

**ANALISIS METODE ELEMEN HINGGA PENGARUH PENGAKU MIRING
TERHADAP PENINGKATAN MOMEN KRITIS TEKUK TORSI LATERAL**

Victor Hotman Lukman Sibuea
victor_lukman@yahoo.com

Magister Teknik Sipil
Universitas Katolik Parahyangan

Abstrak

Pada struktur baja, tekuk torsi lateral adalah salah satu syarat yang menjadi *limit state* di dalam proses desain. Salah satu cara untuk meningkatkan nilai momen kritis tekuk torsi lateral adalah dengan memberikan pengaku-pengaku atau disebut juga dengan stiffener.

Penelitian ini akan membahas pengaruh pengaku miring pada peningkatan nilai momen kritis tekuk torsi lateral dengan menggunakan metode elemen hingga. Analisis metode elemen hingga ini menggunakan program *SAP2000*. Pemodelan pada elemen hingga direncanakan agar pemodelan yang telah dibuat dapat dilaksanakan pada percobaan eksperimental.

Kemiringan stiffener yang digunakan adalah kemiringan 1 banding 1, 1 banding 2 dan 2 banding 1. Untuk panjang tak terkekang yang digunakan adalah 3800 mm dan 2800 mm. Karena pemodelan elemen hingga ini akan digunakan untuk percobaan eksperimental, maka ditambahkan suatu batang tarik pada tengah bentang balok untuk rangkaian pembebanan.

Hasil analisis metode elemen hingga menunjukkan bahwa balok yang diberikan pengaku miring dengan kemiringan 1 banding 2 memberikan peningkatan momen kritis yang paling besar dibandingkan dengan kemiringan lainnya. Besarnya peningkatan momen kritis sebesar 31.78% pada $L_b = 3800$ mm dan 41.62% pada $L_b = 2800$ mm.

Kata Kunci: tekuk torsi lateral, pengaku miring, metode elemen hingga.

Abstract

In steel structures, lateral torsional buckling is one of the requirements that become limit state in the design process. The stiffener will provide an increase in the critical moment.

This study will examine the influence of diagonal stiffeners on increasing the value of lateral torsional buckling critical moment using the finite element method. Finite element method analysis using *SAP2000*. Model on finite element modeling will use on an experimental analysis.

As for the slope of the stiffener used is 1 to 1, 1 to 2 and 2 to 1. The unbraced length used is 3800 mm and 2800 mm. Due to the finite element modeling will be used for experimental analysis, a pull rod added to the beam at the mid span.

The results of the finite element method analysis indicates that given diagonal stiffener beams with slope 1 to 2 provides most increased critical moments than the other slope. On the results of the finite element method the critical moment slope 1 to 2 increase 31.78% at $L_b = 3800$ mm and 41.62% at $L_b = 2800$ mm.

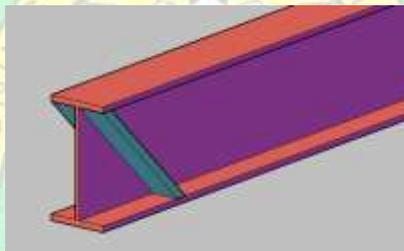
Key Words: lateral torsional buckling, diagonal stiffener, finite element method.

PENDAHULUAN

Salah satu cara untuk meningkatkan momen kritis tekuk torsi lateral adalah dengan memperpendek L_b . L_b adalah panjang tidak terkekang. Yaitu panjang antara 2 titik pada balok yang tidak diberikan penahan lateral untuk mencegah lendutan arah lateral pada flens yang tertekan.

Cara lainnya adalah dengan memberikan pengaku-pengaku atau disebut juga dengan *stiffener*. *Stiffener* secara umum diketahui dapat meningkatkan kekuatan tekuk lateral pada balok.

Pada penelitian ini akan mempelajari perilaku balok yang akan diberi pengaku miring seperti ilustrasi gambar 1.1



Gambar 1. Ilustrasi Stiffener

Penelitian ini akan membandingkan hasil perhitungan manual menggunakan rumus AISC 2010 dengan hasil dari analisis SAP2000. Pertama dibuat pemodelan balok pada analisis elemen hingga sesuai dengan kondisi AISC. Yaitu balok normal tanpa adanya perkuatan stiffener. Jika hasil pemodelan elemen hingga menunjukkan hasil yang sama dengan perhitungan manual maka pemodelan dilanjutkan dengan menambahkan batang tarik sebagai rangkaian pembebanan pada pengujian eksperimental.

