

Analisis Pilin Struktur Balok Baja Berpenampang I dengan Metode Elemen Hingga

Raiyyan Rahmi Isda

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Jenderal Achmad Yani
raiyyan.rahmi.isda@gmail.com

Abstrak

Struktur baja berprofil tertutup seperti profil lingkaran atau persegi mempunyai kemampuan yang relatif cukup baik dalam menahan torsi (*St. Venant torsion*). Sedangkan untuk baja berprofil penampang terbuka, seperti penampang I, T, L, C, maupun Z mempunyai alur tegangan geser yang tidak menerus, sehingga sangat memungkinkan terjadinya torsi dan juga pilin (*warping*). Kasus-kasus instabilitas umumnya ditangani dengan menggunakan pengaku (*bracing* atau *stiffeners*). Hal ini menjadi topik utama dalam penelitian ini. Profil I yang berpenampang terbuka dipilih untuk dianalisis secara linier elastis terhadap stabilitas komponen dengan penggunaan pengaku. Metode elemen hingga digunakan sebagai model diskrit sistem struktur, menggunakan elemen persegi empat yang mengakomodasi ragam lentur dan ragam membran. Analisis struktur dituliskan dalam formulasi matriks dan dituangkan dalam satu paket program komputer yang dituliskan dalam bahasa Fortran. Program kemudian digunakan untuk melakukan analisis sistem struktur dengan atau tanpa menggunakan balok pengaku, baik pengaku vertikal maupun diagonal. Kedua hasil kemudian dibandingkan untuk menarik kesimpulan mengenai pengaruh penggunaan komponen pengaku terhadap perilaku sistem struktur balok. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan komponen pengaku mempengaruhi kekakuan sistem balok, baik dalam ragam lentur, aksial, maupun ragam torsi dan pilin.

Kata kunci: Batang berpenampang terbuka, pilin, torsi, metode elemen hingga, pengaku.

1. Pendahuluan

Ada dua material utama dalam dunia konstruksi, yaitu baja dan beton. Umumnya profil baja relatif jauh lebih langsing dibandingkan dengan bahan beton yang umumnya terbuat dari penampang gemuk dan umumnya massif. Dalam kasus struktur bahan baja, pada umumnya digunakan komponen berprofil terbuka atau tertutup. Komponen tertutup memiliki penampang yang berbentuk menerus secara tertutup, lazim disebut homogen. Penampang semacam ini relatif cukup baik menahan torsi (*St. Venant torsion*). Di lain pihak, selain mengalami torsi, komponen baja terbuka kemungkinan juga akan mengalami pilin (*warping*). Dengan demikian jika menggunakan profil baja berding tipis dan khususnya jika terbuka, perhatian yang seksama perlu diberikan di dalam analisis maupun perencanaan komponen baja semacam ini. Kasus-kasus instabilitas umumnya ditangani dengan menggunakan pengaku (*bracing* atau *stiffeners*). Hal inilah yang menjadi topik sentral dalam penelitian ini.

Penelitian ini bermaksud untuk melakukan analisis linier elastis terhadap stabilitas komponen dengan penggunaan pengaku. Karena aspek ini sulit didekati dengan metode eksak, maka dalam penelitian digunakan metode numerik, dalam hal ini metode elemen hingga. Dengan demikian, efisiensi dan optimasi penggunaan komponen pengaku dapat dianalisis secara numerik.

Profil baja berpenampang terbuka yang dipilih adalah profil baja I. Dalam analisisnya, profil baja I yang merupakan benda pejal tiga dimensi (3D) terdiri atas elemen-elemen pelat datar dua dimensi (2D). Elemen diambil terdiri dari elemen yang mampu memikul ragam aksial (dalam hal ini membran) dan ragam lentur. Menurut Boeraeve (2010), pada kenyataannya suatu struktur fisik aktual model 3D, tetapi ketika pada tahap idealisasi, struktur tersebut dapat diidealisasikan dengan direduksi menjadi struktur 1D, 2D, atau tetap menggunakan 3D.

1.1. Torsi Pilin

Salmon dan Johnson (1996) menjelaskan profil yang paling efisien untuk memikul torsi adalah penampang tertutup seperti lingkaran berding tipis dan persegi dibandingkan dengan penampang terbuka walaupun dengan luasan yang sama. Hal ini dikarenakan profil baja berpenampang terbuka seperti bentuk I, T, L, C, maupun Z mempunyai alur tegangan geser yang tidak menerus.

Puntir pilin merupakan pengaruh ke luar bidang yang timbul bila sayap-sayap berpindah secara lateral selama terpuntir yang analog dengan lentur akibat beban luar lateral. Pada tahun 1853, insinyur Perancis yang bernama Adhemar Jean Barre de Saint-Venant mengemukakan pada *French Academy of Science* tentang teori puntir klasik yang menjadi dasar analisis dewasa ini. Saint-Venant menunjukkan bahwa bila batang yang tidak berpenampang lingkaran dipuntir, penampang transversal yang datar sebelum terpuntir menjadi tidak rata setelah terpuntir atau berlekuk. Jika suatu balok memikul torsi M seperti dalam Gambar 1, maka sayap tekan balok akan melengkung ke

Info Makalah:

Dikirim : 11-06-2017;

Revisi 1 : 01-27-2017;

Revisi 2 : 02-09-2018;

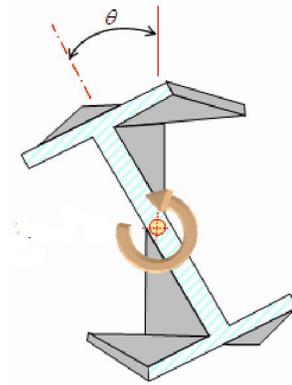
Diterima : 02-11-2018;

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-8526-0403-723

e-mail : raiyyan.rahmi.isda@gmail.com

salah satu arah lateral dan sayap tarikannya melengkung ke arah lateral lainnya, sehingga penampang dapat terpilin menjadi tidak datar lagi.



