

Perilaku Geser Balok *Castellated* Bukaannya Segi Empat Penuh dengan Pengaku Diagonal

Ali Murtopo⁽¹⁾, Dedy Firmansyah⁽²⁾, Ria Miftakhul Jannah⁽³⁾⁽¹⁾Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas TidarCorresponding Author: a.m@untidar.ac.id

Abstrak. Upaya meningkatkan kapasitas beban balok *castellated* melalui bukaan segi empat penuh membuat mekanisme kegagalan *vierendeel* terjadi. Hal ini menyebabkan balok tersebut mengalami penurunan kapasitas beban yang disertai dengan lendutan yang lebih besar dibandingkan profil aslinya. Pengaku diagonal berupa baja tulangan diameter 22 mm dipasang pada lubang bukaan untuk menghindari mekanisme kegagalan *vierendeel* sehingga kapasitas beban meningkat dan besar lendutan dapat berkurang. Benda uji balok dibuat bentang pendek sepanjang 910 mm sehingga terjadi kegagalan geser. Proses pembebanan dilakukan dengan memberikan beban statis sampai benda uji mencapai kapasitas optimumnya dan mengalami keruntuhan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas geser yang dapat dipikul balok *castellated* bukaan segi empat penuh dengan pengaku diagonal meningkat 41,75% dibandingkan dengan profil aslinya. Hasil pengujian dibandingkan dengan hasil perhitungan analitis penyimpangannya adalah 0,72%.

Kata kunci: *balok castellated, perilaku geser, vierendeel, pengaku diagonal*

Abstract. Efforts to increase the load capacity of castellated beam through full height rectangular openings made it experience the vierendeel failure mechanism. This causes the full height rectangular opening castellated steel beam to have a lower load capacity and larger deflection than its original section. Diagonal stiffeners in the form of 22 mm diameter of steel bar are used as stiffeners at openings to avoid vierendeel mechanism so that load capacity increases and deflection decreases. The specimens made of 910 mm short span so that shear failure occurs. The specimens are loaded with static load until it reached its maximum capacity. The test result show that load capacity of the full height rectangular opening castellated steel beam with diagonal stiffener increases to 41.75% compared to original section. Based on analytical calculations there is a deviation of 0.72%.

Keyword: *castellated, shear behavior, vierendeel, diagonal stiffener*

PENDAHULUAN

Balok *castellated* telah banyak dipakai sebagai salah satu alternatif struktur bangunan. Keunggulan balok *castellated* adalah mempunyai rasio kekuatan terhadap berat yang lebih tinggi dibandingkan balok baja WF normal (Beng dan Natawidjaya, 1998). Nilai ekonomis juga menjadi salah satu alasan mengapa balok *castellated* dipilih sebagai alternatif struktur balok. Penilaian bergantung pada beberapa faktor seperti bentang balok, kapasitas muat, dan tinggi balok (Boyer, 1964). Balok *castellated* efektif untuk bentang panjang karena mampu meningkatkan kapasitas lentur balok tanpa menambah berat sendiri dari balok.

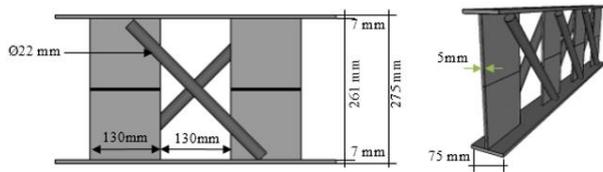
Kasus pada bentang pendek dimana kegagalan terjadi lebih pada mekanisme geser menyebabkan kapasitas beban menjadi rendah. Lubang pada badan balok *castellated* menjadikan balok lemah terhadap geser sehingga pada bentang pendek pemakaian balok *castellated* menjadi tidak efektif. Bukaan segi empat penuh pada *web* membuat balok *castellated* mengalami mekanisme kegagalan *vierendeel* (Oliveira, 2012). Mekanisme kegagalan *vierendeel* adalah kondisi kegagalan yang disebabkan oleh adanya sendi plastis yang muncul di setiap sudut bukaan persegi panjang (Kerdal dan Neterhot, 1984). Akibat kegagalan mekanisme *vierendeel* kapasitas beban balok terhadap geser menjadi lebih rendah dan lendutan lebih besar dibandingkan balok profil WF aslinya (Heldita, 2012).