Pada kasus yang akan dibahas L_p dan L_r menggunakan persamaan AISC 2010 sebagai berikut: [AISC 2010]

$$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad 1$$

$$L_r = 1.956 r_{ts} \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_0} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x h_0}\right)^2 + 6.76 \left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \quad 2$$

$$r_{ts}^2 = \frac{I_y h_0}{2S_x} \quad 3$$

Dimana

$$r_y = \text{Jari-jari girasi sumbu lemah } y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$

I_y = Momen Inersia enampang terhadap sumbu y

A = Luas penampang

h_0 = jarak antara tengah-tengah sayap

S_x = Modulus penampang elastis terhadap sumbu kuat

L_p = Batas panjang tak terkekang untuk limit batas leleh

L_r = Batas panjang tak terkekang untuk limit batas inelastik

Di dalam *chapter F* pada AISC 2010 diberikan rumus-rumus untuk menghitung momen kritis pada kondisi tertentu, yaitu:

a. Dalam Kondisi Leleh

$$M_n = M_p = F_y Z_x$$

4

Dimana:

F_y = Kuat tarik leleh material (MPa)

Z_x = modulus penampang plastis (mm^3)

b. Tekuk Torsi Lateral dengan Pengaruh Panjang L_b

a. Kondisi dimana panjang $L_p < L_b \leq L_r$

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p$$

5

b. Kondisi dimana panjang $L_b > L_r$

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p$$

6

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{S_x h_0} \left(\frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2}$$

7

Dimana

E = Modulus Elastisitas baja (200000 MPa)

J = Torsional Constant (mm^4)

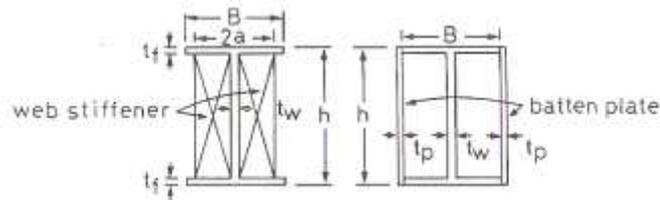
S_x = modulus penampang pada saat elastis (mm^3)

h_0 = jarak antar titik tengah flens (mm)

Studi Terdahulu tentang Pengaruh Stiffener

Penelitian tentang pengaruh stiffener pada peningkatan momen kritis tekuk torsi lateral sudah pernah dilakukan sebelumnya baik secara analisis ataupun eksperimental. Pada penelitian secara analitis yang telah dilakukan oleh Takabatake (1998) penggunaan web stiffener ataupun

batten plate bisa meningkatkan tekuk torsi lateral pada balok. Perbedaan web stiffener dan *batten plate* dapat dilihat pada gambar 2. Pengaruh dari stiffener dan *batten plate* ini terlihat pada peningkatan kekakuan torsi dan kekakuan lentur. Penelitian secara numerik juga telah dilakukan oleh Takabatake dan hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan pada momen inersia tidak terlalu signifikan terlihat pada penggunaan web stiffener ataupun *batten plate* tetapi peningkatan yang signifikan terlihat pada *torsional constant (J)*.



Gambar 2 Perbedaan *Web Stiffener* dan *Batten Plate* [Takabatake 1991]

Hasil yang diperoleh dari eksperimen yang telah dilakukan oleh Takabatake menunjukkan bahwa *perpindahan lateral* dari balok yang telah diperkuat dengan web stiffener ataupun *batten plates* menunjukkan *perpindahan lateral* yang lebih kecil dari balok yang tidak diberi perkuatan sama sekali.

Balok yang diberi perkuatan web stiffener ataupun *batten plates* juga dapat mengurangi *perpindahan vertikal*. Hasil dari *perpindahan vertikal* dipengaruhi oleh momen inersia yang dihasilkan oleh web stiffener dan *batten plates*. Karena dipengaruhi oleh momen inersia maka *batten plates* menunjukkan hasil peningkatan yang lebih besar dibandingkan web stiffener.