Gambar 1. Profil Baja I yang Mengalami Puntir Terpilin.
(Shape Designer Saas, 2010)

1.2. Pemodelan Elemen Hingga

Sebagaimana yang telah dijelaskan di atas, analisis menggunakan metode numerik berupa metode elemen hingga. Metode numerik merupakan suatu rekayasa matematika yang mentransformasikan ekspresi mekanika kontinu (bentuk kalkulus dan persamaan diferensial) menjadi ekspresi mekanika diskrit atau bentuk matriks (Katili, 2003) dan digunakan sebagai alternatif lain dari solusi eksak. Penggunaannya lebih luas untuk kasus-kasus yang lebih rumit dengan struktur yang lebih kompleks. Banyak metode numerik yang tersedia, di antaranya seperti *boundary element method (BEM)*, *finite difference method (FDM)*, *finite volume method (FVM)*, *spectral method*, dan *meshless method*, tetapi metode yang paling populer digunakan adalah metode elemen hingga (*finite element method, FEM*). Pemilihan metode elemen hingga dibandingkan metode-metode lainnya didasarkan keuntungan-keuntungan yang ditawarkan (Cook, dkk, 2002)

Sebagai langkah awal, sistem struktur balok berpenampang I dimodelkan dengan model diskrit berupa jejaring yang membagi sistem struktur atas pelat datar persegi, baik sayap/*flens*, badan, maupun pengaku. Elemen yang digunakan menyertakan ragam lentur dan ragam membran. Untuk mengakomodasi terjadinya rotasi pada elemen, maka matriks kekakuan dari membran bidang datar persegi 4 titik simpul dikombinasikan dengan matriks kekakuan dari pelat lentur yang juga 4 titik simpul. Berikut disajikan penyusunan matriks kekakuan elemen persegi, untuk ragam membran dan untuk ragam lentur.

1.3. Elemen Membran Datar

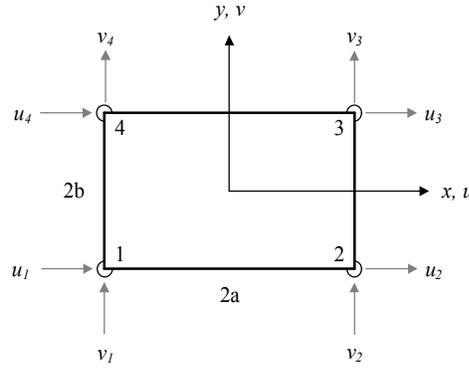
Suatu elemen persegi seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2 mempunyai titik simpul 1-4 yang diberi label berlawanan arah jarum jam. Semua sudut dalamnya 90° , sisi-sisinya berdimensi $2a \times 2b$ di arah bidang XY serta mempunyai ketebalan t di arah sumbu Z. Elemen membran persegi mempunyai 2 derajat kebebasan (dk) per titik simpulnya sehingga dengan 4 titik simpul totalnya ada 8 dk yang menandakan ada 8 perpindahan. Ragam membran dimulai dengan mengambil asumsi perpindahan, Persamaan (1).

$$\{\psi\} = \begin{Bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{Bmatrix} = [N] \{d\} \quad (1)$$

di mana $\{\psi\}$ merupakan matriks perpindahan umum, u adalah perpindahan translasi arah sumbu X, v adalah perpindahan translasi arah sumbu Y, sedangkan (x,y) mendeskripsikan perpindahan pada setiap titik (x_i, y_i) di elemen.

Kemudian simbol N merupakan fungsi bentuk (*shape function*) dan d sebagai perpindahan titik simpul dalam koordinat global. Matriks fungsi bentuk dijabarkan sebagaimana tertera pada Persamaan (2) dan (3). N_1 sampai dengan N_4 menandakan fungsi bentuk pada titik 1 sampai dengan titik 4 dari Gambar 2.

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$



Gambar 2. Model Elemen Membran Persegi

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{1}{4ab}(a-x)(b-y) \\
 N_2 &= \frac{1}{4ab}(a+x)(b-y) \\
 N_3 &= \frac{1}{4ab}(a+x)(b+y) \\
 N_4 &= \frac{1}{4ab}(a-x)(b+y)
 \end{aligned} \tag{3}$$

Simbol a dan b dalam Gambar 2 adalah dimensi elemen yang ditinjau. Untuk regangan elemen dinyatakan dengan ε dalam Persamaan (4). Besar regangan yang berkaitan dengan perpindahan titik simpul dinyatakan dengan matriks B . Matriks L menyatakan matriks operator differensial parsial sebagaimana dalam Persamaan (5).

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} = [L][N]\{d\} \tag{4}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} \frac{\delta}{\delta x} & 0 \\ 0 & \frac{\delta}{\delta y} \\ \frac{\delta}{\delta y} & \frac{\delta}{\delta x} \end{bmatrix} \tag{5}$$

Logan (2007) menuliskan bahwa tegangan bidang didefinisikan sebagai suatu keadaan tegangan di mana tegangan normal dan tegangan geser yang tegak lurus bidang diasumsikan bernilai nol. Hubungan tegangan-regangan dirumuskan σ sebagaimana Persamaan (6) yang merupakan perkalian antara matriks konstitutif D dengan matriks regangan ε .

