

ANALISIS PENGARUH LUAS PENGAKU *WEB* (As) TERHADAP KUAT TEKAN DARI BAJA RINGAN PROFIL KANAL DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Jeffry Arianto¹ dan Leo S. Tedianto²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: jeffryarianto97@gmail.com

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: leotedi@gmail.com

ABSTRAK

Penggunaan *cold-formed steel* atau yang lebih dikenal sebagai baja ringan terus meningkat karena berat dan harganya yang lebih murah dibandingkan baja konvensional. Baja ringan ini memiliki titik leleh yang lebih tinggi dibandingkan dengan baja konvensional dengan rasio dimensi lebar terhadap tebal dinding profil di setiap bagian elemennya sangat besar sehingga akibat beban tekan seringkali mengalami tekuk sebelum mencapai kekuatan maksimum. Kegagalan tekuk pada umumnya dibedakan menjadi dua, yaitu tekuk lokal dan tekuk global. Salah satu cara untuk mengurangi kecenderungan tekuk adalah modifikasi bentuk geometri penampang, yaitu dengan cara penambahan pengaku pada profil penampang. Analisis ini bertujuan untuk mencari pengaruh luas pengaku *web* terhadap kuat tekan kritis dengan metode elemen hingga. Batang tekan adalah elemen struktural yang hanya menerima gaya tekan aksial, di mana gaya bekerja pada sumbu longitudinal melalui sentroid dari penampang. Profil yang digunakan adalah 75mm x 35mm x 5mm x 0.65mm. Perhitungan metode elemen hingga dilakukan dengan program Abaqus. Pemodelan profil dilakukan dengan perbesaran luas pengaku *web* dari model satu sampai model lima dengan panjang yang digunakan adalah 2000mm serta perletakan tetap sendi-rol, arah beban sejajar dengan batang (aksial). Hasilnya adalah dengan pertambahan luas pengaku maka kuat tekan elemen batang akan semakin besar dan tegangan yang dihasilkan akan semakin besar.

Kata kunci: *Cold-formed steel*, tekuk, tegangan, defleksi, metode elemen hingga, kuat tekan, pengaku.

1. PENDAHULUAN

Baja adalah logam paduan dengan besi sebagai unsur dasar dan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Kandungan karbon dalam baja berkisar antara 0.2% hingga 2.1% berat sesuai grade-nya. Fungsi karbon dalam baja adalah sebagai unsur penguat dengan mencegah dislokasi bergeser pada kisi kristal (*crystal lattice*) atom besi. Unsur paduan lain yang biasa ditambahkan selain karbon adalah *Manganese* (Mn), *Chromium* (Cr), *Vanadium*, dan *Tungsten*. Dengan memvariasikan kandungan karbon dan unsur paduan lainnya, berbagai jenis kualitas baja bisa dihasilkan. Penambahan kandungan karbon pada baja berguna untuk meningkatkan kekerasan (*hardness*) dan kekuatan tariknya (*tensile strength*), namun di sisi lain membuatnya menjadi getas (*brittle*) serta menurunkan keuletannya (*ductility*).

Kemajuan Teknologi dan Ilmu pengetahuan juga memicu terjadinya berbagai macam pembaharuan terhadap material-material konstruksi. Salah satu diantaranya adalah baja ringan (*Cold-formed Steel*). *Cold-formed Steel* atau yang lebih dikenal di Indonesia sebagai baja ringan adalah suatu material konstruksi yang memiliki dimensi ketebalan relatif tipis sehingga lebih ringan dibandingkan dengan baja konvensional. Selain itu, *Cold-formed Steel* juga memiliki keuntungan yang lain seperti efisiensi terhadap waktu pengerjaan dan biaya konstruksi, ketahanan material terhadap korosi dan rayap, serta ketersediaan material di pasaran.

Baja ringan memiliki beberapa fenomena keruntuhan diantaranya, terjadi kerutan atau tekuk yang diamati pada batang tekan berlangsung secara tiba-tiba dan sangat berbahaya (Ugural, 1981). Salah satu cara untuk mengurangi kecenderungan tekuk pada baja ringan (*cold-formed steel*) adalah memodifikasi bentuk geometri penampang. Pada penelitian ini dilakukan modifikasi bentuk geometri penampang *cold-formed steel* yang dilakukan dengan cara penambahan pengaku (*stiffener*) pada profil penampang. Akibat adanya elemen pengaku, maka kekakuan penampang meningkat sehingga kekuatan penampang juga akan menjadi semakin besar. keuletannya (*ductility*).

Penelitian akan mencari tentang pengaruh luas pengaku *web* (A_s) terhadap kuat tekan (P_{cr}) dari baja ringan, pertama dihitung dengan menggunakan cara teoritis, kemudian dibandingkan hasilnya dengan cara metode elemen hingga.

