



STUDI ANALISIS ELEMEN HINGGA PENGARUH RASIO DIAMETER TERHADAP KETEBALAN PADA KEKUATAN LENTUR DAN GESER BALOK STRUKTUR BERONGGA BUNDAR

Mahmud Kori Effendi

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Janabadra, Yogyakarta

*Corresponding author, email address: kori.effendi@janabadra.ac.id

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<i>Article History:</i> Received 27 January 2023 Accepted 27 December 2024 Online 30 March 2025 <i>Keywords:</i> Beam Steel D/t Finite element Moment and Shear	Buildings built by steel materials began to be widely used in Indonesia. Circular Hollow Section (CHS) is generally used as column elements and can also be used for beam elements. This study aims to perform a parametric study analysis of the effect of D/t on the flexural and shear behavior of CHS beams using the MSC Marc/Mentat software. The results of the finite element analysis of CHS beams show that the CVSt32 beam ($D/t=35,72$) shows a greater maximum load response than the CVSt12 beam ($D/t=92,25$) and also the CVSt07 beam ($D/t=163,28$). The maximum load response of beams loaded with pure bending (one point) produces a maximum load of 50% more than the maximum load response of beams loaded with a combination of bending and shear (two points). The maximum deflection response of a beam with $D/t=35,72$ which is loaded with pure bending (one point) produces a greater maximum deflection compared to beams with $D/t=92,25$ and $D/t=163,28$. The smaller the D/t both the pure bending beam (two points) and the beam loaded with a combination of bending and shear (one point) produce a greater deflection compared to the larger D/t beam. The phenomenon of local buckling in a beam loaded with one point will cause the maximum load that can be supported by the beam loaded with two points (pure bending). The SNI calculated moment capacity is greater than the finite element analysis result and the calculated shear force (V_n) is greater than the finite element analysis result ($P_{max}/2$). ©2025 Magister Teknik Sipil USK. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Bangunan menggunakan material baja mulai banyak digunakan di Indonesia. Baja dengan Penampang Struktur Berongga (PSR) bundar umumnya digunakan sebagai elemen kolom dan dapat juga digunakan untuk elemen balok. Apabila penampang PSR bundar digunakan sebagai elemen balok maka elemen struktur ini akan memikul beban distribusi dari beban pada pelat lantai. Pembebanan pada pelat lantai yang berlebihan akan menyebabkan balok PSR bundar dapat terjadi leleh dan tekuk lokal dan kemungkinan juga terjadi keruntuhan sebelum penampang mencapai kekuatan ultimitnya. Salah satu penyebab terjadinya tekuk lokal tersebut adalah faktor kelangsingan sayap atau faktor kelangsingan badan.

Pada SNI 1729:2020 (BSN, 2020), Spesifikasi untuk bangunan gedung baja structural, Tabel Catatan Pengguna F1.1, Tabel Pemilihan Untuk Penggunaan Pasal-Pasal Dalam Bab F disebutkan bahwa syarat kelangsingan sayap dan kelangsingan badan untuk Penampang Struktur Berongga (PSR) bundar menunjukkan N/A. Singkatan ini digunakan untuk menunjukkan informasi kosong pada sebuah sel tabel karena tidak diperlukan atau memang tidak ada. Hal ini menunjukkan bahwa pada Penampang Struktur Berongga (PSR) bundar tidak terdapat penampang kompak, tidak kompak dan langsing. Menurut SNI

1729-2020 (BSN, 2020), Penampang kompak adalah penampang yang mampu mengembangkan distribusi tegangan plastis secara penuh dan memiliki kapasitas rotasi, R , kurang lebih tiga sebelum terjadi tekuk lokal. Penampang tidak kompak adalah penampang yang dapat mengembangkan tegangan leleh dalam elemen tekannya sebelum tekuk lokal terjadi, tetapi tidak dapat mengembangkan kapasitas rotasi, R , sebesar tiga. Profil elemen langsing adalah penampang melintang yang memiliki komponen-komponen pelat langsing yang memadai sehingga tekuk lokal pada rentang elastis dapat terjadi.

Penelitian ini bertujuan untuk memvalidasi eksperimen dari Effendi (Effendi, Kawano dan Matsuo, 2014; Effendi dan Kawano, 2017). Hubungan beban-lendutan dibandingkan antara hasil analisis elemen hingga dengan eksperimen. Studi parametrik berupa rasio diameter dengan ketebalan dinding PSR bundar (D/t) dilakukan dengan menggunakan model elemen hingga yang telah tervalidasi dengan eksperimen tersebut. Selain itu, panduan perancangan balok Penampang Struktur Berongga (PSR) bundar SNI 1729-2020 (BSN, 2020) dievaluasi dengan penelitian elemen hingga. Dalam peraturan SNI 1729-2020: F8 (BSN, 2020), dimana pasal ini diterapkan untuk Penampang Struktur Berongga (PSR) bundar yang memiliki $\lambda = D/t$ kurang dari $0.045E/F_y$. Dalam pasal ini tidak disebutkan batas minimum nilai $\lambda = D/t$. Perilaku dan prediksi kekuatan balok Penampang Struktur Berongga (PSR) bundar yang memiliki $\lambda = D/t$ lebih dari $0.045E/F_y$ juga belum masuk dalam peraturan SNI 1729-2020 (BSN, 2020). Oleh karena itu, studi melalui metode elemen hingga perlu untuk dilakukan untuk meneliti permasalahan tersebut.

