

# SIMULASI NUMERIK KEGAGALAN BALOK BAJA ALUMINIUM BERLUBANG MENGGUNAKAN SKEMA *THREE-POINT LOADING*

Michelle Karen Julia Ie<sup>1</sup> dan Andy Prabowo<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara

Jl. Letjen S. Parman No 1 Jakarta

\*Corresponding authors: [andy.prabowo@ft.untar.ac.id](mailto:andy.prabowo@ft.untar.ac.id)

**Abstract:** The aluminium steel structures have relatively long term durability, high strength-to-weight ratio, and corrosion resistance. Investigations on the strength and performance of aluminium structures, both as a structural beam and column, can be found in various existing literature. However, studies that investigate the behaviour and strength of aluminium beams with a web hole remain scarce to date, even though the hole can accommodate building utility lines going through a structural element. This research aims to study the behaviour and strength of perforated aluminium beams using finite element modelling to simulate failure due to a three-point loading scheme. The finite element (FE) model in this study employed two approaches: full-section modelling and half-section modelling, which were then compared to the referred experimental test results. In total, 14 test specimens were built in the FE models, where the failure modes as well as the moment versus curvature curves obtained from the FE models, were quite similar to the test results. Furthermore, failure loads obtained from the test and FE models were very close, with the mean of test-to-FE loads was 0.97 and the coefficient of variation (COV) of 0.038 at maximum. It demonstrates that the numerical model developed in this study is valuable for further parametric study of the aluminium perforated beam, which fails under a three-point loading scheme.

**Keywords:** perforated aluminium beam; finite element model; three-point loading scheme

**Abstrak:** Struktur baja dengan material aluminium memiliki durabilitas yang relatif panjang, rasio antara kekuatan dan berat yang tinggi, dan tahanan terhadap karat. Investigasi mengenai kekuatan dan kinerja struktur aluminium, baik sebagai balok maupun kolom, dapat dijumpai pada beberapa literatur yang ada. Namun demikian, studi yang menginvestigasi perilaku dan kekuatan balok aluminium dengan lubang pada badan masih jarang sampai sekarang, walaupun adanya lubang dapat mengakomodasi jalur pipa utilitas gedung yang menembus sebuah elemen struktur. Penelitian ini bertujuan mempelajari perilaku dan kekuatan balok aluminium berlubang dengan menggunakan pemodelan elemen hingga untuk mensimulasi kegagalan akibat skema *three-point loading*. Model elemen hingga (MEH) pada penelitian ini menggunakan dua pendekatan, yaitu model penampang penuh dan model penampang setengah, yang hasil dari kedua pendekatan dibandingkan dengan hasil pengujian referensi. Secara total, terdapat 14 benda uji (spesimen) yang dibuat ke dalam MEH, dimana pola kegagalan dan kurva momen terhadap kurvatur dari hasil MEH cukup mirip dengan hasil pengujian. Lebih lanjut, seluruh nilai gaya saat MEH mencapai kegagalan sangat dekat dengan yang diperoleh dari pengujian dengan nilai rata-rata sebesar 0,97 dan nilai maksimal koefisien variasi (COV) sebesar 0.038. Ini menunjukkan bahwa model numerik yang dibuat pada penelitian ini bermanfaat untuk studi parametrik lanjutan pada balok aluminium berlubang, yang gagal akibat skema *three-point loading*.

**Kata kunci:** balok aluminium berlubang; model elemen hingga; skema *three-point loading*

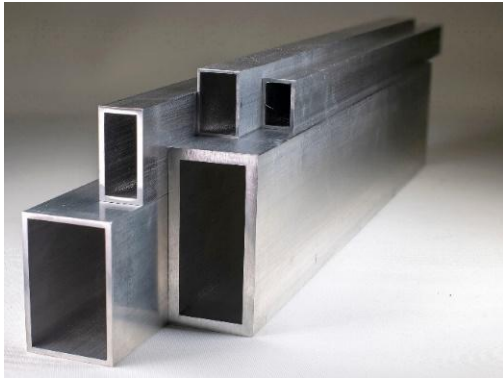
## PENDAHULUAN

Dalam dunia konstruksi, baja adalah salah satu material struktur yang umum digunakan selain beton dalam suatu konstruksi. Walaupun relatif lebih mahal, material baja memiliki proses pelaksanaan dan pengerjaan yang lebih cepat dan praktis jika dibandingkan dengan material beton (Diredja et al., 2023). Oleh

karena itu, material baja cenderung digunakan pada proyek konstruksi dengan durasi yang singkat. Saat ini, terdapat beberapa material baja yang dapat digunakan pada proyek konstruksi, seperti yang terbuat dari material karbon, campuran kromium dan nikel, serta aluminium.

Material aluminium banyak digunakan pada struktur ringan karena berat jenis material

aluminium yang berkisar 2700–2800 kg/m<sup>3</sup>, lebih kecil dari berat jenis material baja karbon dan baja nirkarat (berkisar 7800–7900 kg/m<sup>3</sup>). Material aluminium memiliki berbagai karakteristik diinginkan, seperti durabilitas yang baik, rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, dan ketahanan terhadap karat. Berdasarkan keunggulan tersebut, material aluminium sering digunakan pada bentang atap yang panjang dan pada lingkungan yang lembab serta korosif (Zhu et al., 2020). Dalam penerapannya, struktur aluminium dengan penampang tertutup, seperti *square* dan *rectangle hollow section* (SHS dan RHS), adalah bentuk penampang yang umum. Gambar 1 menampilkan bentuk penampang RHS yang terbuat dari baja aluminium sebagai salah satu contoh penampang tertutup.



