

KAJIAN PENGGUNAAN PLAT JEJARING SEBAGAI PENYAMBUNG RICIH UNTUK STRUKTUR KOMPOSIT KAYU-KONKRIT DALAM STRUKTUR HIBRID

Nur Liayana Nabilah dan Mohd Amirul Mohd Snin*

*Pusat Pengajian Kejuruteraan Awam, Kampus Kejuruteraan Tuanku Syed Sirajuddin, Universiti Sains
Malaysia, Penang, Malaysia.*

*Corresponding author: ceamirul@usm.my

Abstract

Kajian ini membentangkan analisis terperinci mengenai prestasi mekanikal sambungan plat jejaring dalam sistem Komposit Kayu-Konkrit (Timber-Concrete Composite - TCC). Pemodelan unsur terhingga (finite element modelling) telah dijalankan menggunakan perisian LUSAS dan diverifikasikan terhadap kajian eksperimen daripada kajian yang lepas. Model tersebut menunjukkan ketepatan dan kebolehpercayaan yang tinggi seperti hasil keputusannya mempunyai tahap persamaan yang baik dengan hasil kajian yang lepas dan hanya mempunyai perbezaan kecil pada nilai beban dan anjakan. Model seterusnya dilaksanakan dengan memfokuskan kepada dua pemboleh ubah utama: kedalaman benaman (50 mm hingga 200 mm) dan panjang plat jejaring (130 mm hingga 230 mm). Hasil simulasi mendapati bahawa kedalaman benaman memberi kesan yang ketara terhadap kelakuan mekanikal; walaupun beban maksimum kekal pada 97 kN, benaman yang lebih cetek menghasilkan sambungan yang lebih tegar, manakala benaman yang lebih dalam meningkatkan anjakan, kemuluran, dan penyerapan tenaga. Sebaliknya, variasi pada panjang plat memberikan kesan yang lebih kecil dengan beban maksimum kekal pada 34 kN, mencatatkan hanya peningkatan ketegaran yang minimum. Secara kesimpulannya, dapatan ini menonjolkan keperluan tolak ansur antara ketegaran dan kemuluran dalam pengoptimuman reka bentuk sambungan TCC. Benaman yang cetek dan plat yang panjang disyorkan untuk meningkatkan ketegaran, manakala benaman yang dalam adalah lebih sesuai untuk pelepasan tenaga dan kemuluran. Kajian pada masa hadapan disarankan untuk menggunakan data simulasi rujukan yang lebih lengkap serta meneroka pengaruh variasi fizikal plat, termasuk bentuk, ketebalan, dan corak tebukan terhadap prestasi keseluruhan.

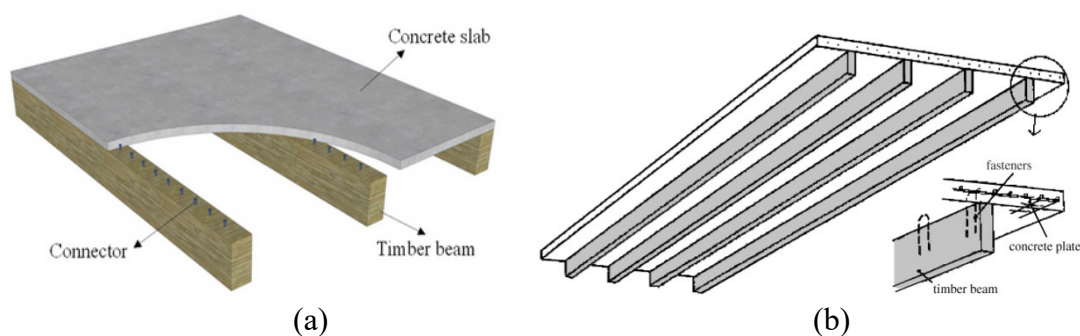
Keywords: Komposit Kayu-Konkrit (TCC), pemodelan unsur terhingga, sambungan plat jejaring, kedalaman benaman, kemuluran, ketegaran mekanikal.

Article history:

Submitted: 02/02/2026; Revised: 12/05/2026; Accepted: 30/06/2026; Online: 30/06/2026

PENDAHULUAN

Sistem komposit semakin mendapat perhatian di dalam sektor pembinaan struktur bangunan kerana ianya menggabungkan beberapa bahan-bahan binaan untuk mencapai prestasi struktur yang unggul. Bahan-bahan pembinaan yang tradisional seperti konkrit bertetulang dan keluli digunakan secara meluas dan menyumbang kepada pelepasan gas rumah hijau yang ketara. Oleh yang demikian, satu sistem struktur komposit sebagai alternatif yang mampan perlu digunakan (Yeoh et al., 2010). Papak Komposit Kayu-Konkrit (TCC) ialah sistem yang menggabungkan kekuatan tegangan tinggi dan ketumpatan rendah daripada rasuk kayu dengan kekuatan mampatan dan modulus keanjalan yang tinggi daripada papak konkrit. Sistem ini dapat meningkatkan kekukuhan, kekuatan, dan prestasi getaran serta mengurangkan beban mati dan meningkatkan kecekapan beban (Branco et al., 2015; Ceccotti, 2002). Sistem komposit yang berkesan bergantung pada penyambung ricih antara dua bahan komposit tersebut dengan pilihan penyambung seperti takuk, gam, pasak (dowel), dan plat jejaring (Ceccotti & Fragiacomio, 2007; Dias, Jorge and Martins, 2011). Penyambung plat jejaring antara penyambung yang mempunyai kekukuhan dan kemuluran yang tinggi dan sesuai digunakan untuk menghasilkan sistem komposit pasang siap. Kajian telah mengesahkan keupayaan penyambung jejaring yang dapat meningkatkan kapasiti galas beban dengan mengekalkan kemuluran di bawah beban yang tinggi (Mudie et al., 2021; Jacquier & Girhammar, 2016).



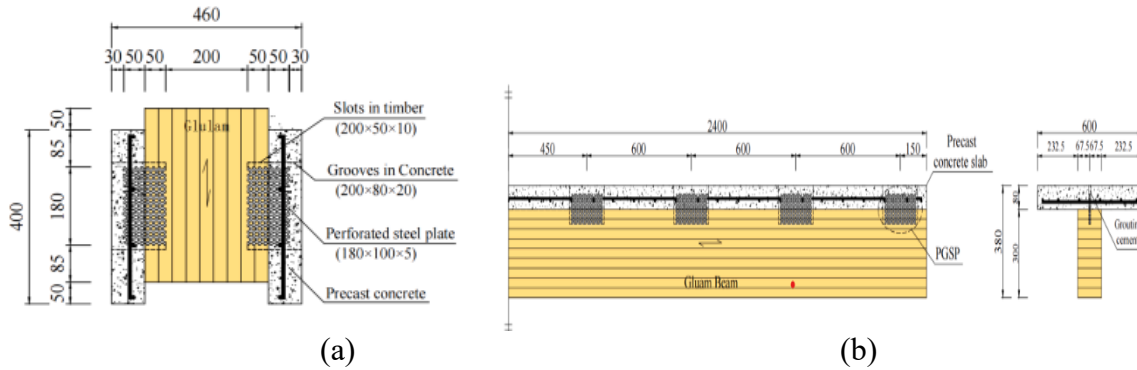
Rajah 1: (a) Sistem papak Komposit Kayu-Konkrit (TCC) yang menunjukkan papak konkrit, rasuk kayu, dan penyambung (Shi et al., 2024) dan (b) Sistem papak Komposit Kayu-Konkrit (TCC) (skematik) (Ceccotti, 2002).