2. KAJIAN PUSTAKA

Penampang Struktur Berongga (PSR) bundar sudah banyak digunakan pada banyak struktur bangunan pipa lepas pantai, platform di perairan dalam lepas pantai, hotel, rumah, dll. Perilaku struktural Penampang Struktur Berongga (PSR) bundar tersebut menjadi hal yang sangat penting. Perilaku balok Penampang Struktur Berongga (PSR) dengan D/t antara 16-48 dan dengan kekuatan tarik baja sangat tinggi yaitu antara 450 sampai 1350 MPa dilakukan secara eksperimen lentur murni dan lentur 4-titik. Analisis kapasitas momen plastis penuh penampang tersebut dapat tercapai dengan kelangsingan penampang sampai 198. Batas kelangsingan plastis 117 dan 153 diusulkan berdasarkan kapasitas rotasi, R sebesar 3 dan 4, berturut-turut (Jiao dan Zhao, 2004). T.M. Chan (Chan dan Gardner, 2008), menguji lentur 4-titik dan lentur 3-titik pada balok baja canai panas (*hot rolled steel*) berongga elips. Selain itu, data uji lentur balok berongga bundar juga digunakan data uji lentur oleh peneliti lain (Sherman, 1986; Gardner dan Chan, 2007) sebagai acuan dalam analisis balok elips. Elchalakani (Elchalakani, Zhao dan Grzebieta, 2002) menguji 12 balok berongga bundar dengan D/t antara 37-122 dan membandingkan dengan peraturan perancangan AS4100 (AS4100, 2020). Guo (Guo, Yang dan Jiao, 2013) menguji pengaruh kelangsingan penampang, rasio diameter-tebal (D/t) bervariasi dari 75 hingga 300, terhadap sifat lentur inelastis dan elastik balok tabung baja berongga bundar berdinding tipis. Selain itu, pengaruh pengaku yang dilas dalam tabung baja juga dipertimbangkan. Pengaku dalam tabung baja meningkatkan kapasitas balok dan meningkatkan daktilitas spesimen. Hasil eksperimen dibandingkan dengan pedoman desain saat ini seperti AISC-LRFD (AISC, 2016), AS4100 (AS4100, 2020), dan Eurocode (BS, 2006).

Analisis elemen hingga juga dilakukan oleh para peneliti untuk memvalidasi hasil eksperimen balok berongga. Zheng (Zheng dkk., 2016), menggunakan software elemen hingga, ABAQUS, untuk memvalidasi hasil eksperimen balok berongga lentur beban dua titik. Zhu (Zhu dkk., 2021) juga menggunakan ABAQUS untuk melakukan analisis elemen hingga balok lentur beban dua titik berongga elips. Penelitian balok baja dengan beban dua titik juga dilakukan oleh banyak peneliti (Hosseini dkk., 2022; Obst, Wasilewicz dan Adamiec, 2022; Lochan dan Polak, 2024).

Dalam peraturan SNI 1729-2020: F8 (BSN, 2020), dimana pasal ini diterapkan untuk Penampang Struktur Berongga (PSR) bundar yang memiliki $\lambda = D/t$ kurang dari $0.45E/f_y$. Kekuatan lentur nominal, M_n , harus nilai terendah yang diperoleh sesuai dengan keadaan batas dari leleh (M_p , momen plastis) dan tekuk lokal:

1. Pelelehan

$$M_n = M_p = f_y Z \quad (1)$$

Keterangan

Z =Modulus penampang plastis, in.³ (mm³)

f_y =Tegangan leleh baja (MPa)

2. Tekuk Lokal

- a. Untuk penampang kompak, keadaan batas dari tekuk lokal sayap tidak diterapkan
- b. Untuk penampang tidak kompak

$$M_n = \left(\frac{0,021E}{D/t} + f_y \right) S \quad (2)$$

- c. Untuk penampang dengan dinding langsing

$$M_n = F_{cr} S \quad (3)$$

Dimana,

$$F_{cr} = \frac{0,33E}{D/t} \quad (4)$$

Keterangan:

F_{cr} =Tegangan kritis, ksi (MPa)

E =Modulus elastisitas baja, ksi (MPa)

