact response of sandwich panels with layered-gradient metal foam cores. *International Journal of Impact Engineering* 184: 104808.
- Zulkifli, M.K., Baharom, S., Azmi, M.R. & Huat, T.S. 2024. An Overview of Buckling Behaviour of Cold-Formed Steel Built-Up Members: Connected Face-to-Face and Back-to-Back. *Jurnal Kejuruteraan* 36(6): 2355–2372.