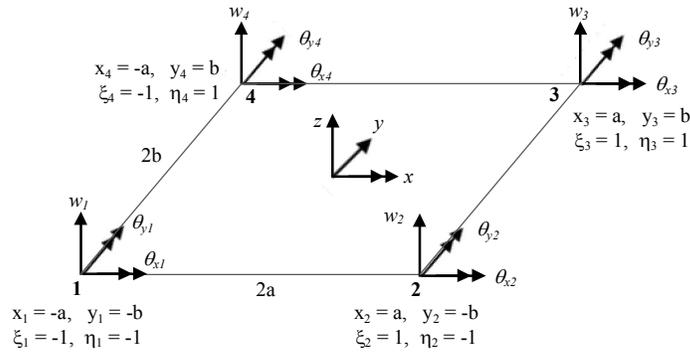
$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \tag{6}$$

Dari persamaan-persamaan yang telah diperoleh di atas, maka matriks kekakuan k dapat ditentukan dengan rumus Persamaan (7), dengan t merupakan tebal elemen.

$$[k] = \int_{-b}^b \int_{-a}^a [B]^T [D][B]t \, dx \, dy \tag{7}$$

1.4. Elemen Pelat Lentur

Sebagaimana elemen membran, elemen pelat juga mempunyai titik simpul 1-4 yang diberi label berallawanan arah jarum jam. Sisi-sisinya berdimensi $2a \times 2b$ di arah bidang XY serta mempunyai ketebalan t di arah sumbu Z. Jika membran mempunyai 2 derajat kebebasan per titik simpul pada bidang XY, maka pelat mempunyai 3 derajat kebebasan untuk satu titik simpul, satu translasi arah transversal Z dan dua rotasi arah bidang XY, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3. Teori yang digunakan berdasarkan teori Kirchoff, sehingga deformasi transversal diabaikan.



Gambar 3. Model Elemen Pelat Lentur

Dengan 3 derajat kebebasan di setiap titik simpulnya, maka ada 12 derajat kebebasan untuk keempat titik simpul sehingga matriks perpindahan pada titik simpul i adalah $\{d_i\}$ seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan (8), dengan matriks total perpindahan $\{d\}$ pada Persamaan (9).

$$\{d_i\} = \begin{Bmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

Simbol w_i menyatakan perpindahan translasi di titik i arah sumbu Z , θ_{xi} perpindahan rotasi di titik i arah sumbu X , dan θ_{yi} perpindahan rotasi di titik i arah sumbu Y . Simbol d_1 sampai d_4 merupakan perpindahan di titik 1 sampai 4 dari Gambar 3 di atas. Fungsi bentuk masing-masing titik dari Persamaan (8) dirumuskan dengan Persamaan (10).

$$\begin{aligned} N_{wi} &= \frac{1}{8} (1 + \xi_i \xi) (1 + \eta_i \eta) (2 + \xi_i \xi + \eta_i \eta - \xi^2 - \eta^2) \\ N_{\theta_{xi}} &= -\frac{1}{8} b \eta_i (1 + \xi_i \xi) (1 - \eta_i \eta) (1 + \eta_i \eta)^2 \\ N_{\theta_{yi}} &= \frac{1}{8} a \xi_i (1 - \xi_i \xi) (1 + \eta_i \eta) (1 + \xi_i \xi)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Simbol ξ dan η menyatakan sumbu koordinat natural, nilainya bervariasi hanya dari -1 sampai +1 di mana ξ adalah x dibagi a , sedangkan η adalah y dibagi dengan b . Variabel x dan y menyatakan sumbu koordinat global.

Hubungan kurvatur $\{\kappa\}$ dengan momen $\{M\}$ diatur oleh Persamaan (11).

$$\{M\} = [H_b] \{\kappa\} \quad (11)$$

Matriks penghubung regangan-perpindahan B_b dengan perpindahan d diberikan oleh Persamaan (12).

$$\{\kappa\} = [B]_b \{d\} \quad (12)$$

$$[B_b]_{3 \times 12} = \begin{bmatrix} -N_{wi,xx} & -N_{\theta_{xi},xx} & -N_{\theta_{yi},xx} \\ -N_{wi,yy} & -N_{\theta_{xi},yy} & -N_{\theta_{yi},yy} \\ -2N_{wi,xy} & -2N_{\theta_{xi},xy} & -2N_{\theta_{yi},xy} \end{bmatrix}_{i=1,4} \quad (13)$$

atau

$$[B_b] = [[B_{b1}] [B_{b2}] [B_{b3}] [B_{b4}]]_{3 \times 12} \quad (14)$$

Masing-masing komponen dari matriks $[B_b]$ diuraikan dalam Persama (15) sampai dengan (18).