S =Modulus penampang elastis, in.³ (mm³)

D =diameter luar PSR bundar, in. (mm)

t =ketebalan dinding desain komponen struktur PSR, in. (mm)

Pasal G5 SNI 1729-2020: F8 (BSN, 2020), dimana pasal ini diterapkan untuk Penampang Struktur Berongga (PSR) bundar yang terkena gaya geser akibat beban luar. Kekuatan geser nominal, V_n , PSR bundar, sesuai dengan keadaan batas leleh geser dan tekuk geser, harus ditentukan sebagai (Persamaan 5) :

$$V_n = \frac{F_{cr} A_g}{2} \quad (5)$$

dengan

F_{cr} harus yang terbesar di antara (Persamaan 6) atau (Persamaan 7)

$$F_{cr} = \frac{1,6E}{\sqrt{\frac{L_v}{D} \left[\frac{D}{t} \right]^4}} \quad (6)$$

Dan

$$F_{cr} = \frac{0,78E}{\left[\frac{D}{t} \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

Tetapi tidak boleh melebihi $0,6f_y$

Keterangan:

F_{cr} = Tegangan kritis, ksi (MPa)

A_g = Luas penampang bruto komponen struktur, in.² (mm²)

E = Modulus elastisitas baja, ksi (MPa)

D = Diameter terluar, in. (mm)

L_v = Jarak dari lokasi gaya geser maksimum ke gaya geser nol, in. (mm)

t = Tebal dinding desain, in. (mm)

Catatan Pengguna: Persamaan tekuk geser, Persamaan 6 dan 7, akan menentukan apabila D/t di atas 100, baja kekuatan tinggi, dan panjang besar. Untuk profil standar, leleh geser umumnya menentukan dan $F_{cr} = 0,6F_y$

3. METODE PENELITIAN

Perangkat lunak elemen hingga komersial MSC Marc/Mentat (MSC, 2003) digunakan untuk membuat pemodelan elemen hingga. Pemodelan elemen hingga adalah salah satu untuk mereproduksi respons eksperimental struktur balok struktural. MSC Marc/Mentat (MSC, 2003) digunakan untuk pemodelan dan juga digunakan untuk analisis elemen balok tabung baja. Analisis menggunakan pendekatan material non linier dan pendekatan geometri non linier. Pemodelan elemen hingga harus dibuat model yang tepat dari spesimen laboratorium eksperimen dalam hal dimensi, kondisi batas, dan sistem pembebanan. Untuk elemen pembebanan dimodelkan menggunakan geometri sedangkan untuk balok PSR menggunakan elemen solid tipe 7 (MSC, 2010).

Tabel 1.Sifat Mekanika Bahan

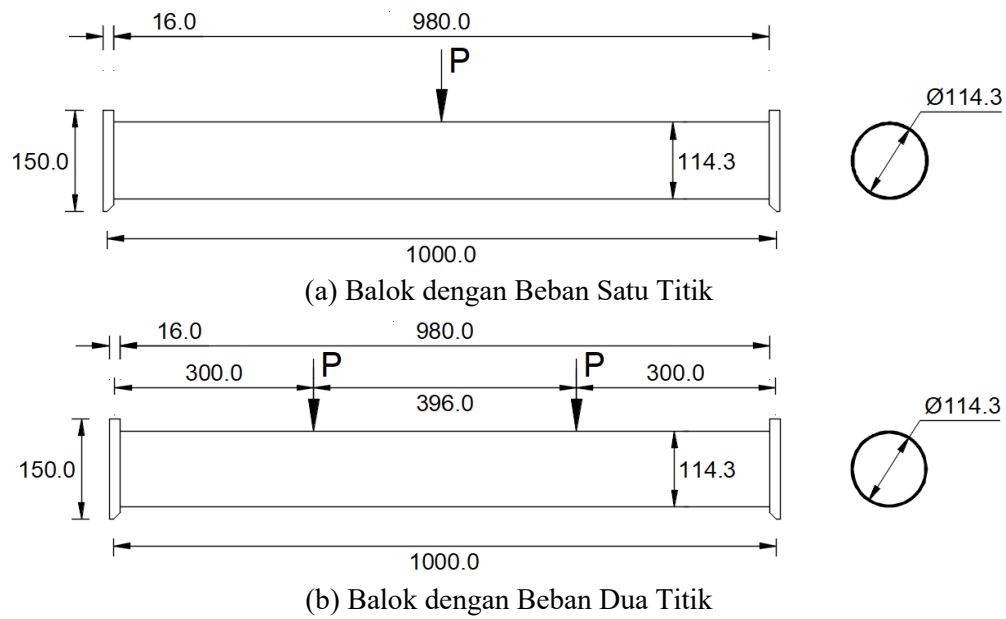
Penampang	D (mm)	t (mm)	$\lambda = \frac{D}{t}$	λ_p	λ_r	Klasifikasi Balok	A_g	Z (cm ³)	S (cm ³)	f_y (MPa)
CVSt07	114,3	0,7	163,2	35,9	159,1	Langsing	249,8	9,03	7,05	411
CVSt12	114,3	1,2	95,2	35,9	159,1	Tidak Kompak	426,3	15,4	11,9	411
CVSt32*	114,3	3,2	35,7	35,9	159,1	Kompak	1116,8	39,5	30,1	411