Agar mekanisme kegagalan *vierendeel* dapat dihindari dan kapasitas geser dapat ditingkatkan, salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan menambah baja tulangan diagonal pada bukaan *web* sebagai pengaku bukaan.

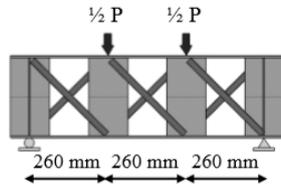
Tujuan dari penelitian ini adalah mengoptimalkan kapasitas geser balok *castellated* bukaan segi empat penuh dengan pengaku diagonal berupa baja tulangan sebagai penguat.

METODE PENELITIAN

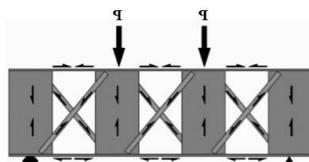
Penelitian dilakukan dengan metode eksperimental berupa pengujian di laboratorium, perhitungan analitis dan perhitungan numeris. Terlebih dahulu dilakukan perhitungan analitis dan numeris kemudian hasil perhitungan dijadikan kontrol dalam pengujian eksperimen di laboratorium. Benda uji dibuat sebagai balok bentang pendek agar terjadi kegagalan geser, lihat Gambar 1. Benda uji terbuat dari profil baja IWF 150x75x7x5 yang dibuat menjadi balok *castellated* bentuk lubang segi empat dengan tinggi 275 mm. Baja tulangan polos diameter 22 mm dipakai sebagai pengaku diagonal pada bukaan badan profil dan dilas pada badan profil. Panjang total balok 910 mm. Pengujian dilakukan dengan pembebanan statik dua titik dengan jarak yang sama yaitu 260 mm. Bentang tumpuan balok 780 mm dengan tumpuan sendi dan rol, lihat gambar 2.



Gambar 1. Balok *castellated* bukaan segi empat penuh pengaku tulangan diagonal



Gambar 2 Pengujian statis dua titik tumpuan sendi-rol



Gambar 3 Metode analisis truss

Data karakteristik material baja WF dan baja tulangan diameter 22 mm didapatkan dari rata-rata hasil pengujian tarik baja. Hasil pengujian menunjukkan bahwa baja tulangan mempunyai kuat leleh rata-rata $f_y = 310$ MPa dan regangan leleh rata-rata $\epsilon_y = 0,0019$. Kuat ultimit baja tulangan rata-rata $f_u = 506$ MPa dan regangan ultimit $\epsilon_u = 0,1833$. Hasil pengujian baja WF menunjukkan bahwa kuat leleh rata-rata $f_y = 336$ MPa dan regangan leleh rata-rata $\epsilon_y = 0,0021$. Kuat ultimit rata-rata $f_u = 454$ MPa dan regangan ultimit $\epsilon_u = 0,15$. Data hasil pengujian tersebut dipakai sebagai acuan data dalam perhitungan teoritis dan numeris.

Kapasitas beban balok *castellated* bukaan segi empat dapat dianalisis dengan rumus yang sederhana. Hal ini dikarenakan pada bukaan, sayap profil atas dan sayap profil bawah tidak saling terkoneksi. Menurut Satyarno dkk (2017) perhitungan kekuatan geser balok *castellated* bukaan segi empat penuh dapat diperhitungkan dengan mekanisme *vierendeel* seperti pada Pers. 1.

$$V_y = \frac{Bt_y^2 f_y}{b} \quad (1)$$

Berdasarkan data yang disebutkan di atas, balok baja *castellated* bukaan segi empat penuh memiliki kekuatan geser luluh $V_y = 9,5$ kN. Nilai kekuatan geser luluh tidak tergantung pada rentang balok. Secara teoritis, hal ini akan membuat bentang pendek dan bentang panjang memiliki kapasitas beban yang sama.

