

PERBANDINGAN BIAYA STRUKTUR BAJA NON-PRISMATIS, CASTELLATED BEAM, DAN RANGKA BATANG

Jason Chris Cassidy¹, Jefry Yulianus Seto², Hasan Santoso³

ABSTRAK : Pesatnya perkembangan dalam dunia konstruksi baja saat ini menuntut para praktisi untuk dapat membangun struktur baja dengan seefisien mungkin. Efisiensi struktur dapat diraih dengan ketepatan pemilihan jenis struktur yang akan digunakan yang pada akhirnya akan berpengaruh terhadap biaya total struktur. Dalam penelitian ini, struktur yang ditinjau adalah struktur gudang dengan model *gable frame* yang akan dirancang dengan 3 tipe, yaitu dengan profil non-prismatis, *castellated beam*, dan rangka batang. Ketiga tipe struktur ini diteliti terlebih dahulu agar mendapatkan hasil yang maksimal sebelum didesain. Setelah mendapatkan hasil desain yang sesuai, maka dapat dibuat perbandingan biaya yang dihitung dari kebutuhan material, biaya pekerjaan, serta biaya secara keseluruhan. Hasil dari penelitian ini dapat menjadi acuan bagi para praktisi yang akan mendesain struktur baja khususnya gudang dengan model struktur *gable frame* pada bentang panjang, yaitu pada kisaran 40-60 meter.

KATA KUNCI: struktur baja gudang, *gable frame*, non-prismatis, rangka batang, *castellated beam*, efisiensi, perbandingan biaya

1. PENDAHULUAN

Pada era globalisasi banyak negara yang sedang berkembang terutama dalam sektor pembangunan. Semakin berkembangnya ekonomi dan teknologi menuntut pembangunan yang semakin cepat. Struktur baja merupakan salah satu alternatif untuk pembangunan yang cepat dan efisien. Beberapa kelebihan yang dimiliki struktur baja antara lain adalah memiliki kuat tarik yang tinggi, menghemat tenaga kerja sehingga biaya produksi lebih rendah, dan menghemat waktu pelaksanaan. Namun pembangunan konstruksi baja tidak lepas dari masalah, yaitu harga yang relatif mahal dan keterbatasan panjang bentang. Untuk mengatasi masalah tersebut dengan teknologi yang sudah maju terdapat sistem baru yaitu sistem *Pre Engineered Building* yang merupakan rekayasa struktur baja dalam segi desain dengan cara sedemikian rupa sehingga biayanya dapat menjadi lebih murah daripada sistem konvensional tanpa mengurangi kekuatan struktur dalam menahan beban yang bekerja. Salah satu yang dilakukan dalam sistem *PEB* ini adalah mendesain balok dan kolom dengan profil non-prismatis yang didesain berdasarkan distribusi momen akibat gaya-gaya yang bekerja. Dengan profil non-prismatis ini perencana bisa mendesain bentang yang lebih panjang daripada profil pada umumnya, sehingga profil non-prismatis ini dapat bersaing dengan *castellated beam* dan rangka batang untuk segi biayanya. Penampang balok non-prismatis yang berubah-ubah sepanjang bentang membuat berat struktur menjadi relatif lebih ringan.

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, rexxarkassidy@gmail.com

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, only.jeffz1@gmail.com

³Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Krsiten Petra, hasan@petra.ac.id

2. STUDI LITERATUR

Dalam mendesain struktur baja dibutuhkan perencanaan yang sebaiknya mengikuti peraturan yang berlaku untuk mendapatkan suatu struktur yang aman. Selain aman juga diperhatikan faktor *serviceability* dan kemudahan dalam konstruksi. Berikut peraturan sesuai dengan SNI 1729-2002.

a) Untuk rafter dan kolom

1) Kapasitas lentur

Momen maksimum yang terjadi harus memenuhi persyaratan, yaitu:

$$M_u \leq \phi_b M_n \quad (1)$$

Keterangan:

ϕ_b = faktor reduksi untuk lentur

M_u = momen lentur rencana (maksimum)

M_n = kuat lentur nominal penampang

2) Kapasitas geser

Geser maksimum yang terjadi harus memenuhi persyaratan, yaitu:

$$V_u \leq \phi V_n \quad (2)$$

Keterangan:

ϕ = faktor reduksi untuk geser

V_u = gaya geser maksimum

V_n = kuat geser nominal penampang

3) Kapasitas normal

Gaya tekan/tarik maksimum yang terjadi harus memenuhi persyaratan, yaitu:

$$N_u \leq \phi N_n \quad (3)$$

Keterangan:

ϕ = faktor reduksi untuk tekan/tarik

N_u = gaya geser maksimum

N_n = kuat tekan/tarik nominal penampang

4) Kapasitas tekan akibat tekuk lentur torsi

Khusus untuk profil *tee* dan *double* siku, gaya normal maksimum yang terjadi harus memenuhi persyaratan, yaitu:

$$N_u \leq \phi_n N_{nt} \quad (4)$$

Keterangan:

ϕ_n = faktor reduksi untuk tekan

N_u = gaya normal maksimum

N_{nt} = kuat tekan nominal penampang akibat tekuk lentur torsi

5) Interaksi aksial-momen

Setiap komponen struktur harus memenuhi persamaan interaksi aksial-momen, yaitu:

- Bila $N_u / \phi N_n \geq 0,2$

$$\frac{N_u}{\phi N_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1,0 \quad (5)$$

- Bila $N_u / \phi N_n < 0,2$

$$\frac{N_u}{2\phi N_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1,0 \quad (6)$$

Keterangan:

N_u = gaya aksial terfaktor, N

N_n = kuat tekan/tarik nominal penampang

- ϕ = faktor reduksi kekuatan
 $\phi = \phi_c$ untuk komponen struktur tekan
 $\phi = \phi_t$ untuk komponen struktur tarik
 ϕ_b = faktor reduksi kekuatan untuk komponen struktur lentur
 M_{nx}, M_{ny} = momen lentur nominal penampang komponen struktur masing-masing terhadap sumbu x dan y
 M_{ux}, M_{uy} = momen lentur terfaktor masing-masing terhadap sumbu x dan y

b) Untuk sambungan

1) Kapasitas baut

Gaya tumpu maksimal yang terjadi harus memenuhi persyaratan, yaitu:

$$R_u \leq \phi R_n \quad (7)$$

Keterangan:

- R_u = gaya tumpu maksimal
 N_n = kuat tekan/tarik nominal penampang
 ϕ = faktor reduksi kekuatan

2) Kapasitas geser baut

Besarnya kapasitas geser yang dimiliki baut untuk setiap bidang geser, yaitu:

$$V_d = \phi_f V_n = \phi_f \cdot r_1 \cdot f_u^b \cdot A_b \quad (8)$$

Keterangan:

- V_d = kapasitas geser maksimum baut
 V_n = kuat nominal geser satu baut
 ϕ_f = faktor reduksi kekuatan fraktur baut
 r_1 = 0,5 untuk polos, 0,4 untuk ulir
 f_u^b = kuat tarik material baut
 A_b = luas penampang baut

3) Kapasitas tarik baut

Besarnya kapasitas tarik yang dimiliki sebuah baut yaitu:

$$T_d = \phi_f T_n = \phi_f \cdot 0,75 \cdot f_u^b \cdot A_b \quad (9)$$

Keterangan:

- T_d = kapasitas tarik maksimum baut
 T_n = kuat nominal tarik satu baut
 ϕ_f = faktor reduksi kekuatan fraktur baut
 f_u^b = kuat tarik material baut
 A_b = luas penampang baut

4) Kapasitas tumpu baut akibat kombinasi geser dan tarik

Besarnya kapasitas tumpu baut akibat kombinasi geser dan tarik yaitu:

$$T_d = \phi_f T_n = \phi_f \cdot f_t \cdot A_b \quad (10)$$

Keterangan:

- T_d = kapasitas tarik maksimum baut
 T_n = kuat nominal tarik satu baut
 ϕ_f = faktor reduksi kekuatan fraktur baut
 f_t = nilai terkecil antara $f_1 - r_2 f_{uv}$ dan f_2
 f_1 = tegangan baut (biasa/mutu tinggi)
 f_2 = tegangan baut (biasa/mutu tinggi)
 r_2 = 1,5 (tanpa ulir pada bidang geser) atau 1,9 (dengan ulir pada bidang geser)
 f_{uv} = tegangan geser maksimum yang terjadi
 A_b = luas penampang baut