**Gambar 1.** Penampang baja aluminium (Online, 2023)

Jika dibandingkan dengan baja karbon ataupun baja tahan karat, baja aluminium memiliki ketahanan terhadap korosi yang lebih baik dan kemampuan “diekstrusi” untuk menunjang proses fabrikasi penampang *solid* (pejal) maupun *hollow* (berongga). Proses dari ekstrusi inilah yang membuat aluminium menjadi material yang sangat serbaguna untuk dipakai sebagai material struktur konstruksi (Kissell & Ferry, 2002).

Dalam penggunaan material baja aluminium sebagai struktur elemen balok, modifikasi seperti penambahan lubang pada bentang dimungkinkan untuk meningkatkan utilitas elemen struktur tersebut. Seperti dikemukakan oleh Chen et al. (2022), balok baja berlubang sering digunakan pada konstruksi. Adanya lubang tersebut pada badan balok baja mempermudah sistem mekanikal

atau saluran pipa dipasang melewati lubang tersebut. Selain itu, pipa yang menembus balok dapat memberi keuntungan bagi arsitek karena dapat menambah *space* secara vertikal pada ruangan dan mengurangi berat sendiri dari komponen struktur.

## TINJAUAN PUSTAKA

Investigasi kekuatan balok baja aluminium tanpa lubang telah terdokumentasi pada beberapa hasil penelitian. Sebagai contoh, Su et al. (2016) yang melakukan studi eksperimen yang dilengkapi dengan pemodelan numerik untuk menyelidiki kekuatan lentur penampang hollow aluminium dengan internal stiffener. Namun, pada penelitian Su et al. (2016) belum meninjau kekuatan lentur pada penampang berlubang. Kekuatan lentur yang didapatkan pada penelitian tersebut diperoleh dari metode pembebanan untuk kasus kegagalan akibat *three-point bending* dan *four-point bending*. Sebagai tambahan, penelitian ini menggunakan tipe aluminium kekuatan normal 6063-T5 dan kekuatan tinggi 6061-T6. Kedua jenis material ini juga digunakan pada penelitian Feng et al. (2017) yang menjadi referensi utama pada penelitian ini.

Penelitian lain mengenai balok baja aluminium tanpa lubang yang menggunakan material aluminium 6063-T5 dan 6061-T6 juga dilakukan oleh Zhu et al. (2020) dan Su et al. (2014). Spesimen yang digunakan pada penelitian Zhu et al. (2020) dapat dikategorikan sebagai penampang terbuka (profil kanal dan *lipped channel*), sehingga hasil penelitian Zhu et al. (2020) berbeda dengan Su et al. (2016). Namun demikian, kedua penelitian tersebut sama-sama melibatkan hasil dari pemodelan numerik untuk melakukan evaluasi keamanan dan keandalan dari rumus perhitungan pada spesifikasi desain struktur internasional. Pada kedua penelitian tersebut pemodelan numerik memberikan data tambahan untuk mendukung hasil eksperimen dalam melakukan evaluasi spesifikasi desain struktur internasional. Pada praktiknya, pemodelan numerik memberikan hasil yang relatif lebih cepat dari pada kegiatan eksperimen.

Selain penelitian mengenai perilaku balok, penelitian lainnya mengenai perilaku kolom menggunakan profil kanal dari material

aluminium dilaporkan oleh Zhu et al. (2019). Penelitian tersebut hanya meninjau perilaku struktur pada temperatur ruangan. Sementara, penelitian mengenai perilaku struktur kolom pada temperatur lebih tinggi seperti yang terjadi ketika struktur mengalami kebakaran dilakukan oleh Zhu et al. (2021). Penelitian Zhu et al. (2021) lebih mengandalkan simulasi numerik menggunakan model elemen hingga (MEH) untuk menghasilkan data kekuatan balok. Simulasi temperatur tinggi diperoleh dari pemodelan material yang diadopsi dari pengujian kupon di laboratorium pada berbagai temperatur ruangan.

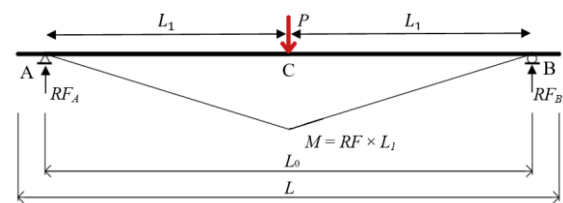
Penelitian mengenai balok baja aluminium dengan lubang masih sedikit ditemukan. Salah satu penelitian tersebut dilakukan oleh Feng et al. (2020) yang melakukan pengujian laboratorium pada balok aluminium berpenampang CHS (*Circular Hollow Section*) dengan kategori material 6063-T5 dan 6061-T6. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa hasil percobaan pada aluminium berkekuatan normal, kapasitas lentur berkurang seiring dengan bertambahnya jumlah dan diameter lubang. Bertambahnya jumlah lubang akan mengurangi kapasitas lentur yang lebih besar dibandingkan dengan bertambahnya diameter lubang.

