

## Studi Numerik Geser Blok Susunan Baut Berliku-liku pada Batang Tarik Profil T

Arif Sandjaya

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara  
Jl. Letjen. S. Parman No.1, Jakarta Barat  
E-mail: arifs@ft.untar.ac.id

Hendy Wijaya

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara  
Jl. Letjen. S. Parman No.1, Jakarta Barat  
E-mail: hendyw@ft.untar.ac.id

### Abstrak

Kekuatan tegangan tarik desain harus merupakan nilai terendah yang diperoleh sesuai dengan keadaan batas dari hasil tegangan tarik leleh pada penampang utuh, tegangan tarik putus pada penampang efektif, dan keadaan batas geser blok sepanjang jalur kegagalan geser dan jalur kegagalan tegak lurus tegangan tarik. Dari hasil eksperimen pada profil T yang disambung dengan baut di bagian sayapnya, dapat terjadi pola kegagalan geser blok yang diistilahkan dengan alternate path block shear failure (ABS). Penelitian ini bertujuan untuk memperkirakan efisiensi pola sambungan baut terhadap kekuatan tarik profil T yang disambung di bagian sayap. Penelitian ini akan dilakukan dengan salah satu analisis numerik yaitu finite element method (FEM) yang telah dibuktikan baik untuk menyelidiki fenomena kegagalan tarik. Kekuatan tarik hasil FEM juga dibandingkan dengan prediksi kekuatan berdasarkan SNI 1729:2015 dan prediksi kekuatan ABS menurut rumus Epstein.

**Kata-kata Kunci:** Profil T, alternate path block shear failure, sambungan baut sayap

### Abstract

The design tensile strength of tension members shall be the lower value obtained according to the limit states of tensile yielding in gross section, tensile rupture in the net section, and the limit state of block shear rupture along shear failure path or paths and a perpendicular tension failure path. From the experimental results on the T profile attached to the bolts on the flanges, a block shear failure pattern can be termed with alternate path block shear failure (ABS). This study aims to estimate the efficiency of the bolt connection pattern to the tensile strength of the T profile attached on the flanges. This research will be conducted with one of the numerical analysis of finite element method (FEM) which has been proven to investigate the phenomenon of tensile failure. The tensile strength of the FEM results is also compared with the strength prediction based on SNI 1729: 2015 and the prediction of ABS power according to the Epstein formula.

**Keywords:** T profile, alternate path block shear failure, bolt connection, flanges

## 1. Pendahuluan

Fenomena geser blok ini kerap menjadi kriteria penentu pada konfigurasi sambungan-sambungan pendek. Kekuatan geser blok yang diatur dalam SNI 1729:2015 dibatasi oleh dua kondisi kegagalan, yaitu kombinasi putus atau leleh disepanjang bidang geser dan putus disepanjang bidang tarik. Persamaan kekuatan geser blok dinyatakan sebagai berikut:

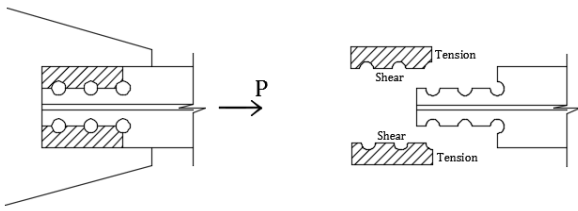
$$\phi R_n = \phi (0,6 F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt}) \leq \phi (0,6 F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt}) \quad (1)$$

dengan

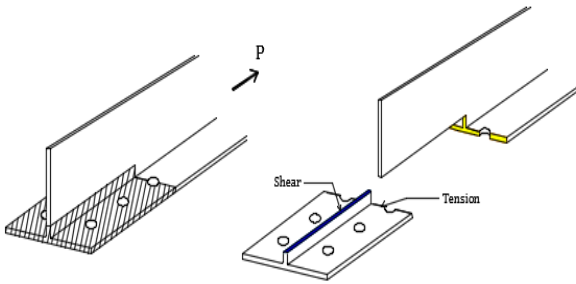
- $\phi$  = faktor ketahanan
- $F_u$  = kekuatan tarik minimum yang dispesifikasikan
- $F_y$  = tegangan leleh minimum yang dispesifikasikan

- $A_{gv}$  = luas bruto bidang geser pada geser blok
- $A_{nv}$  = luas neto bidang geser pada geser blok
- $A_{nt}$  = luas neto bidang tarik pada geser blok
- $U_{bs}$  = faktor reduksi geser blok