Lebar efektif *lip*

Lebar efektif (b_e) *lip* dari elemen dengan pengaku yang mengalami tegangan tekan merata harus ditentukan dari :

- a. Untuk $\lambda \leq 0.673$

$$b_e = b \quad (1)$$

- b. Untuk $\lambda > 0.673$

$$b_e = \rho * b \quad (2)$$

$$\rho = \frac{1 - \frac{0.22}{\lambda}}{\lambda} \leq 1 \quad (3)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{f_{cr}}} \quad (4)$$

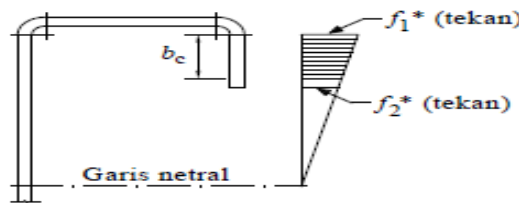
$$f_{cr} = \left\{ \frac{k * \pi^2 * E}{12 (1 - \nu^2)} \right\} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (5)$$

$$k = \frac{0.578}{\Psi + 0.34} \quad (6)$$

$$\Psi = \frac{f_1}{f_2} \quad (7)$$

dengan ρ = faktor lebar efektif, λ = rasio kelangsingan, f_{cr} = tegangan tekuk elastis pelat, k = koefisien tekuk, Ψ = rasio tegangan

f_1 dan f_2 adalah tegangan seperti ditunjukkan pada Gambar 2 yang dihitung berdasarkan penampang bruto dimana dalam kasus keduanya tekan, $f_1 \geq f_2$.



Gambar 1. Diagram f_1 dan f_2 (sumber: SNI 7971:2013)

Lebar efektif *flens*

Sedangkan untuk lebar efektif (b_1 , b_2 , dan d_s) elemen dengan pengaku ujung sederhana seperti yang ditunjukkan pada gambar 3 dapat ditentukan dengan persamaan :

$$S = 1,28 \sqrt{\frac{E}{f}} \quad (8)$$

- a) Untuk $\frac{b}{t} \leq 0,328S$:

$$I_a = 399t^4 \left(\frac{b}{tS} - 0,328 \right)^3 \leq t^4 \left(115 \frac{b}{tS} + 5 \right) \quad (9)$$

$$b_e = b \quad (10)$$

$$b_1 = b_2 = \frac{b}{2} \quad (11)$$

$$d_s = d_{se} \quad (12)$$

$$A_s = A_{se} \quad (13)$$

- b) Untuk $\frac{b}{t} > 0,328S$:

$$b_1 = \frac{be}{2} \left(\frac{I_s}{I_a} \right) \quad (14)$$

$$b_2 = b_e - b_1 \quad (15)$$

$$d_s = d_{se} \left(\frac{I_s}{I_a} \right) \quad (16)$$

$$A_s = A_{se} \left(\frac{I_s}{I_a} \right) \quad (17)$$

$$A_{se} = d_{se} t \quad (18)$$

$$I_s = \frac{d^3 t \sin^2 \theta}{12} \quad (19)$$

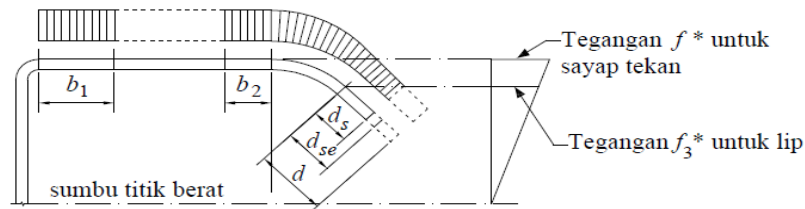
Jika $I_s \geq I_a$, maka $I_s = I_a$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{f_{cr}}} \quad (20)$$

$$f_{cr} = \left\{ \frac{k \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \right\} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (21)$$

$$\rho = \frac{(1 - \frac{0.22}{\lambda})}{\lambda} < 1 \quad (22)$$

$$n = \left(0.582 - \frac{b}{ts} \right) \geq \frac{1}{3} \quad (23)$$



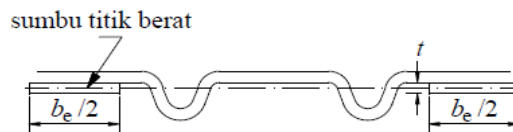
Gambar 2. Lokasi b_1 , b_2 , dan d_s (sumber: SNI 7971:2013)

dengan $f = f_n$ dalam menentukan kekuatan kemudian saat kondisi layan merupakan tegangan yang terjadi pada penampang efektif (f_d), b = lebar datar seperti yang ditunjukkan pada gambar 3, I_a = inersia yang memadai, d_{se} = lebar efektif pengaku, I_s = inersia pengaku, k = faktor tekuk pelat