Balok *castellated* bukaan segi empat penuh pengaku tulangan diagonal dapat dianalisis dengan system *truss*. Gaya yang bekerja adalah gaya dalam berupa tarik dan

tekan, seperti pada Gambar 3. Sayap profil atas mengalami gaya tekan dan sayap profil bawah mengalami gaya tarik. Tulangan diagonal di tengah bentang mengalami gaya tekan dan di bagian tepi mengalami gaya tarik dan tekan sesuai tempatnya.

Kapasitas geser balok *castellated* bukaan segi empat penuh pengaku tulangan diagonal ditentukan oleh kuat nominal masing-masing elemen yaitu badan profil, sayap profil dan baja tulangan sebagai pengaku diagonal. Kapasitas beban balok dihitung berdasarkan kuat nominal elemen terhadap tegangannya. Apabila tegangan elemen telah terlampaui oleh kuat nominalnya maka balok telah mencapai kapasitas bebanya. Agar balok mengalami kegagalan geser maka kuat nominal baja tulangan diagonal dan atau badan profil harus terlebih dahulu terlampaui tegangannya. Apabila kondisi tersebut terjadi maka keruntuhan akan terjadi pada baja tulangan diagonal dan atau badan profil. Keruntuhan tersebut terjadi karena pengaruh gaya geser yang bekerja. Kuat nominal elemen dapat dihitung berdasarkan Pers. 2 dan Pers. 3.

$$P_y = f_y A_s \quad (2)$$

$$M_y = \frac{1}{2} P_y d \quad (3)$$

P_y adalah kuat leleh nominal (N), f_y adalah tegangan leleh penampang (MPa), A_s adalah luas penampang (mm^2), M_y adalah kapasitas lentur (Nmm), d adalah jarak antara tumpuan sampai titik pembebanan (mm).

Elemen tekan dihitung berdasarkan beban kritis yang disebabkan oleh adanya tekuk. Berdasarkan Tabel E.1.1 SNI 1729-2015 kekuatan nominal akibat tekuk lentur batang baja tulangan diagonal yang penampangnya berbentuk lingkaran dapat dihitung berdasarkan Pers. 4.

$$P_n = f_{cr} A_g \quad (4)$$

f_{cr} adalah tegangan kritis (MPa), A_g adalah luas area (mm^2). Rasio kelangsingan efektif ditentukan dalam Pers. 5.

$$\lambda = \frac{KL}{r} \quad (5)$$

λ adalah rasio kelangsingan efektif, K adalah faktor panjang efektif, L adalah panjang batang, r adalah jari-jari girasi (mm). Tegangan kritis f_{cr} ditentukan sebagai berikut dalam Pers. 6, Pers. 7, Pers. 8, Pers. 9, dan Pers. 10.

Apabila :

$$\lambda \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ atau } \frac{f_y}{f_e} \leq 2,25 \quad (6)$$

Maka

$$f_{cr} = \left[0,658^{\frac{f_y}{f_e}} \right] f_y \quad (7)$$

Apabila :

$$\lambda > 4,71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ atau } \frac{f_y}{f_e} > 2,25 \quad (8)$$

Maka

$$f_{cr} = 0,877 f_y \quad (9)$$

Dimana,

$$f_e = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (10)$$

f_y adalah tegangan luluh (MPa), E adalah modulus elastis (MPa), f_e adalah tegangan tekuk elastis (MPa).

Berdasarkan data-data diatas maka didapatkan kuat tekan nominal masing-masing elemen seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Kuat nominal dan tegangan elemen.

Element	Pcr (kN)	Py (kN)
Sayap profil	164	176
Badan Profil	122	218
Baja tulangan diagonal	118	118

Dengan menggunakan metode iterasi, didapatkan bahwa benda uji memiliki kapasitas beban maksimum 346,2 kN. Ketika kapasitas beban tercapai, baja tulangan diagonal mencapai beban kritis sebesar 118 kN dimana beban leleh yang dapat ditahan adalah 118 kN. Pada saat yang bersamaan beban kritis sayap profil dan badan profil masih belum mencapai beban lelehnya. Dapat disimpulkan bahwa pengaku diagonal akan runtuh terlebih dahulu sehingga kegagalan yang terjadi adalah akibat geser.