Walaupun struktur komposit mempunyai banyak kelebihan, struktur Komposit Kayu-Konkrit (TCC) menghadapi kekangan dalam mereka bentuk kerana ketiadaan piawaian khusus yang komprehensif, terutamanya dalam piawaian Eurocode 5 dan Piawaian Malaysia MS544. Eurocode 5 – Reka Bentuk Struktur Kayu, Bahagian 1-1, hanya memberikan panduan yang terhad untuk sistem TCC dengan menggunakan teori asas komposit separa terhadap kelakuan sambungan antara konkrit dan kayu (EN 1995-1-1, CEN, 2004; Dias & Schänzlin, 2018). Di dalam praktikal semasa untuk mereka bentuk sambungan TCC menggunakan Eurocode 5, terdapat klaus 8.1 menyatakan kekukuhan sambungan TCC adalah dua kali ganda daripada kekukuhan sambungan kayu kepada kayu. Di Malaysia, MS544 merangkumi reka bentuk kayu tetapi tidak ada klausa tertentu untuk mereka bentuk sistem TCC. Ini menyebabkan potensi ketidakkonsistenan dan risiko dalam reka bentuk sambungan TCC, terutamanya dalam sambungan plat jejarang. Permasalahan ini mencetuskan keperluan untuk menjalankan penyelidikan dan ujian piawaian terhadap sambungan plat jejarang bagi mereka bentuk sambungan ini. Bagi memenuhi keperluan ini, kajian ini memberikan tumpuan kepada pemodelan elemen terhingga (FEM) untuk menganalisis rasuk TCC dengan penyambung plat jejarang. Kajian ini juga menverifikasikan penggunaan model elemen terhingga dengan membandingkan hasilnya dengan hasil daripada kerja eksperimen sebelumnya. Kajian ini juga menyiasat kapasiti daya ricih serta kekukuhan sambungan plat jejarang dengan konfigurasi geometri yang berbeza-beza berdasarkan hasil daripada model unsur terhingga. Dalam kajian ini, perisian Model Unsur Terhingga (FEM) LUSAS dengan model pengkomputeran 3D telah digunakan untuk memodelkan struktur TCC berdasarkan sifat bahan, sambungan plat jejarang, dan keadaan bebanan yang diambil daripada kajian terdahulu dan kemudiannya diverifikasikan dengan data eksperimen. Analisis ini terhad kepada pemodelan 2D dengan sifat bahan, bebanan seragam, dan andaian—berpandukan piawai Eurocode 5—bahawa kekukuhan sambungan dalam TCC adalah lebih kurang dua kali ganda berbanding sambungan antara papak kayu ke kayu.

KAEDAH PENYELIDIKAN

Kajian ini menggunakan kaedah Model Unsur Terhingga (FEA) dalam perisian LUSAS untuk memodelkan dan mensimulasikan struktur Komposit Kayu-Konkrit (TCC) dengan sambungan plat jejarang. Kaedah ini menggunakan data-data seperti sifat bahan, keadaan bebanan, pemindahan beban, anjakan, dan mekanisme kegagalan. Proses bermula dengan penggunaan LUSAS untuk menetapkan teknik pemodelan diikuti dengan kajian penumpuan dan pengesahan untuk mengoptimumkan konfigurasi jejarangan dan mengesahkan ketepatan. Setelah disahkan, model diaplikasikan kepada analisis berskala penuh untuk menilai prestasi struktur sambungan plat jejarang dalam sistem TCC.

Model unsur terhingga 3D dalam LUSAS dibangunkan berdasarkan konfigurasi rasuk kayu-konkrit komposit yang dibuatkan oleh Tao et al. (2022), seperti yang diilustrasikan dalam Rajah 3.3. Model ini terdiri daripada papak konkrit pasang siap setebal 80 mm yang diletakkan di atas rasuk kayu terlamina bergam (glulam) setinggi 300 mm, memberikan kedalaman rasuk keseluruhan sebanyak 380 mm. Papak konkrit mempunyai lebar 600 mm, manakala lebar rasuk kayu ialah 135 mm. Plat jejarang keluli, setebal 5 mm, panjang 180 mm, dan lebar 100 mm, diintegrasikan ke dalam model sebagai penyambung ricih. Plat jejarang ini dimasukkan ke dalam slot dan alur yang dipotong tepat dalam kedua-dua bahagian kayu dan konkrit, mengikut susun atur sambungan yang dibentangkan oleh Tao et al. (2022) seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1 a dan 2b.



Rajah 1 (a) Keratan rentas rasuk TCC dengan butiran sambungan plat jejaring (Tao et al., 2022) dan (b) Geometri dan pembentukan butiran rasuk TCC dengan sambungan plat jejaring (Tao et al., 2022).

Ketepatan hasil daripada model unsur terhitung sangat bergantung kepada data yang betul bagi sifat bahan untuk kayu, konkrit, dan plat jejaring, kerana parameter-parameter ini secara langsung mempengaruhi kekakuan, kekuatan, dan keseluruhan tingkah laku struktur di bawah beban. Nilai yang diguna pakai dalam kajian ini diperolehi daripada penyelidikan eksperimen sebelumnya daripada Tao et al., (2022). Papak konkrit pasang siap dimodelkan dengan gred kekuatan C30 dan kekuatan mampatan kiub yang diukur setinggi 30.8 MPa pada 28 hari. Sifat mekanikal papak konkrit diberikan dalam Jadual 1. Rasuk kayu dimodelkan menggunakan model kerosakan anjal-rapuh isotropik dalam LUSAS, dengan sifat mekanikal bahan diambil dari piawaian EN 408 untuk pokok kayu Douglas dengan memfokuskan kepada arah membujur selari dengan ira sebagai kapasiti galas beban utamanya. Sifat-sifat mekanikal rasuk kayu ini diringkaskan dalam Jadual 2. Penyambung plat jejaring dimodelkan sebagai elemen keluli isotropik dengan gred kekuatan S355, mengikut parameter yang dilaporkan dalam Tao et al. (2022) . Sifat mekanikal keluli yang digunakan dalam model diberikan dalam Jadual 3.

Jadual 1 : Sifat mekanikal konkrit

Parameter	Nilai
Gred Konkrit	C30
Kekuatan mampatan kiub	30.8 MPa
Ketumpatan konkrit	2400 kg/m ³
Modulus keanjalan, E	21 000 MPa

Jadual 2 : Sifat mekanikal kayu

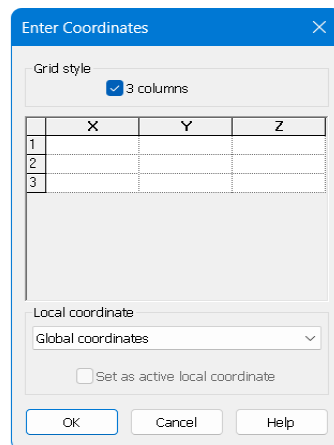
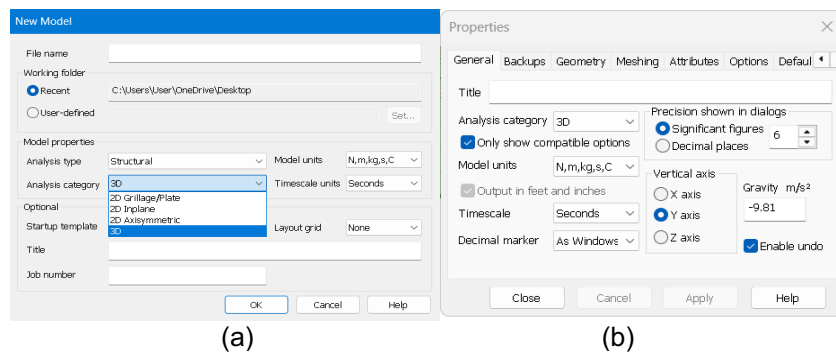
Parameter	Nilai
Ketumpatan kayu	510 kg/m ³
Nisbah Poisson	0.45
Modulus keanjalan arah melintang	13100 MPa
Kekuatan mampatan selari dengan ira kayu	46.3 MPa