$$[B_{b1}] = \frac{1}{4a^2b^2} \begin{bmatrix} -3b^2\xi(1-\eta) & 0 & -ab^2(1-3\xi)(1-\eta) \\ -3a^2\eta(1-\xi) & a^2b(1-\xi)(1-3\eta) & 0 \\ -ab(4-3\xi^2-3\eta^2) & -ab^2(1-\eta)(1+3\eta) & a^2b(1-\xi)(1+3\xi) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$[B_{b2}] = \frac{1}{4a^2b^2} \begin{bmatrix} -3b^2\xi(1-\eta) & 0 & ab^2(1+3\xi)(1-\eta) \\ -3a^2\eta(1+\xi) & a^2b(1+\xi)(1-3\eta) & 0 \\ ab(4-3\xi^2-3\eta^2) & ab^2(1-\eta)(1+3\eta) & a^2b(1+\xi)(1-3\xi) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[B_{b3}] = \frac{1}{4a^2b^2} \begin{bmatrix} 3b^2\xi(1+\eta) & 0 & ab^2(1+3\xi)(1+\eta) \\ 3a^2\eta(1+\xi) & -a^2b(1+\xi)(1+3\eta) & 0 \\ -ab(4-3\xi^2-3\eta^2) & ab^2(1+\eta)(1-3\eta) & -a^2b(1+\xi)(1-3\xi) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$[B_{b4}] = \frac{1}{4a^2b^2} \begin{bmatrix} -3b^2\xi(1+\eta) & 0 & -ab^2(1-3\xi)(1+\eta) \\ 3a^2\eta(1-\xi) & -a^2b(1-\xi)(1+3\eta) & 0 \\ ab(4-3\xi^2-3\eta^2) & -ab^2(1+\eta)(1-3\eta) & -a^2b(1-\xi)(1+3\xi) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Matriks kekakuan elemen k_b untuk ragam lentur disusun dengan persamaan (19).

$$\begin{aligned} [k_b] &= \int_{-a}^a \int_{-b}^b [B_b]^T [H_b] [B_b] dy dx \\ &= ab \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B_b]^T [H_b] [B_b] d\xi d\eta \\ &= D_b ([k_{b1} + k_{b2} + k_{b3} + k_{b4}]) \end{aligned} \quad (19)$$

di mana rumus $[H_b]$ adalah

$$[H_b] = D_b \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad (20)$$

dengan nilai tegangan-regangan D_b atau disebut juga dengan matriks konstituf dihtung dengan Persamaan (21) di mana E adalah modulus elastisitas, t adalah tebal elemen, dan ν adalah rasio *Poisson*.

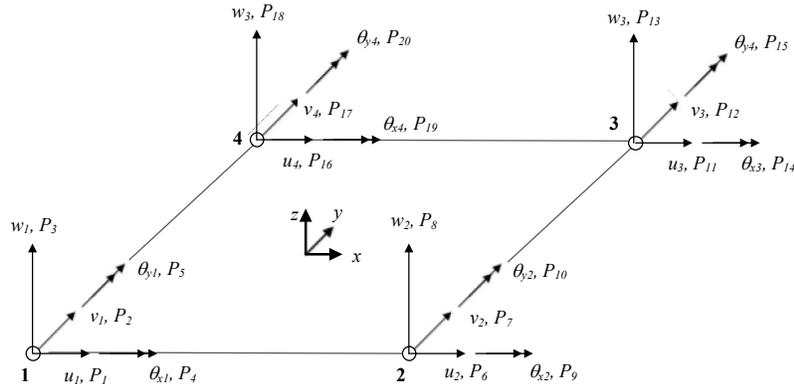
$$D_b = \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)} ; \lambda = \frac{1-\nu}{2} \quad (21)$$

1.5. Kombinasi Formula Matriks Kekakuan

Sebagaimana yang telah dijelaskan di atas, untuk mengakomodasi terjadinya rotasi pada elemen, matriks kekakuannya dikombinasikan antara matriks kekakuan dari membran bidang datar persegi 4 titik simpul dengan matriks kekakuan dari pelat lentur yang juga 4 titik simpul. Dari formulasi membran bidang datar ada 2 derajat kebebasan per titik simpul, yaitu translasi arah X dan translasi arah Y, ada 8 derajat kebebasan untuk setiap elemen. Sedangkan dari pelat lentur ada 3 derajat kebebasan, satu translasi arah Z, satu rotasi arah X, dan satu rotasi arah Y, sehingga ada 12 derajat kebebasan untuk setiap elemen. Gambar 4 menunjukkan susunan derajat kebebasan kombinasi dari kedua macam matriks kekakuan, elemen membran dan pelat lentur, sehingga matriks kekakuan elemen menjadi 20×20 .

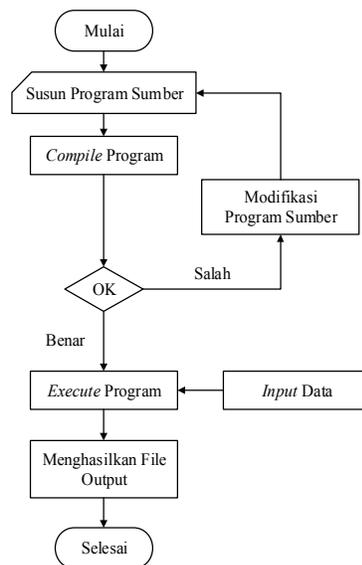
2. Metode

Analisis struktur beserta algoritma program dituangkan dalam paket pemrograman komputer dengan menggunakan perangkat lunak berbahasa Fortran sebagai salah satu bahasa tingkat tinggi komputer yang masih sering digunakan hingga sekarang untuk diterapkan pada bidang ilmu rekayasa. Fortran merupakan singkatan dari FORMula TRANslator, ada juga yang menyebutnya FORMula TRANslation atau FORMula TRANslating. Dari singkatannya menunjukkan bahwa Fortran berorientasi ke suatu masalah tertentu (*problem oriented language*) yaitu permasalahan rumus-rumus atau permasalahan teknik (Jogiyanto, 1993).



