

Prestasi Sambungan Rasuk ke Tiang Nib E Keluli Luaran pada Suhu Kebakaran Selulosa Menggunakan Analisis Struktur-Terma Berganding Tidak Linear (Comparison of External E Steel-Nib Beam-to-Column Connection Performance at Cellulose Fire Temperatures Using Nonlinear Coupled Thermal-Structural Analysis)

Noor Azim Mohd. Radzi^{a,b*}, Roszilah Hamid^{a,b}, Azrul A. Mutalib^{a,b} & A. B. M. A. Kaish^{a,b}

^aProgram Kejuruteraan Awam,

^bSmart and Sustainable Township Research Centre (SUTRA),

Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43650, UKM Bangi, Selangor Malaysia

*Corresponding author: noorazim@ukm.edu.my

Received 16 June 2024, Received in revised form 14 September 2024
Accepted 14 October 2024, Available online 30 May 2025

ABSTRAK

Sambungan rasuk ke tiang nib E keluli merupakan teknologi sambungan baru yang melibatkan kombinasi bahan konkrit dan keluli dalam struktur kerangka konkrit pratuang. Walaubagaimanapun, sambungan rasuk ke tiang nib E keluli bersifat separa tegar dengan rintangan momen yang lebih kecil dan putaran yang lebih besar berbanding sambungan tegar. Semasa kebakaran, sambungan separa tegar lebih mudah mengalami pesongan dan keretakan pada nilai beban yang rendah. Penggunaan bahan keluli menyebabkan pengurangan kekuatan dan perubahan bentuk yang ketara pada suhu tinggi. Dalam kajian ini, kelakuan terma dan struktur bagi sambungan rasuk ke tiang luaran jenis nib E keluli pada suhu tinggi ditentukan melalui analisis struktur-terma berganding tidak linear menggunakan ANSYS. Model sambungan disahkan berdasarkan keputusan eksperimen terdahulu. Kajian parametrik dibuat bagi membandingkan kelakuan terma dan struktur dengan sambungan jenis sesangga konkrit dan nib konkrit. Berdasarkan keputusan simulasi unsur terhingga, model nib E keluli berjaya disahkan dengan nilai perbezaan peratus taburan suhu dalaman dan kecerunan lengkung beban-pesongan di bawah 10 %. Model nib konkrit mencatatkan nilai pesongan terkecil iaitu 38 mm berbanding model sesangga konkrit dengan 47 mm dan model nib E keluli dengan 62 mm. Beban maksimum yang dicatatkan model sesangga konkrit (71 kN) adalah 26.7 % lebih tinggi berbanding beban maksimum yang dicatatkan model nib konkrit (56 kN). Model nib E keluli dan sesangga konkrit dikategorikan sebagai struktur dengan kemuluran terhad manakala model nib konkrit dikategorikan sebagai struktur dengan kelakuan elastik. Keputusan analisis struktur-terma berganding tidak linear dapat memberi manfaat kepada pelbagai pihak dalam bidang kejuruteraan kebakaran.

Kata kunci: Analisis unsur terhingga tidak linear; sambungan rasuk ke tiang; nib e keluli; rintangan kebakaran

ABSTRACT

The E steel-nib beam-to-column connection is a new connection technology involving a combination of concrete and steel materials in precast concrete frame structures. However, the E steel-nib beam-to-column connection is semi-rigid with lower moment resistance and greater rotation compared to rigid connections. During fires, semi-rigid connections are more prone to deflection and cracking at lower load values. The use of steel materials results in significant strength reduction and deformation at high temperatures. In this study, the thermal and structural behaviour of E steel-nib external beam-to-column connections at high temperatures is determined through nonlinear coupled thermal-structural analysis using ANSYS. The connection model is validated based on previous experimental results. A parametric study

was conducted to compare the thermal and structural behaviour with concrete corbel and concrete nib type connections. Based on the finite element simulation results, the E steel-nib model was successfully validated with a percentage difference in internal temperature distribution and load-deflection curvature slope below 10%. The concrete nib model recorded the smallest deflection at 38 mm compared to the concrete corbel model at 47 mm and the E steel-nib model at 62 mm. The maximum load recorded by the concrete corbel model (71 kN) was 26.7% higher than the maximum load recorded by the concrete nib model (56 kN). The E steel-nib and concrete corbel models are categorized as structures with limited ductility, while the concrete nib model is categorized as a structure with elastic behaviour. The results of the nonlinear coupled structural-thermal analysis can benefit various stakeholders in the field of fire engineering.

Keyword: Nonlinear finite element analysis; beam-to-column connection; e steel-nib; fire resistance

PENGENALAN

Penggunaan struktur kerangka konkrit pratuang dalam industri pembinaan global telah berkembang pesat kerana menawarkan kecekapan pengeluaran yang tinggi, kualiti produk yang lebih baik, dan penggunaan tenaga kerja yang rendah (Guaygua et al. 2023; Radzi et al. 2020, 2021; Xu et al. 2024). Komponen sambungan dalam struktur kerangka konkrit pratuang memainkan peranan penting dalam memastikan tahap integriti, kekuatan, kekukuhan, dan kemuluran struktur yang direka bentuk dipatuhi (Elliott 2017; Ghayeb et al. 2020; He et al. 2017). Sambungan rasuk ke tiang merupakan komponen sambungan yang kritikal dalam struktur kerangka konkrit pratuang (CIDB 2017; He et al. 2017).