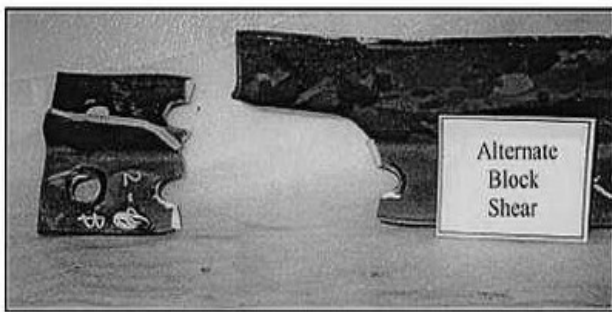
Pada profil T yang disambung dengan baut pada bagian sayap, kegagalan geser blok diasumsikan terjadi daerah sayap (**Gambar 1**). Namun hasil eksperimen pada profil T yang disambung dengan baut pada bagian sayap menampilkan pola kegagalan geser blok yang diistilahkan sebagai alternate path block shear failure atau pola ABS (Epstein, 1996; Epstein dan Stamberg, 2002). Pola ini melibatkan tegangan geser di sepanjang badan profil dan tegangan tarik di sepanjang potongan melintang dari sayap dan menjalar ke badan profil. (**Gambar 2** dan **Gambar 3**).



Gambar 1. Pola geser blok yang diperkirakan SNI 1729:2015



Gambar 2. Pola alternate path block shear failure



Gambar 3. Benda uji yang mengalami alternate path block shear failure (Epstein, 1966)

Perhitungan luas bidang tarik dan bidang geser pada pola ABS mengacu pada modifikasi luas bidang tarik dan geser (Epstein, 1996) sebagai berikut:

$$A_{gt} = A_g - (d - k) t_w \quad (2)$$

$$A_{nt} = A_{gt} - n d_{hole} t_f \quad (3)$$

$$A_{gv} = A_{nv} = (1 + e) t_w \quad (4)$$

dengan

$A_{gt}$  = luas bidang tarik bruto

$A_g$  = luas penampang

$d$  = tinggi penampang

$t_w$  = tebal badan

$t_f$  = tebal sayap

$k$  = tebal sayap + jari-jari sudut ( $r$ )

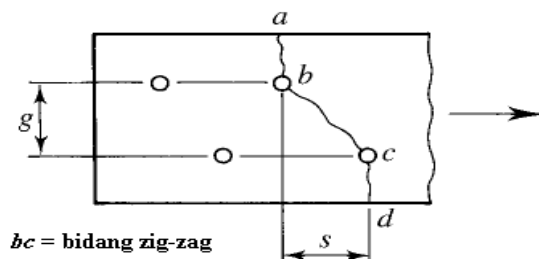
$n$  = jumlah baut yang dilalui bidang tarik

$d_{hole}$  = diameter lubang standar nominal + 2 mm

$L$  = panjang sambungan

$e$  = jarak ke tepi profil

Apabila batang tarik disambung dengan alat penyambung baut, maka luas bidang tarik neto akan maksimum bila baut-baut disusun dalam satu baris. Namun untuk membatasi dimensi pelat buhul maupun sambungan yang terlalu panjang, terkadang penyusunan baut dilakukan dalam dua baris secara berseling atau zig-zag (Gambar 4). Konfigurasi sambungan yang demikian meminimalkan reduksi pada luas bidang tarik neto. Ketentuan mengenai kontribusi susunan baut zig-zag pada kekuatan geser blok belum secara jelas didefinisikan dalam SNI, namun beberapa literatur (Smith, 1996 ; Segui, 2013) menjelaskan adanya peningkatan sebesar  $s^2/4g$  pada luas bidang tarik neto.



Gambar 4. Susunan baut berseling atau zig zag (segui, 2013)

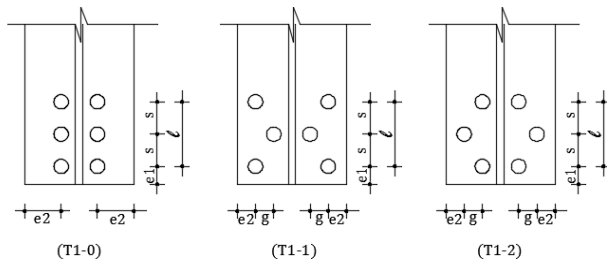
Studi numerik yang dilakukan terhadap profil T yang disambung pada bagian sayap memperlihatkan indikasi ABS yang mungkin terjadi (Wijaya dan Suryoatmono, 2017). Penelitian lain yang dilakukan dalam mempelajari pola geser blok pada penampang kanal dan plat buhul menunjukkan terjadinya putus pada bidang zig-zag (Samimi et. al, 2016).