Gambar 4. Susunan Kombinasi Derajat Kebebasan

Program diberi nama WARPING.FOR, dikembangkan untuk menganalisis elemen membran dan pelat lentur persegi yang digabungkan menjadi satu elemen bersifat *bilinear quadrilateral* atau segi empat linear dengan empat titik simpul. Untuk penerjemahan dari program sumber (*source code*) dari bahasa tinggi Fortran menjadi bahasa rendah (bahasa mesin, *assembler*) diperlukan penerjemah yang dikenal sebagai *compiler*, di sini digunakan Force 2.0. *Compiler* berfungsi untuk mengkompilasi program. Jika tidak terdapat kesalahan (*bugs*), maka program dapat dieksekusi lebih lanjut dengan memasukkan data masukan (*input*) untuk memperoleh hasil (*output*), untuk lebih jelas dapat dilihat Gambar 5.

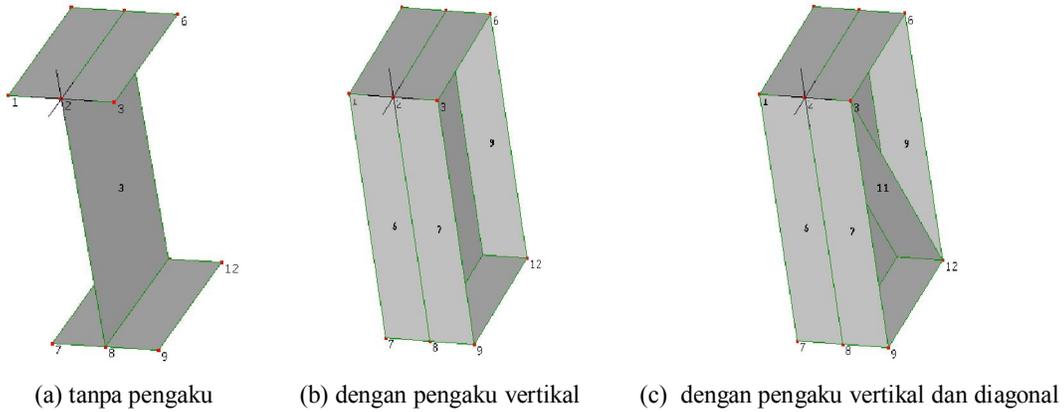


Gambar 5. Alur Pemrograman Fortran

Algoritma analisis sistem struktur balok dengan pengaku yang telah disusun dalam satu program paket komputer, diujikan terhadap sistem struktur sederhana yang telah dianalisis dengan program komputer yang sudah mapan, dalam hal ini SAP2000 versi 14. Hasil yang diperoleh lewat penerapan program komputer praktis sama dengan hasil yang diperoleh dengan penerapan SAP2000. Ini memberikan indikasi bahwa program yang telah disusun cukup baik.

3. Hasil dan Pembahasan

Ada 2 macam pengaku yang digunakan, yaitu pengaku vertikal dan pengaku diagonal. Untuk ini, dilakukan analisis terhadap struktur balok berpenampang terbuka I, dengan pengaku diagonal dan pengaku vertikal seperti dalam Gambar 6.



Gambar 6. Struktur Baja Berpenampang I Terbuka

Sistem struktur ini dianalisis dalam dua tahap pembebanan. Tahap 1 menyangkut gaya di arah X positif sebesar 500 kN di titik 2 (titik tengah paling atas) dan di arah X negatif sebesar 500 kN di titik 8 (titik tengah paling bawah). Tahap 2 mencakup beban dua kali lipat, dengan beban inkremental gaya di arah X positif sebesar 500 kN di titik 2 dan di arah X negatif sebesar 500 kN di titik 8. Kedua gaya mewakili gaya torsi inkremental sebesar $0,46 \times 500 \text{ kN-m} = 230 \text{ kN-m}$.

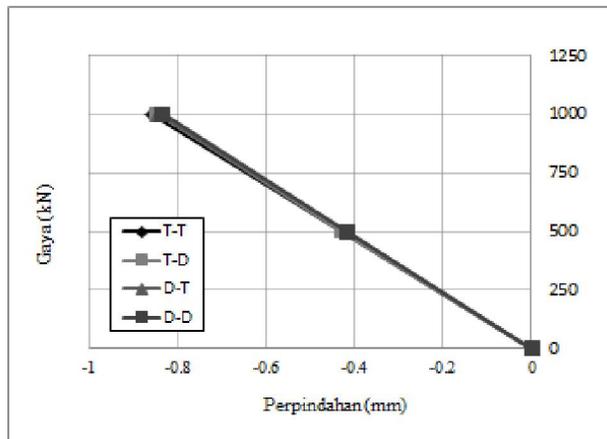
3.1. Pengaruh Kedudukan Pengaku Vertikal

Struktur dalam Gambar 6 (b) yang terdiri dari 5 elemen pelat dipasang hanya pengaku vertikal saja sehingga keseluruhannya ada 9 elemen pelat datar lentur dan aksial; mendatar 4 pelat, vertikal 5 pelat. Untuk sistem struktur ini, studi kasus dibagi atas empat kasus. Yang pertama adalah kasus di mana pada tahap pertama dan tahap kedua hanya terpasang 5 elemen, 4 elemen pelat *flens*, dan 1 elemen pelat badan (T-T). Pada kasus kedua, dipasang 5 elemen pada tahap pembebanan pertama, lalu ditambah 4 pelat pengaku vertikal (T-D). Pada kasus ketiga, dipasang 9 elemen pada tahap pembebanan pertama, lalu dikurangi 4 pelat pengaku vertikal (D-T). Pada kasus keempat, semua 9 elemen dipasang baik pada tahap pembebanan pertama maupun kedua (D-D).