Lebar efektif web

Penentuan lebar efektif (b_e) elemen dengan tambahan pengaku ditengah seperti yang ditunjukkan pada gambar 4 dapat ditentukan dengan persamaan :

$$b_e = \rho \left(\frac{A_g}{t} \right) \quad (24)$$



Gambar 4. Lokasi Lebar Efektif (sumber: SNI 7971:2013)

$$\lambda = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{b_o}{t} \right) \sqrt{\frac{f}{E}} \quad (25)$$

$$f_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b_o} \right)^2 \quad (26)$$

$$R = \frac{11 - \frac{b_o}{d_1}}{5} \geq \frac{1}{2} \quad \text{jika } \frac{b_o}{d_1} \geq 1 \quad (27)$$

$$R = 2 \quad \text{jika } \frac{b_o}{d_1} < 1 \quad (28)$$

Kasus: 'n' pengaku identik, dengan jarak yang sama

$$k_{loc} = 4(n+1)^2 \quad (29)$$

$$k_d = \frac{(1+\beta^2)^2 + \gamma(1+n)}{\beta^2(1+\delta(n+1))} \quad (30)$$

$$\beta = (1 + \gamma(n+1))^{\frac{1}{4}} \quad (31)$$

$$\gamma = \frac{10.92 I_{sp}}{b_o t^3} \quad (32)$$

$$\delta = \frac{A_s}{b_o t} \quad (33)$$

Batang tekan

Berdasarkan SNI 7971:2013, Pada komponen struktur dengan resultan semua beban yang bekerja padanya berupa gaya aksial yang melalui titik berat penampang efektif yang dihitung pada tegangan kirtis (f_n). Gaya aksial tekan desain (N^*) harus memenuhi syarat berikut :

$$a. \quad N^* \leq \Phi_c \times N_s$$

$$b. \quad N^* \leq \Phi_c \times N_c$$

dengan $\Phi_c = 0.85$ faktor reduksi kapasitas untuk komponen struktur dalam tekan, N_s = kapasitas penampang nominal dari komponen struktur dalam tekan ($A_{ey} \times f_y$), A_{ey} = luas efektif saat tegangan leleh (f_y), N_c = kapasitas

komponen struktur nominal dari komponen struktur dalam ($A_e \times f_n$), A_e = luas efektif saat tegangan kritis (f_n), f_n = tegangan kritis, dimana dipengaruhi faktor kelangsingan (λ_c), f_{oc} = nilai terkecil dari tegangan tekuk lentur, torsi, dan lentur-torsi elastis

$$f_n = (0,658^{\lambda_c^2}) f_y \text{ jika } \lambda_c \leq 1,5 \quad (34)$$

$$= \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) f_y \text{ jika } \lambda_c > 1,5 \quad (35)$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_y}{f_{oc}}} \quad (36)$$

$$f_{oc} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (37)$$

Persamaan ini hanya berlaku untuk kondisi elastis, dimana tegangan sebelum mencapai batas proporsionalnya.

Dengan $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$ merupakan radius girasi penampang dari sumbu tekuk. Untuk baja G550 sesuai dengan AS 1397 dengan ketebalan kurang dari 0.9 mm, harus digunakan radius girasi tereduksi γr jika panjang efektif penampang (l_e) < 1.1 l_o .

$$l_o = \pi \times r \times \sqrt{\frac{E}{f_{cr}}} \quad (38)$$

$$f_{cr} = \left\{ \frac{k \times \pi^2 \times E}{12(1 - \nu^2)} \right\} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (39)$$

$$\gamma = 0.65 + \left(\frac{0.35 l_e}{1.1 l_o} \right) \quad (40)$$

Kekuatan tekuk (SNI 7971:2013)

Kekuatan nominal (P_n) harus diambil terkecil antara: P_n untuk leleh, lentur, lentur-torsi dan tekuk torsi.

$$P_n = \Phi \times A_e \times f_n \quad (41)$$

dengan $\Phi = 0,85$ faktor keamanan (LRFD), A_e = luasan efektif yang dipengaruhi oleh lebar efektif setiap elemen, f_n = tegangan tekuk

2. METODE ELEMEN HINGGA

Metode elemen hingga atau yang dikenal dengan *Finite Element Method* (FEM) merupakan metode numerik dalam menyelesaikan masalah teknik dan matematis. Masalah-masalah yang dapat diselesaikan tersebut meliputi analisis struktur, perpindahan panas, aliran fluida, perpindahan massa dan elektromagnetik. Penyelesaian yang didapat dalam analisis masalah struktur meliputi *displacement* pada setiap titik (*nodes*) yang selanjutnya digunakan untuk mendapatkan nilai-nilai regangan (*strain*) dan tegangan (*stress*) sedangkan untuk penyelesaian masalah bukan analisis struktur meliputi temperatur akibat flux temperatur (*heat transfer*) dan tekanan fluida akibat flux fluida (*fluid flow*).