Penelitian ini memaparkan hasil studi numerik dengan bantuan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga (FEM) terhadap indikasi terjadinya pola ABS pada batang tarik profil T yang disambung di bagian sayap dengan susunan baut zig-zag. Prediksi kekuatan hasil FEM juga dibandingkan dengan hasil analitis berdasarkan SNI 1729:2015 dan modifikasi rumus ABS menurut Epstein. Penelitian ini merupakan lanjutan dari studi yang telah dilakukan oleh Wijaya dan Suryoatmono (2017).

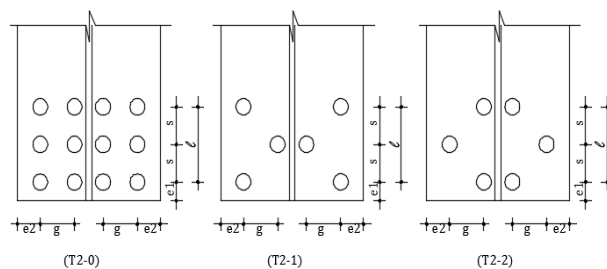
## 2. Metode Penelitian

Profil T yang digunakan yang digunakan dalam analisis didasarkan pada profil dengan konfigurasi sambungan lurus (tipe 0) yang kegagalannya ditentukan oleh pola ABS menurut Epstein (Persamaan 2, 3, dan 4). Pada penelitian ini digunakan dua jenis profil T, yakni T 150x150 dan T 125x250 yang mengalami ABS menurut Wijaya dan Suryoatmono (2017). Konfigurasi dari sambungan lurus tersebut kemudian divariasikan dalam dua pola zig-zag (tipe 1 dan tipe 2) tanpa merubah panjang total sambungan ( $l + e_1$ ). Total ada enam model yang dianalisis. Parameter geometris sambungan tipe 0, tipe 1, dan tipe 2 dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Geometri dari

sambungan disesuaikan dengan ketentuan jarak minimum yang ditetapkan dalam SNI 1729:2015. **Tabel 1** menunjukkan nilai parameter geometris yang digunakan untuk keenam model.



**Gambar 5. Konfigurasi sambungan profil T 150 x 150 (T1) baut M16**



**Gambar 6. Konfigurasi sambungan profil T 125x250 (T2) M22**

Kekuatan tarik desain diperhitungkan dengan menggunakan faktor reduksi,  $U_{bs} = 1$  dan menyertakan faktor  $s^2/4g$  pada luas bidang tarik neto. Kekuatan tarik ini kemudian dibandingkan dengan prediksi kekuatan hasil FEM saat beban runtuh tercapai.

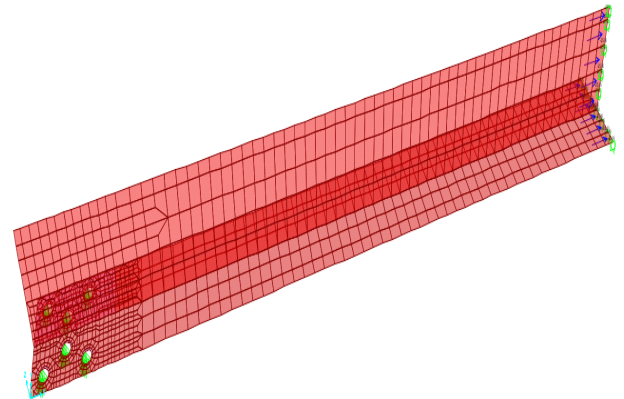
**Tabel 1. Parameter geometris sambungan**

| Indeks | Total baut | $e_1$ (mm) | $e_2$ (mm) | $s$ (mm) | $l$ (mm) | $g$ (mm) |
|--------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|
| T1-0   | 6          | 25         | 50         | 45       | 90       | -        |
| T1-1   | 6          | 25         | 25         | 45       | 90       | 45       |
| T1-2   | 6          | 25         | 25         | 45       | 90       | 45       |
| T2-0   | 12         | 40         | 40         | 60       | 120      | 60       |
| T2-1   | 6          | 40         | 40         | 60       | 120      | 60       |
| T2-2   | 6          | 40         | 40         | 60       | 120      | 60       |

Elemen yang digunakan dalam analisis adalah elemen shell segiempat 4 nodal sebagai elemen utama, dipadukan dengan beberapa elemen shell segitiga 3 nodal sebagai elemen-elemen transisinya. Karena analisis dilakukan secara 3D, sehingga dipilih elemen shell yang mampu mempresentasikan perilaku membran dan perilaku lentur pada setiap titik nodalnya.