Berbeda dengan profil yang dipakai pada penelitian Feng et al. (2020), sebelumnya Feng et al. (2017) melakukan pengujian laboratorium balok yang menggunakan profil berpenampang SHS (*square hollow section*) dan RHS (*rectangular hollow section*). Karena penelitian ini baru sebatas pada pengujian laboratorium, maka penelitian selanjutnya dilakukan menggunakan MEH pada penelitian ini. Penelitian menggunakan MEH memiliki keunggulan dari segi waktu dan kenyamanan dibandingkan pengujian laboratorium. Namun demikian, hasil MEH perlu diverifikasi menggunakan hasil laboratorium untuk memeriksa keakuratan *input* yang dipakai dalam MEH, seperti yang akan ditunjukkan pada bagian selanjutnya.

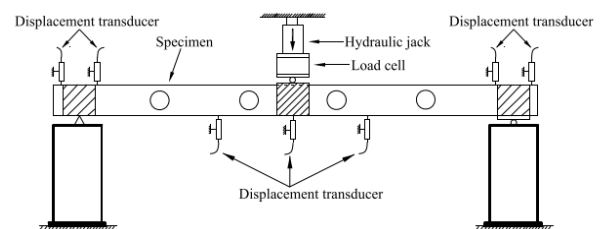
## PENGUJIAN LABORATORIUM

Feng et al. (2017) melakukan pengujian laboratorium balok SHS dan RHS berlubang banyak (*multiple holes*) menggunakan material 6061-T6 (penampang RHS,  $f_y = 192,34$  MPa)

dan 6063-T5 (penampang RHS,  $f_y = 206,53$  MPa). Nilai tegangan leleh ( $f_y$ ) tersebut diperoleh dari pengujian material di laboratorium. Jumlah lubang pada balok bervariasi mulai dari 4 sampai 6 lubang yang terdistribusi merata di sepanjang bentang. Hasil pengujian balok tanpa lubang juga ditampilkan untuk meninjau seberapa besar penurunan kekuatan akibat adanya lubang pada balok. Jenis pengujian yang dilakukan yaitu uji lentur menggunakan skema *three-point loading* dan *four-point loading*. Skema *three-point loading* ditunjukkan pada Gambar 2. Besarnya nilai kekuatan lentur balok diperoleh dari nilai reaksi perletakan (RF) dikalikan dengan panjang setengah bentang balok ( $L_1$ ).



Gambar 2. Skema *three-point loading* (Feng et al., 2017)



Gambar 3. Pengujian lentur skema *three-point loading* (Feng et al., 2017)



Gambar 4. Pengujian laboratorium skema *three-point loading* (Feng et al., 2017)

Situasi pengujian digambarkan oleh Gambar 2 dan Gambar 3. Spesimen yang digunakan pada pengujian Feng et al. (2017)

ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Pada lokasi tumpuan dan pembebanan diberikan plat pengaku (*stiffening plate*) untuk mencegah terjadinya kegagalan prematur akibat adanya konsentrasi tegangan selama pengujian. Pengujian menggunakan sistem *displacement control* dengan memberikan *loading rate* tertentu. Hasil pengujian berupa nilai gaya saat spesimen mengalami keruntuhan (*failure load*) dan kurva momen versus kurvatur. Besarnya nilai kurvatur diperoleh menggunakan persamaan (1) (Chan & Gardner, 2008) dengan memperhatikan Gambar 1 untuk definisi simbol yang dipakai.

$$\kappa \times 10^{-4} = \frac{8 (D_M - D_L)}{(4 (D_M - D_L)^2 + L_0^2)} \times 10^{-4} \quad (1)$$

dengan  $\kappa$  = kurvatur (1/mm),  $r$ : radius (mm),

$D_M$  = defleksi vertikal di tengah bentang (mm),  
 $D_L$  = rata-rata defleksi vertikal di Titik A dan C (mm) (untuk *three-point bending*),

$L_0$  = panjang bentang (mm)

**Tabel 1.** Ukuran spesimen (Feng et al., 2017)

| Spesimen                     | Lebar    | Panjang  | Tebal    | Panjang Total |
|------------------------------|----------|----------|----------|---------------|
|                              | $b$ (mm) | $h$ (mm) | $t$ (mm) | $L$ (mm)      |
| HS 150 × 150 × 3-B3          | 150,2    | 150,18   | 3,06     | 2000,4        |
| HS 150 × 150 × 3-d45-n4-B3   | 149,98   | 150,37   | 3,05     | 1999,4        |
| HS 150 × 150 × 3-d45-n4-B3-R | 150,12   | 150,25   | 3,01     | 1999,8        |
| HS 150 × 150 × 3-d90-n4-B3   | 150,3    | 150,35   | 3,05     | 1999,4        |
| NR 50 × 200 × 2,5-B3         | 49,27    | 199,7    | 2,39     | 2750,5        |
| NR 50 × 200 × 2,5-d90-n4-B3  | 49,08    | 199,5    | 2,38     | 2750,2        |
| NR 50 × 200 × 2,5-d90-n6-B3  | 49,34    | 199,8    | 2,4      | 2750,8        |