(Effendi, Kawano dan Matsuo, 2014; Effendi dan Kawano, 2017)

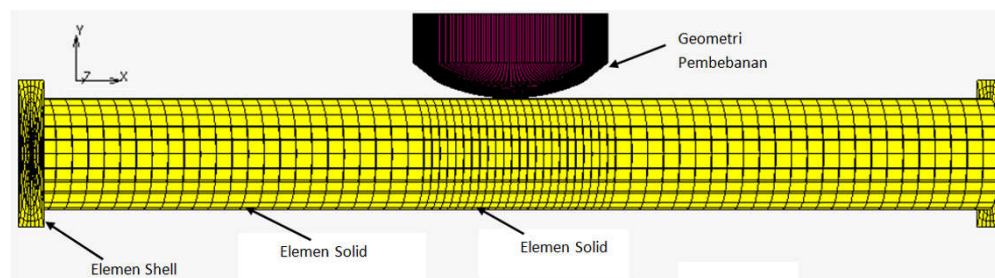
Sifat mekanik tabung baja ditunjukkan pada Tabel 1. Spesimen balok berada dalam kisaran $\lambda=D/t$ kurang dari 0,45(E/f_y)=0,45(211000/4110=231. Dalam model elemen hingga, material balok PSR baja dimodelkan sebagai material model plastik elastis bilinear dimana garis linier pertama terdiri dari regangan leleh dan tegangan leleh sedangkan garis linier yang kedua regangan tarik ultimit dan tegangan tarik ultimit. Tegangan leleh (f_y) dan tegangan tarik ultimit tabung baja masing-masing adalah 411 MPa dan 520 MPa. Modulus elastisitas (E) dan rasio Poisson (ν) berturut-turut adalah 211 GPa dan 0,3. Untuk pelat tumpuan diasumsikan bahwa sifat mekanik pelat baja adalah material elastis.

Pada Gambar 1(a) terlihat gambar balok dengan beban satu titik. Model elemen hingga ini merupakan pemodelan balok eksperimen yang dilakukan oleh Effendi (Effendi dan Kawano, 2017). Untuk melihat perbedaan perilaku lentur dan geser (beban satu titik) (Gambar 1(a)) dengan perilaku lentur murni (beban dua titik) (Gambar 1(b)) maka dilakukan investigasi mengenai perilaku kedua jenis balok tersebut. Pada Gambar 2 terlihat bahwa ukuran mesh elemen solid di bawah permukaan beban (8,3x16x3,2) dibuat lebih kecil ukurannya dibandingkan dengan elemen yang jauh dari beban (16,6x16,6x3,2). Elemen shell, elemen tipe 75 (MSC, 2010), digunakan untuk pelat tumpuan. Gambar 3 menunjukkan model elemen hinggadengan kondisi batas tumpuan adalah tumpuan sendi-rol dan aplikasi pembebanan disimulasikan untuk menghasilkan kondisi pembebanan seperti pada pengujian eksperimental. Elemen geometri pembebanan diatur untuk bergerak ke bawah sebesar 120 mm. Bentang balok yang diperhitungkan adalah 996 mm.

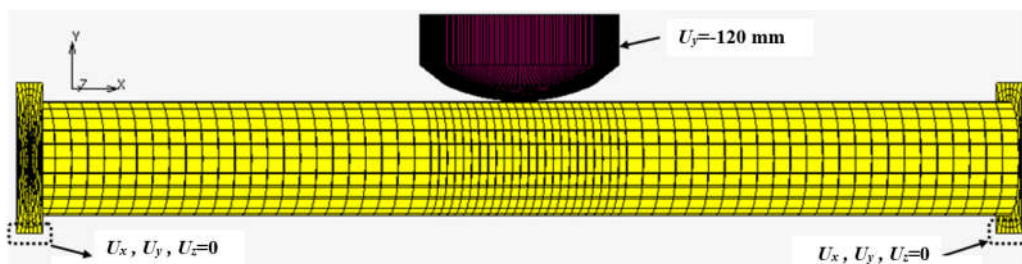
Pada Gambar 4, ketika geometri pembebanan bergerak ke bawah, terjadi kontak dengan balok. Kontak terjadi antara permukaan pelat beban dan permukaan balok tabung baja di bawah pelat beban (warna pink) dimodelkan sebagai kontak sentuh (*touching contact*). Kontak ini terjadi tanpa gesekan yang memungkinkan pemisahan dan tanpa penetrasi antara benda yang saling bersentuhan. Elemen solid tabung baja yang tidak bersentuhan dengan geometri pembebanan ditunjukkan dengan warna hitam.