Salah satu pertimbangan penting dalam reka bentuk struktur konkrit pratuang adalah pendedahan terhadap kebakaran (Elliott 2017; Mohammed & Inamdar 2018). Menurut Eurocodes (European Committee For Standardization 2011), kebakaran dikelaskan sebagai beban yang tidak disengajakan yang perlu diambil kira dalam proses reka bentuk. Prestasi sambungan rasuk ke tiang konkrit pratuang terhadap kebakaran dinilai berdasarkan kelakuan terma dan struktur sambungan. Kelakuan terma sambungan merangkumi ciri taburan suhu dalaman konkrit, perubahan visual konkrit, dan keadaan serpihan konkrit setelah didedahkan pada suhu tinggi. Kelakuan struktur sambungan pula merangkumi lengkung momen-putaran relatif dan lengkung beban-pesongan apabila dikenakan beban sehingga gagal. Kegagalan sambungan rasuk ke tiang semasa kebakaran memberi kesan penting terhadap struktur kerangka konkrit pratuang. Disebabkan integriti yang rendah, struktur kerangka konkrit pratuang dianggap lebih mudah terdedah terhadap keruntuhan progresif berbanding struktur kerangka konkrit tuang di situ (Qian et al. 2019).

Selain sambungan rasuk ke tiang konkrit pratuang jenis sesangga konkrit dan nib konkrit yang banyak digunakan di dalam industri pembinaan (Guaygua et al. 2023; Radzi et al. 2020), sambungan rasuk ke tiang konkrit pratuang jenis hibrid iaitu nib E keluli merupakan teknologi sambungan baru yang melibatkan kombinasi bahan konkrit

dan keluli (S. Bahrami & Madhkhan 2019; Saeed Bahrami et al. 2017; Radzi 2023). Nib E keluli dikimpal pada tetulang tiang untuk memberikan kekuatan ricih dan kestabilan yang mencukupi. Rasuk konkrit separa pratuang diletakkan di atas nib E keluli sebelum tetulang bebanang di bahagian bawah diketatkan dengan nat dan tuangan konkrit tambahan di atas rasuk.

Seperti struktur keluli lain, penggunaan bahan keluli lebih berisiko terhadap kebakaran berbanding penggunaan bahan konkrit disebabkan oleh pengurangan kekuatan dan perubahan bentuk yang ketara pada suhu tinggi (Xu et al. 2024). Penilaian terhadap sambungan rasuk ke tiang keluli menunjukkan pengurangan lengkung momen-putaran yang mendadak dengan peningkatan suhu (Al-Jabri et al. 2008). Pada suhu 700 °C, rintangan momen untuk sambungan plat hujung sedatar keluli berkurangan 80 % dari nilai momen asal pada suhu ambien. Kajian oleh Rahnavard & Thomas (2018) ke atas pelbagai jenis sambungan keluli yang menggunakan kaedah bolt dan kimpalan menunjukkan perubahan dalam tingkah laku kapasiti momen serta kekukuhan apabila suhu meningkat. Walaubagaimanapun, tiada kajian khusus yang dibuat bagi membandingkan prestasi sambungan rasuk ke tiang nib E keluli dengan sambungan rasuk ke tiang konkrit pratuang jenis sesangga konkrit dan nib konkrit.

Dalam kajian ini, kelakuan terma dan struktur bagi sambungan rasuk ke tiang luaran jenis nib E keluli pada suhu tinggi ditentukan melalui analisis struktur-terma berganding tidak linear menggunakan ANSYS. Model sambungan rasuk ke tiang nib E keluli disahkan berdasarkan keputusan eksperimen terdahulu (Radzi 2023). Seterusnya, kajian parametrik dibuat bagi membandingkan kelakuan terma dan struktur sambungan rasuk ke tiang nib E keluli dengan sambungan rasuk ke tiang konkrit pratuang jenis sesangga konkrit dan nib konkrit (CIDB 2017; JKR 2020).

SPESIMEN EKSPERIMEN TERDAHULU

Kajian ini dibuat dengan merujuk kepada spesimen eksperimen terdahulu oleh Radzi (2023). Rekabentuk rasuk

dan tiang konkrit pratuang disediakan mengikut BS 8110:1997 (BSI 1997) yang terdapat di dalam Katalog IBS CIDB (CIDB 2019) seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 1 dan Jadual 2. Saiz bagi rasuk dan tiang masing-masing

adalah $200 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ dan $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$. Panjang rasuk jurul adalah 1250 mm, manakala tinggi tiang pula adalah 2225 mm.

JADUAL 1. Reka bentuk rasuk

Saiz Rasuk (mm)	Panjang (mm)	Reka bentuk Muktamad			Tetulang Tegangan	Tetulang Ricih
		Beban Agihan Seragam, w (kN/m)	Momen Maksimum di Tengah Rentang dan Sokong (kNm)	Ricih (kN)		
200×450	1250	27	31	49	2T16	R10-250

Sumber: Radzi (2023)

JADUAL 2. Reka bentuk tiang

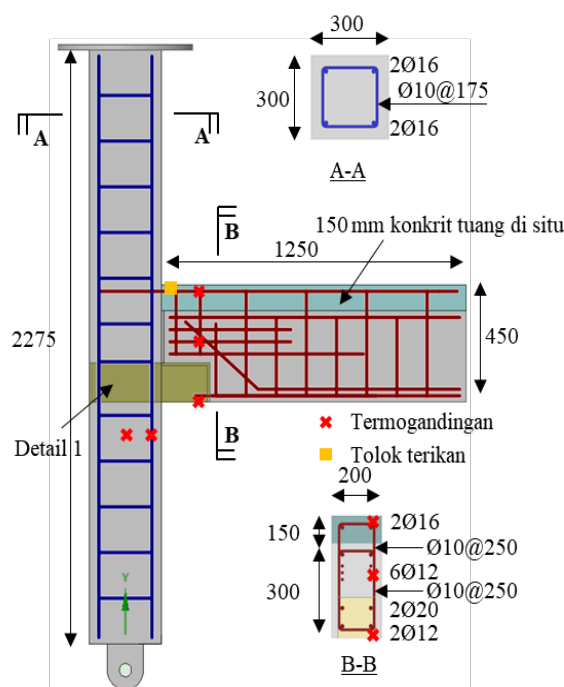
Saiz Tiang (mm)	Tinggi (mm)	Berat Sendiri (Pratuang) (kN/m)	Peringkat Akhir Reka bentuk		Perincian Tetulang	
			Beban Paksi Maksimum (kN)	Momen Maksimum (kNm)	Tetulang Utama	Tetulang Pengikat
300×300	2225	2.16	630	59	4T16	R10-175