Berdasarkan setting up pengujian pada Gambar 3 yang merupakan balok sederhana, gaya geser (v) balok *castellated* bukaan segi empat penuh dengan pengaku diagonal yang bekerja dapat dihitung dengan Pers. 11

$$V = \frac{Pn}{2} \quad (11)$$

Kegagalan profil WF asli terjadi jika badan profil yang terletak pada daerah geser mengalami keruntuhan terlebih dahulu. Apabila badan profil dalam kondisi stabil maka sebagian gaya geser akan dipikul oleh badan profil tersebut. Artinya ketidakstabilan antara akibat kombinasi antara lentur dan geser tidak terjadi. Persamaan kekuatan geser nominal menurut SNI 1729 : 2015 adalah seperti pada Pers. 12, Pers. 13 dan Pers. 14.

$$V_n = 0,6 F_y A_w C_v \quad (12)$$

Untuk profil I canai panas :

$$\frac{h}{t_w} \leq 2,24 \sqrt{E T f_y} \quad (13)$$

Maka $C_v = 1,0$

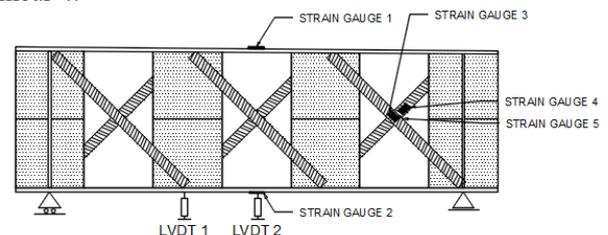
$$V_u \leq \phi V_n \quad (14)$$

dengan $\phi=0,9$ (DFBK)

V_n adalah gaya geser nominal (N), F_y adalah tegangan leleh (N/mm^2), A_w adalah luas badan profil (mm^2) dan C_v adalah koefisien geser badan.

Berdasarkan data di atas didapatkan gaya geser (V_u) yang dapat ditahan oleh balok WF asli adalah 123 kN

Metode eksperimental dilakukan untuk mengetahui perilaku balok *castellated* bukaan segi empat penuh dengan pengaku diagonal. Hasil perhitungan analitis dan numeris dijadikan dasar acuan desain sekaligus prediksi kapasitas beban yang dapat ditahan oleh balok. Prediksi kapasitas balok perlu diperhitungkan agar alat pengujian yang dipakai sesuai dengan prediksi kapasitas beban. Selain itu prediksi perilaku kegagalan juga menjadi acuan dalam penempatan alat pencatat hasil instrument antara lain *LVDT* untuk mencatat lendutan dan *strain gauge* untuk mencatat regangan yang terjadi. Perletakan *LVDT* dan *strain gauge* dapat dilihat pada Gambar 4.



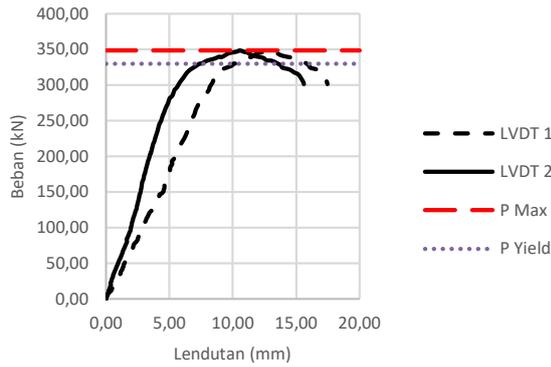
Gambar 4 Lokasi perletakan *LVDT* dan *strain gauge*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian eksperimen menunjukkan bahwa kapasitas beban yang dapat ditahan oleh benda uji adalah sebesar 348,7 kN. Hasil tersebut tidak jauh berbeda dengan hasil perhitungan analitis dan hasil perhitungan numeris. Tingkat kesalahan berada di bawah 5%, lihat Tabel 2.

