

Kekuatan Geser Gelagar Pelat *Linearly Tapered*

*Flosten Yosep, Paulus Karta Wijaya

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung

*flostenyosep@gmail.com

Received: 25 Mei 2020 Revised: 30 November 2020 Accepted: 5 Desember 2020

Abstract

This study analyzes the shear behaviour of I profile linearly tapered plate girder and obtains a proposed method to estimate its shear strength. This study contains 72 models of linearly tapered plate girder with angle of inclination range from 2° up to 30°, web thickness: 5 mm up to 8 mm and ratio of a/h: 1, 1.25 dan 1.5. All models have slender web. This study was performed through analysis by finite element method using ADINA 9.5 software. All models are simply supported and applied two shear load variations, which cause diagonal tension field action at short diagonal direction (Type I) and long diagonal direction (Type II), respectively. For type I, its shear strength can be determined using the equation of shear strength according to AISC 360-16 design specification using smallest web depth. While for type II, the analysis results shown that its shear strength reduce with the increase of its inclination angle and ratio of a/h_{min} . According to that results, a modification factor for determining the shear strength of linearly tapered plate girder which respects to AISC 360-16 design specification has been obtained.

Keywords: Shear strength, plate girder, tension field action, linearly tapered, modification factor

Abstrak

Studi ini menganalisis perilaku geser gelagar pelat linearly tapered berpenampang I dan menentukan metode usulan untuk mengestimasi kekuatan gesernya. Studi ini terdiri dari 72 model gelagar pelat linearly tapered dengan sudut kemiringan berkisar antara 2° hingga 30°, tebal pelat badan 5 mm hingga 8 mm dan rasio a/h: 1; 1,25 dan 1,5. Keseluruhan model memiliki pelat badan yang langsing. Studi dilakukan melalui analisis metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak ADINA 9.5. Keseluruhan model dimodelkan tertumpu sederhana dan diberikan dua variasi tipe beban geser, yakni yang menyebabkan aksi medan tarik diagonal pada arah diagonal pendek (Tipe I) dan diagonal panjang (Tipe II). Untuk tipe I, kekuatan gesernya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan kekuatan geser yang terdapat pada spesifikasi desain AISC 360-16, dengan menggunakan tinggi pelat badan terkecil. Sedangkan untuk tipe II, hasil analisis menunjukkan bahwa kekuatan gesernya menurun seiring dengan peningkatan sudut kemiringannya dan rasio a/h_{min} . Berdasarkan hasil tersebut, faktor modifikasi untuk menentukan kekuatan geser gelagar pelat linearly tapered terhadap spesifikasi desain AISC 360-16 ditentukan.

Kata kunci: Kekuatan geser, gelagar pelat, aksi medan tarik diagonal, linearly tapered, faktor modifikasi

Pendahuluan

Salah satu penampang elemen struktural yang paling sering digunakan ialah penampang I. Pada struktur gedung dan jembatan, dimana beban-beban yang bekerja sangat besar, elemen struktural (balok dan kolom) yang didesain memiliki dimensi penampang yang sangat besar. Sebagai hasil proses optimasi, penampang nonprismatis menjadi salah satu alternatif yang efektif dalam mendesain elemen struktural. Pada struktur jembatan, salah satu

penampang nonprismatis yang sering digunakan ialah gelagar pelat *linearly tapered*, dimana variasi tinggi profil berubah secara linier disetiap panjangnya. Selain itu, gelagar pelat biasanya memiliki pelat badan yang langsing. Dalam hal ini, proses optimasi mencakup desain penampang sesuai dengan momen yang terjadi sepanjang bentang. Sebagai hasilnya, penggunaan gelagar pelat *tapered* memberikan keuntungan dalam hal reduksi berat sendiri profil dan dari segi ekonomis juga tercapai (Chalal, 2017).

Salah satu kriteria dalam desain penampang ialah kriteria kekuatan geser. Berbagai penelitian telah banyak dilakukan, baik secara eksperimental maupun numerik, untuk menganalisis dan memberikan suatu metode perhitungan untuk menentukan kekuatan geser profil I prismatis. Metode yang umum digunakan ialah metode Basler (1961), yang juga digunakan dalam spesifikasi desain AISC 360-16 dan AASHTO.

Beberapa asumsi mendasar metode Basler ialah: (1) pelat badan profil memikul beban geser murni hingga mencapai kondisi tekuk kritis; (2) sudut tegangan utama yang terjadi ialah 45° ; (3) tegangan tekan utama tidak meningkat setelah terjadi tekuk geser. Menurut Basler, profil I prismatis, paska terjadinya tekuk pelat badan, masih mampu memikul beban yang melebihi dari beban tekuk pelat badannya, jika pengaku transversal dipasang dengan jarak yang cukup baik dan memberikan kekakuan yang cukup untuk menahan pergerakan keluar bidang dari pelat badan yang tertekuk. Perilaku tersebut dikenal dengan istilah aksi medan tarik (*tension field action*). Spesifikasi desain AISC 360-16 membatasi rasio jarak antara pengaku transversal terhadap tinggi pelat badan (a/h) tidak melebihi dari tiga untuk memperhitungkan aksi medan tarik yang terjadi. Kekuatan geser gelagar pelat profil I prismatis pada spesifikasi desain AISC 360-16, yang berdasar pada metode Basler, dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\text{a) Untuk } h/t_w \leq 1.10\sqrt{k_v E/F_y} \\ V_n = 0.6F_y A_w \quad (1)$$

$$\text{b) Untuk } h/t_w > 1.10\sqrt{k_v E/F_y} \\ \text{Jika } 2A_w/(A_{fc} + A_{ft}) \leq 2.5, h/b_{fc} \leq 6 \text{ dan } h/b_{ft} \leq 6, \text{ maka:} \\ V_n = 0.6F_y A_w \left[C_{v2} + \frac{1-C_{v2}}{1.15\sqrt{1+(a/h)^2}} \right] \quad (2)$$

Selain dari itu,

$$V_n = 0.6F_y A_w \left[C_{v2} + \frac{1-C_{v2}}{1.15[a/h+\sqrt{1+(a/h)^2}]} \right] \quad (3)$$

dimana h , t_w , A_w ialah tinggi, tebal dan luas pelat badan, E dan F_y ialah modulus elastisitas dan tegangan leleh material baja, A_{fc} dan A_{ft} merupakan luas dari pelat sayap tekan dan tarik, b_{fc} dan b_{ft} ialah lebar pelat sayap tekan dan tarik, a ialah jarak antara pengaku transversal. Koefisien k_v merupakan koefisien tekuk geser yang ditentukan dengan menggunakan Persamaan (4).