Rasio panjang profil terhadap tinggi profil untuk semua kasus diambil seragam sebesar  $L/d = 10$ . Sambungan dimodelkan pada salah satu ujung profil saja, dan ujung lainnya mencerminkan kondisi profil diluar daerah

sambungan. Beban berupa tegangan tarik diterapkan pada ujung yang jauh dari sambungan. Boundary conditions ditentukan sedemikian rupa sehingga analisis dapat mewakili kondisi sebenarnya. Dengan mengasumsikan bahwa baut adalah rigid, kurang lebih separuh dari keliling lubang baut ditahan terhadap translasi vertikal dan translasi horisontal pada daerah kontak baut dengan profil. Sedangkan pada ujung yang jauh dari sambungan, setiap titik nodal dimana beban bekerja ditahan terhadap translasi vertikal. **Gambar 7** memperlihatkan tipikal model elemen hingga yang digunakan.

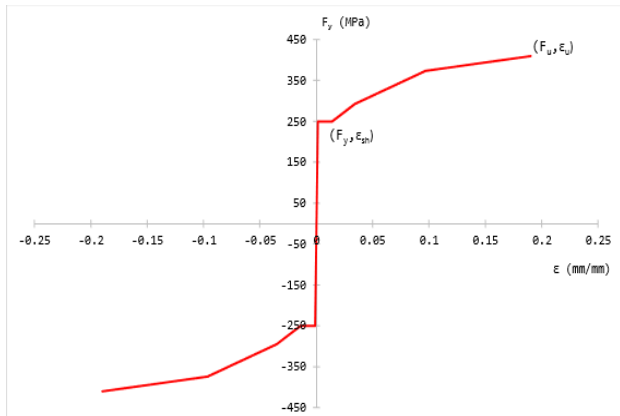


**Gambar 7. Tipikal model elemen hingga**

Pada penelitian ini, diperhitungkan pengaruh non-linieritas material dan geometri. Hubungan tegangan-regangan yang digunakan digambarkan pada **Gambar 8**. Material dalam kondisi elastis sampai titik leleh  $F_y$ . Setelah kekuatan leleh tercapai, material akan terus berdeformasi dengan tegangan konstan  $F_y$  sampai tercapai regangan  $\epsilon_{sh}$ . Pada kondisi strain hardening, meskipun deformasi terus bertambah namun material mendapatkan keuntungan dengan terjadinya peningkatan tegangan menuju tegangan ultimit  $F_u$ . Pada titik  $F_u$ , regangan yang sudah tercapai adalah sebesar  $\epsilon_u$ . Non-linieritas geometri diperhitungkan terhadap efek P-Delta.

Pembebanan menggunakan beban riwayat waktu, dengan besar beban yang ditingkatkan secara linier terhadap waktu. Untuk menghindari adanya pengaruh gaya inersia yang dapat menyebabkan elemen bergetar, maka beban harus ditingkatkan secara sangat perlahan. Analisis beban riwayat waktu menggunakan metode integrasi langsung dengan formulasi Hilber, Hughes, dan Taylor (metode  $\alpha$ ). Parameter  $\alpha$  diambil sebesar -0.3. Analisis non-linear beban riwayat waktu dilakukan sampai analisis mencapai kondisi tak konvergen.

Untuk merekam respons perpindahan terhadap perubahan beban, digunakan metode Newton-Raphson. Batas toleransi konvergensi gaya diambil sebesar 0,001, sedangkan parameter-parameter non-linier lainnya mengikuti default yang telah ditetapkan dalam perangkat lunak.