Sumber: Radzi (2023)

Rasuk direka bentuk sebagai disokong mudah semasa pemasangan dan sebagai selangar semasa peringkat akhir. Bagi rasuk, tetulang tegangan yang digunakan adalah 2T16 dengan tetulang ricih R10-250. Bagi tiang, tetulang utama adalah 4T16 dengan tetulang pengikat adalah R10-175. Kekuatan minimum konkrit tuang di situ dan konkrit pratuang adalah gred C25 pada peringkat awalan rekabentuk dan gred C35 pada peringkat akhir rekabentuk. Tempoh rintangan kebakaran adalah dua jam dengan ketebalan penutup konkrit 25 mm. Kekuatan alah tetulang besi tegangan tinggi, $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$ manakala tetulang besi tegangan sederhana, $f_y = 250 \text{ N/mm}^2$. Rekabentuk sambungan rasuk ke tiang nib E keluli disediakan mengikut Saeed Bahrami et al. (2017). Plat nib E keluli setebal 10 mm dikimpal pada tetulang tiang untuk memberikan kekuatan ricih dan kestabilan yang mencukupi. Rasuk disambung ke tiang menggunakan bolt bersaiz 20 mm, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Rajah 2 pula menunjukkan specimen makmal sebenar.

Kaedah eksperimen bebanan terma pada suhu tinggi dibuat berdasarkan piawai ISO 834 (ISO 1999). Beban paksi malar 10 kN dikenakan ke atas tiang dan kekal sepanjang eksperimen. Seterusnya, pemanasan selama 120 minit menggunakan relau pemanas dibuat berdasarkan lengkung kebakaran selulosa. Beban khidmat malar 10 kN dikenakan pada hujung rasuk sepanjang tempoh pemanasan. Selepas 120 min pemanasan, beban statik pada kadar 5 kN/min dikenakan secara meningkat pada hujung rasuk sehingga sambungan gagal. Pemeriksaan visual dibuat terhadap specimen yang gagal. Data dari perakam suhu

dan pencatat data dianalisis. Perhatian diberikan terhadap taburan suhu dalaman, corak keretakan dan mod kegagalan sambungan, lengkung beban – terikan tetulang, lengkung momen – putaran, dan lengkung beban-pesongan. Suhu $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ditetapkan sebagai suhu kritikal bagi konkrit dan tetulang keluli seperti yang diterangkan oleh Maraveas & Vrakas (2014).



RAJAH 1. Perincian specimen nib E keluli (Radzi 2023)



RAJAH 2. Spesimen makmal nib E keluli (Radzi 2023)

METODOLOGI

PROSES SIMULASI

Dalam kajian ini, terdapat tiga model sambungan rasuk ke tiang yang terlibat iaitu model nib E keluli (EN-ST), model sesangga konkrit (S-ST), dan model nib konkrit (N-ST), seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 3.

JADUAL 3. Kod model unsur terhingga

Jenis Sambungan	Kod Model
Nib E keluli	EN-ST
Sesangga konkrit	S-ST
Nib konkrit	N-ST

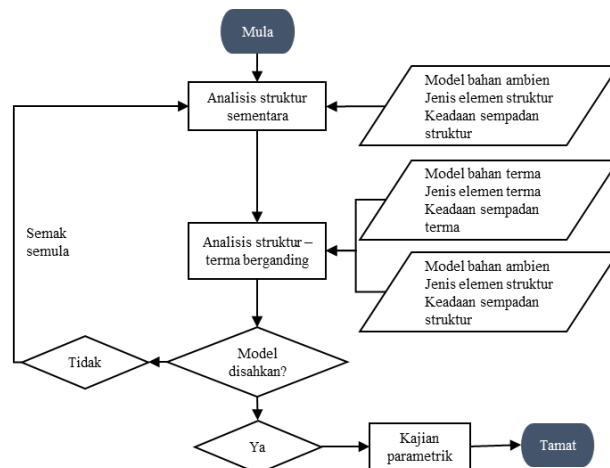
Rajah 3 menunjukkan carta alir simulasi unsur terhingga menggunakan ANSYS. Dua jenis analisis terlibat

iaitu analisis struktur sementara dan analisis struktur – terma berganding. Bagi analisis struktur sementara, proses dimulakan dengan pemodelan geometri, diikuti dengan penghasilan unsur terhingga melalui jejaring. Tiga input utama dimasukkan iaitu model bahan ambien, jenis elemen struktur, dan keadaan sempadan struktur. Setelah itu, analisis struktur dibuat bagi mendapatkan kapasiti muksamad struktur pada suhu ambien.