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} \quad (4)$$

Faktor C_{v2} merupakan rasio antara tegangan tekuk geser kritis terhadap tegangan leleh geser, yang ditentukan sebagai berikut.

$$\text{a) Jika } h/t_w \leq 1.10\sqrt{k_v E/F_y}$$

$$C_{v2} = 1 \quad (5)$$

$$\text{b) Jika } 1.10\sqrt{k_v E/F_y} < h/t_w \leq 1.37\sqrt{k_v E/F_y}$$

$$C_{v2} = \frac{1.10\sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w} \quad (6)$$

$$\text{c) Jika } h/t_w > 1.37\sqrt{k_v E/F_y}$$

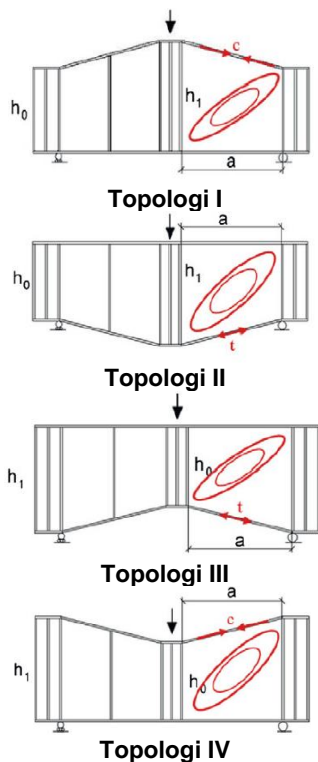
$$C_{v2} = \frac{1.51k_v E}{(h/t_w)^2 F_y} \quad (7)$$

Untuk gelagar pelat *linearly tapered*, AISC Design Guide 25 (2011) merekomendasikan metode perhitungan untuk menentukan kekuatan gesernya dengan mengasumsikan gelagar pelat merupakan gelagar pelat prismatis dengan tinggi $(h_0 + h_1)/2$, dimana h_0 dan h_1 merupakan tinggi pelat badan terkecil dan terbesar secara berturut-turut. Dengan asumsi yang demikian, maka efek kemiringan yang ditimbulkan terhadap kekuatan gesernya diabaikan, yang mungkin saja dapat mereduksi ataupun meningkatkan kekuatan geser yang disediakan oleh gelagar pelat *linearly tapered* berpenampang I. Di samping itu, AISC Design Guide 25 hanya membatasi sudut kemiringan gelagar pelat *linearly tapered* hingga 15° .

Terdapat beberapa penelitian baik itu secara eksperimental maupun numerik terkait dengan kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered*. Falby & Lee (1976) dengan menggunakan teori Basler memperhitungkan kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered* berdasarkan tinggi rata-ratanya namun kontribusi pelat sayap dalam menahan geser diabaikan. Selanjutnya, hasil penelitian Davies & Mandal (1979) menunjukkan bahwa kontribusi pelat sayap gelagar pelat *linearly tapered* terhadap kapasitas gesernya memberikan hasil yang lebih akurat antara hasil teoritis dan eksperimental. Namun, hasil penelitian tersebut hanya sesuai untuk kondisi pembebanan di mana gelagar pelat dibebani pada bagian ujungnya. Zarate & Mirambel (2014) melakukan kajian numerik terhadap gelagar pelat *linearly tapered* yang mengalami aksi medan tarik diagonal pada arah diagonal pendeknya. Penelitian dilakukan dengan berbagai variasi geometrik. Selain itu, penelitian ini juga mencoba menganalisis efek dari kondisi tegangan pelat sayap yang miring terhadap kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered*.

Selanjutnya, Bedynek *et al.* (2013, 2017) melakukan studi tentang kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered* berpenampang I, dimana empat model melalui kajian eksperimental dan 28 model melalui kajian numerik dengan menggunakan analisis metode elemen hingga. Bedynek *et al.* (2013, 2017) membagi gelagar pelat *linearly tapered* dalam empat topologi sebagaimana Gambar 1. Melalui kajian tersebut, Bedynek *et al.* (2013, 2017) mengusulkan persamaan kekuatan

geser gelagar pelat *linearly tapered* berpenampang I dengan memodifikasi persamaan yang terdapat pada spesifikasi desain EN 1993-1-5 dengan memperhitungkan efek *resal* yang ditimbulkan oleh kemiringan gelagar pelat. Efek *resal* merupakan tambahan beban geser yang disebabkan oleh gaya aksial pada pelat sayap akibat kemiringan gelagar pelat.

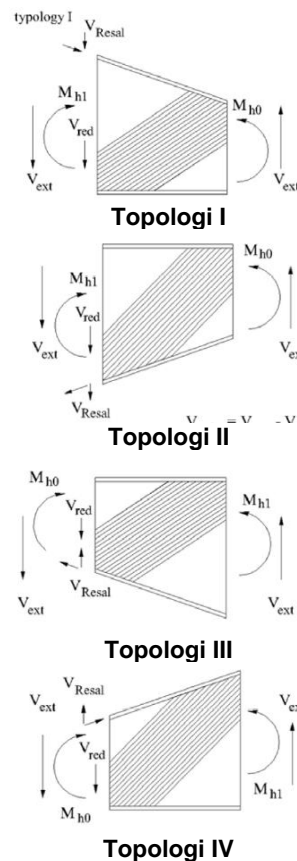


Gambar 1. Empat topologi gelagar pelat *linearly tapered* (Bedynek et al., 2013)

Efek *resal* ini diilustrasikan pada Gambar 2 dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut ini.

$$V_{Resal} = \frac{V_{ext}}{[1+(1/\cos \alpha)]} \sin^2 \alpha \quad (8)$$

dengan V_{ext} merupakan beban geser yang bekerja dan α merupakan sudut kemiringan gelagar pelat. Untuk topologi I dan II, efek *Resal* tersebut mereduksi beban eksternal yang bekerja pada struktur sedangkan untuk topologi III dan IV meningkatkan beban eksternal yang bekerja. Lebih terperinci lagi, Bedynek et al. (2014) mengusulkan modifikasi persamaan terhadap koefisien tekuk elastik untuk gelagar pelat *linearly tapered* untuk masing-masing topologi. Dari analisis tersebut, tekuk geser elastik gelagar pelat dengan sudut kemiringan $\leq 2,5^\circ$ masih cukup akurat jika menggunakan persamaan untuk gelagar pelat prismatis sedangkan untuk sudut kemiringan yang lebih besar, maka persamaan tersebut sudah tidak akurat lagi. Semakin besar sudut kemiringan dan rasio a/h , maka kekuatan tekuk geser elastiknya semakin tereduksi.