**Tabel 2.** Diameter dan posisi lubang (Feng et al., 2017)

| Spesimen                     | Diameter Lubang | Interval Lubang | Panjang Bentang |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                              | $d$ (mm)        | $s$ (mm)        | $L_0$ (mm)      |
| HS 150 × 150 × 3-B3          | -               | -               | 1800            |
| HS 150 × 150 × 3-d45-n4-B3   | 45,34           | 360,1           | 1800            |
| HS 150 × 150 × 3-d45-n4-B3-R | 45,41           | 359,8           | 1800            |
| HS 150 × 150 × 3-d90-n4-B3   | 90,66           | 360             | 1800            |
| NR 50 × 200 × 2,5-B3         | -               | -               | 2450            |
| NR 50 × 200 × 2,5-d90-n4-B3  | 89.54           | 490.3           | 2450            |
| NR 50 × 200 × 2,5-d90-n6-B3  | 89.92           | 350.8           | 2450            |

Untuk kemudahan, maka setiap spesimen numerik diberikan simbol yang sama dengan simbol spesimen pada pengujian laboratorium. Penampang SHS dengan material aluminium berkekuatan tinggi diberi label dengan HS (high strength SHS), sedangkan untuk penampang RHS dengan aluminium berkekuatan normal

diberi label dengan NR (normal strength RHS). Contoh, untuk penamaan “HS 150 × 150 × 3–d45–n4–B3–R” mendeskripsikan sebuah high strength SHS dengan dimensi 150 × 150 × 3 dengan diameter lubang sebesar 45 mm sebanyak 4 buah yang diuji three-point bending (B3). Untuk huruf ‘R’ sendiri menyatakan bahwa pengujian tersebut diulang (repeated

test). Seluruh data spesimen dipakai dalam pemodelan di ABAQUS (2023) sebagai *tool* untuk pemodelan numerik/MEH.

## PEMODELAN NUMERIK

Pada penelitian yang meninjau desain dan perilaku batang struktur sering menggunakan metode pemodelan numerik untuk menambahkan data berdasarkan perluasan dari variasi parameter untuk pengujian laboratorium. Hasil dari pemodelan numerik, seperti yang diperoleh dari ABAQUS, dapat menggantikan hasil pengujian laboratorium selama dilakukan validasi pada pemodelan ABAQUS (Prabowo et al., 2024).

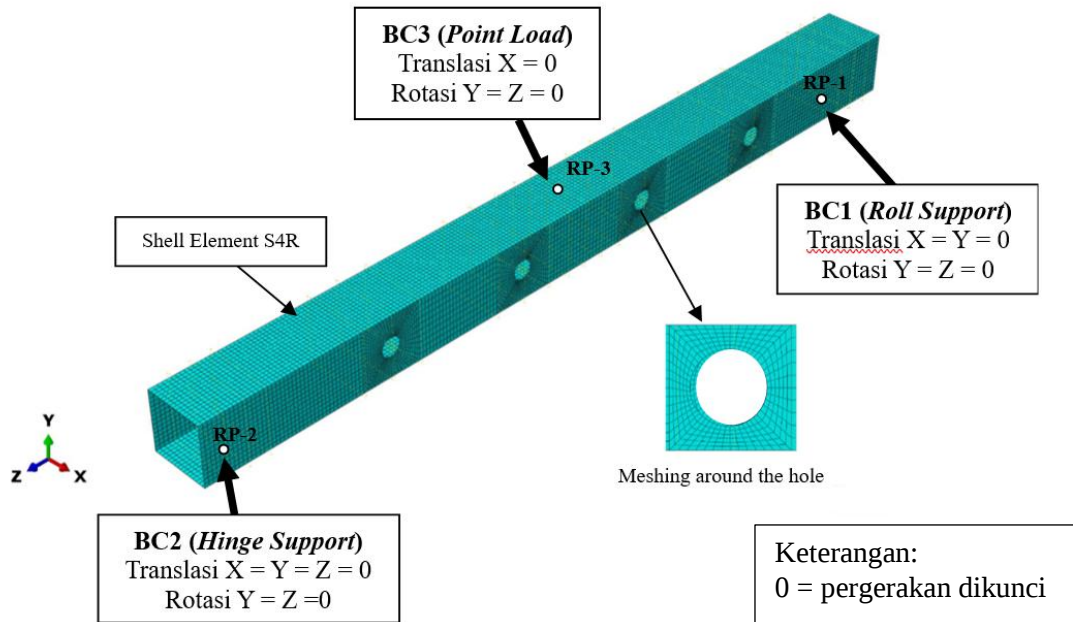
**Tabel 3.** Tabel nilai *true stress-logarithmic plastic strain* penampang SHS dan RHS

| SHS               |                          | RHS               |                          |
|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|
| $\epsilon_{true}$ | $\sigma_{true}$<br>(MPa) | $\epsilon_{true}$ | $\sigma_{true}$<br>(MPa) |
| 0                 | 49,81                    | 0                 | 50,38                    |
| 0,00007           | 99,70                    | 0,00003           | 100,27                   |
| 0,00008           | 134,32                   | 0,00005           | 115,59                   |
| 0,00009           | 150,80                   | 0,00008           | 130,92                   |
| 0,00040           | 164,48                   | 0,00030           | 150,27                   |
| 0,00044           | 178,71                   | 0,00031           | 166,75                   |
| 0,00075           | 192,42                   | 0,00041           | 177,01                   |
| 0,00133           | 204,50                   | 0,00100           | 187,93                   |
| 0,00229           | 208,12                   | 0,00168           | 193,19                   |
| 0,00378           | 209,57                   | 0,00291           | 195,70                   |
| 0,00728           | 210,88                   | 0,00615           | 197,49                   |
| 0,02188           | 217,48                   | 0,01877           | 204,64                   |
| 0,03628           | 223,01                   | 0,02931           | 209,75                   |
| 0,05168           | 228,28                   | 0,04360           | 215,15                   |
| 0,06707           | 233,66                   | 0,06029           | 221,81                   |
| 0,08801           | 240,48                   | 0,07416           | 226,15                   |
| 0,10357           | 244,27                   | 0,08741           | 228,55                   |
| 0,11888           | 248,05                   | 0,09730           | 229,57                   |