Web stiffener dan *batten plates* menunjukkan berkurangnya nilai *perpindahan lateral* setelah diberi perkuatan tersebut. Web stiffener dan *batten plates* mencegah atau menghambat terjadinya *perpindahan lateral*. Maka hasilnya tentu saja peningkatan untuk nilai momen kritis.

Pemodelan Elemen Hingga

Elemen cangkang adalah salah satu elemen yang ada dalam program *SAP2000*. Elemen ini digunakan untuk memodelkan struktur pelat pada sistem 2 dimensi maupun cangkang.

Elemen ini adalah elemen dengan 3 atau 4 titik node yang mengkombinasikan antara kekakuan membran dan kekakuan lentur pelat. Membran mempunyai 2 arah translasi, yaitu translasi dalam arah bidang. Pelat memiliki 1 arah translasi yaitu translasi pada arah tegak lurus bidang dan 3 rotasi dalam ketiga arah sumbu. Kemudian digabungkan sehingga mempunyai 6 derajat kebebasan.

Thin-plate adalah elemen yang tidak memperhitungkan deformasi geser sedangkan *thick-plate* memperhitungkan deformasi geser.

Untuk analisis tekuk pada *SAP2000* yang digunakan adalah analisis tekuk linear. Pada program *SAP2000* kita dapat menentukan berapa banyak mode tekuk yang akan dihitung. Perhitungan tekuk di dalam program adalah perhitungan yang dilakukan dengan cara iterasi.

Analisis tekuk linear mencari ketidakstabilan mode pada struktur akibat efek dari P-delta akibat pengaruh beban yang bekerja. Persamaan umum dari analisis tekuk adalah:

$$[K - \lambda G(r)]\Psi = 0$$

8

Dimana K adalah matriks kekakuan, $G(r)$ adalah kekakuan geometri (P-delta) akibat vektor beban r , λ adalah bilangan skalar yang disebut dengan *eigenvalue* atau nilai eigen, dan ψ adalah *eigenvector* yang merupakan bentuk ragam dari tekuk.

Setiap pasangan dari *Eigenvalue* dan *Eigenvector* disebut ragam tekuk dari struktur. Ragam tekuk ini diurutkan mulai dari nilai *Eigen* yang terkecil sampai dengan yang terbesar. Bila struktur mempunyai N derajat kebebasan, maka akan didapat N ragam tekuk. Namun beban kritis diambil dari ragam terkecil.

Eigenvalue (λ) disebut juga dengan *buckling factor*. *Eigenvalue* adalah faktor skala yang akan mengalikan beban dalam r dan akan menyebabkan tekuk sesuai dengan mode yang diberikan.

Untuk data ukuran profil yang digunakan untuk pemodelan elemen hingga adalah profil IWF 150x75x5x7 dengan ukuran-ukuran sebagai berikut. Tinggi profil = 150 mm, Lebar profil = 75 mm, Tebal web = 5 mm, Tebal Flens = 7 mm, Tebal Stiffener = 5 mm. Kemudian untuk panjang tak terkekang dan kemiringan stiffener dilakukan variasi sebagai berikut:

1. Panjang Tak Terkekang (L_b)

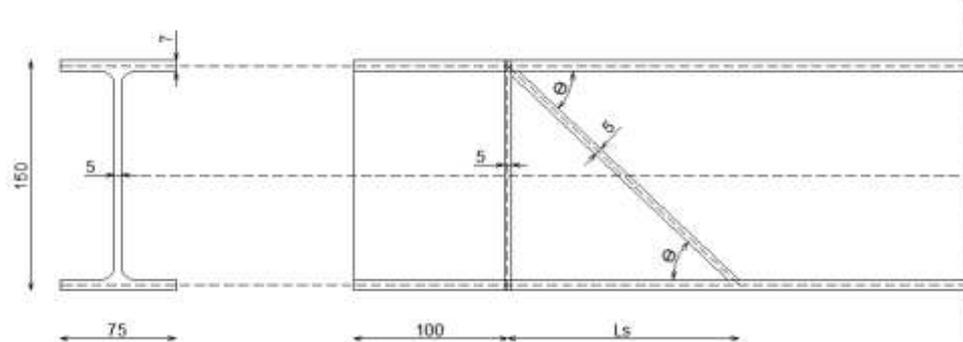
Digunakan 2 macam panjang L_b , yaitu:

- a. $L_b = 3800$ mm
- b. $L_b = 2800$ mm

2. Panjang L_s

Digunakan 3 kemiringan stiffener yaitu:

- a. Kemiringan 1 banding 1
 $L_s = 150$ mm atau $\theta = 45^\circ$
- b. Kemiringan 1 banding 2
 $L_s = 300$ mm atau $\theta = 26.57^\circ$
- c. Kemiringan 2 banding 1
 $L_s = 75$ mm atau $\theta = 63.44^\circ$



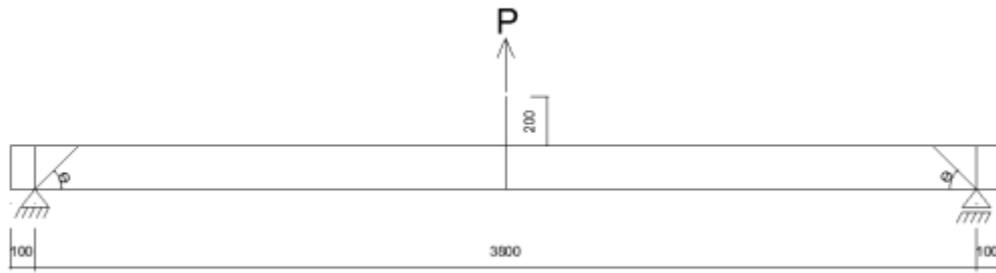
Gambar 3 Dimensi Profil yang digunakan dalam Pemodelan Elemen Hingga

Untuk data-data material didapatkan dari pengolahan data setelah dilakukan pengujian eksperimental untuk *coupon specimen*. Data-data material yang digunakan adalah sebagai berikut:

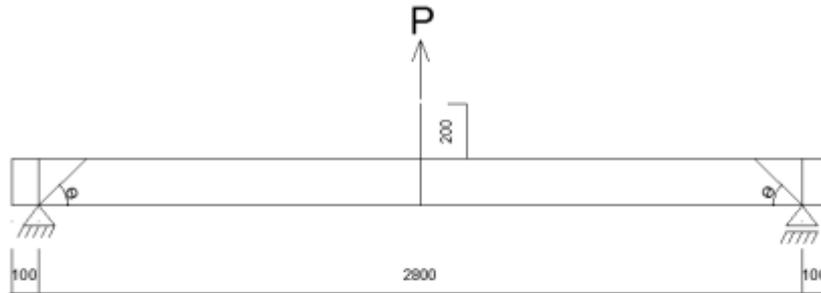
- 1. Modulus Elastisitas (E) = 204224.3333 MPa
- 2. Tegangan Leleh (f_y) = 409.3333 MPa
- 3. Tegangan Putus (f_u) = 542.8165239 MPa

Kemudian model balok dibuat pada program SAP2000 tanpa adanya perkuatan stiffener. Yang hasilnya akan dibandingkan dengan nilai momen kritis yang didapat dari hasil perhitungan dengan rumus AISC.

Kemudian dengan pemodelan yang ada ditambahkan batang tarik sebagai rangkaian model pembebanan. Pada gambar 4 dan 5 memperlihatkan gambar skematik untuk pemodelan pada program SAP2000.