Gambar 2. Efek *resal* pada gelagar pelat *linearly tapered* (Bedynek et al., 2014)

Selanjutnya, Studer et al. (2015) melakukan kajian eksperimental tentang kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered* dan diperoleh kesimpulan bahwa kekuatan gesernya sangat akurat jika *modified shear method* digunakan, di mana komponen vertikal dari gaya pelat sayap atau efek *resal* diperhitungkan. Kajian lain adalah Serror et al. (2017) mengenai efek dari parameter geometrik gelagar pelat *linearly tapered* bagian ujung terhadap kuat geser elastik dan nominalnya. Parameter geometrik yang dimaksudkan ialah sudut kemiringan, rasio a/h , kelangsingan pelat badan, rasio ketebalan pelat sayap terhadap pelat badan dan tambahan pengaku transversal gelagar pelat *linearly tapered* bagian ujung.

Sebagai hasilnya, beban tekuk geser elastik dan nominalnya semakin rendah seiring dengan meningkatnya kelangsingan pelat badan dan rasio a/h . Sementara itu, peningkatan rasio ketebalan pelat sayap terhadap pelat badan meningkatkan kekuatan geser elastiknya namun tidak terlalu mempengaruhi kekuatan nominalnya. Hasil analisis lainnya, tambahan pengaku transversal meningkatkan kekuatan geser elastik dan nominal gelagar pelat *linearly tapered*. Penelitian lain terkait kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered* dilakukan oleh Sediek (2017) melalui kajian

numerik dengan metode elemen hingga. Diperoleh kesimpulan bahwa gelagar pelat *linearly tapered* sangat dipengaruhi oleh dua aspek, yaitu kemiringan dan rasio a/h dari gelagar pelat. Untuk sudut kemiringan $\leq 15^\circ$ dan rasio $a/h = 1$, kekuatan gesernya menurun rata-rata sebesar 10%. Sedangkan untuk kasus dengan sudut kemiringan $> 15^\circ$ dan rasio $a/h > 2$, kekuatan paska tekuk dapat diabaikan.

Terkait dengan kapasitas lenturnya, berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Sundar, *et al.* (2018) menunjukkan bahwa kapasitas lentur semakin besar nilainya jika bentuk dari gelagar pelat *linearly tapered* semakin mendekati bentuk bidang momen yang terjadi. Selanjutnya, Ibrahim *et al.* (2020) melakukan investigasi kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered* dengan kategori pelat badan yang langsing dan rasio $a/h \geq 3$ secara eksperimental dan numerik melalui metode elemen hingga. Melalui analisis yang dilakukan, diperoleh persamaan faktor modifikasi terhadap faktor C_v , rasio tegangan tekuk geser terhadap tegangan leleh geser, yang terdapat pada spesifikasi desain AISC 360-16.

Oleh karena kurangnya kajian terhadap kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered*, maka studi ini menganalisis perilaku gelagar pelat *linearly tapered* berpenampang I melalui kajian numerik dengan metode elemen hingga. Melalui studi ini, metode perhitungan untuk menentukan kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered* berpenampang I diperoleh dengan membandingkan hasil analisis metode elemen hingga dengan persamaan yang terdapat pada spesifikasi desain AISC 360-16. Dari hasil perbandingan tersebut, suatu persamaan faktor modifikasi terhadap persamaan AISC 360-16 dapat ditentukan.

Metode

Pemodelan struktur

Pemodelan struktur yang dilakukan pada studi ini berupa gelagar pelat *linearly tapered* berpenampang I dengan tumpuan sederhana di kedua ujungnya. Pada setiap lokasi pengaku transversal, gelagar pelat diberikan pengaku lateral,

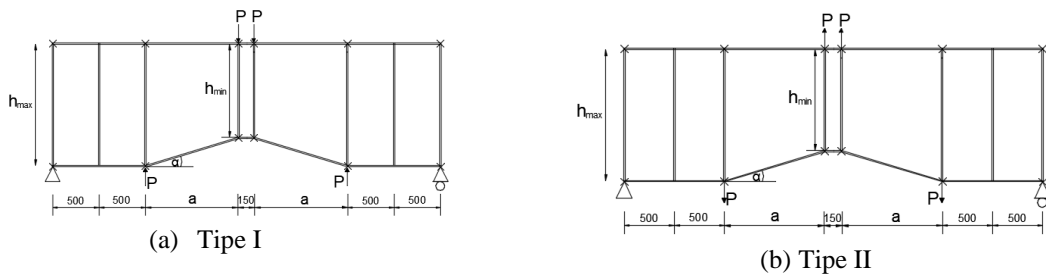
masing-masing pada pelat sayap bagian atas dan bawah, untuk mencegah terjadinya tekuk torsi lateral. Tipe pembebanan yang diberikan ialah beban geser pada masing-masing gelagar pelat bagian dalam. Tipe pembebanan ini terdiri dari 2 variasi, yakni Tipe I yang menyebabkan aksi medan tarik pada arah diagonal pendek dan Tipe II yang menyebabkan aksi medan tarik pada arah diagonal pendek. Pelat badan, baik dengan tinggi yang terbesar maupun terkecil, dimodelkan dengan kategori langsing. Untuk mencegah terjadinya tekuk lokal dan kelelahan pelat sayap terlebih dahulu sebelum terjadinya keruntuhan geser pelat badan, maka pelat sayap dimodelkan dengan kategori kompak. Pengaku transversal dimodelkan dengan secara teliti agar dapat dengan baik mendistribusikan beban geser yang diaplikasikan ke pelat badan gelagar pelat.

Rasio antara jarak pengaku transversal terhadap tinggi, dimana tinggi pelat badan yang digunakan ialah tinggi pelat badan terkecil, diambil sebesar 1, 1,25 dan 1,5. Rasio ini diambil berdasarkan penggunaannya yang sangat sering dalam desain struktur. Pemodelan struktur ini dapat dilihat pada Gambar 3 dan untuk variasi dimensi penampang ditampilkan pada Tabel 1 Untuk pemberian label gelagar pelat diberikan notasi, sebagai contoh, A_200_1, dimana notasi "A" mendeskripsikan gelagar pelat A, notasi angka "200" menyatakan perbedaan tinggi pelat badan terbesar dan terkecil serta notasi angka "1" menyatakan rasio jarak pengaku transversal terhadap tinggi pelat badan terkecil. Properti material baja yang digunakan ialah material baja dengan tegangan leleh minimum (F_y) sebesar 250 MPa, kekuatan tarik minimum (F_u) sebesar 410 MPa dan modulus elastisitas (E) sebesar 200 GPa.