Jadual 3 : Sifat Mekanikal Sambungan (Plat Jejaring)

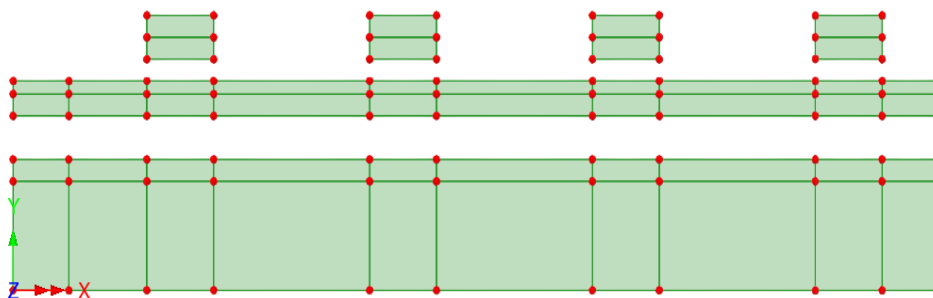
Parameter	Nilai
Gred Keluli	S355
Modulus Keanjalan	200 GPa
Kekuatan Alah	345 MPa

1 Model dalam LUSAS

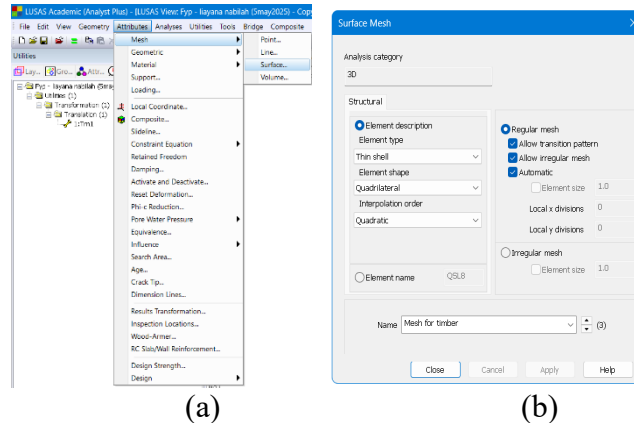
2 LUSAS terdiri daripada dua modul utama: LUSAS Modeller untuk mencipta model dan memaparkan
 3 keputusan, dan LUSAS Solver menterjemahkan model yang dibina, menyelesaikan persamaan
 4 matematik yang kompleks, dan menghasilkan data keputusan untuk dipaparkan semula oleh Modeller.
 5 Pemodelan telah dijalankan menggunakan LUSAS Modeller Versi 21, bermula dengan pemilihan jenis
 6 analisis sebagai 3D In-plane untuk mengkaji tingkah laku rasuk komposit, dan menetapkan sistem unit
 7 kepada Newton (N), milimeter (mm), tan metrik (t), saat (s), dan darjah Celsius ($^{\circ}\text{C}$) seperti yang
 8 ditunjukkan dalam Rajah 2 a dan b. Model geometri dicipta menggunakan fungsi Geometry > Surface,
 9 dengan koordinat untuk setiap permukaan dimasukkan secara manual berdasarkan data rujukan dalam
 10 Rajah 2 c untuk mentakrifkan dengan tepat rasuk kayu, papak konkrit, dan penyambung plat jejaring.
 11 Untuk memudahkan penentuan antara muka penyahlipisan (delamination interface), model
 12 dibahagikan kepada dua bahagian, dengan setiap komponen dicipta secara individu, seperti yang
 13 ditunjukkan dalam susun atur lengkap dalam Rajah 3.



21 Rajah 3 : (a) Penetapan unit model dan jenis analisis model. (b) Penetapan unit model. (c) Permukaan koordinasi grid untuk
 22 model kayu konkrit dan plat jejaring.



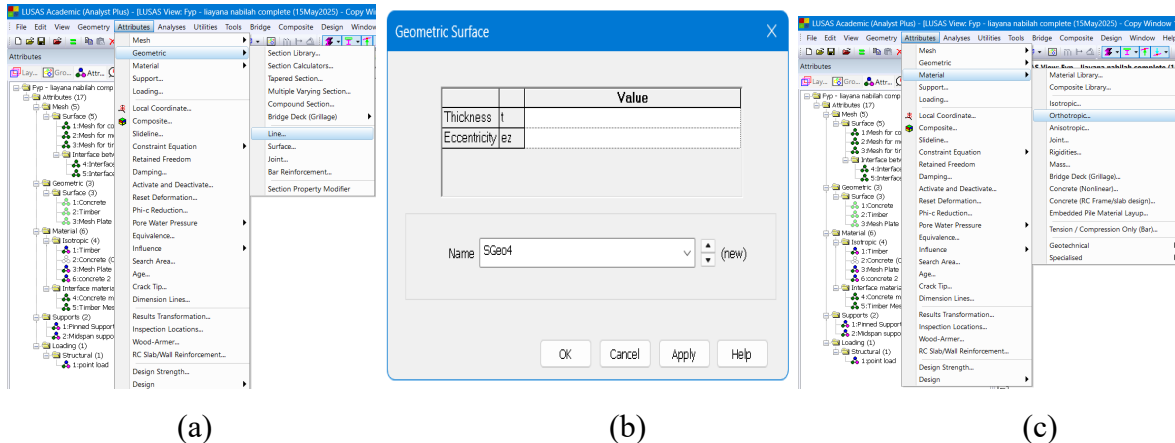
1 Berjaring (meshing) adalah langkah penting dalam menyediakan model unsur terhingga, melibatkan
 2 pembahagian struktur kepada elemen dan nod yang lebih kecil untuk menghasilkan keputusan yang
 3 lebih tepat. Dalam kajian ini, atribut jejaringan dihasilkan bagi setiap komponen kayu, konkrit, dan plat
 4 jejaring menggunakan arahan Attribute > Mesh > Surface dalam Rajah 4 a. Kayu dan konkrit
 5 menggunakan elemen kelompong nipis (thin shell element) dengan bentuk sisi empat dan susunan
 6 interpolasi kuadratik, dengan papak konkrit disusun dalam corak jejaringan tetap seperti dalam Rajah
 7 4 b. Plat jejaring juga menggunakan tetapan yang serupa tetapi dengan ketumpatan jejaring yang lebih
 8 halus untuk menghasilkan keputusan tingkah laku penyah lapisan (delamination) yang lebih baik. Di
 9 kawasan antara permukaan komponen kayu dan konkrit, ianya dimodelkan dengan menggunakan
 10 atribut jejaringan garisan (line mesh) untuk menambah baik pemodelan anjakan (slip) atau pemisahan
 11 (separation).
 12