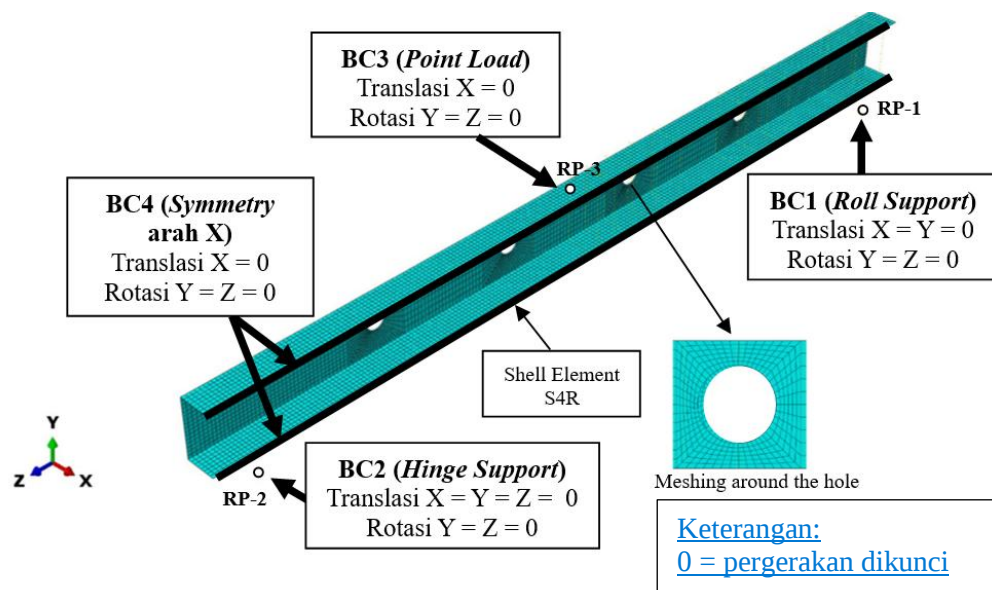
Pemodelan numerik belum dilakukan pada penelitian Feng et al. (2017). Oleh karena itu, penelitian bertujuan membuat model numerik dari salah satu skema pembebanan yang dilakukan pada penelitian tersebut. Model numerik (MEH) yang dibuat pada penelitian ini menggunakan data geometri penampang pada Tabel 1. Untuk memperhitungkan efek nonlinier dari perilaku material, maka diagram tegangan-regangan hasil pengujian kupon yang juga dilaporkan oleh Feng et al. (2017) diikutsetakan pada MEH. Namun demikian, seluruh nilai

tegangan-regangan dari hasil pengujian perlu dirubah dulu menjadi *true stress* dan *logarithmic plastic strain*, yang hasilnya ditampilkan pada Tabel 3. Aspek ketidaksempurnaan geometri penampang dan batang diabaikan karena memiliki efek yang tidak signifikan seperti pada penelitian Chen et al. (2022).

Dua pendekatan pemodelan ABAQUS dibuat pada penelitian ini, yaitu model penampang penuh (Model 1) dan model penampang setengah (Model 2). Perbedaan kedua model terletak pada geometri penampangnya, dimana Model 1 memodelkan geometri penampang secara utuh sedangkan Model 2 hanya setengah geometri saja yang dimodelkan. Keseluruhan model memiliki panjang bentang sesuai dengan data pada Tabel 1. Penampakan kedua model dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Pemodelan penuh (Model 1)



Gambar 6. Pemodelan setengah (Model 2)

Pengaturan model numerik di ABAQUS seperti dijelaskan berikut. Kedua model numerik memiliki elemen *shell* S4R dengan ukuran *mesh*  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ . Ukuran *mesh* diperhalus pada bagian di sekitar lubang. Perletakan sendi (BC2) dan rol (BC1) berada di posisi ujung-ujung bentang yang di-*input* melalui

*reference point* (RP). Posisi RP berada di lokasi pusat tumpuan sesuai dengan data pengujian laboratorium. Pertemuan antara penampang dan plat pengaku yang dipakai saat pengujian diberikan *constraint* ke RP.

Komponen *degree of freedom* (DOF) yang dikunci diberikan nilai 0 seperti disebutkan

pada Gambar 5 dan Gambar 6. Sementara, lokasi beban berada di BC3 dengan memberikan nilai perpindahan target (*target displacement*) pada komponen translasi arah Z. Model 1 dan Model 2 memiliki kesamaan pengaturang DOF sebagai *bounday conditon* (BC). Namun, pada Model 2 ada tambahan BC untuk memberikan *contraint* di bagian tengah penampang di sepanjang bentangnya, seperti ditunjukkan oleh BC4 pada Gambar 6. Nilai perpindahan target diatur sedemikian sehingga kurva momen versus kurvatur yang dihasilkan dapat melewati nilai puncak.