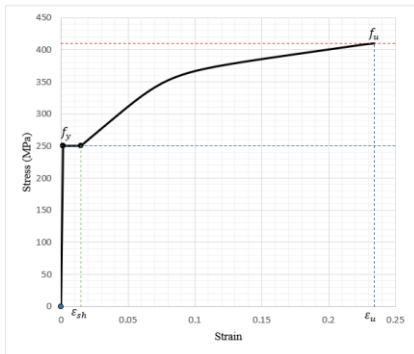
Pemodelan kurva tegangan-regangan material mengikuti pemodelan yang direkomendasikan oleh Yun dan Gardner (2017), sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4. Kriteria kelelahan yang digunakan pada analisis ini ialah kriteria kelelahan von Mises. Analisis yang digunakan merupakan analisis metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak ADINA (*Automatic Dynamic Incremental Analysis*) 9.5.

Tabel 1. Variasi dimensi penampang

Profil Balok	h_{min} (mm)	h_{max} (mm)	t_w (mm)	a/h_{min}	α ($^\circ$)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_s (mm)
A	850	950-1350	5	1; 1,25; 1,5	2 - 30	250	15	12
B	1.000	1100-1600	6	1; 1,25; 1,5	3 - 30	300	20	12
C	1.150	1250-1800	7	1; 1,25; 1,5	3 - 30	375	25	15
D	1.300	1400-2050	8	1; 1,25; 1,5	3 - 30	375	25	15



Gambar 3. Pemodelan struktur



Gambar 4. Kurva tegangan-regangan

Tipe elemen diskrit yang digunakan ialah *MITC4*, yang merupakan elemen *shell* dengan empat titik nodal, masing-masing nodal memiliki enam derajat kebebasan, dengan asumsi teori pelat Mindlin/Reissner. Dimensi elemen diskrit yang digunakan ialah 20x20 mm.

Prosedur analisis

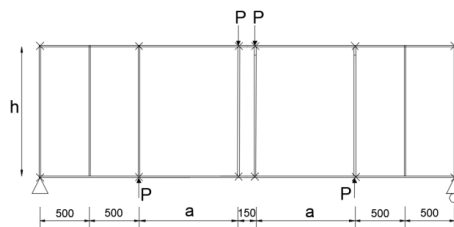
Analisis yang dilakukan pada studi ini dibagi dalam dua tahap, yakni: (1) analisis tekuk linear (*linear buckling analysis*); (2) analisis keruntuhan (*collapse analysis*). Pada perangkat lunak *ADINA* 9,5, analisis tekuk linear merupakan masalah nilai eigen dan bertujuan untuk menentukan beban tekuk yang koresponden dengan kondisi struktur pada saat tertekuk. Beberapa manfaat dari analisis tekuk linier ini ialah: (1) memberikan gambaran terhadap bentuk deformasi lateral pelat badan, dan (2) ragam tekuk hasil analisis dapat digunakan sebagai ketidaksempurnaan awal untuk analisis keruntuhan (*collapse analysis*) selanjutnya, yang disediakan oleh perangkat lunak *ADINA* 9.5. Selanjutnya, analisis keruntuhan dilakukan untuk menentukan beban geser ultimit gelagar pelat dengan ketidaksempurnaan awal dari hasil analisis tekuk linier dengan amplitudo sebesar $a/10000$.

Hasil dan Pembahasan

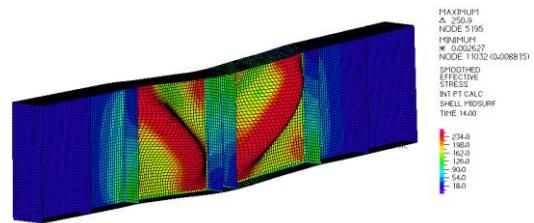
Verifikasi pemodelan elemen hingga

Delapan tipe gelagar pelat prismatis berpenampang I dianalisis menggunakan metode elemen hingga

dengan bantuan perangkat lunak *ADINA* 9.5, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5. Delapan tipe gelagar yang dimaksud ialah gelagar pelat prismatis berpenampang I dengan tinggi yang digunakan ialah tinggi minimum h_{min} seperti yang disajikan pada Tabel 1 dan rasio a/h sebesar 1 dan 1,5. Penamaan struktur pemodelan gelagar pelat diberikan dengan notasi A1, sebagai contoh, di mana notasi “A” mendeskripsikan gelagar pelat A, dengan dimensi penampang sebagaimana yang ditampilkan pada Tabel 1 dan notasi “1” mendeskripsikan rasio a/h . Analisis ini bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi dari pemodelan yang dilakukan terhadap persamaan AISC 360-16 mengenai kekuatan geser dari gelagar pelat prismatis berpenampang I.



Gambar 5. Pemodelan struktur verifikasi



Gambar 6. Model keruntuhan gelagar pelat A1

Hasil analisis pemodelan dengan metode elemen hingga, persamaan *AISC* 360-16 beserta rasio hasil analisis metode elemen hingga terhadap persamaan *AISC* 360-16 dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 2, rasio perbedaan V_{nMEH}/V_{nAISC} berada pada rentang 0,9562% hingga 4,6213%.

Pemodelan struktur yang dilakukan dapat dikatakan cukup akurat oleh karena rasio yang dihasilkan masih berada di bawah 5% sehingga analisis terhadap kekuatan geser gelagar pelat *linearly*

tapered berpenampang I dapat dilakukan sesuai dengan pemodelan yang telah divalidasi. Model keruntuhan yang terjadi ditampilkan pada Gambar 6. Pada Gambar 6, sangat jelas terlihat bahwa keruntuhan yang terjadi ialah keruntuhan geser, dengan aksi medan tarik diagonal.

Tabel 2. Perbandingan kekuatan geser ultimit metode elemen hingga dan AISC

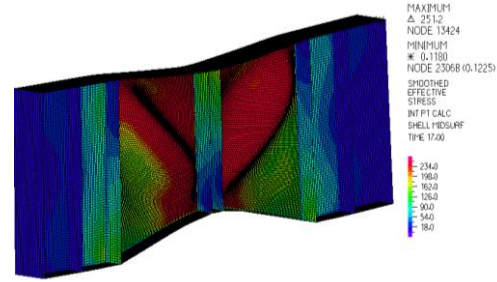
Tipe balok	V_{nMEH} (kN)	V_{nAISC} (kN)	Perbedaan (%)
A1	483,9630	494,6075	-2,1521
A1,5	420,3912	407,1195	3,2599
B1	692,2140	704,1226	-1,6913
B1,5	602,9890	580,4389	3,8850
C1	941,5125	950,6022	-0,9562
C1,5	820,7404	784,4872	4,6213
D1	1208,0812	1234,0496	-2,1043
D1,5	1053,9675	1053,9675	3,4044

Analisis kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered* berpenampang I

Melalui analisis keruntuhan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak ADINA 9.5, beban geser yang menyebabkan keruntuhan geser gelagar pelat *linearly tapered* diperoleh untuk masing-masing tipe pembebanan. Hasil analisis ditampilkan pada Tabel 3 dan 4. Pada tabel tersebut, kekuatan geser berdasarkan persamaan spesifikasi desain AISC 360-16 menggunakan tinggi minimum dari gelagar pelat *linearly tapered*. Untuk tipe pembebanan I, dapat dilihat pada Tabel 3 bahwa kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered* tidak berbeda jauh dengan gelagar pelat prismatis.