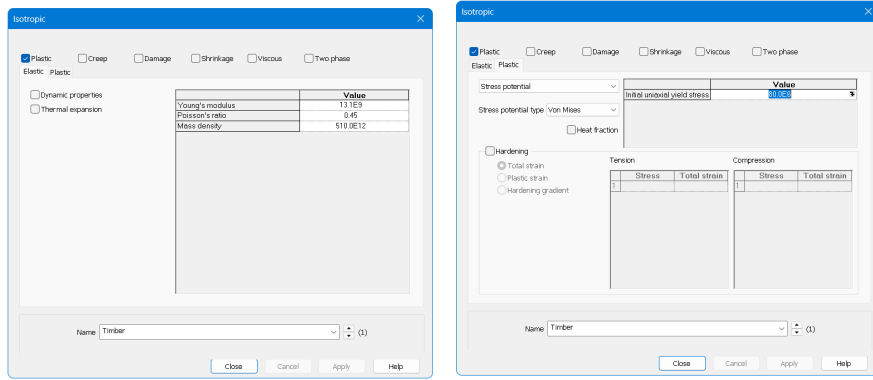
Rajah 4 : (a) Arahan sifat Jejaringan. (b) Jejaringan permukaan untuk konkrit, kayu dan plat jejaring

13
 14
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 22
 23
 24
 25
 26
 27

Selepas melengkapkan persediaan geometri dan jejaringan, ketebalan geometri diumpukkan
 (assigned) kepada setiap komponen menggunakan pilihan *Surface* seperti dalam Rajah 5 a dengan
 nilai 135 mm untuk rasuk kayu, 600 mm untuk papak konkrit, dan 5 mm untuk plat jejaring seperti dalam
 Rajah 5 b. Sifat mekanikal bahan untuk kayu, konkrit, dan plat jejaring kemudiannya ditakrifkan
 menggunakan fungsi Attributes > Material dengan semua bahan ditetapkan sebagai isotropik untuk
 memastikan sifat seragam dalam semua arah seperti dalam Rajah 5 c. Parameter yang ditentukan
 termasuklah modulus keanjalan (Elastic Modulus), nisbah Poisson (poisson ratio), ketumpatan jisim,
 dan tegasan alah sepaksi awal (uniaxial yield stress) seperti yang ditunjukkan dalam 5 d dan e
 diaplikasikan pada permukaan melalui kaedah seret-dan-lepas (drag and drop).



28
 29

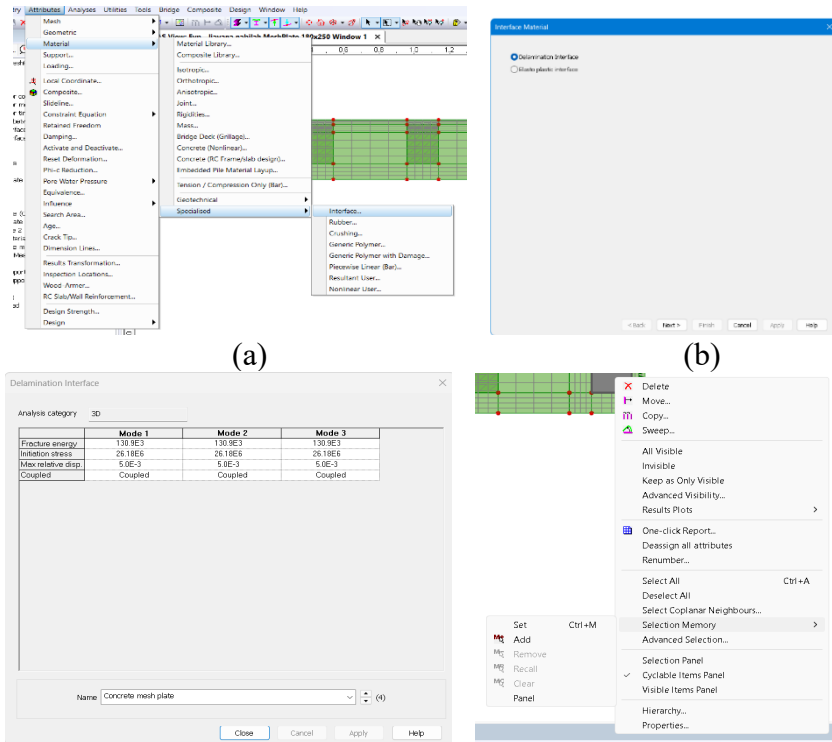


(d)

(e)

Rajah 5 : (a) Arahan sifat geometri (b) Permukaan geometri untuk kayu dan konkrit (c) Arahan sifat bahan (d) Tetapan plastik isotropik untuk kayu, konkrit dan plat jejaring. (e) Tetapan elastik isotropik untuk kayu, konkrit dan plat jejaring.

Bagi memodelkan permukaan antara kayu-konkrit, fungsi penyahlapisan (delamination) antara permukaan telah digunakan seperti dalam Rajah 6 a. dan memilih pilihan *Delamination Interface* yang biasa digunakan untuk mensimulasikan pemisahan lapisan dalam struktur komposit seperti dalam Rajah 6 b. Parameter mekanikal untuk tiga mod keretakan iaitu Mod 1 (normal), Mod 2 (ricih dalam satah) dan Mod 3 (ricih luar satah) ditetapkan dengan tenaga keretakan $130.9 \times 10^3 \text{ J/m}^2$, tegasan permulaan $26.18 \times 10^6 \text{ mPa}$ dan anjakan relatif maksimum $5.0 \times 10^{-3} \text{ m}$, semua mod adalah *Coupled* untuk mengambil kira interaksi dalam Rajah 6 c. Semua nilai ini dikira menggunakan formula kekuatan cabutan (*withdrawal*) antara keluli dengan kayu. Pemilihan *master* telah diberikan kepada kayu dan konkrit dan pemilihan *slave* ke permukaan plat jejaring menggunakan *Selection Memory* seperti dalam Rajah 6 d, kemudian elemen antara muka diaplikasikan melalui penumpukkan *slave* dalam Rajah 7. Kayu dan konkrit ditetapkan sebagai tidak boleh digabungkan (*unmergeable*) sebelum meletakkan plat jejaring di antara mereka dan diumpukkan kepada kedua-dua komponen konkrit dan kayu untuk melengkapkan model.



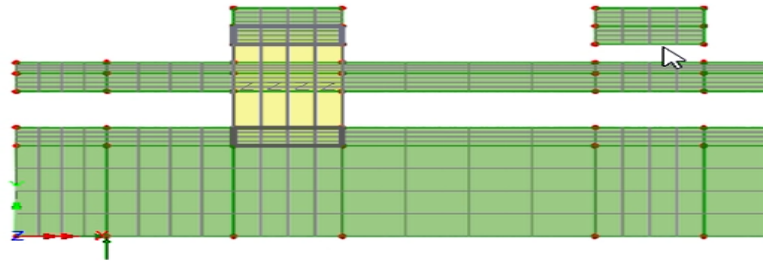
(a)

(b)

(c)

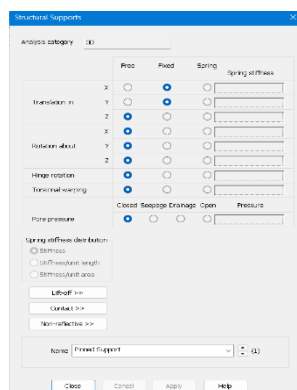
(d)

Rajah 6 : (a) Sifat elemen antara muka. (b) Tetapan antara muka penyahlaminaan. (c) Permukaan penyahlaminaan untuk konkrit, kayu dan plat jejaring. (d) Memori pemilihan untuk penetapan umpukan induk.