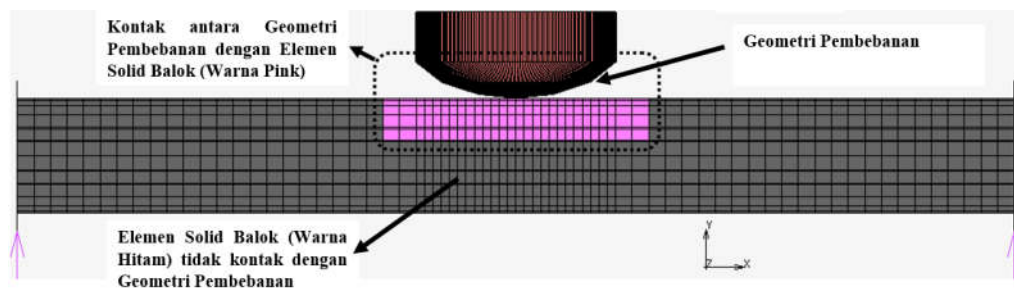
Gambar 1 . Balok dengan Beban Satu Titik dan Dua Titik



Gambar 2 . Mesh pada Balok



Gambar 3 . Kondisi Tumpuan dan Pembebanan

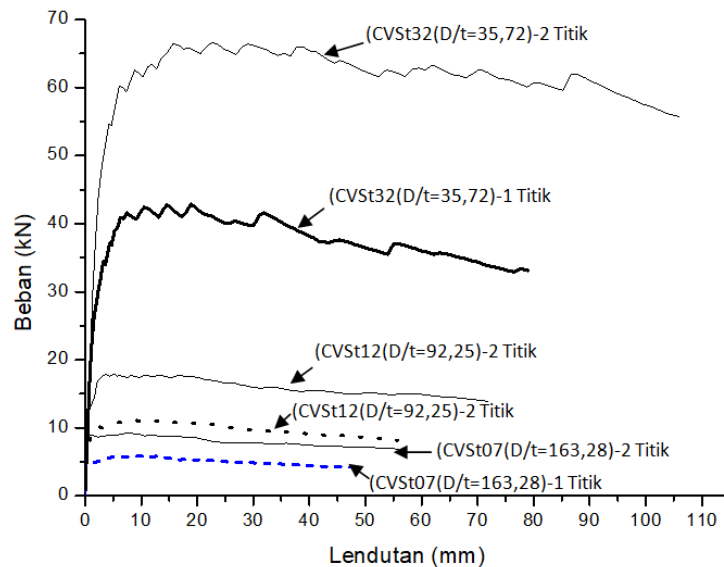


Gambar 4 . Analisis Kontak

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hubungan Beban-Lendutan

Hasil pemodelan elemen hingga pada penelitian sebelumnya (Effendi, Kawano dan Matsuo, 2014; Effendi dan Kawano, 2017) mampu memodelkan eksperimen dengan hasil yang sesuai, sehingga model tersebut digunakan untuk melakukan studi parametrik balok PSR dengan variasi D/t 35,72 (CVSt32); 95,25 (CVSt12); dan 163,28 (CVSt07). Semua balok dibebani dengan kontrol perpindahan (*displacement control*) 120 mm ke arah bawah. Balok PSR akan dibebani satu titik untuk memodelkan balok terkena kombinasi lentur dan geser sedangkan balok PSR yang dibebani dua titik untuk memodelkan balok terkena lentur murni di posisi tengah bentang balok.



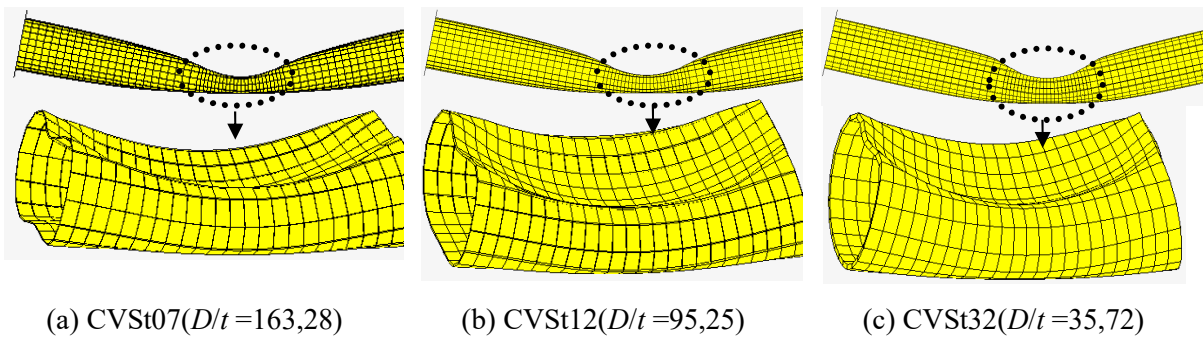
Gambar 5 . Respon Beban-lendutan Balok Beban Satu Titik dan Dua Titik