Rasio kekuatan gesernya berkisar antara 0,963 (-3,659%) hingga 1,046 (4,621%). Berdasarkan tipe keruntuhan yang terjadi, aksi medan tarik yang terjadi pada gelagar pelat *linearly tapered* berada pada arah diagonal pendek, dimana sama dengan gelagar pelat prismatis. Di samping itu, kelelahan pada arah diagonal juga diikuti dengan kelelahan pelat badan pada bagian gelagar pelat dengan tinggi yang terkecil seiring dengan meningkatnya beban geser yang diaplikasikan. Tipe keruntuhan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 7.

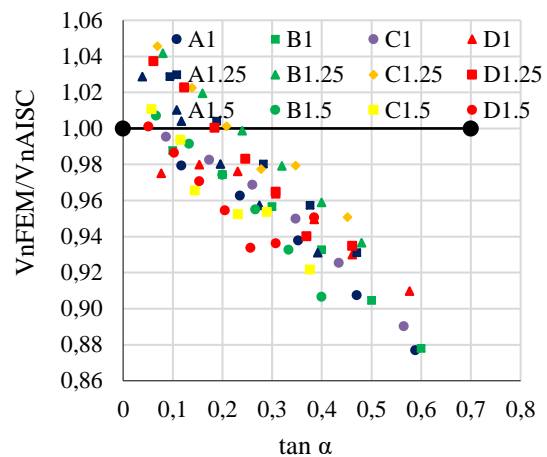
Berdasarkan hal-hal tersebut, kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered* berpenampang I untuk tipe pembebanan I dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada spesifikasi desain AISC 360-16. Untuk tipe pembebanan II, pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya sudut kemiringan gelagar pelat *linearly tapered* kekuatan gesernya makin mengecil. Rasionya mencapai 0,879 atau dalam persentase sebesar -12,307%.



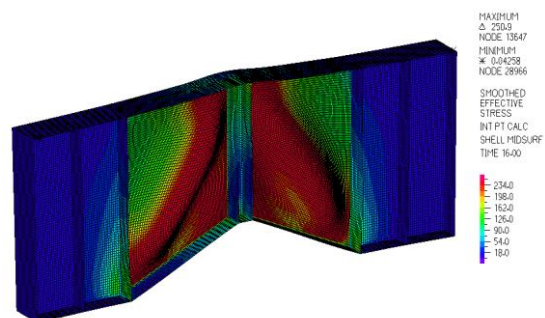
Gambar 7. Tipe keruntuhan tipe I

Gambar 8 menunjukkan grafik hubungan antara rasio kekuatan geser dan sudut kemiringan gelagar pelat. Hal ini disebabkan oleh karena aksi medan tarik yang terjadi ialah pada arah diagonal panjang. Hal ini bisa dianalogikan sama seperti gelagar pelat prismatis, semakin besar rasio a/h dengan h yang konstan, dimana peningkatan tersebut juga meningkatkan dimensi diagonalnya, kekuatan gesernya makin kecil.

Dari analogi tersebut, disimpulkan bahwa peningkatan sudut kemiringan gelagar pelat *linearly tapered*, dimana dimensi diagonalnya juga meningkat, kekuatan geser dengan aksi medan tarik pada arah tersebut semakin mengecil.



Gambar 8. Hubungan rasio beban geser dan kemiringan gelagar pelat



Gambar 9. Tipe keruntuhan tipe II

Tabel 3. Kekuatan geser hasil analisis metode elemen hingga dan persamaan AISC 360-16 untuk tipe pembebebanan I