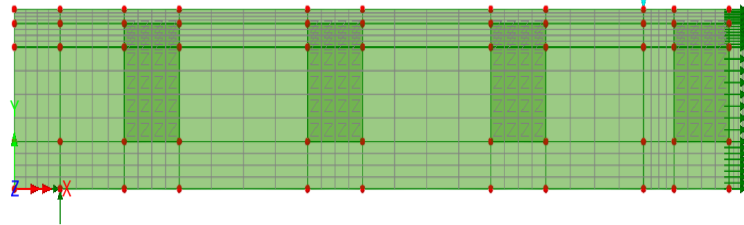


Rajah 7 : Induk dan hamba bagi umpukan tersebut.

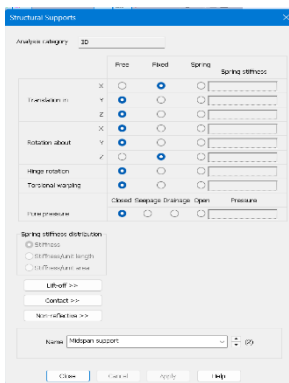
Sokongan (support) tetap iaitu mengekang semua darjah kebebasan translasi dan putaran dalam arah x, y, dan z seperti dalam Rajah 8 a, diumpukkan ke permukaan bawah komponen konkrit seperti dalam Rajah 8 b. Model TCC ini dimodelkan hanya separa disebabkan strukturnya yang simetri. Oleh sebab itu, sokongan dengan mengekang translasi dalam arah x dan putaran pada paksi z sambil membenarkan translasi bebas dalam arah y seperti dalam Rajah 8 c digunakan pada sebelah kanan permukaan kayu seperti dalam Rajah 8 d.



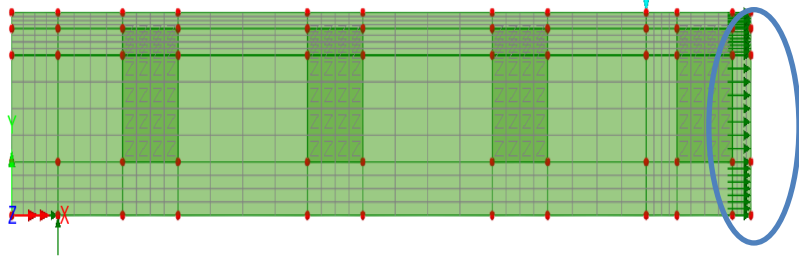
(a)



(b)



(c)



(d)

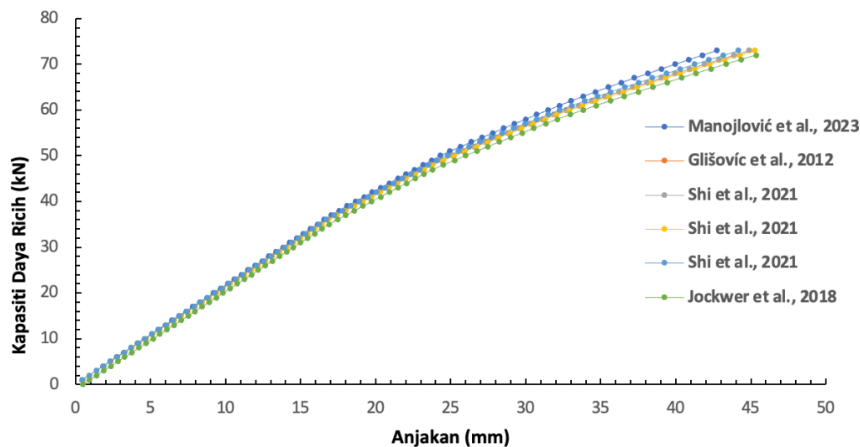
Rajah 8 : (a) Sokongan tetap. (b) Sokongan tetap di bahagian kiri. (c) Simetri pada pertengahan rentang. (d) Simetri bagi sokongan pertengahan rentang.

Selepas model unsur terhingga dilaksanakan tanpa ralat, pengesahan (validation) model dijalankan untuk memastikan kebolehpercayaan (reliability) dan ketepatan (accuracy). Pelaksanaan tanpa ralat tidak menjamin tingkah laku yang realistik, oleh itu bentuk yang berubah (deformed shape) daripada model dan taburan tegasan (stress distribution) dinilai terlebih dahulu untuk konsistensi dengan jangkaan tindak balas rasuk komposit. Hubungan anjakan beban pada titik kritikal kemudiannya dinilai menggunakan fungsi LUSAS Graph Wizard untuk mengekstrak anjakan pada nod yang dipilih, tindak balas sokongan (support reaction), dan daya dalaman (internal forces). Plot ini dibandingkan dengan data eksperimen daripada kajian Teo et al. (2022) untuk menilai tingkah laku anjakan (slip behaviour) dan kekukuhan sambungan (connection stiffness). Percanggahan yang ketara memerlukan

1 penghalusan sifat bahan, keadaan sempadan (boundary condition), atau parameter penyambung.
2 Proses ini mengesahkan ketepatan model sebelum analisis parametrik dan sensitiviti diperincikan.
3
4