Model 1 dan Model 2 memiliki tujuh variasi spesimen sehingga totalnya ada 14 spesimen numerik yang dibuat di ABAQUS. Hasil dari analisis dari keempat 14 spesimen numerik tersebut ditampilkan bagian selanjutnya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis ABAQUS yang ditampilkan pada bagian ini terdiri dari 3 hal, yaitu: nilai *failure loads*, kurva momen versus kurvatur, dan *failure mode*. Ketiga hal tersebut dibandingkan dengan hasil pengujian laboratorium, dengan menggunakan keterangan simbol sebagai berikut:

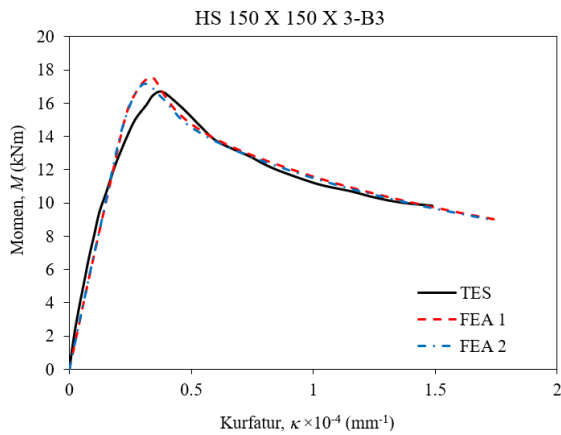
- TES = Hasil pengujian laboratorium Feng et al. (2017)

- FEA 1 = Hasil simulasi numerik ABAQUS dari Model 1
- FEA 2 = Hasil simulasi numerik ABAQUS dari Model 2

Perbandingan nilai momen ultimit (kapasitas lentur) dari keempat belas spesimen numerik terhadap hasil eksperimen dapat dilihat pada Tabel 4. Rasio antara nilai momen hasil tes ( $M_{TES}$ ) terhadap kedua hasil momen dari FEA1 ( $M_{FEA1}$ ) berkisar antara 0,94-1,03, dengan nilai rata-rata (mean) yaitu 0,97 dan *coefficient of variation* (COV) 0,036. Sedangkan untuk rasio antara  $M_{TES}$  terhadap  $M_{FEA2}$  berkisar 0,9-1,02 dan memiliki nilai mean 0,97 dengan COV 0,038. Hal ini menunjukkan bahwa baik Model 1 dan Model 2 memiliki kedekatan dengan hasil laboratorium yang sama. Namun demikian, waktu *running* yang diperlukan oleh Model 2 lebih singkat dibanding Model 1 karena pemodelan setengah penampang. Nilai COV yang diperoleh dari kedua pendekatan MEH relatif kecil dan menunjukkan apabila pendekatan yang dipakai dalam pemodelan di ABAQUS memiliki konsistensi hasil yang relatif seragam. Nilai mean sebesar 0,97 menunjukkan apabila hasil dari ABAQUS 3% lebih besar dari hasil laboratorium. Kedekatan antara hasil analisis ABAQUS dengan hasil laboratorium juga dibuktikan lebih lanjut melalui perbandingan kurva momen versus kurvatur.

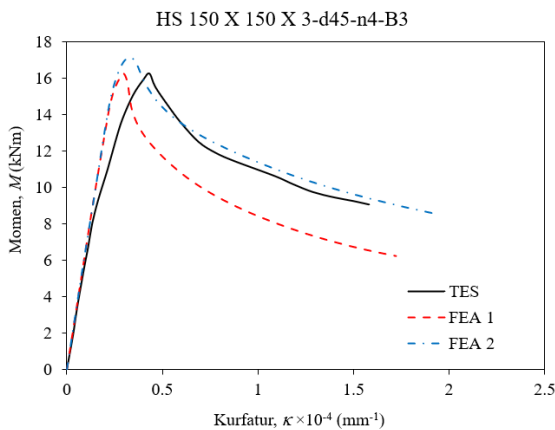
Tabel 4. Perbandingan hasil eksperimen dengan FEA 1 & FEA 2

| Spesimen                     | $M_{TES}$<br>(kNm) | $M_{FEA1}$<br>(kNm) | $\frac{M_{TES}}{M_{FEA1}}$ | $M_{FEA2}$<br>(kNm) | $\frac{M_{TES}}{M_{FEA2}}$ |
|------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|
| HS 150 × 150 × 3-B3          | 16,70              | 17,51               | 0,95                       | 17,10               | 0,98                       |
| HS 150 × 150 × 3-d45-n4-B3   | 16,36              | 17,28               | 1,01                       | 17,02               | 0,96                       |
| HS 150 × 150 × 3-d45-n4-B3-R | 16,43              | 16,95               | 0,97                       | 16,51               | 1,00                       |
| HS 150 × 150 × 3-d90-n4-B3   | 14,54              | 15,13               | 0,96                       | 15,10               | 0,96                       |
| NR 50 × 200 × 2,5-B3         | 12,34              | 12,24               | 1,03                       | 12,12               | 1,02                       |
| NR 50 × 200 × 2,5-d90-n4-B3  | 11,47              | 12,25               | 0,94                       | 12,14               | 0,94                       |
| NR 50 × 200 × 2,5-d90-n6-B3  | 10,89              | 11,54               | 0,94                       | 12,05               | 0,90                       |
|                              |                    | MEAN                | 0.97                       |                     | 0.97                       |
|                              |                    | COV                 | 0.036                      |                     | 0.038                      |