5) Kapasitas las sudut

Besarnya kapasitas tumpu yang dimiliki las sudut yaitu:

$$\phi R_{nw} = 0,75 \cdot t_{p1} \cdot L \cdot (0,6f_u) \text{ (pelat)} \quad (11)$$

$$\phi R_{nw} = 0,75 \cdot t_t \cdot L \cdot (0,6f_{uw}) \text{ (las)} \quad (12)$$

Keterangan:

ϕR_{nw} = kapasitas tumpu maksimum las sudut

t_{p1} = tebal pelat yang dilas

t_t = tebal las

L = panjang las sudut

f_u = tegangan maksimum dari pelat

f_{uw} = tegangan maksimum dari material las

3. METODOLOGI PENELITIAN

Model struktur yang dipakai dalam penelitian ini adalah struktur portal berbentuk *gable frame* (**Gambar 1**) yang mempunyai tinggi kolom 6 m dengan panjang bentang 40 m, 50 m, dan 60 m.



Gambar 1. Permodelan Struktur Portal Arah X

Analisis yang digunakan berupa analisis 2 dimensi dengan menggunakan beban yang paling maksimum, yaitu pada portal yang berada di tengah dengan jarak antar portal sebesar 6 m. Permodelan struktur portal menggunakan program SAP2000 dengan beban sesuai dengan PPIUG 1989. Struktur ini menggunakan material dengan mutu baja BJ 37. Selain mengambil gaya dalam dari analisis struktur yang dilakukan program SAP2000, *preliminary design* dapat dilakukan juga dengan menggunakan fitur *steel design* pada SAP2000. Setelah desain telah efisien di tahap *preliminary*, selanjutnya dilakukan desain dengan perhitungan manual sesuai dengan peraturan SNI 03-1729-2002 untuk mengecek apakah profil dapat digunakan serta cukup efisien (interaksi $\pm 0,75$). Setelah desain selesai, dilakukan wawancara pada perusahaan fabrikasi baja untuk mendapatkan data biaya pekerjaan struktur. Selain itu, harga dari semua material yang dibutuhkan juga ditanyakan pada perusahaan material baja. Setelah data lengkap, maka dapat dibuat perbandingan biaya dalam segi kebutuhan material, pekerjaan struktur, dan secara keseluruhan.

4. ANALISIS HASIL PENELITIAN

4.1. Penelitian Efisiensi Struktur

Setiap jenis struktur dapat dibuat sedemikian rupa sehingga efisiensinya dapat dimaksimalkan, untuk itu dilakukan penelitian yang dapat menunjang tercapainya efisiensi tersebut. Penelitian dilakukan pada struktur non-prismatis dan rangka batang saja, untuk *castellated beam* tidak dilakukan penelitian karena

pada umumnya *castellated beam* yang ada di pasaran lubangnya berbentuk segi enam. Acuan yang digunakan dalam penentuan efisiensi dalam penelitian ini adalah berat total struktur. Semakin ringan berat total struktur, maka struktur dinilai semakin efisien.

Untuk mendapatkan efisiensi maksimal dari profil non-prismatis, dilakukan percobaan jumlah pembagian *section* pada profil non-prismatis yang dipakai untuk *rafter*. Percobaan yang dilakukan ada dua, yaitu percobaan pada *rafter* dengan 1 *section* dan 3 *section*. Pembagian *rafter* menjadi 2 *section* tidak ditinjau, namun 3 *section* dinilai cukup untuk mewakilinya. Hasil dari penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Berat Sendiri Struktur dengan Pembagian 1 Section dan 3 Section

Struktur	Bentang (m)		
	40 (ton)	50 (ton)	60 (ton)
1 <i>section</i>	7,14	9,97	16,21
3 <i>section</i>	6,05	7,48	10,05

Dapat dilihat pada tabel di atas bahwa dengan membagi *rafter* menjadi 3 *section* pada bentang 40 m, 50 m, maupun 60 m, struktur akan menjadi lebih ringan apabila dibandingkan dengan pembagian *rafter* menjadi 1 *section* saja. Dengan berat sendiri yang lebih ringan, maka struktur dengan pembagian *rafter* menjadi 3 *section* adalah struktur yang akan digunakan untuk penelitian ini.