Pada Gambar 5 terlihat kurva beban-lendutan hasil analisis elemen hingga. Lendutan diukur pada lokasi di bawah balok di tengah-tengah bentang balok. Pada Grup A terlihat bahwa kekakuan awal semua balok memiliki nilai yang hampir sama. Balok CVSt32 ($D/t=35,72$) dibebani dua titik maupun dibebani satu titik menghasilkan respon beban maksimum yang paling besar dibandingkan dengan balok CVSt12 ($D/t=92,25$) dan balok CVSt07 ($D/t=163,28$). Balok CVSt32 ($D/t=35,72$) yang dibebani dua titik menghasilkan respon beban maksimum (66,6 kN) sebesar 55,2% lebih besar daripada balok CVSt32 ($D/t=35,72$) yang dibebani satu titik (42,9 kN). Balok CVSt12 ($D/t=92,25$) yang dibebani dua titik menghasilkan respon beban maksimum (17,9 kN) sebesar 61,2% lebih besar daripada balok CVSt12 ($D/t=92,25$) yang dibebani satu titik (11,1 kN). Balok CVSt07 ($D/t=163,28$) yang dibebani dua titik menghasilkan respon beban maksimum (9,21 kN) sebesar 58,5% lebih besar daripada balok CVSt12 ($D/t=163,28$) yang dibebani satu titik (5,81 kN). Dari hasil diatas dapat disimpulkan bahwa respon beban maksimum balok PSR yang dibebani dua titik menghasilkan respon beban lebih dari 50% dari respon beban maksimum balok PSR yang dibebani satu titik. Hal ini menunjukkan bahwa respon beban maksimum balok yang dibebani lentur murni menghasilkan beban maksimum 50% lebih dari respon beban maksimum balok yang dibebani kombinasi lentur dan geser.

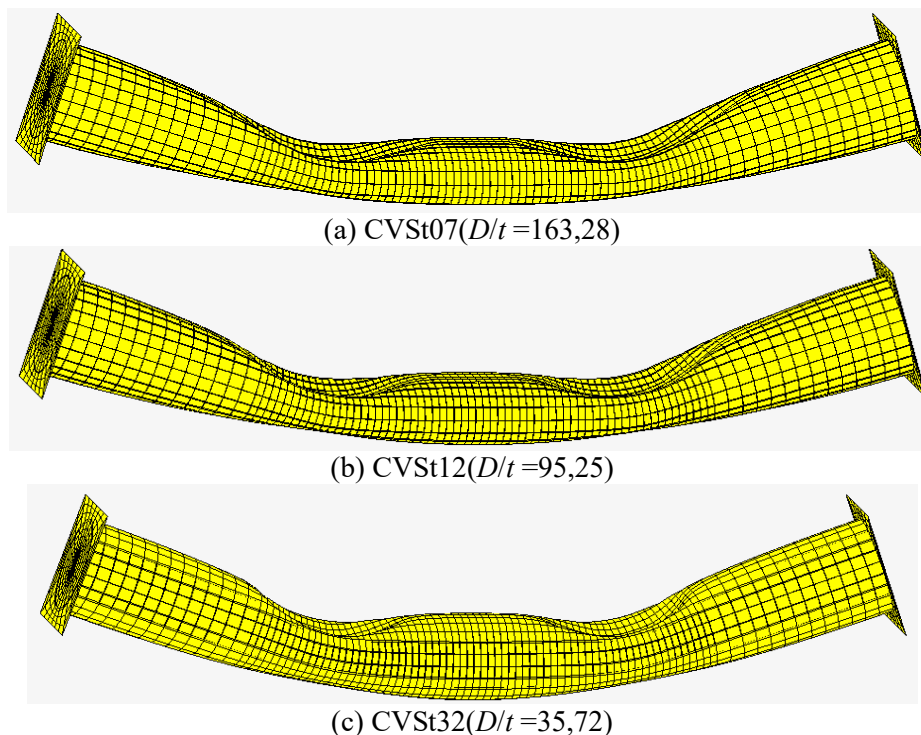
Balok CVSt32 ($D/t=35,72$) yang dibebani dua titik maupun dibebani satu titik menghasilkan respon lendutan maksimum yang paling besar dibandingkan dengan balok CVSt12 ($D/t=92,25$) dan balok CVSt07 ($D/t=163,28$). Balok CVSt32 ($D/t=35,72$) yang dibebani dua titik menghasilkan respon lendutan maksimum (106 mm) sebesar 34,1% lebih besar daripada balok CVSt32 ($D/t=35,72$) yang dibebani satu titik (79 mm). Balok CVSt12 ($D/t=92,25$) yang dibebani dua titik menghasilkan respon lendutan maksimum (72 mm) sebesar 29,03% lebih besar daripada balok CVSt12 ($D/t=92,25$) yang dibebani satu titik (55,8 mm). Balok