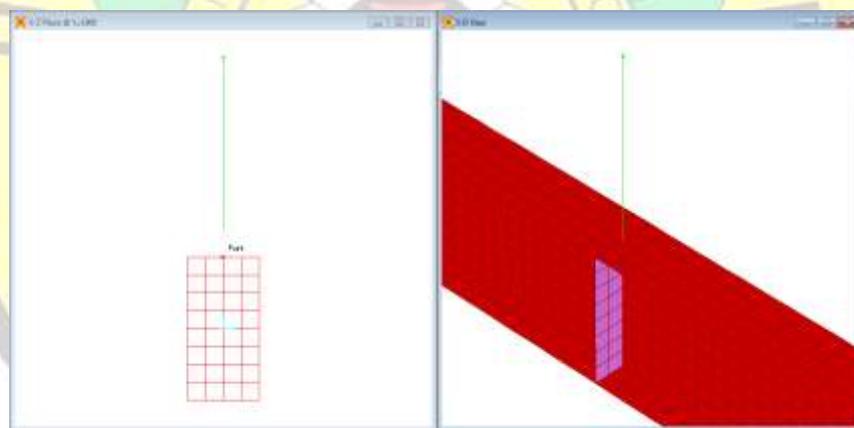


Gambar 4 Skematik Pemodelan Eksperimental $L_b = 3,8$ meter



Gambar 5 Skematik Pemodelan Eksperimental $L_b = 2,8$ meter

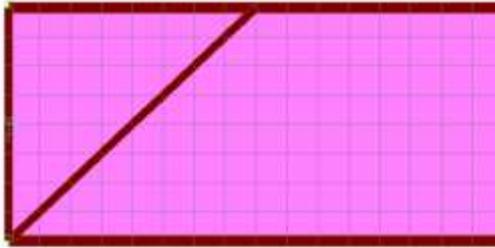
Untuk gambar pemodelan batang tarik dapat dilihat pada gambar 6 dibawah ini.



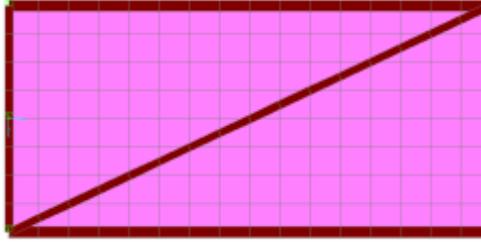
Gambar 6 Gambar Pemodelan Batang Tarik

Untuk jumlah benda uji yang dianalisis dengan metode elemen hingga jumlah keseluruhannya ada 8, yaitu:

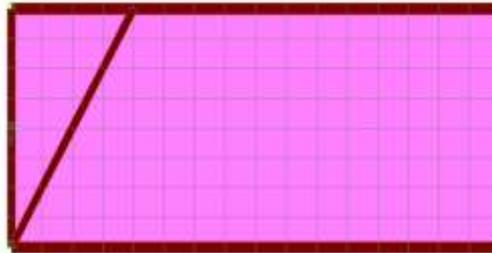
1. $L_b = 3,8$ meter
 - a. Tanpa Stiffener atau $\theta = 0^\circ$
 - b. Kemiringan Stiffener 1:1 atau $\theta = 45^\circ$
 - c. Kemiringan Stiffener 1:2 atau $\theta = 26.57^\circ$
 - d. Kemiringan Stiffener 2:1 atau $\theta = 63.44^\circ$
2. $L_b = 2,8$ meter
 - a. Tanpa Stiffener atau $\theta = 0^\circ$
 - b. Kemiringan Stiffener 1:1 atau $\theta = 45^\circ$
 - c. Kemiringan Stiffener 1:2 atau $\theta = 26.57^\circ$
 - d. Kemiringan Stiffener 2:1 atau $\theta = 63.44^\circ$



Gambar 7 Kemiringan Stiffener 1 banding 1 atau $\theta = 45^\circ$ ($L_s = 150$ mm)



Gambar 8 Kemiringan Stiffener 1 banding 2 atau $\theta = 26.57^\circ$ ($L_s = 300$ mm)



Gambar 9 Kemiringan Stiffener 2 banding 1 atau $\theta = 63.44^\circ$ ($L_s = 75$ mm)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis dari pemodelan SAP adalah sebagai berikut:

a. $L_b = 2800$ mm, beban kritisnya adalah $P_{cr} = 33.8349$ kN

b. $L_b = 3800$ mm, beban kritisnya adalah $P_{cr} = 17.3949$ kN

Untuk hasil perhitungan dengan rumus AISC digunakan persamaan 4, 5 atau 6 sesuai dengan kondisi balok. Dengan menggunakan $f_y = 409.3333$ MPa, didapatkan L_r sebesar 2.098×10^3 . Dengan menggunakan persamaan AISC, untuk $L_b = 3800$ mm didapatkan $M_n = 15.7781$ kNm. Maka beban kritisnya sebesar $P_{cr} = 16.6085$ kN. Untuk $L_b = 2800$ mm didapatkan $M_n = 22.8331$ kNm dan beban kritisnya sebesar $P_{cr} = 32.6188$ kN.

Selisih antara perhitungan manual AISC dan pemodelan dapat kita lihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 1 Selisih Beban Kritis Antara AISC dan SAP (%)

L_b	AISC (kN)	SAP (kN)	%Selisih
2800	32.6188	33.8349	3.59
3800	16.6085	17.3949	4.52

Hasil dari selisih antara AISC dan SAP kurang dari 5%, maka pemodelan pada program SAP sudah mendekati hasil dari perhitungan AISC.