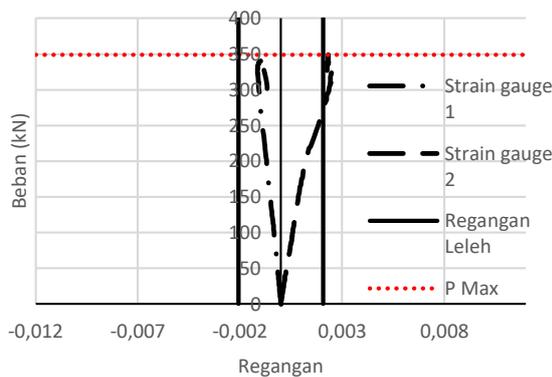
Tabel 2. Perbandingan hasil pengujian terhadap perhitungan analitis dan numeris.

Metode	Kapasitas Beban (kN)	Tingkat Kesalahan (%)
Eksperimen	348,70	
Perhitungan analitis	346,20	0,72

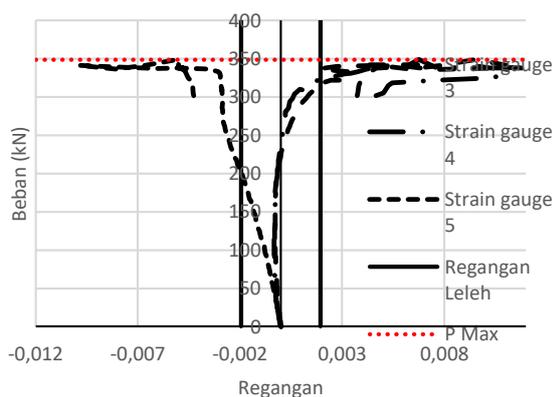


Gambar 5 Grafik hubungan beban-lendutan

Hubungan beban dan lendutan dapat dilihat pada Gambar 5. Lendutan terbesar terjadi di bawah beban, bukan di tengah bentang. Hal ini terjadi karena kegagalan balok *castellated* terjadi akibat geser. Ditandai dengan keruntuhan pada pengaku diagonal yang menyebabkan adanya lendutan di daerah tepi di bawah beban.



Gambar 6a Hasil pengukuran regangan pada sayap profil



Gambar 6b Hasil pengukuran regangan pada pengaku diagonal

Gambar 6 Hasil pengukuran regangan

Kekuatan balok *castellated* bukaan segi empat penuh dengan pengaku diagonal ditentukan oleh kekuatan pengaku diagonal. Kegagalan terjadi di daerah geser dimana tulangan pengaku diagonal mengalami keruntuhan. Gambar 6 menunjukkan hasil pengukuran regangan. Hasil pengukuran regangan pada sayap profil pada saat balok *castellated* telah mencapai kapasitas maksimumnya masih belum mencapai regangan leleh, lihat Gambar 6a. Hal ini menunjukkan bahwa sayap profil masih belum mengalami keruntuhan. Berbeda dengan tulangan pengaku diagonal. Tiga buah LVDT yang dipasang pada tulangan pengaku diagonal telah jauh melewati regangan lelehnya, lihat Gambar 6b. Hal ini menandakan bahwa keruntuhan terjadi pada tulangan diagonal.

Hasil pengamatan langsung pada benda uji dapat dilihat pada Gambar 7. Kegagalan awal terindikasi terjadi tekuk pada pengaku diagonal yang disertai dengan mekanisme kegagalan *vierendeel* seperti pada Gambar 7a. Kegagalan tersebut terjadi pada saat beban mencapai 330 kN. Tekuk pada pengaku diagonal semakin besar sampai pada kapasitas beban maksimumnya yaitu 348,70 kN. Setelah beban mengalami penurunan, tekuk pada pengaku diagonal menarik sayap profil dan badan profil sehingga mengikuti arah tekuk, lihat Gambar 7b.