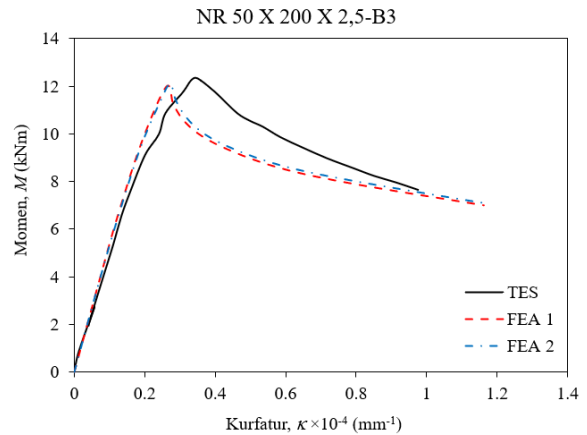


**Gambar 7.** Kurva perbandingan momen dengan kurvatur HS 150 × 150 × 3-B3

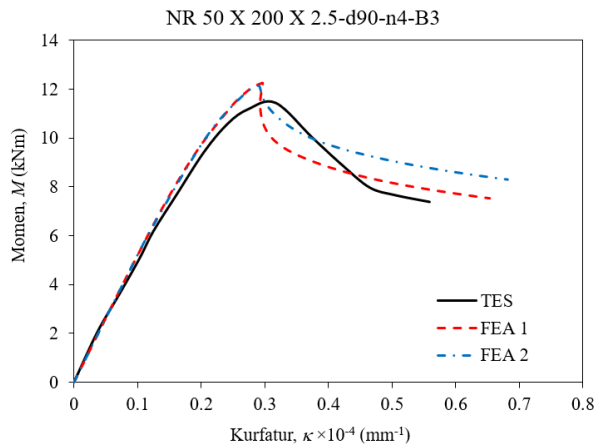
Gambar 7 - Gambar 10 menunjukkan apabila kurva hasil seluruh model FEA di-plot bersama dengan hasil laboratorium relatif cukup dekat terutama pada saat batang berperilaku elastik hingga mencapai kondisi di sekitar ultimit. Namun demikian, pada fase *post-ultimate* ketika batang memasuki *post-buckling stage* maka terjadi percabangan dari ketiga kurva yang ditunjukkan oleh keempat gambar tersebut. Kondisi *post-buckling* menjadi bagian yang kurang begitu diperhatikan karena konsep desain yang berlaku saat ini hanya memperhatikan kondisi ultimit saja dan tidak memanfaatkan kekuatan sisa setelah kondisi ultimit.



**Gambar 8.** Kurva perbandingan momen dengan kurvatur HS 150 × 150 × 3-d45-n4-B3



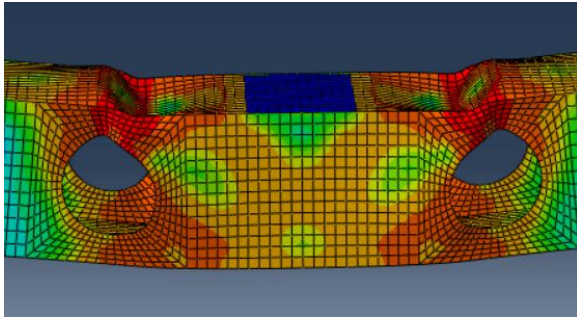
**Gambar 9.** Kurva perbandingan momen dengan kurvatur NR 50 × 200 × 3-B3



**Gambar 10.** Kurva perbandingan momen dengan kurvatur NR 50 × 200 × 3-d90-n4-B3

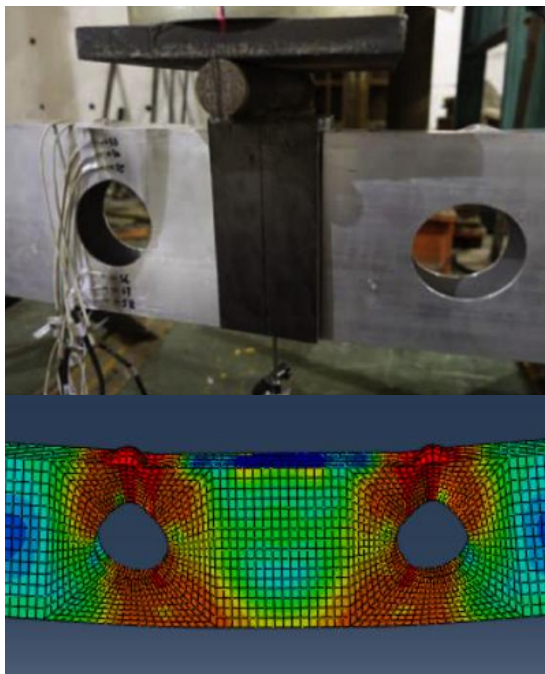
Untuk meyakinkan kedekatan antara hasil MEH dengan hasil laboratorium, maka dapat dibandingkan kondisi fisik saat mengalami kegagalan, seperti ditunjukkan contoh keruntuhan yang ditangkap pada Gambar 11 dan Gambar 12.