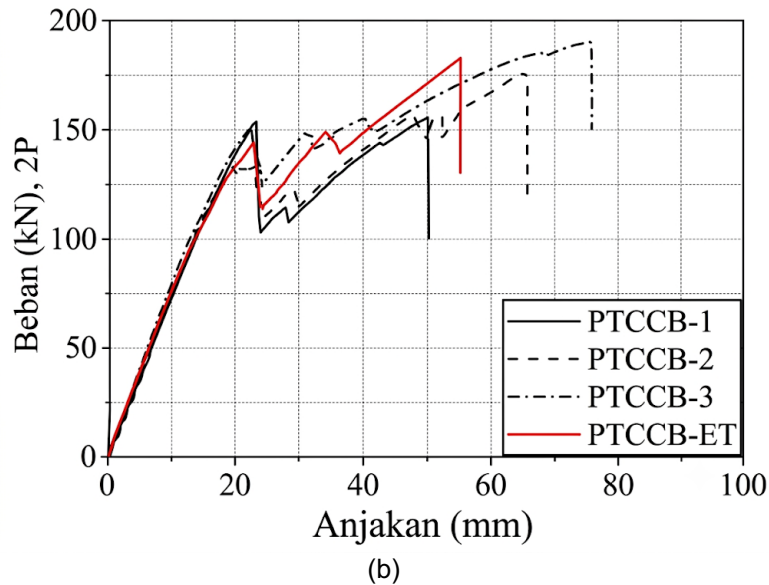
5 HASIL DAN PERBINCANGAN

6 Seksyen ini membentangkan keputusan pemodelan unsur terhingga bagi sambungan plat jejaring
7 dalam sistem Komposit Kayu-konkrit (TCC) menggunakan perisian LUSAS dengan graf anjakan beban
8 yang diproses menggunakan Microsoft Excel. Analisis memfokuskan kepada tingkah laku mekanikal
9 dan ciri kegagalan penyambung plat jejaring dalam kedua-dua konkrit dan kayu, dan mengkaji kesan
10 panjang plat jejaring dan kedalaman benaman (embedment depth) terhadap prestasi struktur TCC.
11 Keputusan daripada model FEM dibandingkan dengan data eksperimen daripada kajian terdahulu
12 daripada sampel PTTCB-1, PTTCB-2 dan PTTCB-3 Tao et al. (2022) untuk mengesahkan model dan
13 menilai pengaruh parameter. Keputusan kapasiti daya ricih-anjakan daripada model LUSAS yang
14 menggunakan model *embedment strength* daripada Manojlović et al. (2023), Glišović et al. (2012), Shi
15 et al. (2021), dan Jockwer et al. (2018) untuk parameter penyahlapisan *delamination* menghasilkan
16 kekuatan benaman (embedment strength) berbeza untuk sambungan plat jejaring. Seperti yang
17 ditunjukkan dalam Rajah 9 a, graf kapasiti daya ricih (shear force capacity) melawan anjakan
18 (displacement) daripada kajian terdahulu telah dirujuk dan dibandingkan dengan graf simulasi daripada
19 model FEM seperti dalam Rajah 9 b. Graf daripada model FEM menunjukkan trend yang hampir sama
20 dengan graf daripada eksperimen terdahulu dengan hanya mempunyai perbezaan anjakan yang kecil.
21 Perbezaan anjakan yang terhasil adalah disebabkan oleh model permukaan antara kayu-konkrit, fungsi
22 penyahlapisan menggunakan nilai yang dikira menggunakan formula kekuatan cabutan daripada
23 daripada Mohd Snin and Kassim (2023) yang menghasilkan nilai anjakan yang sedikit kecil. Ini
24 menunjukkan bahawa model ini boleh memprediksi dengan agak tepat tingkah laku sambungan plat
25 jejaring di bawah kapasiti beban ricih. Jadual 4 menunjukkan nilai-nilai hasil anjakan dan peratusan
26 beza anjakan antara model FEM dengan eksperimen. Manakala Jadual 5 menunjukkan nilai-nilai
27 kapasiti daya ricih dan peratusan beza anjakan antara model FEM dengan eksperimen.
28



(a)

29
30
31



Rajah 9 : (a) Graf Kapasiti Daya Ricih melawan anjakan hasil daripada model LUSAS. (b) Graf beban melawan anjakan daripada kajian terdahulu (Tao et al., 2022).

Jadual 4 : Anjakan hasil daripada model LUSAS dan peratus perbezaannya dengan nilai daripada eksperimen Tao et al. (2022)

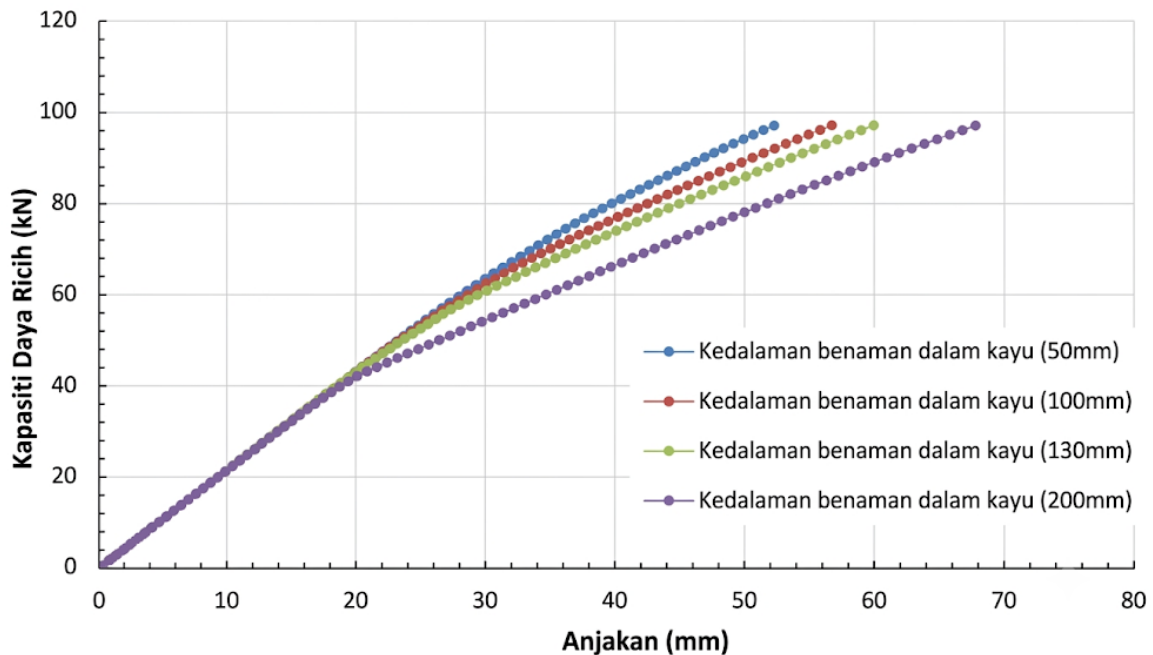
Model permukaan antara konkrit dan kayu	Anjakan (mm)	% Peratus perbezaan anjakan (nilai anjakan eksperimen 75.8 mm)
Manojlović et al., 2023	42.70	12.66
Glišović et al., 2012	44.89	18.44
Shi et al., 2021	44.88	18.41
Shi et al., 2021	45.26	19.42
Shi et al., 2021	44.16	16.52
Jockwer et al., 2018	45.35	19.66

Jadual 5 : Keputusan eksperimen Kapasiti Daya Ricih (Tao et al., 2022)

Sampel	Kapasiti Daya Ricih (Tao et al., 2022) (kN)	Kapasiti Daya Ricih daripada model LUSAS (kN)	% Peratus perbezaan Kapasiti Daya Ricih eksperimen dengan model (kN)	anjakan (mm)
PTTCB-1	117.0	146	24.79%	50.0
PTTCB-2	131.6	146	10.94%	65.9
PTTCB-3	142.4	146	2.53%	75.8

Berdasarkan hasil eksperimen oleh Tao et al. (2022), tiga spesimen PTTCB-1, PTTCB-2, dan PTTCB-3 telah diuji untuk menilai sambungan plat jejaring dalam struktur komposit kayu-konkrit (TCC), merekodkan beban puncak sebanyak 117.0 kN, 131.6 kN, dan 142.4 kN dengan anjakan sepadan sebanyak 50.0 mm, 65.9 mm, dan 75.8 mm. Daripada graf perbandingan ini, hasil daripada model Manojlović et al. (2023) adalah paling hampir dengan Tao et al. (2022) berbanding model *embedment strength* daripada kajian lain. Simulasi LUSAS dalam kajian ini menghasilkan beban kegagalan 73.0 kN untuk separuh-model dan 146.0 kN untuk model penuh berbanding beban kegagalan eksperimen PTTCB-3 sebanyak 142.4 kN dan anjakan 75.8 mm. Perbezaan peratusan dalam kapasiti daya ricih antara simulasi dan eksperimen ialah 2.53%, dan 12.66% untuk anjakan. Perbezaan kecil ini berkemungkinan besar disebabkan oleh andaian pemodelan, variasi dalam sifat bahan, penyederhanaan dalam geometri, dan perbezaan keadaan sempadan. Walaupun terdapat perbezaan ini, simulasi ini sejajar dengan tingkah laku eksperimen, mengesahkan kebolehpercayaan model dalam meramalkan prestasi sambungan plat jejaring dalam sistem TCC.