Untuk mendapatkan struktur rangka batang yang paling efisien, diperlukan penelitian terhadap bentuk dan tinggi rangka batang yang akan digunakan. Tinggi rangka batang yang dicoba ada 4 ketinggian, yaitu 0,5 m, 0,7 m, 0,8 m, dan 1 m. Bentang *rafter* yang digunakan untuk penelitian ini adalah bentang 60 m, karena bentang 60 m dianggap sebagai yang paling kritis. Jumlah *section* ditetapkan sama untuk setiap permodelan, yaitu dibagi menjadi 3 *section* pada profil bagian atas dan bawah (profil *tee*). Selain tinggi rangka batang, bentuk rangka batang yang digunakan juga diteliti secara bersamaan. Bentuk yang diteliti ada dua, yaitu model *Warren* dan *Pratt*. Pemilihan 2 model ini didasarkan dari penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Suyono Nt. (2007) yang hasilnya menunjukkan bahwa 2 model tersebut adalah model yang memiliki hasil gaya dalam terkecil dan defleksi terkecil. Dengan analisis struktur oleh SAP2000, didapatkan hasil perhitungan berat sendiri dari total *joint reaction* pada model yang dibuat yang dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Berat Sendiri Struktur Rangka Batang dengan Variasi Ketinggian dan Bentuk Rangka Batang

Panjang Bentang 60 m		
H (m)	<i>Warren</i> (ton)	<i>Pratt</i> (ton)
0,5	9,48	10,06
0,7	7,26	8,05
0,8	6,74	
1	6,4	

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa struktur rangka batang yang memiliki berat sendiri paling ringan adalah struktur rangka batang dengan tinggi 1 m dan bentuk *Warren*, sehingga tinggi dan bentuk rangka batang ini yang akan digunakan untuk perhitungan struktur dalam penelitian ini.

4.2. Perhitungan Struktur

Untuk analisis struktur, digunakan program SAP2000. Beban yang dimasukkan ke dalam SAP2000 berdasarkan reaksi vertikal dari gording dan *tie beam* yang sudah dihitung sebelumnya. *Steel design* dari

SAP2000 digunakan sebagai *preliminary design* untuk mengetahui apakah profil yang digunakan sudah cukup efisien. Untuk menjamin desain, perhitungan manual untuk desain struktur dilakukan sesuai dengan SNI 1729-2002. Berikut ini merupakan hasil desain profil untuk struktur non-prismatis, *castellated beam*, dan rangka batang yang dapat dilihat pada **Tabel 3**, **Tabel 4**, dan **Tabel 5**.

Tabel 3. Hasil Desain Rafter dan Kolom untuk Struktur Non-Prismatis

Desain	Bentang	Section	Start Section (mm)	End Section (mm)	Interaksi
Rafter	40 m	1	500.200.12.20	400.200.12.20	0,85
		2	400.200.12.20	350.200.12.20	0,4
		3	350.200.12.20	450.200.12.20	0,23
	50 m	1	700.300.13.23	600.300.13.23	0,77
		2	600.300.13.23	450.300.13.23	0,44
		3	450.300.13.23	500.300.13.23	0,41
	60 m	1	900.200.13.23	750.200.13.23	0,81
		2	750.200.13.23	650.200.13.23	0,31
		3	650.200.13.23	700.200.13.23	0,37
Kolom	40 m	1	400.300.15.26	700.300.15.26	0,3
		1 (mid)	400.300.15.26	700.300.15.26	0,21
	50 m	1	700.200.12.17	950.200.12.17	0,67
		1 (mid)	700.200.12.17	950.200.12.17	0,41
	60 m	1	900.250.12.17	1000.250.12.17	0,63
		1 (mid)	900.250.12.17	1000.250.12.17	0,36