Tipe Balok	h_{min} (mm)	h_{max} (mm)	a (mm)	α (°)	V_{nMEH} (kN)	V_{nAISC} (kN)	Perbedaan (%)	Rasio
A_100_1	850	950	850,0	6,710	483,720	494,607	-2,201	0,978
A_200_1	850	1.050	850,0	13,241	484,088	494,607	-2,127	0,979
A_300_1	850	1.150	850,0	19,440	482,246	494,607	-2,499	0,975
A_400_1	850	1.250	850,0	25,201	493,050	494,607	-0,315	0,997
A_500_1	850	1.350	850,0	30,466	508,155	494,607	2,739	1,027
A_100_1,25	850	950	1.062,5	5,377	441,500	446,109	-1,033	0,990
A_200_1,25	850	1.050	1.062,5	10,660	440,017	446,109	-1,366	0,986
A_300_1,25	850	1.150	1.062,5	15,767	440,499	446,109	-1,257	0,987
A_400_1,25	850	1.250	1.062,5	20,630	440,100	446,109	-1,347	0,987
A_500_1,25	850	1.350	1.062,5	25,201	441,119	446,109	-1,119	0,989
A_100_1,5	850	950	1.275,0	2,246	412,669	407,119	1,363	1,014
A_200_1,5	850	1.050	1.275,0	6,710	406,833	407,119	-0,070	0,999
A_300_1,5	850	1.150	1.275,0	11,094	404,938	407,119	-0,536	0,995
A_400_1,5	850	1.250	1.275,0	15,350	403,963	407,119	-0,775	0,992
A_500_1,5	850	1.350	1.275,0	21,413	403,454	407,119	-0,900	0,991
B_100_1	1.000	1.100	1.000,0	5,711	693,602	704,122	-1,494	0,985
B_200_1	1.000	1.200	1.000,0	11,310	695,529	704,122	-1,220	0,988
B_300_1	1.000	1.300	1.000,0	16,699	694,182	704,122	-1,412	0,986
B_400_1	1.000	1.400	1.000,0	21,801	706,913	704,122	0,396	1,004
B_500_1	1.000	1.500	1.000,0	26,565	717,449	704,122	1,893	1,019
B_600_1	1.000	1.600	1.000,0	30,964	729,281	704,122	3,573	1,036
B_100_1,25	1.000	1.100	1.250,0	4,574	634,613	635,493	-0,139	0,999
B_200_1,25	1.000	1.200	1.250,0	9,090	632,041	635,493	-0,543	0,995
B_300_1,25	1.000	1.300	1.250,0	13,496	633,331	635,493	-0,340	0,997
B_400_1,25	1.000	1.400	1.250,0	17,745	633,361	635,493	-0,336	0,997
B_500_1,25	1.000	1.500	1.250,0	21,801	633,857	635,493	-0,258	0,997
B_600_1,25	1.000	1.600	1.250,0	25,641	640,194	635,493	0,740	1,007
B_100_1,5	1.000	1.100	1.500,0	3,814	594,158	580,439	2,364	1,024
B_200_1,5	1.000	1.200	1.500,0	7,595	587,222	580,439	1,169	1,012
B_300_1,5	1.000	1.300	1.500,0	11,310	583,573	580,439	0,540	1,005
B_400_1,5	1.000	1.400	1.500,0	14,931	582,406	580,439	0,339	1,003
B_500_1,5	1.000	1.500	1.500,0	18,435	582,383	580,439	0,335	1,003
B_600_1,5	1.000	1.600	1.500,0	21,801	581,900	580,439	0,252	1,003
C_100_1	1.150	1.250	1.150,0	4,970	942,855	950,602	0,812	0,992
C_200_1	1.150	1.350	1.150,0	9,866	941,529	950,602	0,954	0,990
C_300_1	1.150	1.450	1.150,0	14,621	944,981	950,602	0,591	0,994
C_400_1	1.150	1.550	1.150,0	19,179	948,345	950,602	0,237	0,998
C_500_1	1.150	1.650	1.150,0	23,499	956,734	950,602	0,645	1,006
C_650_1	1.150	1.800	1.150,0	29,476	973,473	950,602	2,402	1,024
C_100_1,25	1.150	1.250	1.437,5	3,979	865,485	858,363	0,830	1,008
C_200_1,25	1.150	1.350	1.437,5	7,921	861,863	858,363	0,408	1,004
C_300_1,25	1.150	1.450	1.437,5	11,788	849,825	858,363	-0,995	0,990
C_400_1,25	1.150	1.550	1.437,5	15,550	863,741	858,363	0,627	1,006
C_500_1,25	1.150	1.650	1.437,5	19,179	864,177	858,363	0,677	1,007
C_650_1,25	1.150	1.800	1.437,5	24,331	870,221	858,363	1,381	1,014
C_100_1,5	1.150	1.250	1.725,0	3,318	811,816	785,487	3,484	1,035
C_200_1,5	1.150	1.350	1.725,0	6,613	793,311	785,487	1,125	1,011
C_300_1,5	1.150	1.450	1.725,0	8,246	797,995	785,487	1,722	1,017
C_400_1,5	1.150	1.450	1.725,0	8,246	784,363	785,487	0,019	1,000
C_500_1,5	1.150	1.650	1.725,0	16,164	795,696	785,487	1,429	1,014
C_650_1,5	1.150	1.800	1.725,0	20,647	789,068	785,487	0,584	1,006
D_100_1	1.300	1.400	1.300,0	4,399	1.209,229	1.234,050	-2,011	0,980
D_200_1	1.300	1.500	1.300,0	8,746	1.207,620	1.234,050	-2,142	0,979
D_300_1	1.300	1.600	1.300,0	12,995	1.188,900	1.234,050	-3,659	0,963
D_400_1	1.300	1.700	1.300,0	17,103	1.202,715	1.234,050	-2,539	0,975
D_600_1	1.300	1.900	1.300,0	24,775	1.196,854	1.234,050	-3,014	0,970
D_750_1	1.300	2.050	1.300,0	29,982	1.217,925	1.234,050	-1,307	0,987
D_100_1,25	1.300	1.400	1.625,0	3,521	1.108,991	1.114,721	-0,514	0,995
D_200_1,25	1.300	1.500	1.625,0	7,017	1.102,482	1.114,721	-1,098	0,989
D_300_1,25	1.300	1.600	1.625,0	10,460	1.098,131	1.114,721	-1,488	0,985
D_400_1,25	1.300	1.700	1.625,0	13,829	1.078,425	1.114,721	-3,256	0,967

Tabel 3. Kekuatan geser hasil analisis metode elemen hingga dan persamaan AISC 360-16 untuk tipe pembebanan I (lanjutan)

Tipe balok	h_{min} (mm)	h_{max} (mm)	a (mm)	α (°)	V_{nMEH} (kN)	V_{nAISC} (kN)	Perbedaan (%)	Rasio
D_500_1	1.300	1.800	1.300	21,038	1.198,316	1.234,050	-2,896	0,971
D_500_1,25	1.300	1.800	1.625	17,103	1.095,795	1.114,721	-1,698	0,983
D_600_1,25	1.300	1.900	1.625	20,266	1.093,995	1.114,721	-1,859	0,981
D_750_1,25	1.300	2.050	1.625	24,775	1.126,485	1.114,721	1,055	1,011
D_100_1,5	1.300	1.400	1.950	2,936	1.041,485	1.019,268	2,180	1,022
D_200_1,5	1.300	1.500	1.950	5,856	1.022,648	1.019,268	0,332	1,003
D_300_1,5	1.300	1.600	1.950	8,746	1.019,880	1.019,268	0,060	1,001
D_400_1,5	1.300	1.700	1.950	11,592	1.013,830	1.019,268	-0,534	0,995
D_500_1,5	1.300	1.800	1.950	14,381	1.010,431	1.019,268	-0,867	0,991
D_600_1,5	1.300	1.900	1.950	17,103	1.007,660	1.019,268	-1,1,39	0,989
D_750_1,5	1.300	2.050	1.950	21,038	991,125	1.019,268	-2,761	0,972

Tabel 4. Kekuatan geser hasil analisis metode elemen hingga dan persamaan AISC 360-16 untuk Tipe Pembebanan II