Tabel 1. Perbandingan Kurva Gaya-Perpindahan di Titik Simpul 1 Arah Y Untuk Kasus Pengaku Pengaku Vertikal

Kasus	Perpindahan (mm)	
	Tahap 1	Tahap 2
T-T	-0,430	-0,859
T-D	-0,430	-0,846
D-T	-0,417	-0,846
D-D	-0,417	-0,833

Ket : T = tanpa pengaku, D = dengan pengaku
Tahap 1 dan 2 telah dijelaskan di atas



Gambar 7. Kurva Perbandingan Gaya-Perpindahan di Titik Simpul 1 Arah Y Untuk Profil Dengan Pengaku Vertikal

Dengan pemasangan pengaku vertikal saja maka totalnya ada 9 elemen. Perpindahan total untuk kasus T-T sebesar -0,859 mm, dibandingkan perpindahan kasus D-D sebesar -0,833 mm. Perbandingan perpindahan untuk semua kasus di titik simpul 1 disajikan dalam Tabel 1. Sedangkan kurva perbandingan ditunjukkan dalam Gambar 7. Untuk kasus

kedua dan ketiga, perpindahan akhir bernilai sama, sekalipun menunjukkan perpindahan yang berbeda pada akhir tahap pembebanan 1. Dari Gambar 7 terlihat bahwa kombinasi profil dengan pengaku vertikal saja (total 9 elemen) untuk semua kasus menghasilkan total perpindahan yang nyaris sama persis.

3.2. Pengaruh Keududukan Pengaku Vertikal dan Diagonal

Struktur dalam Gambar 6 (c) yang terdiri dari 5 elemen pelat dipasang pengaku vertikal dan diagonal sehingga keseluruhannya ada 11 elemen pelat datar lentur dan aksial; mendatar 4 pelat, vertikal 5 pelat dan diagonal 2 pelat. Untuk sistem struktur ini, studi kasus juga dibagi atas empat kasus. Yang pertama adalah kasus di mana pada tahap pertama dan tahap kedua hanya terpasang 5 elemen, 4 elemen pelat *flens*, dan 1 elemen pelat badan (T-T). Pada kasus kedua, dipasang 5 elemen pada tahap pembebanan pertama, lalu ditambah 6 pelat pengaku, 4 pelat pengaku vertikal dan 2 diagonal (T-D). Pada kasus ketiga, dipasang 11 elemen pada tahap pembebanan pertama, lalu dikurangi 6 pelat pengaku, 4 pelat pengaku vertikal dan 2 diagonal (D-T). Pada kasus keempat, semua 11 elemen dipasang baik pada tahap pembebanan pertama maupun kedua (D-D).

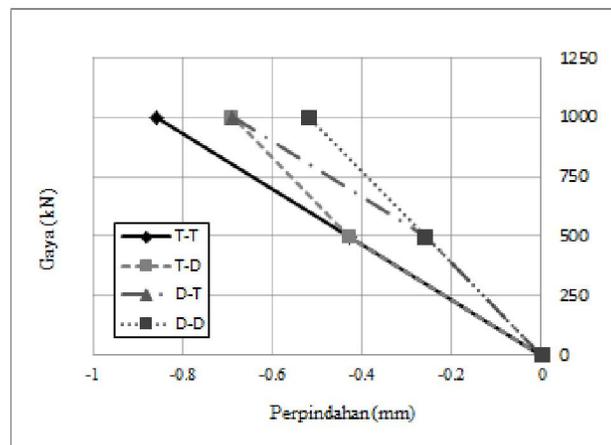
Dengan pemasangan pengaku vertikal dan diagonal, totalnya ada 11 elemen. Hasil pengaruh pemasangan pengaku jelas terlihat dalam gambar. Sebagai contoh, perpindahan total untuk kasus T-T sebesar -0,859 mm, dibandingkan perpindahan kasus D-D sebesar -0,519 mm. Perbandingan perpindahan untuk semua kasus di titik simpul 1 disajikan dalam Tabel 2 dan kurva perbandingan dalam Gambar 8. Untuk kasus kedua dan ketiga, perpindahan akhir bernilai sama, sekalipun menunjukkan perpindahan yang berbeda pada akhir tahap pembebanan 1. Dari kurva tersebut terlihat bahwa kombinasi profil dengan pengaku untuk kasus T-D dan D-T menghasilkan total perpindahan yang sama. Tentunya profil baja berpenampang terbuka tanpa pengaku untuk tahap pembebanan pertama maupun kedua kasus T-T menghasilkan perpindahan yang paling besar. Perpindahan yang paling kecil diperoleh dari profil dengan pemasangan pengaku untuk kedua tahap pembebanan D-D.

Tabel 2. Perbandingan Kurva Gaya-Perpindahan di Titik Simpul 1 Arah Y Untuk Kasus Pengaku Pengaku Vertikal dan Diagonal

Kasus	Perpindahan (mm)	
	Tahap 1	Tahap 2
T-T	-0,430	-0,859
T-D	-0,430	-0,689
D-T	-0,259	-0,689
D-D	-0,259	-0,519