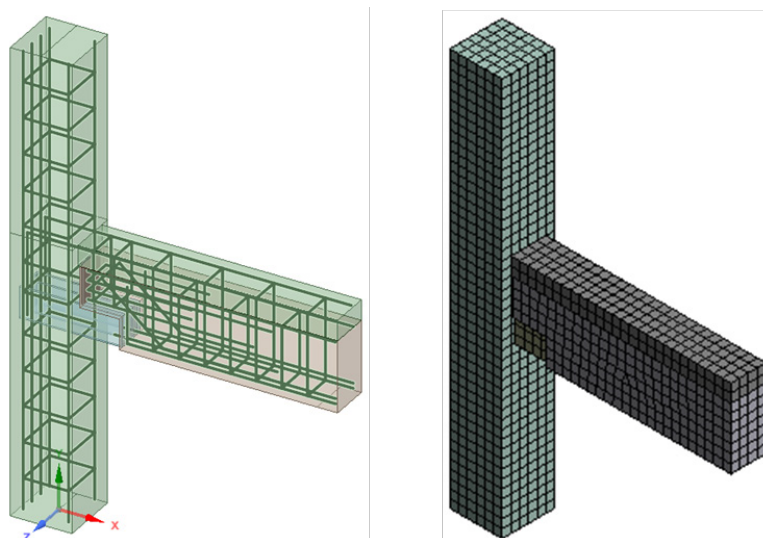
Bagi analisis struktur – terma berganding, proses dimulakan dengan pemodelan geometri, diikuti dengan penghasilan unsur terhingga melalui jejaring. Tiga input utama dimasukkan iaitu model bahan terma, jenis elemen terma, dan keadaan sempadan terma. Setelah itu, analisis terma dibuat bagi mendapatkan kapasiti muksamad terma pada suhu tinggi. Analisis diteruskan dengan menukar tiga input terma kepada model bahan ambien, jenis elemen struktur, dan keadaan sempadan struktur. Setelah itu, analisis struktur dibuat bagi mendapatkan kapasiti muksamad struktur setelah dipanaskan pada suhu tinggi.

Seterusnya, kedua-dua keputusan analisis dibandingkan dengan keputusan eksperimen terdahulu (Radzi 2023) bagi tujuan pengesahan model unsur terhingga. Model yang disahkan adalah model nib E keluli. Sekiranya keputusan tidak disahkan, proses akan kembali semula ke peringkat awal simulasi. Sekiranya keputusan disahkan, model akan digunakan untuk kajian parametrik dengan sambungan rasuk ke tiang konkrit pratuang jenis sesangga konkrit dan nib konkrit. Tumpuan diberikan terhadap perbandingan lengkung beban-pesongan pada suhu tinggi. Pemodelan geometri dibuat menggunakan perisian tambahan oleh ANSYS iaitu SpaceClaim 2021 R2.

Rajah 4 menunjukkan model geometri dan penghasilan unsur terhingga melalui jejaring bagi model EN-ST. Dalam kajian ini, saiz jejaring 50 mm dipilih berdasarkan keputusan analisis penumpuan. Jenis jejaring yang dipilih adalah bersifat linear dan berbentuk hexahedral dengan enam permukaan.



RAJAH 3. Carta alir simulasi unsur terhingga



RAJAH 4. Model geometri dan penghasilan unsur terhingga

MODEL BAHAN DAN JENIS ELEMEN

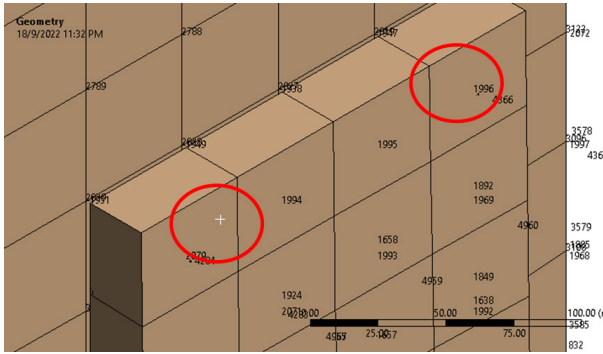
Untuk analisis terma sementara, model bahan terma adalah berkadar dengan perubahan suhu iaitu ketumpatan, haba tentu dan kekonduksian terma. Manakala untuk analisis struktur sementara, model bahan tidak berkadar dengan suhu seperti bahagian isotropik elastik linear, keplastikan pengerasan kinematik bebas kadar tak linear (keplastikan Mises), dan konkrit keplastikan bukan logam. Dalam kajian ini, pemilihan model bahan dibuat berdasarkan model Eurocode yang digunakan oleh Elshorbagy & Abdel-Mooty (2020). Butiran lanjut boleh dirujuk terhadap rujukan tersebut.

Jenis elemen pula diterangkan oleh ANSYS (ANSYS Inc. 2010). Untuk analisis terma sementara, elemen SOLID278 digunakan untuk konkrit, turapan, dan plat keluli, manakala elemen REINF264 digunakan untuk tetulang besi. Untuk analisis struktur sementara, elemen SOLID185 digunakan untuk konkrit, turapan, dan plat keluli, manakala elemen REINF264 digunakan untuk tetulang besi. SOLID278 mempunyai keupayaan pengaliran terma 3-D. Elemen ini mempunyai lapan nod dengan satu darjah kebebasan dan suhu pada setiap nod. SOLID185 pula mempunyai keupayaan keplastikan, hiperkeplastikan, pengukuhan tegasan, rayapan, lenturan besar, dan terikan besar. REINF264 mempunyai keupayaan keplastikan, pengukuhan tegasan, rayapan, lenturan besar, dan terikan besar.

PENGESAHAN MODEL

Pengesahan model unsur terhingga bagi sambungan rasuk ke tiang pada suhu ambien dan suhu tinggi dibuat dalam dua peringkat sebagaimana kajian oleh Ezekiel (2015) dan Elshorbagy & Abdel-Mooty (2020). Pada peringkat pertama, keputusan dari analisis terma sementara disahkan dengan keputusan eksperimen bebanan terma pada suhu tinggi oleh Radzi (2023). Pengesahan dibuat terhadap taburan suhu dalaman pada tetulang besi. Proses dimulakan dengan memotong keratan rentas pada bahagian sambungan. Kemudian, nombor nod diaktifkan bagi mengetahui ID bagi kedudukan tetulang seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5. Bulatan merah menunjukkan kedudukan bagi tetulang besi atas. Setelah itu, nilai taburan suhu dalaman bagi ID ini dianalisis dan dibandingkan dengan keputusan eksperimen.