Gambar 8. Kurva hubungan tegangan—regangan material BJ 41

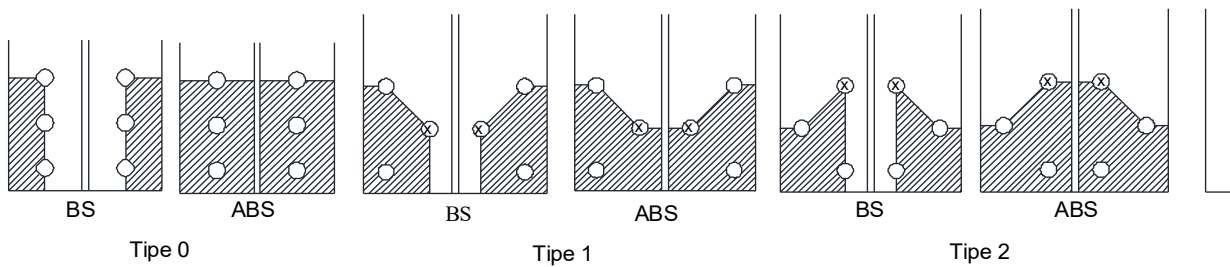
Kriteria kegagalan dari hasil analisis berkaitan dengan beban yang menyebabkan struktur tidak stabil yang dapat ditentukan dari kurva beban-perpindahan. Karena tegangan yang terjadi di tiap elemen adalah tegangan

multiaksial, maka tegangan ekuivalen von Mises juga ditinjau pada penelitian ini.

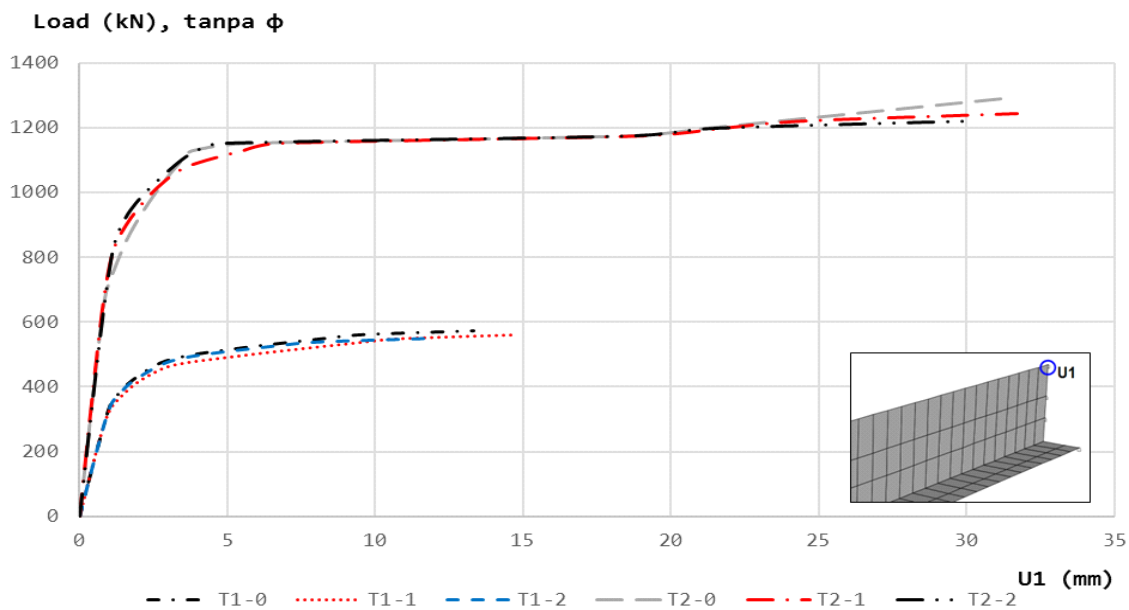
Retak tidak dimodelkan dalam model, sehingga ragam kegagalan dari hasil FEM tidak terdefinisi dengan jelas. Kegagalan geser blok atau putus pada penampang neto, keduanya merupakan peristiwa putus yang tentunya melibatkan proses terbentuknya retak dan penjarangan retak. Indikasi terhadap salah satu ragam kegagalan dapat ditentukan dengan menyelidiki distribusi tegangan dan deformasi yang terjadi.

### 3. Hasil Analisis

Hasil kekuatan tarik desain menurut SNI 1729:2015 dan modifikasi rumus ABS disajikan dalam Tabel 2. Pola geser blok dan ABS yang diasumsikan terjadi pada konfigurasi tipe 1 dan tipe 2 diilustrasikan pada Gambar 9. Pada bidang zig-zag hanya diperhitungkan tegangan tarik yang bekerja. Berdasarkan prosedur analitis, ragam kegagalan ABS terjadi pada konfigurasi tipe 2, sedangkan pada konfigurasi tipe 1, ragam kegagalannya ditentukan oleh geser blok.