Tabel 2 dan 3 memperlihatkan hasil peningkatan P kritis dari analisis pemodelan elemen hingga dengan menggunakan program *SAP2000* dan memperlihatkan hasil peningkatan momen kritis setelah diberikan perkuatan berupa stiffener miring.

Tabel 2 Hasil Analisis Momen Kritis Pemodelan Elemen Hingga dengan Batang Tarik ($L_b = 3,8$ meter)

Spesimen	θ	Hasil Analisis SAP	%Peningkatan
1A	0°	27.13241	-
1B	45°	34.55542	27.36
1C	26.57°	35.75521	31.78
1D	63.44°	32.84981	21.07

Tabel 3 Hasil Analisis Momen Kritis Pemodelan Elemen Hingga dengan Batang Tarik ($L_b = 2,8$ meter)

Spesimen	θ	Hasil Analisis SAP	%Peningkatan
2A	0°	52.70173	-
2B	45°	71.53922	35.74
2C	26.57°	74.63615	41.62
2D	63.44°	66.76629	26.69

Tabel 4 dan tabel 5 dibawah ini menunjukkan hasil perbandingan P kritis balok antara balok yang diberi rangkaian pembebanan batang tarik dan balok yang tidak diberikan batang tarik.

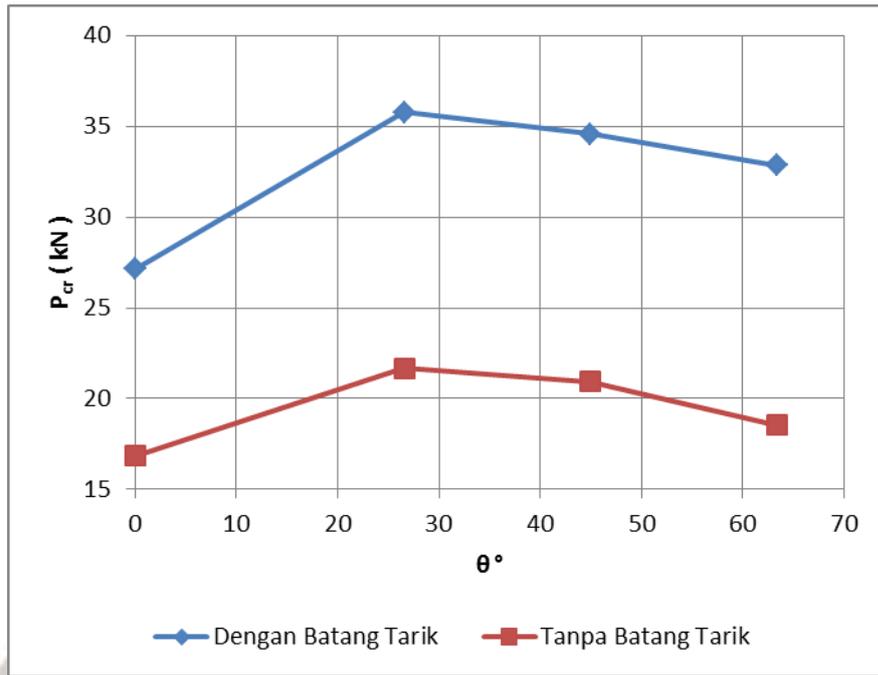
Tabel 4 Perbedaan P kritis Pemodelan Elemen Hingga dengan Batang Tarik dan Tanpa Batang Tarik ($L_b = 3,8$ meter)

θ	Tanpa Batang Tarik (kN)	Dengan Batang Tarik (kN)	% Beda
0°	16.85157	27.13241	37.89
45°	20.92572	34.55542	39.44
26.57°	21.68704	35.75521	39.35
63.44°	19.97813	32.84981	43.52