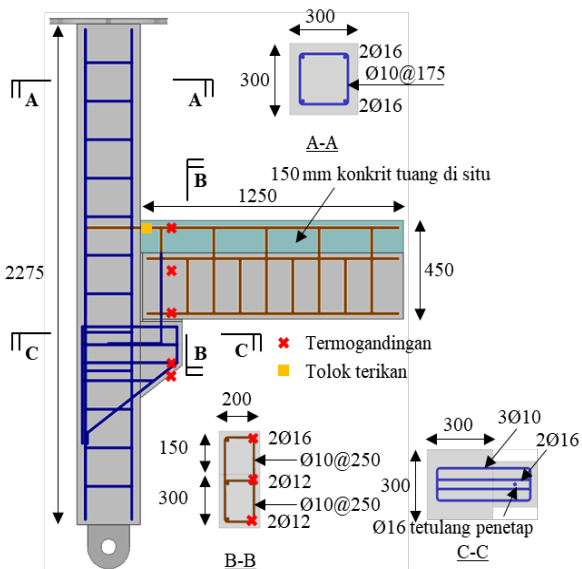
Pada peringkat kedua pula, keputusan dari analisis struktur sementara bagi suhu ambien dan suhu tinggi disahkan dengan eksperimen di makmal. Pengesahan dibuat terhadap lengkung beban – pesongan dengan keputusan yang diperoleh oleh (Radzi 2023). Dalam kajian ini, kesan serpihan konkrit dan formasi suhu mendatar pada suhu 100 °C hingga 120 °C berlaku disebabkan proses penyejatan air bebas dan air terikat secara kimia dari kalsium silika hidrat (CSH) tidak diambilkira. Nilai peratus perbezaan di antara simulasi unsur terhingga dengan eksperimen ditetapkan pada maksimum 15 %.



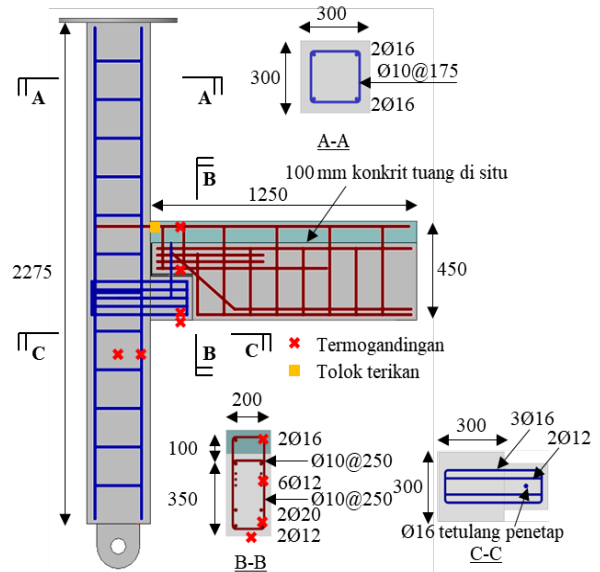
RAJAH 5. Nombor nod bagi kedudukan tetulang

KAJIAN PARAMETRIK

Kajian parametrik dilakukan berdasarkan model EN-ST yang telah disahkan. Perbandingan dibuat terhadap model S-ST dan model N-ST berdasarkan Katalog IBS CIDB (CIDB 2019) dan Katalog IBS JKR (JKR 2020), seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6 dan Rajah 7. Dua jenis analisis terlibat iaitu analisis struktur sementara dan analisis struktur-terma berganding. Model-model tersebut didedahkan kepada suhu tinggi selama 120 minit sebelum beban statik pada kadar 5 kN/min dikenakan secara beransur-ansur pada hujung rasuk sehingga sambungan mengalami kegagalan.



RAJAH 6. Perincian tetulang bagi model sesangga konkrit (CIDB 2017; JKR 2020)



RAJAH 7. Perincian tetulang bagi model nib konkrit (CIDB 2017; JKR 2020)

Seterusnya, kategori prestasi struktur bangunan bagi ketiga-tiga model ditentukan seperti dalam Jadual 4 berdasarkan faktor kemuluran, R mengikut persamaan berikut:

$$(1)$$

di mana δ_u ialah pesongan muktamad dan δ_y ialah pesongan alah.

JADUAL 4. Kategori prestasi struktur mengikut faktor kemuluran

Kategori prestasi struktur	Faktor Kemuluran, R	
	Park (1988)	Budescu (2009)
Struktur dengan kelakuan elastik	1, 1.5, 2, 2.5	1.25
Struktur dengan kemuluran terhad	3, 3.5, 4, 4.5	2 hingga 3
Struktur dengan kemuluran penuh	5.3	5 hingga 6