1
2 Selepas verifikasi, kedalaman benaman (embedment depth) plat jejaring dalam kayu diubah kepada
3 saiz 50 mm, 100 mm, 130 mm, dan 200 mm untuk mengkaji kesannya terhadap graf daya ricih melawan
4 anjakan. Variasi dari segi kedalaman benaman ini membolehkan perbandingan dan perbincangan
5 lanjut berdasarkan corak graf yang dihasilkan memberikan gambaran yang lebih mendalam tentang
6 bagaimana geometri sambungan mempengaruhi kekukuhan dan kapasiti daya ricih. Dalam model
7 pertama, plat jejaring dibenamkan 50 mm ke dalam kayu yang berfungsi sebagai rujukan untuk menilai
8 prestasi sambungan jejaring. Untuk mengkaji pengaruh kedalaman benaman terhadap graf kapasiti
9 daya ricih, kedalaman dinaikkan kepada 100 mm, 130 mm, dan 200 mm dan menghasilkan graf seperi
10 dalam Rajah 10. Apabila kedalaman benaman meningkat daripada 50 mm kepada 200 mm, kekukuhan
11 menurun daripada 739 N/mm kepada 568 N/mm, menunjukkan bahawa benaman yang lebih cetek
12 memberikan kekukuhan yang lebih tinggi dan menahan anjakan dengan lebih berkesan di bawah
13 beban, manakala benaman yang lebih dalam menghasilkan tindak balas yang lebih mulur kerana laluan
14 pemindahan beban yang lebih panjang dan ubah bentuk mampatan yang lebih besar dalam kayu. Ini
15 menunjukkan perubahan dalam nilai kekukuhan dan kemuluran, di mana benaman yang lebih cetek
16 sesuai untuk reka bentuk struktur yang memerlukan ketegaran (rigidity) tinggi anjakan (slip) minimum,
17 manakala benaman yang lebih dalam adalah lebih baik untuk ubah bentuk terkawal dan penyerapan
18 tenaga, bergantung pada keutamaan prestasi struktur. Satu parameter lagi yang diasas dalam kajian
19 ini ialah panjang plat jejaring untuk menilai kesannya terhadap kapasiti daya ricih dan tingkah laku
20 anjakan sambungan komposit kayu-konkrit. Konfigurasi rujukan menggunakan plat jejaring berukuran
21 180 × 100 mm dengan lebar dikekalkan malar pada 100 mm untuk semua model. Panjang plat jejaring
22 ditambah menjadi 130 mm, 150 mm, dan 230 mm dianalisis untuk menentukan sama ada
23 penambahan panjang dapat meningkatkan kekukuhan, menambah baik pemindahan beban, dan
24 mengurangkan anjakan. Graf kapasiti daya ricih melawan anjakan dan nilai kekukuhan ditunjukkan
25 dalam Rajah 11 dan Jadual 7 yang berkaitan, yang menggambarkan pengaruh panjang plat jejaring ke
26 atas prestasi sambungan.
27
28



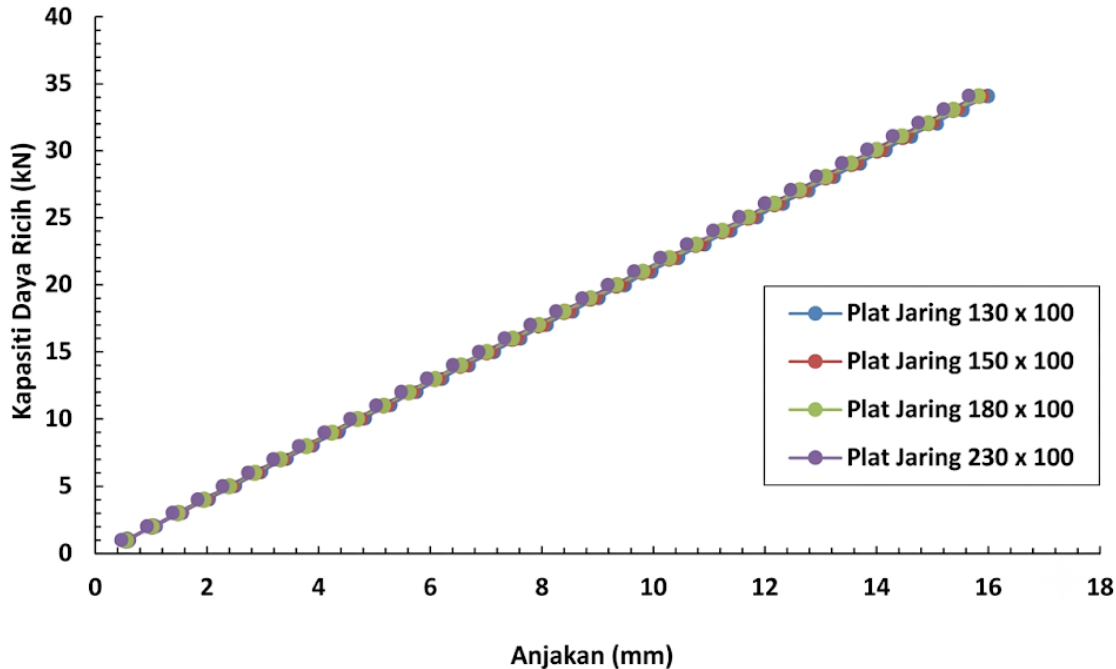
29
30
31 Rajah 10 : Graf Kapasiti Daya Ricih melawan anjakan untuk saiz kedalaman penumpuan yang berbeza

32
33
34 Jadual 6 : Perbandingan hasil keputusan mengikut kedalaman benaman plat jejaring dalam kayu yang berbeza.

Kedalaman benaman plat jejaring dalam kayu (mm)	Kapasiti Daya Ricih (kN)	Anjakan (mm)	Kekukuhan N/mm
50	97	52.48	739
100	97	57.01	681

130	97	60.31	643
200	97	68.36	568

1
2
3
4
5



6
7
8
9
10
11

Rajah 11 : Graf Kapasiti Daya Ricih melawan Anjakan untuk panjang plat jejaring yang berbeza

Jadual 7 : Pbandingan hasil Keputusan mengikut Panjang plat jejaring yang berbeza

Panjang plat jejaring (mm)	Beban (kN)	Anjakan (mm)	Kekukuhan N/mm
130 x 100	34	15.98	851
150 x 100	34	15.92	854
180 x 100	34	15.80	860
230x 100	34	15.62	871

12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29

Hasil menunjukkan bahawa mengubah panjang plat jejaring mempunyai kesan minimum pada tingkah laku anjakan sambungan kayu-konkrit, dengan beban maksimum kekal malar pada 34 kN untuk semua saiz. Konsistensi ini membolehkan penilaian yang lebih jelas tentang variasi anjakan dan kekukuhan. Apabila panjang bertambah, anjakan menurun sedikit, manakala kekukuhan bertambah baik. Sebagai contoh, plat terpendek, 130 × 100 mm, merekodkan anjakan tertinggi sebanyak 15.98 mm dan kekukuhan terendah pada 851 N/mm, mencerminkan sambungan yang lebih fleksibel, manakala plat terpanjang, 230 × 100 mm, menunjukkan pengurangan anjakan kepada 15.62 mm dan kekukuhan yang lebih tinggi pada 871 N/mm. Gambaran ini menunjukkan bahawa plat jejaring yang lebih panjang menawarkan rintangan yang sedikit lebih besar terhadap anjakan, meningkatkan kekukuhan tanpa mengubah kapasiti secara ketara. Secara keseluruhannya, walaupun pertambahan panjang plat meningkatkan kecekapan pemindahan beban, kesannya adalah sederhana berbanding dengan faktor seperti kedalaman benaman atau ketebalan plat, menjadikannya berguna untuk pengoptimuman bahan tanpa menjejaskan prestasi struktur.