Cara kerja metode elemen hingga adalah dengan memecah (mendiskritisasi) atau dalam bahasa Inggris disebut *meshing* merupakan suatu proses pemodelan sebuah struktur atau objek dengan membaginya ke dalam elemen-elemen kecil (elemen hingga) yang terhubung oleh dua atau lebih titik (*nodes*) dan digunakan sebagai batas dari struktur atau objek tersebut. Dalam metode elemen hingga, tidak dilakukan pemecahan permasalahan elemen struktur secara keseluruhan dalam satu kali operasi, melainkan membuat formulasi persamaan untuk masing-masing elemen hingga, kemudian menggabungkannya untuk memperoleh solusi untuk elemen strukturnya. Secara singkat, solusi dari permasalahan struktur yang dimaksud adalah menghitung besarnya perpindahan dan tegangan yang dialami struktur akibat adanya beban yang bekerja (Logan, 2011).

Beberapa software komputer yang dapat melakukan perhitungan dengan metode elemen hingga antara lain :

- GT STRUDL
- StruCAD
- ALGOR
- IDEAS
- FEMAP
- MSC NASTRAN
- MSC DYTRAN
- MSC MARC
- MSC PATRAN
- MICRO SAS
- CATIA
- FLUENT
- CFX
- STARDYNE
- SACS
- NISA

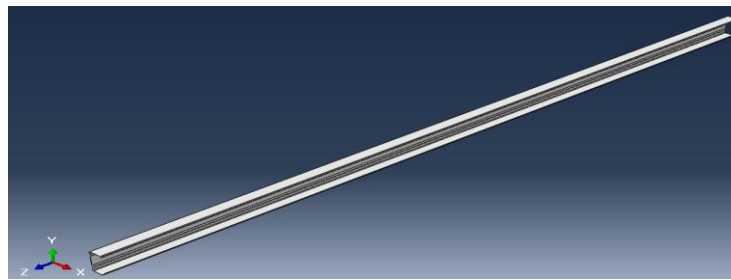
- ADINA
- ANSYS
- SAP2000
- ABAQUS

Langkah-Langkah Pemodelan dan Analisa Struktur dengan Program Abaqus

Berikut akan dijelaskan langkah-langkah pemodelan struktur dengan program ABAQUS.

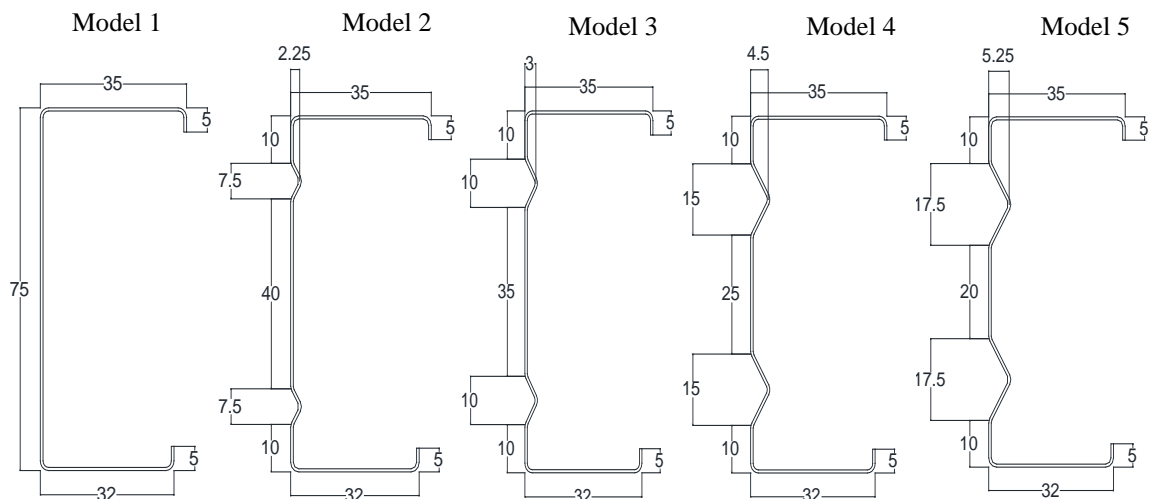
1. Part

Dipilih bentuk 3D, *deformable*, elemen *shell* tipe *extrusion*. Kemudian untuk *depth* dimasukkan nilai panjang elemen 2000mm.