Ket : T = tanpa pengaku, D = dengan pengaku

Tahap 1 dan 2 telah dijelaskan di atas

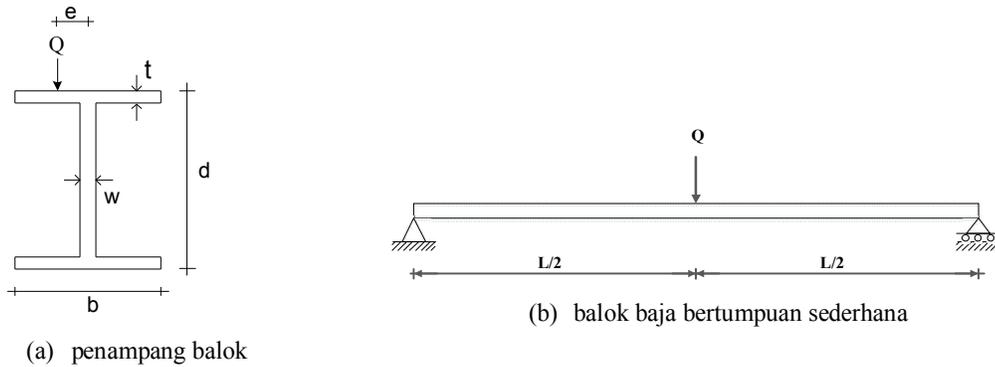


Gambar 8. Kurva Perbandingan Gaya-Perpindahan di Titik Simpul 1 Arah Y Untuk Profil Dengan Pengaku Vertikal dan Diagonal

Dari Gambar 7 dan Gambar 8 terlihat beberapa pengamatan sebagai berikut. Pertama, penggunaan pengaku vertikal tidak mempengaruhi kekakuan balok, sementara penggunaan pengaku diagonal secara signifikan mempengaruhi kekakuan balok. Dengan demikian disimpulkan bahwa pengaku berkedudukan diagonal lebih efisien dari pada pengaku berkedudukan vertikal dalam meningkatkan kekakuan balok.

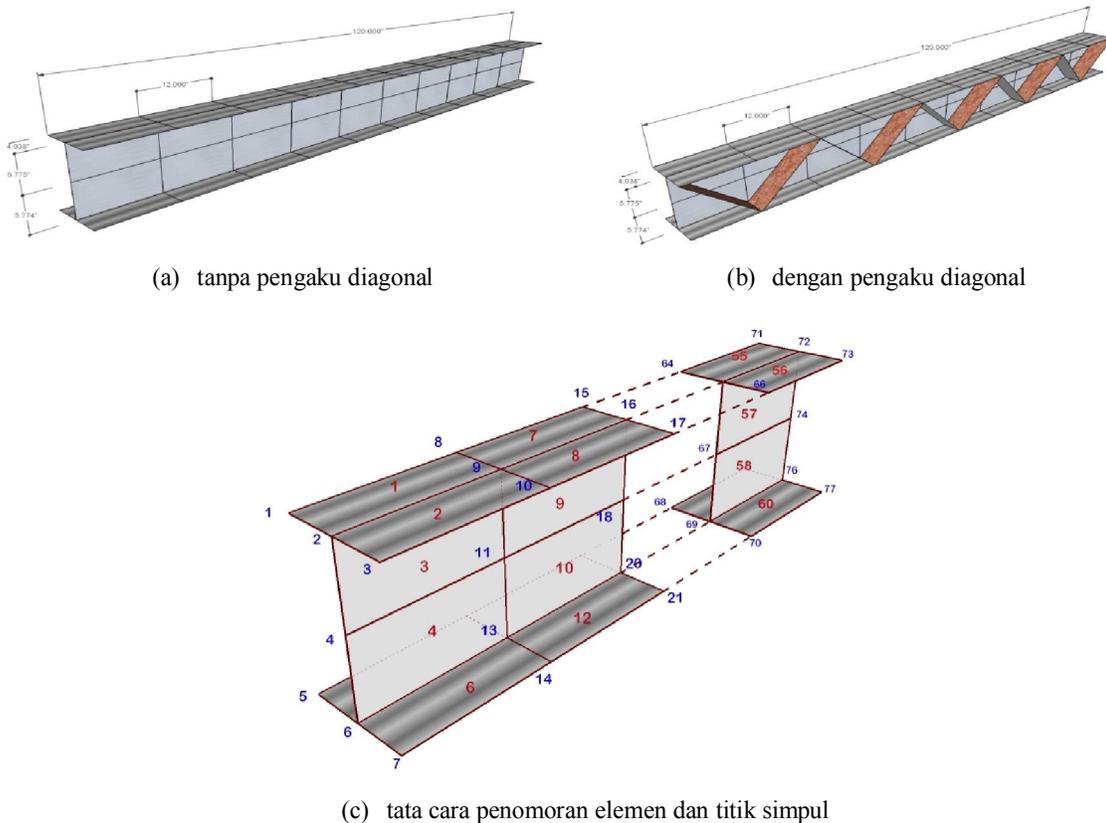
3.3. Studi Kasus Profil Baja Berpenampang Terbuka

Suatu struktur balok berpenampang terbuka I, Gambar 9(a) dan (b), dianalisis dalam tulisan ini dengan mengambil profil dari tabel baja (Gunawan, R., Morisco, 1988). Data struktur sebagai berikut, panjang bentang $L = 6 m$, tinggi penampang $d = 310 mm$, lebar *flens* $b = 205 mm$, tebal *flens* $t = 16,28 mm$, tebal badan $w = 9,42 mm$. Bahan yang digunakan memiliki sifat elastisitas $E = 200 GPa$ dan $\nu = 0,3$. Gaya yang bekerja adalah beban terpusat $Q = 889,644 kN$ dengan eksentrisitas $e = -25,4 mm$ terhitung dari titik pusat penampang.