**Gambar 11.** Perbandingan Pola Keruntuhan Penampang HS  $150 \times 150 \times 3$ -d90-n4-B3

Kedua gambar merupakan kondisi fisik spesimen ketika mencapai momen ultimit. Bentuk deformasi yang ditunjukkan dari foto pengujian laboratorium relatif cukup dekat dengan screen shot yang ditangkap dari layar hasil analisis ABAQUS. Tangkapan layar hasil ABAQUS menunjukkan kontur tegangan pada daerah di sekitar lubang dimana tegangan tertinggi (berwarna merah) berada di sekitar lubang. Gambar 11 dan Gambar 12 juga menunjukkan pola keruntuhan yang terjadi yaitu tekuk lokal pada bagian serat atas dan badan yang berkombinasi dengan tekuk lentur.



**Gambar 12.** Perbandingan Pola Keruntuhan Penampang NR  $50 \times 200 \times 3$ -d90-n6-B3

## KESIMPULAN

Hasil simulasi numerik dari pengujian laboratorium balok aluminium dengan badan berlubang menunjukkan apabila pemodelan yang dibuat pada ABAQUS dapat menggantikan kegiatan pengujian fisik. Kesimpulan ini diperoleh berdasarkan perbandingan: kapasitas lentur maksimal dari spesimen, kurva momen versus kurvatur, dan bentuk deformasi kegagalan dari spesimen. Pengaturan pada ABAQUS, yang meliputi input model material, ukuran *mesh*, dan *boundary conditions*, yang dikerjakan pada model penampang penuh dan model penampang setengah memiliki validitas yang relatif akurat. Tidak ditinjaunya aspek ketidaksempurnaan geometri mengakibatkan proses analisis model numerik yang dihasilkan relatif lebih sederhana karena tidak memerlukan analisis tekuk elastik menggunakan *eigen value analysis*.

Walaupun kedua model pendekatan memiliki hasil yang relatif mirip, model numerik dengan penampang penuh disimpulkan yang paling mendekati dengan pengujian laboratorium. Model penampang sebagian membutuhkan idealisasi *boundary conditions* yang menimbulkan efek *constraint* yang berlebihan dan tidak konsisten dengan pengujian laboratorium. Dengan demikian, penelitian ini mengusulkan model numerik dengan penampang penuh dapat dipergunakan untuk tahap penelitian selanjutnya, yaitu studi parametrik, untuk mengevaluasi desain kekuatan lentur balok aluminium berlubang.

## DAFTAR PUSTAKA

- ABAQUS. (2023). User's manual and theory manual. Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Chan, T. M., & Gardner, L. (2008). Bending Strength of Hot-Rolled Elliptical Hollow Sections. *Journal of Construction Steel Research*, 64, 971–986.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.11.001>
- Chen, Z., Huang, Y., & Young, B. (2022). Design of cold-formed ferritic stainless steel RHS perforated beams. *Engineering Structures*, 250.  
<https://doi.org/10.1016/j.eng-struct.2021.113372>

- Diredja, N. V., Desimaliana, E., & Adhitomo, I. (2023). Studi Perbandingan Respon Struktur pada Gedung Menggunakan Profil Baja Kastela dan WF. *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, 9(3), 240. <https://doi.org/10.26760/rekara-cana.v9i3.240>
- Feng, R., Sun, W., Shen, C., & Zhu, J. (2017). Experimental investigation of aluminum square and rectangular beams with circular perforations. *Engineering Structures*, 151, 613–632. <https://doi.org/10.1016/j.eng-struct.2017.08.053>
- Feng, R., Chen, Z., Shen, C., Roy, K., Chen, B., & Lim, J. B. P. (2020). Flexural capacity of perforated aluminium CHS tubes—An experimental study. *Structures*, 25, 463–480. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.025>
- Kissell, J. R., & Ferry, R. L. (2002). *Aluminum structures: a guide to their specifications and design* (2<sup>nd</sup> ed). John Wiley & Sons.
- Online, A. (2023). Rectangular Hollow Section 60 x 30 x 3mm. <https://www.aluminium-online.co.uk/product/60-x-30-x-3mm-rectangular-hollow-section/>
- Prabowo, A., Huang, Y., & Young, B. (2024). Cold-formed stainless steel beams with single web hole at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, 195, 111321. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111321>
- Su, M. N., Young, B., & Gardner, L. (2014). Deformation-based design of aluminum alloy beams. *Engineering Structures*, 80, 339–349. <https://doi.org/10.1016/j.eng-struct.2014.08.034>
- Su, M. N., Young, B., & Gardner, L. (2016). Flexural response of aluminium alloy SHS and RHS with internal stiffeners. *Engineering Structures*, 121, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.021>
- Suratman, R. (2001). Karakteristik Korosi Aluminium dan Baja tahan karat. *Jurnal Sains Dan Teknologi Nuklir Indonesia*, 11(1), 27–38.
- Zhu, J.-H., Li, Z.-q., Su, M., & Young, B. (2019). Behaviour of aluminium alloy plain and lipped channel columns. *Thin-walled Structures*, 135, 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.11.010>
- Zhu, J.-H., Li, Z.-q., Su, M., & Young, B. (2020). Design of Aluminum Alloy Channel Section Beams. *Journal of Structural Engineering*, 146(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002615](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002615)
- Zhu, J.-H., Li, Z.-q., & Su, M. (2021). Numerical investigation and design of aluminium alloy channel section columns at elevated temperatures. *Thin-walled Structures*, 159, 107225. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107225>