CVSt07 ($D/t=163,28$) yang dibebani dua titik menghasilkan respon lendutan maksimum (56,1 mm) sebesar 14,02% lebih besar daripada balok CVSt12 ($D/t=163,28$) yang dibebani satu titik (49,2 mm). Dari hasil diatas dapat disimpulkan bahwa respon lendutan maksium balok dengan $D/t=35,72$ yang dibebani lentur murni menghasilkan lendutan maksimum lebih besar dibandingkan dengan balok dengan $D/t=92,25$ dan $D/t=163,28$. Semakin kecil D/t baik balok lentur murni dan balok dibebani kombinasi lentur dan geser menghasilkan lendutan yang lebih besar dibandingkan dengan balok D/t semakin besar.

Bentuk kerusakan balok CVSt07 ($D/t=163,28$), CVSt12 ($D/t=92,25$) dan balok CVSt32 ($D/t=35,72$) yang dibebani satu titik dapat dilihat pada Gambar 6(a-c), berturut-turut. Semua balok dengan beban satu titik (kombinasi lentur dan geser) terlihat bahwa terjadi tekuk lokal balok di lokasi di bawah beban. Untuk bentuk kerusakan balok CVSt07 ($D/t=163,28$), CVSt12 ($D/t=92,25$) dan balok CVSt32 ($D/t=35,72$) yang dibebani dua titik dapat dilihat pada Gambar 7(a-c), berturut-turut. Fenomena tekuk lokal pada balok dibebani satu titik akan menyebabkan beban maksimal yang dapat didukung oleh balok menjadi menurun atau lebih kecil dibandingkan dengan balok yang dibebani dua titik (lentur murni) seperti terlihat pada Gambar 5. Pada Gambar 7(a-c) pada tengah bentang tidak terjadi tekuk lokal. Tekuk lokal terjadi tepat dibawah beban seperti pada kasus balok dibebani satu titik.



Gambar 6 . Kerusakan Balok akibat Beban Satu Titik



Gambar 7 . Kerusakan Balok akibat Beban Dua Titik

4.2 Perbandingan Kekuatan Lentur dan Geser dengan SNI

Ada sejumlah spesifikasi yang tersedia untuk desain tahanan momen tabung sirkular termasuk AISC-LRFD (AISC, 2005), AS4100 (AS4100, 2020) dan Eurocode (BS, 2006). Spesifikasi Baja Indonesia merupakan adopsi dari AISC LRFD (BSN, 2020). Kemudian, hasil dari analisis elemen hingga balok penampang berongga melingkar yang digunakan dalam studi parametrik dibandingkan dan diverifikasi dengan perhitungan analitis sesuai SNI. Momen leleh dihitung menggunakan Persamaan 1. Momen tekuk lokal dihitung menggunakan Persamaan (2) atau Persamaan (3) tergantung kategori penampangnya. Kapasitas geser balok, V_n , dihitung menggunakan Persamaan (5). Kapasitas penampang dipilih nilai yang terkecil dari momen leleh atau momen tekuk lokal. Dari Tabel 2 nilai yang terkecil dicetak dengan huruf tebal. Nilai P_{max} didapat dari nilai maksimum dari respon beban hasil analisis elemen hingga. Berdasarkan hasil perhitungan di Tabel 2 terlihat bahwa kapasitas momen hasil perhitungan lebih besar daripada momen hasil analisis elemen hingga dan gaya geser hasil perhitungan (V_n) lebih besar daripada gaya geser hasil analisis elemen hingga ($P_{max}/2$).