Gambar 7a Tekuk pertama pada pengaku diagonal



Gambar 7b Kondisi akhir setelah pembebanan

Gambar 7 Kegagalan geser balok *castellated* bukaan segi empat penuh dengan pengaku diagonal

Pemakaian pengaku diagonal untuk mengurangi mekanisme kegagalan *vierendeel* pada balok *castellated* bukaan segi empat penuh cukup efektif. Pengaku diagonal bekerja bersama-sama dengan sayap profil dan

badan profil sehingga kapasitas geser yang dapat ditahan balok mengalami peningkatan, lihat Tabel 3. Peningkatan kapasitas geser sangat signifikan, mencapai 1.735%.

Tabel 3. Perbandingan kapasitas geser balok *castellated* bukaan segi empat penuh tanpa dan dengan pengaku diagonal.

Tipe balok	Kapasitas Beban (kN)	Peningkatan (%)
Balok <i>castellated</i> bukaan segi empat penuh	9,50	
Balok <i>castellated</i> bukaan segi empat penuh dengan pengaku diagonal	174,35	1.735

Perbandingan kapasitas geser balok *castellated* bukaan segi empat penuh dengan pengaku diagonal terhadap balok WF asli dapat dilihat pada tabel 4. Kapasitas geser yang dapat ditahan oleh balok *castellated* berdasarkan hasil pengujian eksperimen terhadap Persamaan 11 didapatkan sebesar 174,35 kN. Sedangkan kapasitas geser balok WF asli dari hasil perhitungan analitis adalah 123 kN. Peningkatan kapasitas geser balok *castellated* bukaan segi empat penuh dengan pengaku diagonal terhadap balok WF asli adalah 41,75%.

Tabel 4. Perbandingan kapasitas geser balok *castellated* bukaan segi empat penuh dengan pengaku diagonal terhadap balok WF asli.

Tipe balok	Kapasitas Geser (kN)	Peningkatan (%)
Balok WF Asli	123	
Balok <i>castellated</i> bukaan segi empat penuh dengan pengaku diagonal	174,35	41,75

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Pengaku diagonal pada balok *castellated* bukaan segi empat penuh dapat digunakan untuk mengurangi mekanisme *vierendeel*.
2. Pengaku diagonal dapat meningkatkan kapasitas geser balok *castellated* bukaan segi empat penuh terhadap balok WF aslinya.
3. Metode analisis *truss* dapat dipakai dalam perhitungan balok *castellated* bukaan segi empat penuh dengan pengaku diagonal.

4. Kegagalan balok *castellated* bukaan segi empat penuh dengan pengaku diagonal merupakan kombinasi dari kegagalan geser dan mekanisme *vierendeel* karena dalam kondisi elastis, pengaku diagonal, sayap profil, dan badan profil bekerja dan gagal bersama-sama.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional, 2012, *Tatacara perencanaan struktur baja untuk bangunan gedung* – SNI 03-1729-2012.
- Beng, J.P. dan Natawijaya, E.K., 1998, *Perbandingan kekuatan profil WF biasa dengan profil WF kastela pada struktur rangka gable*, Jurnal Teknik Sipil Universitas Tarumanegara, No. 1, Vol. 4, Maret.
- Boyer, J.P., 1964, *Castellated Beams-New Developments*, AISC National Engineering Conference, Omaha, Nebraska
- Heldita, D., 2012, *Perilaku Geser Balok Castellated Bentuk Lubang Segi Empat dengan Tulangan dan Komposit Mortar*, Yogyakarta : Tesis S2 Universitas Gadjah Mada
- Kerdal dan Nethercot, 1984, *Failure modes for castellated beams*, Journal of Constructional Steel Research 4(4):295-315
- Oliveira, A. T. C. R. D., 2012, *Perilaku Lentur Balok Castellated Bentuk Lubang Segi Empat Dengan Tulangan Dan Komposit Mortar*, Yogyakarta : Tesis S2 Universitas Gadjah Mada.
- Satyarno, I., dkk., 2017, *Full Height Rectangular Opening Castellated Steel Beam Partially Encased in Reinforced Mortar*, Procedia Engineering. Vol. 171 : 176-184.