Tipe balok	h_{min} (mm)	h_{max} (mm)	a (mm)	α (°)	V_{nMEH} (kN)	V_{nAISC} (kN)	Perbedaan (%)	Rasio
A_100_1	850	950	850,0	6,710	484,427	494,607	-2,058	0,979
A_200_1	850	1.050	850,0	13,241	476,111	494,607	-3,740	0,963
A_300_1	850	1.150	850,0	19,440	463,881	494,607	-6,212	0,938
A_400_1	850	1.250	850,0	25,201	448,872	494,607	-9,247	0,908
A_500_1	850	1.350	850,0	30,466	433,737	494,607	-12,307	0,877
A_100_1,25	850	950	1.062,5	5,377	433,783	446,109	-2,763	0,972
A_200_1,25	850	1.050	1.062,5	10,660	436,212	446,109	-2,219	0,978
A_300_1,25	850	1.150	1.062,5	15,767	427,211	446,109	-4,236	0,958
A_400_1,25	850	1.250	1.062,5	20,630	416,070	446,109	-6,734	0,933
A_500_1,25	850	1.350	1.062,5	25,201	402,719	446,109	-9,726	0,903
A_100_1,5	850	950	1.275,0	2,246	418,846	407,119	2,880	1,029
A_200_1,5	850	1.050	1.275,0	6,710	408,800	407,119	0,412	1,004
A_300_1,5	850	1.150	1.275,0	11,094	399,095	407,119	1,971	0,980
A_400_1,5	850	1.250	1.275,0	15,350	389,723	407,119	4,273	0,957
A_500_1,5	850	1.350	1.275,0	21,413	379,025	407,119	6,901	0,931
B_100_1	1.000	1.100	1.000,0	5,711	695,418	704,122	-1,236	0,988
B_200_1	1.000	1.200	1.000,0	11,310	686,096	704,122	-2,560	0,974
B_300_1	1.000	1.300	1.000,0	16,699	673,562	704,122	-4,340	0,957
B_400_1	1.000	1.400	1.000,0	21,801	656,710	704,122	-6,734	0,933
B_500_1	1.000	1.500	1.000,0	26,565	636,902	704,122	-9,547	0,905
B_600_1	1.000	1.600	1.000,0	30,964	618,245	704,122	-12,196	0,878
B_100_1,25	1.000	1.100	1.250,0	4,574	639,957	635,493	0,702	1,007
B_200_1,25	1.000	1.200	1.250,0	9,090	630,037	635,493	-0,859	0,991
B_300_1,25	1.000	1.300	1.250,0	13,496	619,148	635,493	-2,572	0,974
B_400_1,25	1.000	1.400	1.250,0	17,745	606,970	635,493	-4,488	0,955
B_500_1,25	1.000	1.500	1.250,0	21,801	592,682	635,493	-6,737	0,933
B_600_1,25	1.000	1.600	1.250,0	25,641	576,135	635,493	-9,341	0,907
B_100_1,5	1.000	1.100	1.500,0	3,814	604,665	580,439	4,172	1,042
B_200_1,5	1.000	1.200	1.500,0	7,595	591,733	580,439	1,946	1,019
B_300_1,5	1.000	1.300	1.500,0	11,310	579,739	580,439	-0,121	0,999
B_400_1,5	1.000	1.400	1.500,0	14,931	568,400	580,439	-2,074	0,979
B_500_1,5	1.000	1.500	1.500,0	18,435	556,649	580,439	-4,099	0,959
B_600_1,5	1.000	1.600	1.500,0	21,801	543,637	580,439	-6,340	0,937
C_100_1	1.150	1.250	1.150,0	4,970	946,154	950,602	-0,467	0,995
C_200_1	1.150	1.350	1.150,0	9,866	933,947	950,602	-1,752	0,982
C_300_1	1.150	1.450	1.150,0	14,621	920,806	950,602	-3,134	0,969
C_400_1	1.150	1.550	1.150,0	19,179	902,953	950,602	-5,013	0,950
C_500_1	1.150	1.650	1.150,0	23,499	879,698	950,602	-7,459	0,925
C_650_1	1.150	1.800	1.150,0	29,476	846,326	950,602	-10,969	0,890
C_100_1,25	1.150	1.250	1.437,5	3,979	867,447	858,363	-1,058	1,011
C_200_1,25	1.150	1.350	1.437,5	7,921	852,773	858,363	-0,651	0,993
C_300_1,25	1.150	1.450	1.437,5	11,788	828,754	858,363	-3,450	0,966
C_400_1,25	1.150	1.550	1.437,5	15,550	817,549	858,363	-4,755	0,952
C_500_1,25	1.150	1.650	1.437,5	19,179	818,471	858,363	-4,647	0,954

Tabel 4. Kekuatan geser hasil analisis metode elemen hingga dan persamaan AISC 360-16 untuk Tipe Pembebanan II (lanjutan)

Tipe balok	h_{min} (mm)	h_{max} (mm)	a (mm)	α (°)	V_{nMEH} (kN)	V_{nAISC} (kN)	Perbedaan (%)	Rasio
C_650_1,25	1.150	1.800	1.437,5	24,331	791,066	858,363	-7,840	0,922
C_100_1,5	1.150	1.250	1.725,0	3,318	820,305	785,487	4,566	1,046
C_200_1,5	1.150	1.350	1.725,0	6,613	802,193	785,487	2,257	1,023
C_300_1,5	1.150	1.450	1.725,0	8,246	785,453	785,487	0,123	1,001
C_400_1,5	1.150	1.550	1.725,0	13,055	766,766	785,487	-2,259	0,977
C_500_1,5	1.150	1.650	1.725,0	16,164	768,364	785,487	-2,055	0,979
C_650_1,5	1.150	1.800	1.725,0	20,647	745,875	785,487	-4,922	0,951
D_100_1	1.300	1.400	1.300,0	4,399	1.209,285	1.234,050	-2,007	0,980
D_200_1	1.300	1.500	1.300,0	8,746	1.204,650	1.234,050	-2,382	0,976
D_300_1	1.300	1.600	1.300,0	12,995	1.189,328	1.234,050	-3,624	0,964
D_400_1	1.300	1.700	1.300,0	17,103	1.171,733	1.234,050	-5,050	0,950
D_500_1	1.300	1.800	1.300,0	21,038	1.147,691	1.234,050	-6,998	0,930
D_600_1	1.300	1.900	1.300,0	24,775	1.122,774	1.234,050	-9,017	0,910
D_750_1	1.300	2.050	1.300,0	29,982	1.122,774	1.234,050	-12,071	0,879
D_100_1,25	1.300	1.400	1.625,0	3,521	1.115,772	1.114,721	-,094	1,001
D_200_1,25	1.300	1.500	1.625,0	7,017	1.099,586	1.114,721	-1,358	0,986
D_300_1,25	1.300	1.600	1.625,0	10,460	1.082,093	1.114,721	-2,927	0,971
D_400_1,25	1.300	1.700	1.625,0	13,829	1.063,953	1.114,721	-4,554	0,954
D_500_1,25	1.300	1.800	1.625,0	17,103	1.040,765	1.114,721	-6,624	0,934
D_600_1,25	1.300	1.900	1.625,0	20,266	1.043,618	1.114,721	-6,379	0,936
D_750_1,25	1.300	2.050	1.625,0	24,775	1.059,649	1.114,721	-4,940	0,951
D_100_1,5	1.300	1.400	1.950,0	2,936	1.057,188	1.019,268	3,720	1,037
D_200_1,5	1.300	1.500	1.950,0	5,856	1.042,318	1.019,268	2,261	1,023
D_300_1,5	1.300	1.600	1.950,0	8,746	1.019,554	1.019,268	0,028	1,000
D_400_1,5	1.300	1.700	1.950,0	11,592	1.002,004	1.019,268	-1,694	0,983
D_500_1,5	1.300	1.800	1.950,0	14,381	983,363	1.019,268	-3,523	0,965
D_600_1,5	1.300	1.900	1.950,0	17,103	958,184	1.019,268	-5,993	0,940
D_750_1,5	1.300	2.050	1.950,0	21,038	952,774	1.019,268	-6,524	0,935

Selain itu, kelelahan pada bagian pelat badan pada gelagar pelat dengan tinggi terkecil juga terjadi mengikuti kelelahan arah diagonal. Tipe keruntuhan untuk gelagar pelat *linearly tapered* dengan tipe pembebanan ini dapat dilihat pada Gambar 9.