Gambar 9. Struktur Balok Dengan Gaya Terpusat Eksentris di Tengah Bentang

Balok dianalisis separuh bentang saja karena sistem struktur maupun gaya bersifat simetris, dalam hal ini diambil separuh bentang kiri. Bagian ini dimodelkan dengan 80 elemen yang terdiri atas 20 elemen *flens* atas, 20 elemen *flens* bawah, 20 elemen badan, dan 20 elemen pengaku diagonal, seperti dalam Gambar 10. Model diskrit balok tanpa pengaku diperlihatkan dalam Gambar 10(a), dengan pengaku diagonal diperlihatkan dalam Gambar 10(b), dan penomoran elemen beserta titik simpulnya diperlihatkan dalam Gambar 10(c). Pengaku diagonal dipilih untuk dianalisis dibandingkan pengaku vertikal karena berdasarkan tinjauan sebelumnya, pengaku diagonal lebih efisien dalam meningkatkan kekakuan balok.



Gambar 10. Pemodelan Diskrit Struktur Separuh Balok

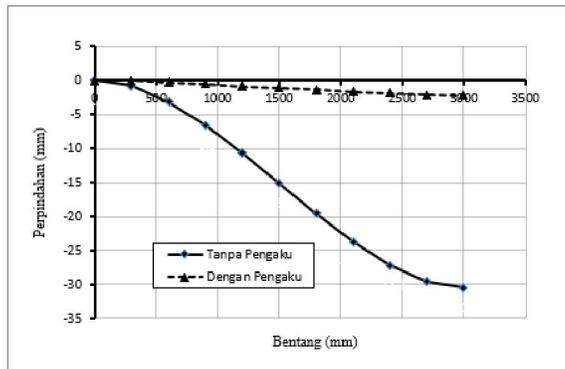
Eksekusi program dilaksanakan untuk dua sub-kasus, yaitu kasus balok tanpa pengaku dan balok dengan pengaku diagonal. Hasil run diplot untuk garis tepi kiri *flens* atas (garis 1), garis tengah *flens* atas (garis 2), dan garis tepi kanan *flens* atas (garis 3). Hasil perpindahan yang diperoleh ditunjukkan dalam Tabel 3 dan Gambar 11. Dari

hasil penggambaran terlihat bahwa penggunaan pengaku diagonal mempengaruhi kekakuan balok, sehingga perpindahan masing-masing titik simpul yang dihasilkan jadi lebih kecil dibandingkan balok tanpa pengaku.

Tabel 3. Perbandingan Perpindahan Titik Simpul pada Balok Berpengaku dan Tidak Berpengaku

Bentang (mm)	Perpindahan pada Garis								
	1			2			3		
	TS	T (mm)	D (mm)	TS	T (mm)	D (mm)	TS	T (mm)	D (mm)
0	1	0.00	0.00	2	0.00	0.00	3	0.00	0.00
300	8	-0.73	0.03	9	-0.87	-0.15	10	-1.09	-0.33
600	15	-3.13	-0.30	16	-3.21	-0.36	17	-3.32	-0.43
900	22	-6.54	-0.52	23	-6.60	-0.60	24	-6.69	-0.68
1200	29	-10.66	-0.81	30	-10.69	-0.83	31	-10.73	-0.85
1500	36	-15.11	-1.06	37	-15.11	-1.06	38	-15.12	-1.06
1800	43	-19.58	-1.32	44	-19.55	-1.30	45	-19.51	-1.27
2100	50	-23.70	-1.60	51	-23.65	-1.53	52	-23.57	-1.45
2400	57	-27.15	-1.82	58	-27.06	-1.75	59	-26.94	-1.68
2700	64	-29.55	-2.12	65	-29.43	-1.96	66	-29.26	-1.80
3000	71	-30.48	-2.22	72	-30.35	-2.11	73	-30.14	-1.98

Keterangan : TS = titik simpul, T = balok tanpa pengaku diagonal, D = balok dengan pengaku diagonal



Gambar 11. Perbandingan Perpindahan Titik Simpul Antara Balok Berpengaku dengan Tanpa Pengaku

Kesimpulan

Dari hasil *run* dan pembahasan hasil disimpulkan bahwa penggunaan dari pada pengaku diagonal sangat mempengaruhi kekakuan lentur, torsi, maupun aksial dari pada balok. Kedudukan pengaku juga sangat mempengaruhi efisiensi dan optimasi dari pada penggunaan pengaku, dalam arti bahwa pengaku diagonal lebih efisien dari pada pengaku vertikal. Kita mengetahui bahwa kekakuan membran dari pada suatu pelat datar jauh lebih dominan dibandingkan dengan kekakuan lentur. Kedudukan diagonal pelat pengaku cenderung lebih mengorganisir kemampuan pengaku karena mengerahkan perlawanan membran.

Daftar Pustaka

Boeraeve, P. (2010). *Introduction to The Finite Element Method (FEM)*. Institut Gramme: Liege, Belgium, 2-68.
 Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E., & Witt, R.J. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 4th Edition*, John Wiley & Sons Inc, New York.
 Gunawan, R, & Morisco. (1998). *Tabel Profil Konstruksi Baja*. Yogyakarta: Kanisius.
 Jogiyanto. (1993). *Teori dan Aplikasi Program Komputer Bahasa Fortran*. Yogyakarta: Andi Offset.
 Logan, D. L. (2007). *A First Course in The Finite Element Method* (4th ed.). Canada: Thomson.
 Katili, I. (2003). *Metode Elemen Hingga untuk Pelat Lentur*. Jakarta: Universitas Indonesia.
 Salmon, C.G., & Johnson, J.E., (1996). *Steel Structures: Design and Behavior, Emphasizing Load and Resistance Factor Design (4th ed)*. New York: Harper Collins College Publishers.
 Shape Designer SaaS 2010 (2017, 20 Mei). Diperoleh dari:
http://www.mechatools.com/shapedesigner/html/index.html?theoretical_background.htm