Gambar 1. Tampak 3D Pemodelan Penampang

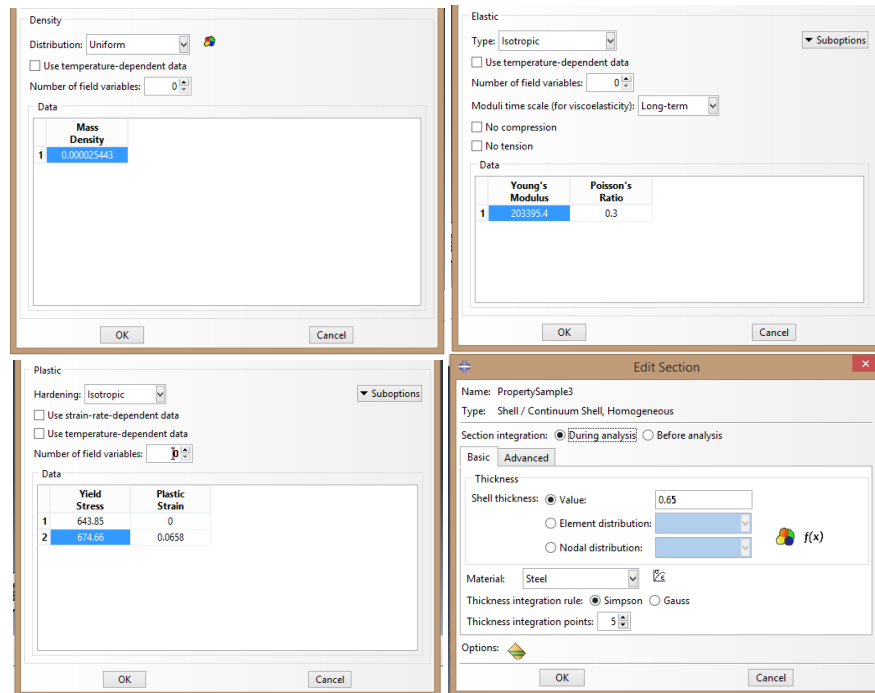
Model Profil yang digunakan untuk penelitian adalah *C-Channel* (75mm x 35mm x 5mm x 0,65mm), yang dibentuk menjadi beberapa jenis model.



Gambar 2. Model-Model Penampang *C-Channel*

2. Property

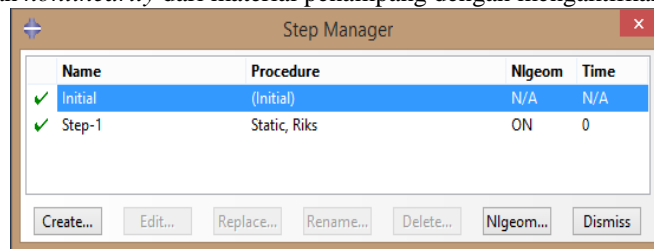
Pada bagian *Property*, dilakukan pengisian material dari penampang yang telah dibuat. Pada *density* (massa jenis) digunakan $2,5446 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$; Modulus Elastisitas 203395,4 MPa; *Poisson's Ratio* 0,3; Tegangan leleh (*fy*) 643,85 MPa; Tegangan *ultimate* (*fu*) 674,66 MPa dengan elongasi 6,58%. Kemudian property di-assign ke penampang dengan tipe shell dan homogeneous dengan shell thickness 0,65 mm.



Gambar 3. Properti Penampang

3. Step

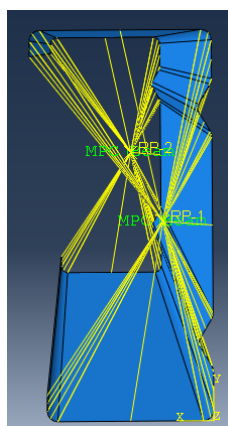
Pada bagian *Step*, dilakukan pemilihan metode perhitungan dengan *Static Riks*, karena metode perhitungan ini dapat memperhitungkan *nonlinearity* dari material penampang dengan mengaktifkan mode *Nlgeom*.



Gambar 7. Kotak Dialog Step Manager

4. Interaction

Pada bagian *Interaction*, dilakukan pembuatan titik berat penampang untuk meletakkan perletakan dan beban. Pertama dibuat *Reference Point* (RP) pada kedua ujung penampang. Kedua dibuat *Multi Point Constraint* (MPC) tipe *beam* untuk menggabungkan nodal-nodal pada ujung penampang ke satu titik *master nodal* yaitu *Reference Point* yang telah dibuat sebelumnya.