Tabel 2. Hasil pengujian balok dibebani satu titik dan dua titik

Pembebanan	Penampang	D/t	Momen Leleh	Momen Tekuk Lokal (kNm)	P_{max} (kN)	M_{max} (kNm)	V_n (kN)	$P_{max}/2$ (kN)
Dua Titik	CVSt07	163,2	3,7	3,0	9,21	2,2	9,9	4,6
	CVSt12	95,2	6,3	5,4	17,8	4,4	37,7	8,9
	CVSt32	35,7	16,2		66,6	16,5	137,7	33,3
Satu Titik	CVSt07	163,2	3,7	3,1	5,8	1,4	9,9	2,9
	CVSt12	95,2	6,3	5,4	11,1	2,7	37,7	5,5
	CVSt32	35,7	16,2		42,9	10,6	137,7	21,4

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil dari analisis elemen hingga balok PSR menggunakan software MSC Marc/Mentat menghasilkan bahwa Balok CVSt32 ($D/t=35,72$) menunjukkan respon beban maksimum yang lebih besar daripada Balok CVSt12 ($D/t=92,25$) dan Balok CVSt07 ($D/t=163,28$). Respon beban maksimum balok yang dibebani lentur murni (dua titik) menghasilkan beban maksimum 50% lebih dari respon beban maksimum balok yang dibebani kombinasi lentur dan geser (satu titik). Respon lendutan maksimum balok dengan $D/t=35,72$ yang dibebani lentur murni (satu titik) menghasilkan lendutan maksimum lebih besar dibandingkan dengan balok dengan $D/t=92,25$ dan $D/t=163,28$. Semakin kecil D/t baik balok lentur murni (satu titik) dan balok dibebani kombinasi lentur dan geser (dua titik) menghasilkan lendutan yang lebih besar dibandingkan dengan balok D/t semakin besar. Fenomena tekuk lokal pada balok dibebani satu titik akan menyebabkan beban maksimal yang dapat didukung oleh balok menjadi menurun atau lebih kecil dibandingkan dengan balok yang dibebani dua titik (lentur murni).

5.2 Saran

Penelitian ini hanya terbatas pada rasio D/t pada rasio 35,72; 95,25; dan 163,28 saja. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan melihat pengaruh rasio D/t dengan nilai D tetap t berubah dan D berubah t tetap.

DAFTAR PUSTAKA

- AISC. 2005. *Steel construction manual*. Amer Inst of Steel Construction.
AISC. 2016. Specification for Structural Steel Buildings. *American Institute of Steel Construction ANSI/AISC 360-16*, Chicago, Illinois.
AS4100. 2020. *Steel Structures. Standard Australia*.

- BS. 2006. Eurocode 3—Design of steel structures—. *BS EN 1993-1. 1*, 2005.
- BSN. 2020. SNI 1729: 2020 Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. *Jakarta: Badan Standardisasi Nasional*.
- Chan, T.M., Gardner, L. 2008. Bending strength of hot-rolled elliptical hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 64(9), 971–986.
- Effendi, M.K., Kawano, A. 2017. A study on the static and impact structural behavior of concrete filled steel tubular members under Tsunami flotsam collision. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.4976875>.
- Effendi, M.K., Kawano, A., Matsuo, S. 2014. *Finite element analysis of vacant tubular members under static loading considering the tip shapes of load*. *Applied Mechanics and Materials*, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.575.497>.
- Elchalakani, M., Zhao, X.L., Grzebieta, R. 2002. Bending tests to determine slenderness limits for cold-formed circular hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 58(11), 1407–1430.
- Gardner, L., Chan, T.M. 2007. Cross-section classification of elliptical hollow sections. *Steel and Composite Structures*. 7(3), 185.
- Guo, L., Yang, S., Jiao, H. 2013. Behavior of thin-walled circular hollow section tubes subjected to bending. *Thin-Walled Structures*. 73, 281–289.
- Hosseini, S.M., Shakiba, M., Bazli, M., Javaheri, A. 2022. Using four-point flexure test to investigate effects of temperature and bar size on the tensile properties of GFRP bars. *Polymer Testing*. 112, 107627.
- Jiao, H., Zhao, X.L. 2004. Section slenderness limits of very high strength circular steel tubes in bending. *Thin-walled structures*. 42(9), 1257–1271.
- Lochan, P.P., Polak, M.A. 2024. Evaluation of 3-Point and 4-Point Bending Tests for Tensile Strength Assessment of GFRP Bars. *Materials*. 17(21), 5261.
- MSC. 2003. MSC Software corporation. *Santa Ana, CA*.
- MSC. 2010. Volume B: Element Library. *MSC. Software Corporation*. 113–661.
- Obst, M., Wasilewicz, P., Adamiec, J. 2022. Experimental investigation of four-point bending of thin walled open section steel beam loaded and set in the shear center. *Scientific Reports*. 12(1), 7275.
- Sherman, D.R. 1986. Inelastic flexural buckling of cylinders. *Steel Structures: Recent Research Advances and Their Applications to Design (Ed, MN Pavlovic)*, Elsevier Applied Science Publishers. 339–357.
- Zheng, B., Shu, G., Xin, L., Yang, R., Jiang, Q. 2016. Study on the bending capacity of cold-formed stainless steel hollow sections. *Structures*. 63–74.
- Zhu, J.H., Su, M.N., Zhu, X., Daniels, J., Young, B. 2021. Flexural behaviour of cold-formed steel oval hollow section beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 180, 106605.