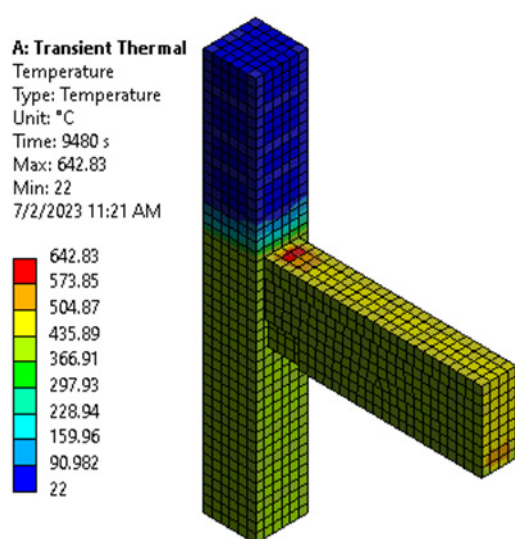
Sumber: R.Park 1988 dan Budescu 2009

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

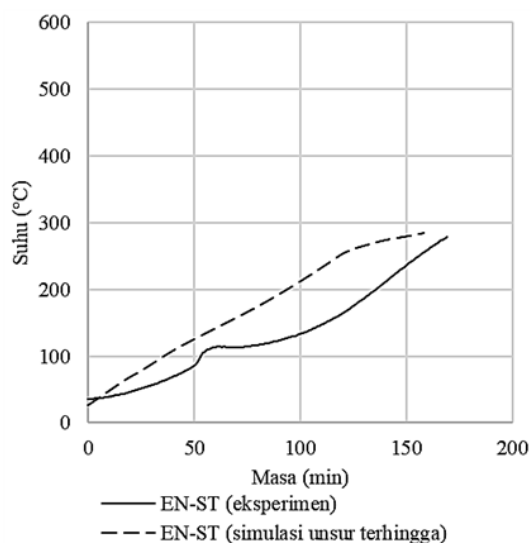
PENGESAHAN MODEL UNSUR TERHINGGA

Rajah 8 menunjukkan pemanasan model unsur terhingga pada suhu tinggi menggunakan perisian ANSYS. Rajah 9 pula menunjukkan perbandingan keputusan taburan suhu dalaman spesimen eksperimen dengan model unsur terhingga pada suhu tinggi. Penilaian mendapati taburan

suhu dalaman pada 50 min pertama pembakaran menunjukkan keseragaman yang baik di antara kedua-dua keputusan spesimen eksperimen dengan model unsur terhingga. Perbezaan nilai suhu bagi model EN-ST pada suhu tinggi adalah kecil iaitu 6 %. Selepas tempoh 50 min pembakaran, lengkung suhu – masa simulasi unsur terhingga mula menunjukkan perbezaan. Perbezaan lengkung suhu – masa simulasi unsur terhingga bagi kedua-dua keputusan spesimen eksperimen dengan model unsur terhingga adalah 10 %. Peratus perbezaan berada di dalam julat taburan suhu dalaman kajian (10 %) oleh (Kodur & Shakya 2014) dan (Elshorbagy & Abdel-Mooty 2020) sekaligus mengesahkan model unsur terhingga ini.

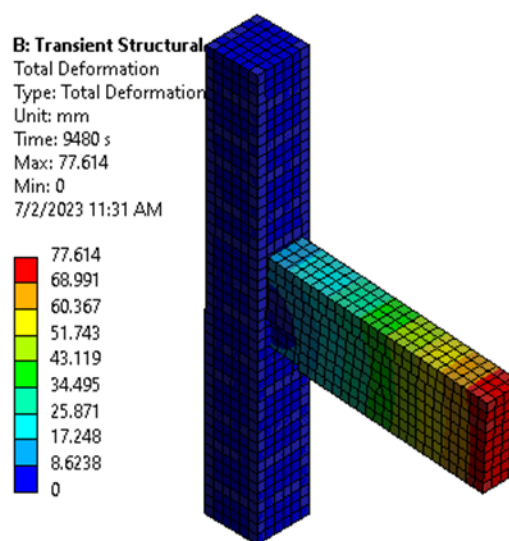


RAJAH 8. Pemanasan model unsur terhingga pada suhu tinggi

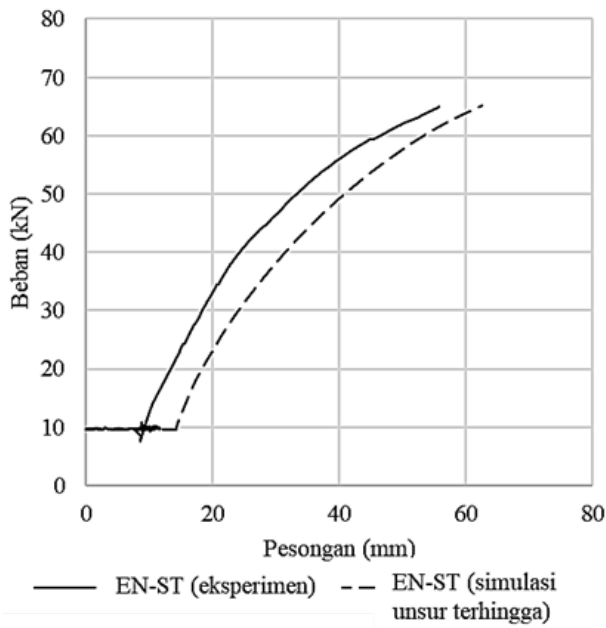


RAJAH 9. Perbandingan keputusan taburan suhu dalaman pada suhu tinggi di antara model EN-ST dengan eksperimen terdahulu (Radzi 2023)

Rajah 10 menunjukkan pesongan model unsur terhingga pada suhu tinggi menggunakan perisian ANSYS. Rajah 11 pula menunjukkan perbandingan lengkung beban-pesongan pada suhu tinggi di antara spesimen eksperimen dengan model unsur terhingga. Penilaian mendapati kecerunan lengkung beban-pesongan bagi model unsur terhingga adalah seragam dengan kecerunan lengkung beban-pesongan spesimen eksperimen. Perbezaan utama adalah disebabkan oleh pesongan yang berlaku semasa proses pembakaran. Berdasarkan keputusan tersebut, model EN-ST berjaya disahkan. Nilai peratus perbezaan pesongan maksimum didapati berada di bawah 10 %. Model EN-ST mencatatkan nilai peratus perbezaan pesongan maksimum 6 %. Sebagai perbandingan dengan kajian terdahulu, model konkrit monolitik pada suhu tinggi oleh Song, Han & Tao (2016) dan Elshorbagy & Abdel-Mooty (2020) masing-masing mencatatkan nilai peratus perbezaan pesongan maksimum 15 % dan 7 %. Keputusan simulasi unsur terhingga dengan kecerunan yang lebih atau kurang dari kecerunan eksperimen memastikan faktor keselamatan yang lebih tinggi serta kebolehpercayaan model unsur terhingga sebagaimana yang dinyatakan oleh Islam et al. (2014).