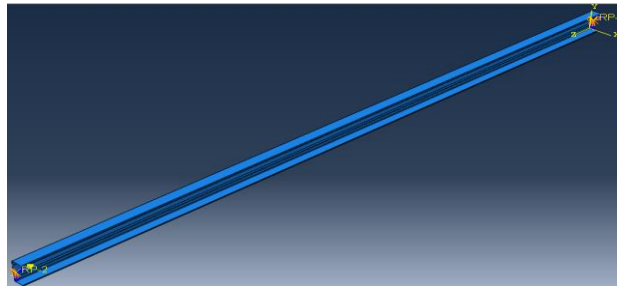


Gambar 8. Reference Point dan MPC

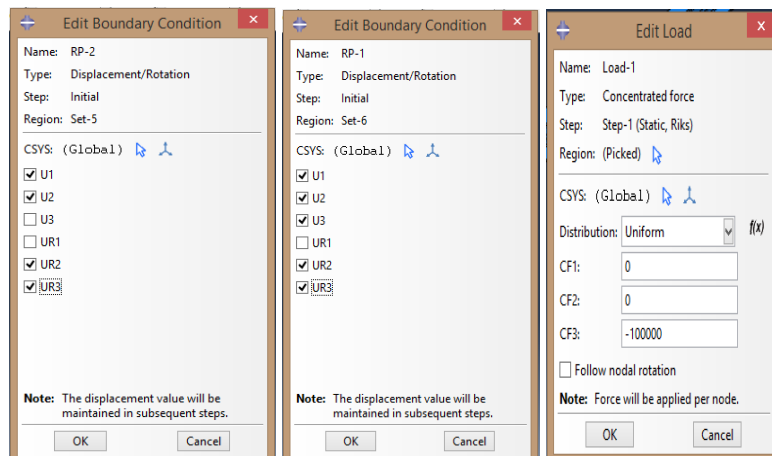
5. Load

Pada bagian *Load*, dilakukan pembuatan perletakan sendi-rol, yaitu pada RP 2 dibuat translasi sama dengan 0 pada sumbu X, Y dan rotasi sama dengan 0 pada sumbu Y, Z sedangkan pada RP 1 dibuat

translasi sama dengan 0 pada sumbu X, Y, Z dan rotasi sama dengan 0 pada sumbu Y, Z. Kemudian dimasukkan beban tekan sebesar 100 kN pada RP 2.



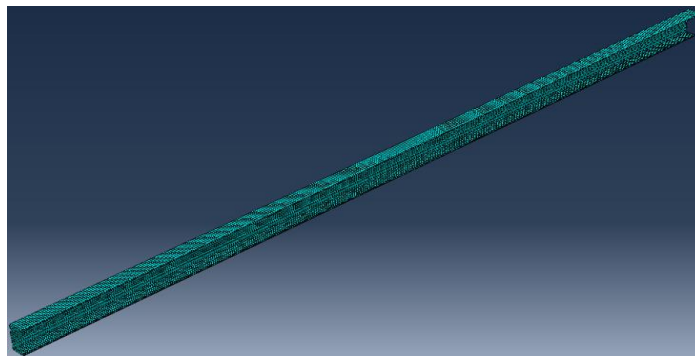
Gambar 9. Tampak 3D Pemodelan Perletakan dan Beban



Gambar 10. Kotak Dialog *Edit Boundary Condition* dan *Load*

6. Mesh

Pada bagian *Mesh*, dipilih *Meshing* dengan tipe elemen S4R (Q4) dengan luas *maximum* setiap elemen sebesar 5 x 5 mm.