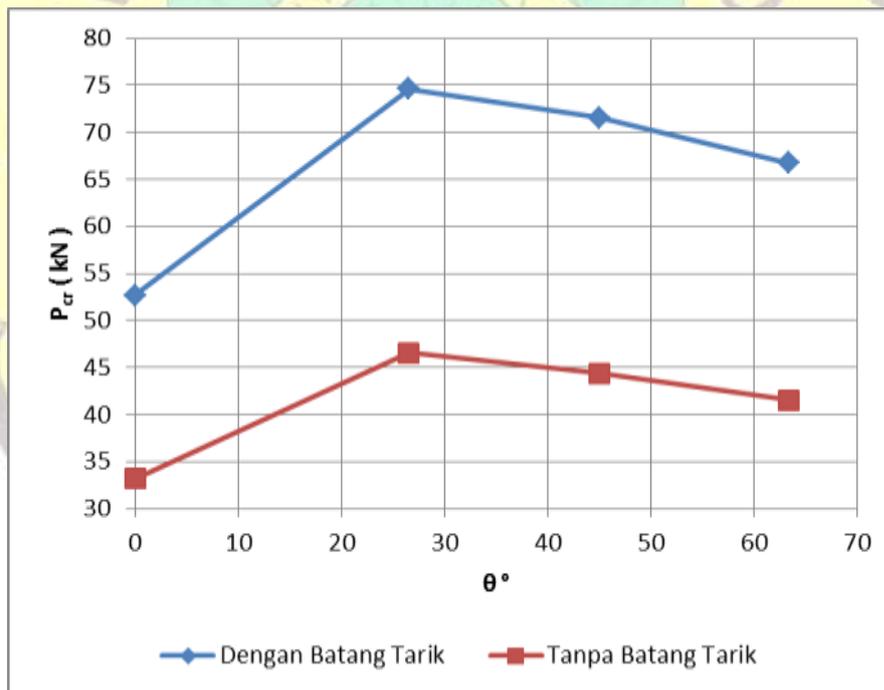
Tabel 5 Perbedaan P Kritis Pemodelan Elemen Hingga dengan Batang Tarik dan Tanpa Batang Tarik ($L_b = 2,8$ meter)

θ	Tanpa Batang Tarik (kN)	Dengan Batang Tarik (kN)	% Beda
0°	33.16299	52.70173	37.07
45°	44.37967	71.53922	38.97
26.57°	46.55547	74.63615	37.62
63.44°	41.54597	66.76629	37.77

Berikut ini adalah grafik peningkatan momen kritis dari balok yang telah diberi perkuatan stiffener miring berdasarkan tabel 2 dan tabel 3.



Gambar 10 Grafik Peningkatan Momen Kritis $L_b = 3,8$ meter



Gambar 11 Grafik Peningkatan Momen Kritis $L_b = 2,8$ meter

KESIMPULAN

Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa pemberian perkuatan dengan menggunakan diagonal stiffener pada balok baja dapat meningkatkan kekuatan momen kritis tekuk torsi lateralnya.

Dari gambar grafik 10 dan 11 dapat dilihat bahwa peningkatan terbesar dari momen kritis ada pada kemiringan stiffener 1 banding 2 atau dengan $\theta = 26.57^\circ$. Yaitu sebesar 31.78% pada $L_b = 3,8$ meter dan 41.62% pada $L_b = 2,8$ meter.

Pada tabel 4 dan tabel 5 terlihat bahwa balok yang diberikan rangkaian pembebanan batang tarik memberikan nilai P kritis yang lebih besar. Hal ini dikarenakan beban tarik yang bekerja pada balok bekerja pada 2 arah. Yaitu arah vertikal dan horisontal. Terbaginya beban pada kedua arah ini dikarenakan adanya *perpindahan lateral* yang terjadi pada saat tekuk terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- American Institute of Steel Construction, (2010). *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-10)*, Chicago.
- Computers and Structures, Inc. (2010). *CSI Analysis Reference Manual*, Berkeley, California, USA.
- Salmon, C.G. and Johnson J.E. 1996. *Steel Structures: Design and Behavior*. Second Edition. Harper Collins Colledge Publisher, New York.
- Takabatake, H., Kusumoto, S., dan Inoue, T., (1990), "Lateral Buckling of I Beams Stiffened with Stiffeners", *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, June 3203-3215
- Tjahjanto, H.H, Wijaya, P.K, and Sibuea, V.H.L., (2013). "*Diagonal Stiffener Effect on Lateral-Torsional Buckling of Steel Beam: A Numerical Study, The 2nd Indonesian Structural Engineering and Material Symposium*", November T17-1 – T17-7.