Gambar 9. Asumsi pola geser blok dan ABS pada konfigurasi tipe 0, 1, dan 2.



Gambar 10 Kurva beban—perpindahan dari keenam model

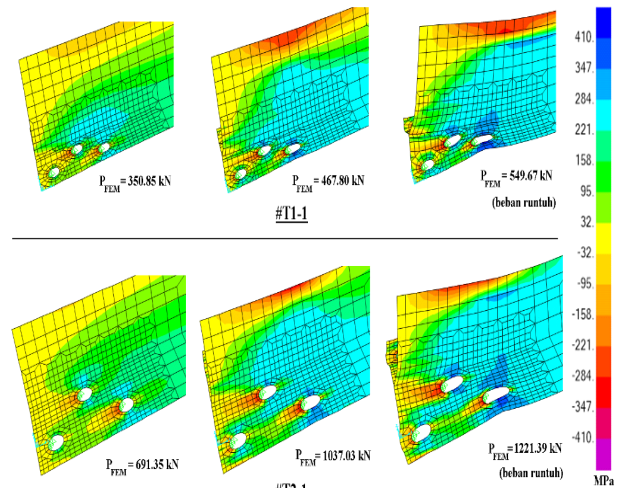
Pada model T1, kekuatan tertinggi dialami oleh konfigurasi tipe 2. Kekuatan terendah dialami oleh konfigurasi tipe 1. Hal ini karena tipe 1 memiliki bidang geser yang lebih pendek, sehingga kekuatan yang disumbangkan bidang geser menjadi lebih rendah. Sedangkan tipe 0 memiliki bidang tarik yang lebih kecil karena tidak ada kontribusi  $s^2/4g$ . Jika dilihat dari luas bidang tarik pada tipe 1 dan 2, maka kedua tipe memberikan kontribusi yang sama besar. Hal ini bisa dikatakan bahwa untuk kedua tipe tersebut, kekuatan tarik desain ditentukan oleh posisi lubang baut terdepan pada barisan baut yang dekat dengan badan profil (lubang baut dengan simbol [x] pada Gambar 9).

Prediksi kekuatan tarik desain dari hasil FEM dapat dibaca dari kurva hubungan beban-perpindahan pada masing-masing model. Kurva hubungan beban-perpindahan diperlihatkan pada Gambar 10. Prediksi kekuatan hasil FEM dirangkum dalam Tabel 2 dengan  $\phi$  sebesar 0.75.

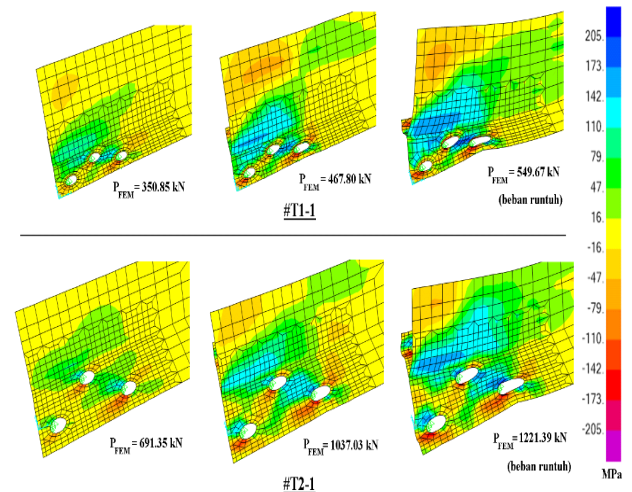
Tabel 2. Kekuatan tarik hasil analitis dan prediksi FEM

| Indeks | Analitis          |       | FEM, dengan $\phi$ |          |
|--------|-------------------|-------|--------------------|----------|
|        | Beban runtuh (kN) | Ragam | Beban runtuh (kN)  | Indikasi |
| T1-0   | 436.80            | ABS   | 421.02             | ABS      |
| T1-1   | 364.53            | BS    | 412.25             | ABS      |
| T1-2   | 438.18            | ABS   | 403.48             | ABS      |
| T2-0   | 868.64            | ABS   | 967.89             | ABS      |
| T2-1   | 851.76            | BS    | 916.04             | ABS      |
| T2-2   | 987.66            | ABS   | 898.76             | ABS      |