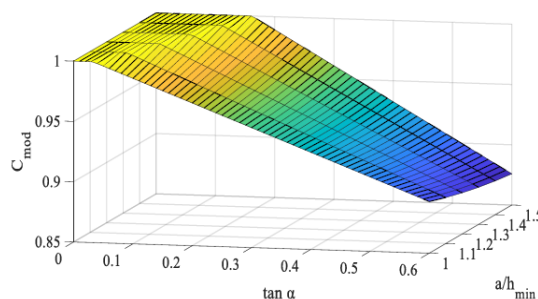
Berdasarkan hasil analisis, disebabkan oleh rasio kekuatan geser untuk tipe II yang cukup besar perlu ditentukan metode perhitungan yang lebih akurat untuk mengestimasi kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered* yang mengalami aksi medan tarik pada arah diagonal panjang. Pada studi ini, analisis yang dilakukan untuk menentukan metode perhitungan tersebut ialah analisis regresi. Analisis regresi ini bertujuan untuk menentukan faktor modifikasi terhadap persamaan kekuatan geser persamaan AISC 360-16, yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$C_{mod} = V_{nMEH} / V_{nAISC} \quad (9)$$

Faktor modifikasi C_{mod} , bergantung pada sudut kemiringan gelagar pelat dan rasio a/h_{min} . Dengan bantuan perangkat lunak MINITAB 18 untuk melakukan analisis regresi, diperoleh persamaan faktor modifikasi sebagai berikut.

$$C_{mod} = 0,974 + 0,0318 \left(\frac{a}{h_{min}} \right)^2 - 0,1889 \left(\frac{a \tan \alpha}{h_{min}} \right) \leq 1 \quad (10)$$

Persamaan (10) di atas memiliki koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9209. Persamaan (10) dibatasi nilainya untuk tidak melebihi 1 agar tidak melebihi kekuatan geser gelagar pelat pada persamaan AISC 360-16. Hubungan faktor modifikasi ini dengan sudut kemiringan dan rasio a/h_{min} dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik faktor modifikasi kekuatan geser gelagar *linearly tapered* berpenampang I

Setelah mendapatkan persamaan faktor modifikasi, maka kekuatan geser gelagar pelat *linearly tapered* berpenampang I dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (11) berikut ini:

$$V_{nTaper} = C_{mod} \cdot V_{nAISC} \quad (11)$$

Kesimpulan

Kekuatan gelagar pelat *linearly tapered* berpenampang I, dengan berbagai variasi dimensi penampang, telah dilakukan melalui analisis numerik dengan menggunakan metode elemen hingga. Dua tipe pembebanan yang dilakukan yakni yang menyebabkan aksi medan tarik diagonal pada arah diagonal pendek dan diagonal panjang. Untuk tipe pembebanan yang menyebabkan aksi medan tarik diagonal pada arah diagonal pendek, kekuatan gesernya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan spesifikasi desain AISC 360-16 dengan menggunakan tinggi pelat badan yang terkecil dan faktor modifikasi senilai 1.

Berbeda dengan hal tersebut, gelagar pelat *linearly tapered* berpenampang I yang mengalami aksi medan tarik diagonal pada arah diagonal panjang dipengaruhi oleh sudut kemiringan dan rasio a/h_{min} . Semakin besar rasio a/h_{min} dan sudut kemiringan gelagar pelat *linearly tapered* berpenampang I maka kekuatan gesernya mengalami reduksi. Berdasarkan studi yang telah dilakukan, faktor modifikasi terhadap persamaan spesifikasi desain AISC 360-16 telah diperoleh dan bernilai sama dengan atau kurang dari 1.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada Universitas Katolik Parahyangan atas izin yang telah diberikan untuk menggunakan perangkat lunak ADINA 9.5 yang lisensinya telah dimiliki.

Daftar Pustaka

American Association of State Highway and Transportation officials. (2017). *AASHTO LRFD bridge design specification*. Washington, DC.

American Institute of Steel Construction. (2016). *Specification for structural buildings*. Chicago: Illinois.

American Institute of Steel Construction. (2011). *Steel design guide 25 – frame design using web-tapered members*. Georgia.

Basler, K. (1961). Strength of plate girders in shear. *Journal of the Structural Division*, 87(6), 153-184.

Bedynek, A., Real, E., & Mirambel, E. (2013). Tapered plate girders under shear: tests and numerical research. *Engineering Structures*, 46, 350-358.

Bedynek, A., Real, E., & Mirambel, E. (2014). Shear buckling coefficient: proposal for tapered steel plates. *Proceeding of the Institution of Civil Engineering: Structures and Buildings*, 167, 243-252.

Bedynek, A., Real, E., & Mirambel, E. (2017). Design proposal for ultimate shear strength of tapered steel plate girders. *Informes de La Construcción*, 69(545), 1-12.

Chalal, F. Z. (2017). Optimum Design of continuous plate girder with variable depth. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(3), 494-509.

Davies, G., & Mandal, S. N. (1979). The collapse behaviour of tapered girder loaded within the tip. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2*, 67, 65-80.

Falby, W. E., & Lee, G. C. (1976). Tension field design of tapered webs. *Engineering Journal*, 13, 11-17.

Ibrahim, M. M., El Aghoury, I. M., Ibrahim, S. A. B. (2020). Experimental and numerical investigation of ultimate shear strength of unstiffened slender web-tapered steel members. *Thin-Walled Structures*, 148, 1-12.

Sediek, O. A. (2017). Numerical Investigation On Shear Strength And Design Requirements Of Tapered End Web Panels, *Master Thesis*, Egypt: Cairo University.

Serror, M. H., Abdelbaset, B. H., & Malhas, F. A. (2017). Shear strength of tapered end web panels. *Journal of Constructional Research*, 138, 513-525.

Studer, R. P., Binion, C. D., & Davis, D. B. (2015). Shear strength of tapered I-shaped steel members. *Journal of Constructional Research*, 112, 167-174.

Sundar, T., Soehardjono, A., & Wisnumurti. (2018). Perilaku balok baja I nonprismatis. *Rekayasa Sipil*, 11(2), 167-174.

Yun, X., & Gardner, L. (2017). Stress-strain curves for hot rolled steels. *Journal of Constructional Research*, 133, 36-46.

Zarate, A.V., & Mirambel, E. (2014). Shear strength of tapered steel plate girders. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 157(5), 343-354.