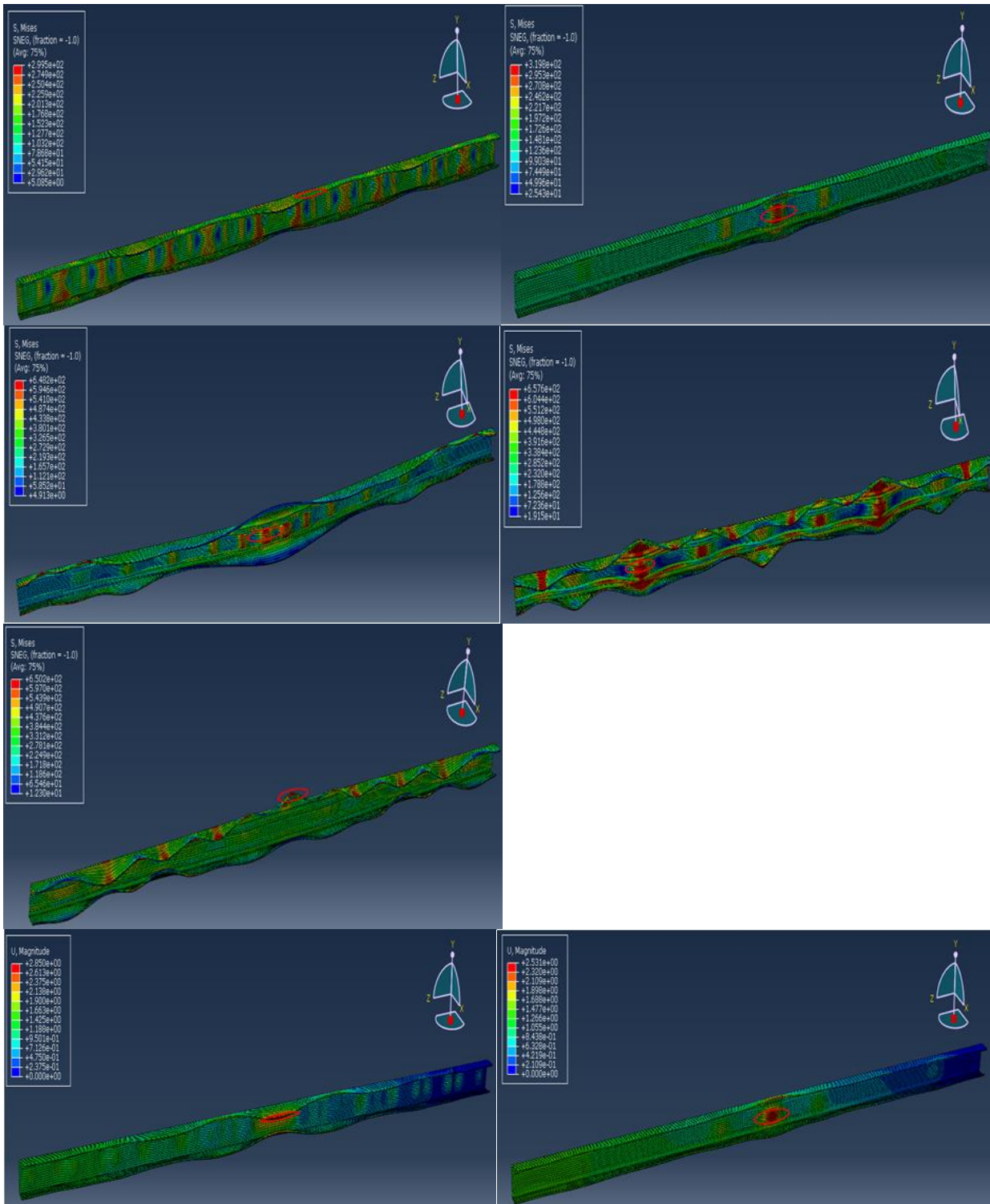


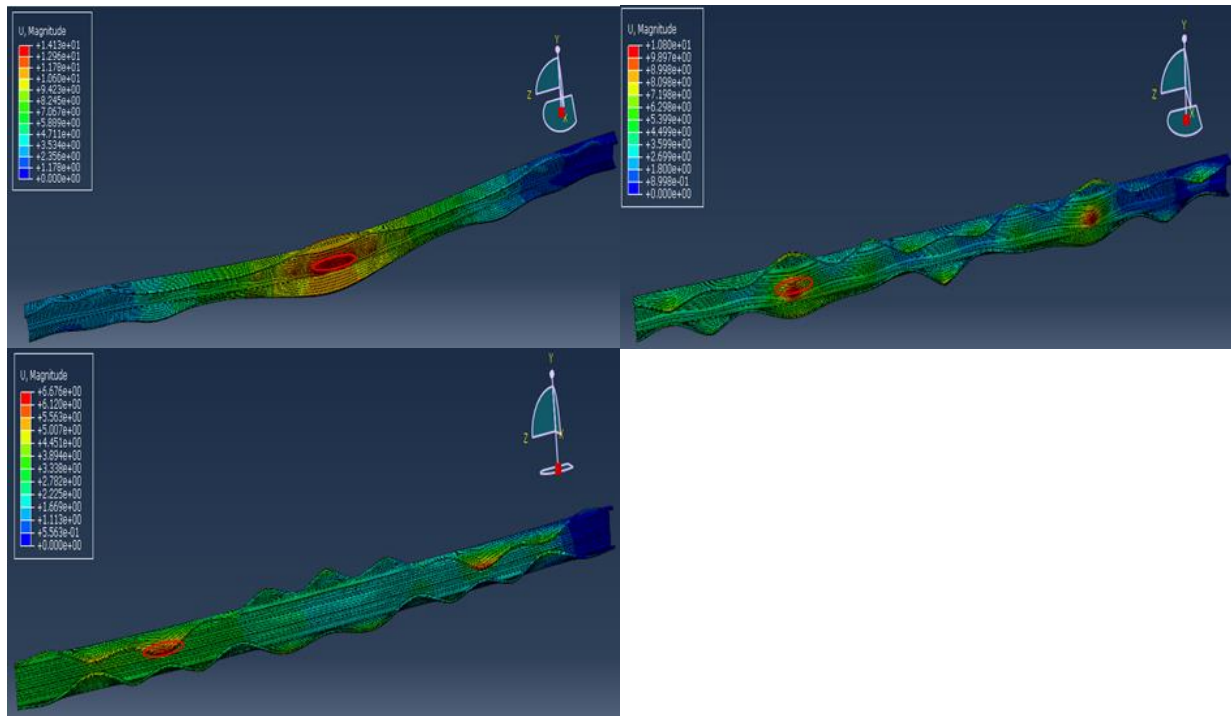
Gambar 11. Tampak 3D Pemodelan *Meshing*

3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis dengan Abaqus

Berikut adalah tegangan dan deformasi dari setiap model berurutan dari model 1 sampai model 5.