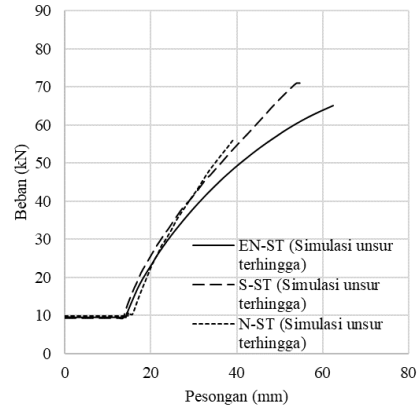
RAJAH 10. Pesongan model unsur terhingga pada suhu tinggi



RAJAH 11. Perbandingan lengkung beban-pesongan pada suhu tinggi di antara model EN-ST dengan eksperimen terdahulu (Radzi 2023)

KAJIAN PARAMETRIK

Rajah 12 menunjukkan perbandingan lengkung beban-pesongan pada suhu tinggi di antara model EN-ST dalam kajian ini dengan model S-ST dan N-ST (CIDB 2019; JKR 2020). Semasa proses pemanasan dengan beban khidmat malar 10 kN, pesongan berlaku pada hujung rasuk bagi semua model, sebagaimana eksperimen oleh Radzi (2023). Lengkung beban-pesongan bagi model N-ST mencatatkan nilai pesongan terkecil iaitu 38 mm berbanding model S-ST dengan 47 mm dan model EN-ST dengan 62 mm. Beban maksimum yang dicatatkan model S-ST (71 kN) adalah 26.7 % lebih tinggi berbanding beban minimum yang dicatatkan model N-ST (56 kN). Pesongan tinggi yang dicatatkan model EN-ST adalah disebabkan oleh keretakan tegangan yang berlaku pada bahagian atas rasuk di permukaan tiang pada beban 33 kN.



RAJAH 12. Perbandingan lengkung beban-pesongan pada suhu tinggi di antara model EN-ST dengan model S-ST dan N-ST (CIDB 2019; JKR 2020)

Jadual 5 menunjukkan faktor kemuluran dan kategori prestasi struktur bagi model sambungan rasuk ke tiang pada suhu tinggi. Model EN-ST dan S-ST masing – masing mencatatkan nilai faktor kemuluran 2.38 dan 2.14. Berdasarkan kategori kategori prestasi struktur dalam Jadual 4, Model EN-ST dan S-ST dikategorikan sebagai struktur dengan kemuluran terhad. Model EN-ST dan S-ST mampu mengalami ubah bentuk tak anjal selepas keretakan pertama dan boleh mengekalkan kekuatan yang mencukupi untuk menyokong beban selanjutnya dan memberi amaran kegagalan untuk mengelakkan keruntuhan mutlak. Sambungan dengan kemuluran terhad adalah penting dalam reka bentuk rintangan gempa bumi dan struktur yang terdedah kepada beban dinamik, kerana mampu untuk mengagihkan semula daya dan mengekalkan kapasiti menanggung beban walaupun setelah mengalami pesongan yang ketara.

Sementara itu, model N-ST pula mencatatkan faktor kemuluran 1.58 dan dikategorikan sebagai struktur dengan kelakuan elastik dan bersifat lebih rapuh berbanding model EN-ST dan S-ST. Sambungan rasuk ke tiang yang rapuh mempunyai kecenderungan untuk gagal secara tiba-tiba dan tanpa amaran di bawah beban tinggi atau daya luaran. Sambungan ini biasanya mempunyai kapasiti pesongan yang minima. Disebabkan keupayaan terhad mereka untuk menyerap tenaga, sambungan rapuh boleh menyebabkan kegagalan struktur secara tiba-tiba dan bencana.

JADUAL 5. Faktor kemuluran dan kategori prestasi struktur bagi model pada suhu tinggi

Model sambungan	Pesongan pada Alah (mm) [1]	Pesongan Maksimum (mm) [2]	Faktor Kemuluran =	Kategori prestasi struktur (Jadual 4)
EN-ST	26	62	2.38	Struktur dengan kemuluran terhad
S-ST	22	47	2.14	Struktur dengan kemuluran terhad
N-ST	24	38	1.58	Struktur dengan kelakuan elastik

KESIMPULAN

Berdasarkan keputusan yang diperoleh dari analisis struktur-terma berganding tidak linear ini, kesimpulan berikut boleh dibuat:

1. Model nib E keluli berjaya disahkan dengan nilai perbezaan peratus taburan suhu dalaman dan kecerunan lengkung beban-pesongan di bawah 10 %.
2. Berdasarkan lengkung beban-pesongan, model nib konkrit mencatatkan nilai pesongan terkecil iaitu 38 mm berbanding model sesangga konkrit dengan 47 mm dan model nib E keluli dengan 62 mm. Beban maksimum yang dicatatkan model sesangga konkrit (71 kN) adalah 26.7 % lebih tinggi berbanding beban maksimum yang dicatatkan model nib konkrit (56 kN).
3. Model nib E keluli dan sesangga konkrit dikategorikan sebagai struktur dengan kemuluran terhad di mana mampu mengalami ubah bentuk tak anjal selepas keretakan pertama dan boleh mengekalkan kekuatan yang mencukupi untuk menyokong beban selanjutnya.
4. Model nib konkrit dikategorikan sebagai struktur dengan kelakuan elastik di mana lebih cenderung untuk gagal secara tiba-tiba dan tanpa amaran di bawah beban tinggi atau daya luaran.
- 5.

PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia atas sokongan kewangan di bawah geran penyelidikan GUP-2018-027, DIP-2019-002, dan MUTIARA-A165894.

PENGISYTIHARAN KONFLIK KEPENTINGAN

Tiada.

RUJUKAN

Abbas, A., Salloom, G., RuddAl-Jabri, K.S., Davison, J.B. & Burgess, I.W. 2008. Performance of beam-to-column joints in fire-A review. *Fire Safety Journal* 43(1): 50–62.

- ANSYS Inc. 2010. *Mechanical APDL Element Reference*. Vol. 15317.
- Bahrami, S. & Madhkhan, M. 2019. Performance of the Modified Precast Beam to Column Connection Placed on a Concrete Corbel. *Civil Engineering Infrastructures Journal*.
- Bahrami, Saeed, Madhkhan, M., Shirmohammadi, F. & Nazemi, N. 2017. Behavior of two new moment resisting precast beam to column connections subjected to lateral loading. *Engineering Structures* 132: 808–821.
- BSI. 1997. Structural use of concrete - Code of practice for design and construction. *BS 8110-1:1997*.
- CIDB. 2017. IBS Catalogue for Precast Concrete Building System Revision 2017. *Construction Industry Development Board Malaysia* 1(1): 120–132.
- CIDB. 2019. IBS Catalogue for Precast Building System Vol 1. *CIDB Malaysia* 53(9): 1689–1699.
- Elliott, K.S. 2017. Precast Concrete Structures. *CRC Press* 1–681.
- Elshorbagy, M. & Abdel-Mooty, M. 2020. The coupled thermal-structural response of RC beams during fire events based on nonlinear numerical simulation. *Engineering Failure Analysis* 109(November 2019): 104297.
- European Committee For Standardization. 2011. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Report No. .
- Ezekiel, S. 2015. Fire Resistance Simulation for High Strength Reinforced Concrete. London South Bank University.
- Ghayeb, H.H., Razak, H.A. & Ramli Sulong, N.H. 2020. Performance of dowel beam-to-column connections for precast concrete systems under seismic loads: A review. *Construction and Building Materials* 237: 117582.
- Guaygua, B., Sánchez-Garrido, A.J. & Yepes, V. 2023. A systematic review of seismic-resistant precast concrete buildings. *Structures*.
- He, W., Yin, Z., Weijun, G. & Student, D. 2017. A Review of Precast Concrete Building Development in Different Countries. In *Proceedings of 128th The IIER International Conference, Auckland, New Zealand*. pp. 8–11.
- Islam, M.M., Khatun, M.S., Ul Islam, M.R., Dola, J.F., Hussan, M. & Siddique, A. 2014. Finite element analysis of steel fiber reinforced concrete (SFRC): Validation of experimental shear capacities of beams. *Procedia Engineering* 90(December): 89–95.
- ISO. 1999. Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements. *ISO 834-1*.
- JKR. 2020. JKR IBS Catalogue 2020. *Jabatan Kerja Raya Malaysia*.

- Kodur, V.K.R.R. & Shakya, A.M. 2014. Modeling the response of precast, prestressed concrete hollow-core slabs exposed to fire. *PCI Journal* 59(3): 78–94.
- Maraveas, C. & Vrakas, A.A. 2014. Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*.
- Mohammed, S. & Inamdar, A. 2018. Joints and Connections in Precast Concrete Buildings 7(6): 2017–2019.
- Olteanu, I., Ciongradi, I.-P., Anechitei, M. & Budescu, M. 2009. The Ductile Design Concept for Seismic Actions in Miscellaneous Design Codes (Lix): 4–11.
- Qian, K., Liang, S.L., Fu, F. & Fang, Q. 2019. Progressive collapse resistance of precast concrete beam-column sub-assemblages with high-performance dry connections. *Engineering Structures* 198.
- R.Park. 1988. Ductility Evaluation From Laboratory And Analytical Testing. *Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing* 607.
- Radzi, N.A.M. 2023. Kelakuan Terma dan Struktur Sambungan Rasuk ke Tiang Konkrit Pratuang Luaran Pada Suhu Tinggi. *Ph.D Thesis*. Ph.D Thesis, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Radzi, N.A.M., Hamid, R., Mutalib, A.A. & Amrul Kaish, A.B.M. 2020. A review of precast concrete beam-to-column connections subjected to severe fire conditions. *Advances in Civil Engineering* 2020(November).
- Radzi, N.A.M., Hamid, R., Mutalib, A.A. & Kaish, A.A. 2021. A Review of the Structural Fire Performance Testing Methods for Beam-to-Column Connections. *Advances in Civil Engineering* 1–36.
- Rahnavard, R. & Thomas, R.J. 2018. Numerical evaluation of the effects of fire on steel connections; Part 1: Simulation techniques. *Case Studies in Thermal Engineering* 12(November 2018): 445–453.
- Song, T.Y., Han, L.H. & Tao, Z. 2016. Performance of Steel-Reinforced Concrete Beam-to-Column Joints after Exposure to Fire. *Journal of Structural Engineering (United States)* 142(10).
- Xu, J., Chong, X. & Han, J. 2024. Fire resistance and flexural load capacity of beam-column welded-bolted hybrid connection joints under post-earthquake fire. *Structures*.