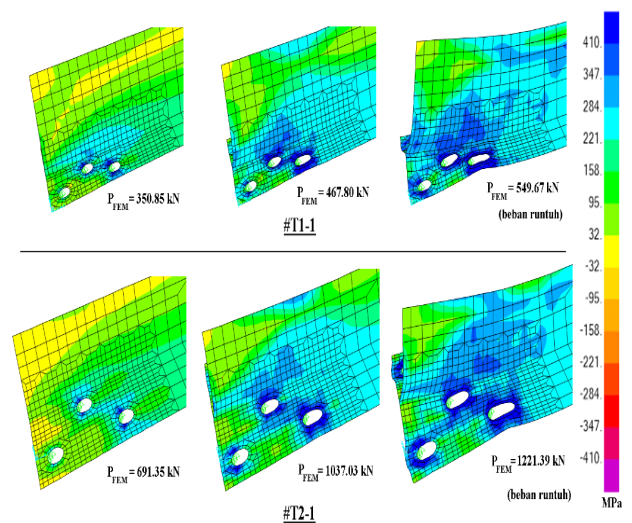
Dari keenam model tersebut, prediksi FEM menunjukkan hasil yang cukup baik untuk tipe 0. Untuk tipe 1 dan 2, FEM menunjukkan bahwa kekuatan tipe 1 lebih tinggi dari tipe 2, namun hasil analitis menunjukkan kekuatan tipe 1 lebih rendah dari tipe 2. Hal ini tentu perlu menjadi perhatian untuk diselidiki lebih lanjut penyebab perbedaan tersebut. Untuk menyelidiki kemungkinan terjadinya ABS pada susunan baut zig-zag, maka dipelajari pola penyebaran tegangan yang terjadi yaitu tegangan normal arah longitudinal, tegangan geser, dan tegangan von Mises ditinjau (Gambar 11 – Gambar 16). Bila dilihat dari pola penyebaran tegangan normal longitudinal (Gambar 14), konsentrasi tegangan yang dialami konfigurasi tipe 2 lebih dahulu menjaral ke badan profil pada tahapan beban yang sama. Penulis beranggapan hal itu mungkin bisa menjadi salah satu penyebab kekuatan tipe 1 lebih tinggi dari tipe 2. Di dalam SNI 1729:2015 tidak diperhitungkan pengaruh arah pola zig-zag pada kekuatan geser blok.