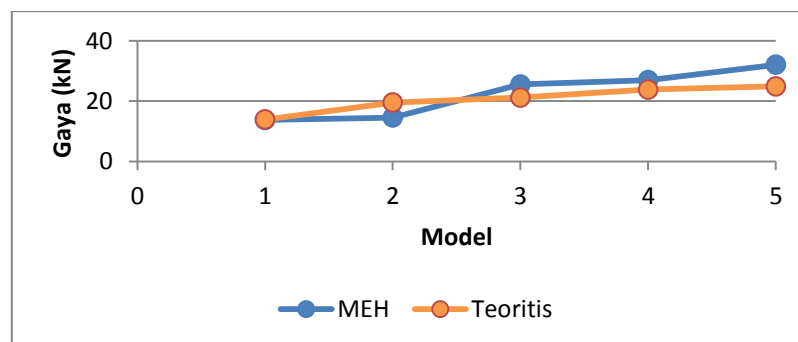




Gambar 12. Tegangan, Deformasi Model 1 sampai 5

Tabel 2. Hasil Analisis Teoritis dan MEH

Model No.	Teoritis (kN)	MEH (kN)	Perbedaan (%)
1	13,9141	13,7659	1,0651
2	19,5484	14,5354	25,644
3	21,1855	25,5395	20,5518
4	23,8193	26,9574	13,1746
5	24,9001	32,051	28,7184



Gambar 13. Grafik Perbedaan Analisis MEH dan Teoritis

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis metode elemen hingga dan teoritis maka diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Beban tekan kritis (P_{cr}) yang dihasilkan antara model pertama hingga kelima secara berurutan adalah 13,9141 KN; 19,5484 KN; 21,1855 KN; 23,8193 KN; 24,9001 KN menunjukkan bertambahnya luas pengaku web akan menaikkan kuat tekan penampang tersebut. Hal ini juga didukung dari hasil analisis metode elemen hingga secara berurutan yaitu 13,7659 KN; 14,5354 KN; 25,5395 KN; 26,9574 KN; 32,051 KN.

2. Pada perhitungan beban tekan kritis (P_{cr}) dengan analisis metode elemen hingga terjadi peningkatan yang cukup besar pada model ketiga, yaitu sebesar 75,7% terhadap model kedua.
3. Tegangan *Von Mises* yang dihasilkan antara model pertama hingga kelima secara berurutan adalah 301,546 MPa; 323,149 MPa; 644,008 MPa; 646,83 MPa; 650,18 MPa menunjukkan semakin luas pengaku *web*, tegangan *Von Mises* yang dihasilkan juga semakin besar.
4. Berdasarkan kegagalan pada model pertama dan kelima, tekuk yang terjadi pada model adalah tekuk lokal (bagian *flens*), dan pada model kedua, ketiga dan keempat, tekuk yang terjadi pada model adalah tekuk lokal (bagian *web*). Hal ini menunjukkan kalau profil memerlukan pengaku yang lebih kuat pada bagian *flens* dan *web*.
5. Perbedaan nilai P_{cr} analisis metode elemen hingga dengan analisis teoritis yang cukup dekat terjadi pada model pertama yaitu sebesar 1,06% menunjukkan model metode elemen hingga cocok digunakan untuk perhitungan profil tanpa pengaku *web*.

Saran

Berdasarkan proses pengerjaan studi ini ditemukan beberapa kesulitan, maka dari itu penulis memberikan saran untuk studi selanjutnya :

1. Untuk hasil yang lebih akurat perlu dilakukan uji eksperimen pada penelitian selanjutnya.
2. Untuk penelitian selanjutnya dapat diganti bentuk profil penampang atau ditambah jumlah pengaku pada penampang.
3. Dapat dicoba penelitian pengaruh luas pengaku terhadap kuat tekan profil dengan nilai rasio kelangsingan lainnya.
4. Untuk penelitian selanjutnya dapat diganti tipe perletakan dengan tipe kondisi batas lainnya.
5. Permodelan elemen dapat disempurnakan dengan memperhitungkan nilai tegangan sisa dan *imperfection* dari penampang.

DAFTAR PUSTAKA

- American Iron and Steel Institute (2007), *Nort American Specification for Design of Cold-Formed Steel Sctructure Members*, Mexico.
- Dewobroto, W. (2015). *Struktur Baja “Perilaku, Analisis, dan Desain – AISC 2010.”* Tangerang, Banten: Jurusan Teknik Sipil Universitas Pelita Harapan, LUMINA Press.
- Getting Started With Abaqus. Tersedia di www.engineering.ucsb.edu/~tshugar/GET_STARTED.pdf (13 Juni 2018).
- Logan, D.L., (2011). *A First Course in the Finite Element Method*. 5th ed., Nelson, Canada.
- Ruus, Kezia dkk. (2017). *Pengaruh Bentuk Badan Profil Baja Ringan Terhadap Kuat Tekan*. Jurnal Sipil Statik.
- Standar Nasional Indonesia 7971 (2013). “Struktur Baja Canai Dingin.” Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Sutresman, Onny Suryono. (2014). *Profil HS-75 Untuk Rangka Atap*. Palu: Penerbit Untad Press
- Yu, Wei Wen. (2000). *Cold-Formed Steel Design*. Edisi 3, Canada.