RUMUSAN

Kajian ini telah membentangkan analisis terperinci mengenai sambungan plat jejaring dalam sistem Komposit Kayu-Konkrit (Timber-Concrete Composite - TCC) melalui pemodelan unsur terhingga (finite element modelling) menggunakan perisian LUSAS, yang disahkan terhadap kajian eksperimen oleh Manojlović et al. (2023), Tao et al. (2022), dan lain-lain. Simulasi tersebut menunjukkan keputusan yang baik dengan hanya perbezaan kecil pada beban dan anjakan (displacement), sekaligus mengesahkan ketepatan dan kebolehpercayaan model tersebut. Dua parameter utama—kedalaman benaman (embedment depth) dan panjang plat jejaring—telah diubah-ubah untuk menilai pengaruhnya terhadap prestasi mekanikal. Bagi kedalaman benaman, semua model mencapai beban maksimum yang sama iaitu 97 kN, tetapi peningkatan benaman dari 50 mm kepada 200 mm membawa kepada anjakan yang lebih tinggi dan pengurangan kekukuhan (slip modulus). Ini menunjukkan bahawa benaman yang lebih cetek memberikan sambungan yang lebih tegar (stiff), manakala benaman yang lebih dalam meningkatkan kemuluran (ductility) dan penyerapan tenaga. Sebaliknya, perubahan panjang plat jejaring dari 130 mm kepada 230 mm memberikan kesan yang lebih kecil; beban maksimum kekal malar pada 34 kN, dengan hanya sedikit pengurangan pada anjakan dan peningkatan kecil pada kekukuhan bagi plat yang lebih panjang. Penemuan ini menonjolkan keperluan untuk tolak ansur (trade-off) antara ketegaran dan kemuluran, serta menawarkan panduan untuk mengoptimalkan reka bentuk sambungan TCC: benaman yang cetek dan plat yang panjang meningkatkan ketegaran, manakala benaman yang dalam menyokong kemuluran dan pelepasan tenaga (energy dissipation). Untuk kajian pada masa hadapan, adalah dicadangkan agar rujukan menyediakan data simulasi yang lengkap, seperti tegasan permulaan (initiation stress) dan anjakan relatif, bagi meningkatkan ketepatan. Tambahan pula, kajian masa hadapan harus meneroka variasi dalam ciri-ciri fizikal plat jejaring—termasuk bentuk, ketebalan, dan corak tebuk (perforation pattern)—untuk lebih memahami faktor-faktor yang mempengaruhi ketegaran dan prestasi mekanikal secara keseluruhan.

Penghargaan

Para penulis merakamkan penghargaan atas pembiayaan yang diterima daripada Universiti Sains Malaysia di bawah geran jangka pendek (304/PAWAM/6315691) yang telah membantu menyokong penyelidikan ini.

References

- Auclair, S. C., Sorelli, L., & Salenikovitch, A. (2016). A new composite connector for timber-concrete composite structures. *Construction and Building Materials*, 112, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.025>
- Branco, J. M., Kekeliak, M., & Lourenco, P. B. (2015). In-plane stiffness of timber floors strengthened with CLT. *Eur. J. Wood Prod.*, 73, 313-323. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5_65
- Ceccotti, A. (2002). Composite concrete-timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 264–275. <https://doi.org/10.1002/pse.126>
- Ceccotti, A., Fragiaco, M., & Giordano, S. 2007. 'Long-term and collapse tests on a timber-concrete composite beam with glued-in connection', *Materials and Structures*, vol. 40, no. 1, pp. 15–25.
- CEN. (2004). Eurocode 5: Design of Timber Structures- Part 1- 1: General- Common Rules and Rules for Buildings. Brussel: BSI.
- Daňková, J., Pavel Mec, & Tereza Majstříková. (2016). Stiffness analysis of glued connection of the timber-concrete structure. *Open Engineering*, 6(1). <https://doi.org/10.1515/eng-2016-0028>
- Dias, A. M., Ferreira, M. C., Jorge, L. F., & Martins, H. M. (2011). Timber-concrete Practical Applications- Bridge Case Study. *Structures and Buildings*, 164(SB2), 131-141. <https://doi.org/10.1680/stbu.9.00061>
- Dias, A.M., Schanzlin, J., Dietsch, P., (2018). Design of timber-concrete composite structures. A state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 4
- Dragan Manojlović, Andrija Rašeta, Vladimir Vukobratović, Arpad Čeh, Ljiljana Kozarić, Đorđe Jovanović, & Anka Starčev-Čurčin. (2023). Simulation of Load–Slip Capacity of Timber–Concrete Connections with Dowel-Type Fasteners. *Buildings*, 13(5), 1171–1171. <https://doi.org/10.3390/buildings13051171>
- Glišović, I.; Stevanović, B.; Kočetrov-Mišulić, T. Embedment Test of Wood for Dowel-Type Fasteners. *Wood Res.*2012,57, 639–650.
- Jacquier N and Girhammar UA. (2014). Tests on glulam – CLT shear connections with double-sided punched metal plate fasteners and inclined screws. *Constr Build Material*, 72:444–57. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.095>
- Jockwer R, Frohlich R, Wydler J, Voulpiotis K, Schabel J, Frangi A. (2018) Deformation behaviour of highly loaded elements in tall timber buildings. In: *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2018)*, WCTE, Seoul, Korea;
- J. Mudie, W.M. Sebastian, J. Norman, I.P. Bond. (2021). Relative influences of cracking and connection yield on transverse distributions of moments and reactions in timber-concrete composites, *Engineering Structures*, Volume 236, 2021, 112090. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112090>.
- Mohd Snin, Mohd Amirul B., and Moustafa Moufid Kassem. "Novel Use of Scanning Methods to Investigate the Performance of Screw Connections in Timber- Concrete Composite Structures." *Advances in Civil Engineering*, vol. 2023, 3 June 2023, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1155/2023/4176805>
- Naud, N., Sorelli, L., Salenikovitch, A., & Cuerrier-Auclair, S. (2019). Fostering GLULAM-UHPFRC composite structures for multi-storey buildings. *Engineering Structures*, 188, 406–417. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.049>
- Shi, B., Zhou, X., Tao, H., Yang, H., & Wen, B. (2024). Long-Term Behavior of Timber–Concrete Composite Structures: A Literature Review on Experimental and Numerical Investigations. *Buildings*, 14(6), 1770. <https://doi.org/10.3390/buildings14061770>

- 1 Tao, H., Shi, B., Yang, H., Wang, C., Ling, X., & Xu, J. (2022). Experimental and finite element studies of prefabricated timber-
2 concrete composite structures with glued perforated steel plate connections. *Engineering Structures*, 268, 114778.
3 <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114778>
- 4 Yeoh, D., Fragiaco, M., De Franceschi, M., & Koh, H.(2011). The State of the Art on Timber-concrete Composite Structures-
5 a literature review. *Journal of Structural Engineering*, 137(10), 1085-1095. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000353](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000353)
6