Gambar 11. Tegangan normal longitudinal pada konfigurasi tipe 1

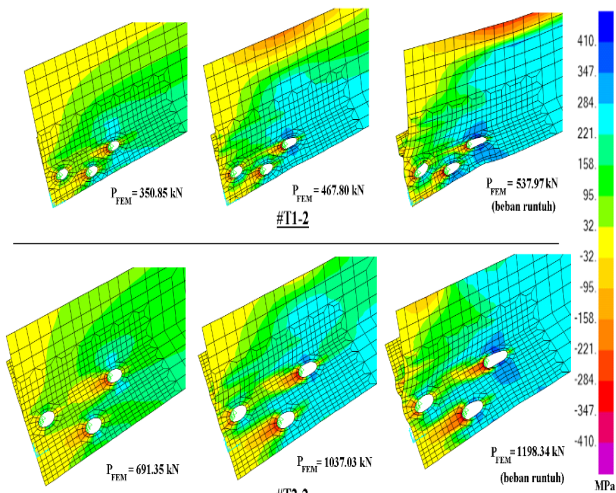


Gambar 12. Tegangan geser pada konfigurasi tipe 1

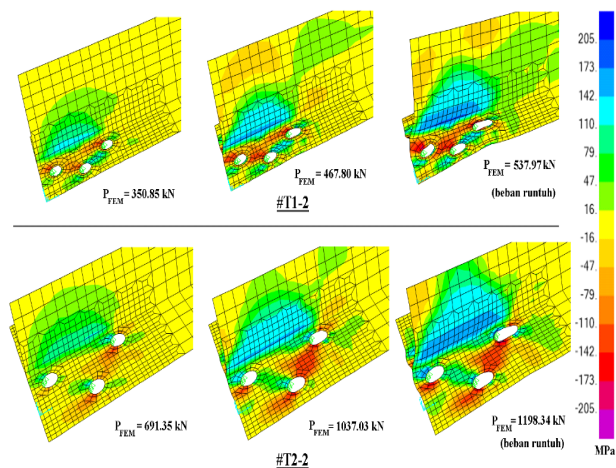


Gambar 13. Tegangan Von Mises pada konfigurasi tipe 1

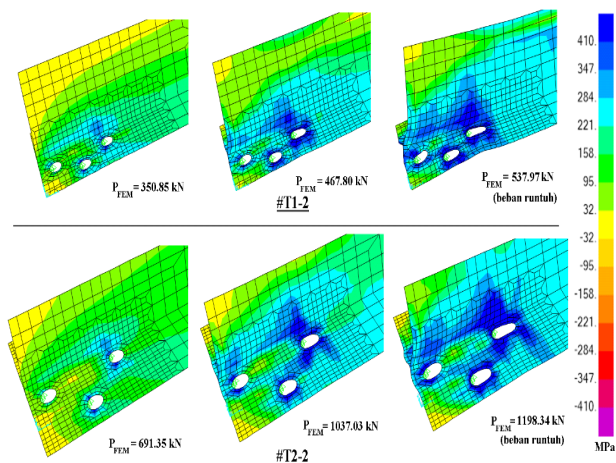




Gambar 14. Tegangan normal longitudinal pada konfigurasi tipe 2



Gambar 15. Tegangan geser pada konfigurasi 2



Gambar 16. Tegangan Von Mises pada konfigurasi tipe 2

FEM memperlihatkan adanya deformasi lentur yang dialami keenam model. Hal ini dapat dijelaskan karena adanya eksentrisitas antara pusat berat penampang dengan pusat berat sambungan. Pada jenis sambungan

yang eksentris, tambahan momen lentur akan mempengaruhi kekuatan geser blok. SNI 1729:2015 belum mendefinisikan secara jelas tentang pengaruh ini.

#### 4. Kesimpulan dan Saran

Dari hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Hasil perhitungan kuat tarik desain menunjukkan bahwa kegagalan alternate path block shear failure (ABS) lebih menentukan pada konfigurasi tipe 2, sedangkan konfigurasi tipe 1 ditentukan oleh geser blok.
2. Pada konfigurasi tipe 1, perhitungan kekuatan tarik desain berdasarkan ketentuan SNI dan modifikasi rumus ABS lebih konservatif dibandingkan hasil prediksi FEM, sedangkan pada konfigurasi tipe 2, FEM menunjukkan hasil yang lebih konservatif dibandingkan hasil analitis.
3. Pola penyebaran tegangan dan deformasi hasil FEM menunjukkan adanya indikasi bahwa alternate path block shear failure (ABS) mungkin terjadi pada kedua tipe konfigurasi.
4. Hasil FEM memperlihatkan tiap-tiap elemen di sepanjang bidang zig-zag menderita tegangan normal dan tegangan geser secara simultan, sedangkan perhitungan analitis hanya mempertimbangkan tegangan tarik pada bidang tersebut. Hal ini tentu perlu dipelajari lebih lanjut perihal kontribusi tegangan geser pada bidang zig-zag pada kekuatan tarik desain.

Beberapa hal yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian lebih lanjut antara lain:

1. Memvariasikan jumlah dan jarak baut yang digunakan sehingga diperoleh lebih banyak data guna mendukung hasil penelitian ini.
2. Pengujian eksperimental perlu dilakukan untuk memverifikasi ragam kegagalan serta kekuatan tarik desain menurut SNI, modifikasi rumus ABS, dan hasil prediksi FEM pada kedua konfigurasi sambungan.

#### Daftar Pustaka

Badan Standarisasi Nasional 2015. SNI.03-1729-2015: Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural, Indonesia.

Epstein, H. (1996), *Block Shear of Structural Tees in Tension – Alternate Paths*, Engineering Journal, AISC, Fourth Quarter, pp. 147-152.

Epstein, H. and Stamberg, H. (2002), *Block Shear and Net Section Capacities of Structural Tees in Tension: Test Results and Code Implications*, Engineering Journal, AISC, Fourth Quarter, pp. 228-239.

Segui, W. T. (2013), *Steel Design*. 5<sup>th</sup> ed., Cengage Learning. Stamford, Connecticut.

Wijaya, H. dan Suryoatmono, B. (2017), *Numerical Study on Alternate Block Shear Failure Mode of Structural Tees Section Loaded in Tension*, *Procedia Engineering*, Volume 171, pp. 865-873