Tabel 4. Hasil Desain Rafter dan Kolom untuk Struktur Castellated Beam

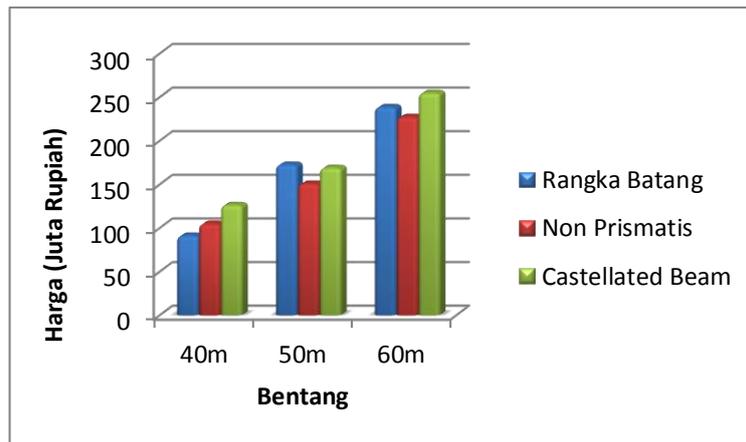
Desain	Bentang	Profil WF Asal	Profil Castellated	Interaksi
Rafter	40 m	450.200.9.14	675.200.9.14	0,7
	50 m	500.200.10.16	750.200.10.16	0,89
	60 m	600.200.11.17	900.200.11.17	0,99
Kolom	40 m	390.300.10.16	-	0,86
	50 m	606.201.12.20	-	0,78
	60 m	692.300.13.20	-	0,66

Tabel 5. Hasil Desain Rafter dan Kolom untuk Struktur Rangka Batang

Member	Jenis Profil	Bentang 40 m		Bentang 50 m		Bentang 60m	
		Dimensi Profil	Interaksi	Dimensi Profil	Interaksi	Dimensi Profil	Interaksi
Rafter	Tee	303.201.12.20	0,84	297.302.14.23	0,92	456.302.18.34	0,89
		150.150.6,5.9	0,69	147.200.8.12	0,69	200.200.8.13	0,78
		62,5.125.6,5.9	0,99	97.150.6.9	0,66	149.149.5,5.8	0,63
	Double Siku	40.40.5.5.6,5	0,69	40.40.5.5.6	0,74	40.40.4.4.18	0,5
		40.40.4.4.12	0,34	40.40.4.4.14	0,4	40.40.4.4.8	0,11
		40.40.4.4.6,5	0,09	40.40.4.4.8	0,11	40.40.4.4.5,5	0,14
		40.40.4.4.6,5	0,53	40.40.4.4.6	0,11	45.45.5.5.5,5	0,67
		45.45.5.5.12	0,52	45.45.5.5.14	0,82	50.50.5.5.18	0,56
		45.45.5.5.6,5	0,78	45.45.5.5.8	0,91	50.50.5.5.8	0,74
Kolom	Wide Flange	500.200.10.16	0,68	582.300.12.17	0,65	582.300.12.17	0,88

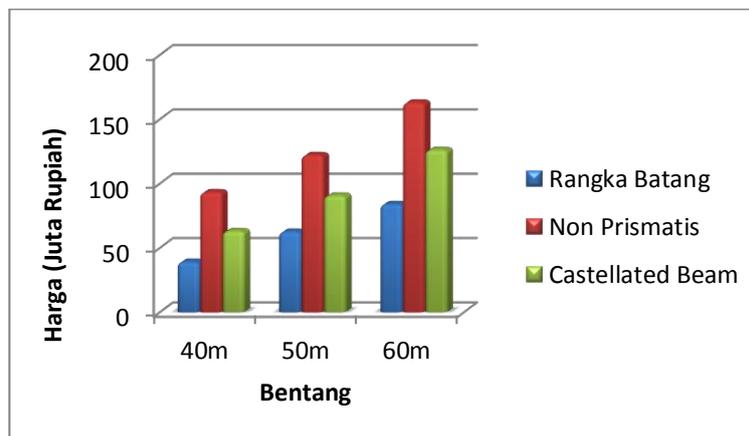
4.3. Perhitungan Anggaran Biaya

Dari data struktur di atas, kemudian dibuat perbandingan biaya antara 3 struktur tersebut. Dari perbandingan tersebut dapat terlihat struktur yang lebih efisien pada masing-masing bentang. Hasil perbandingan dari segi harga kebutuhan material yang terlihat pada **Gambar 2** menunjukkan bahwa untuk bentang 40 m harga kebutuhan material struktur rangka batang lebih efisien dari struktur non-prismatis dan *castellated beam*, namun untuk bentang 50 m dan 60 m harga kebutuhan material struktur non-prismatis yang lebih efisien daripada struktur rangka batang dan *castellated beam*.



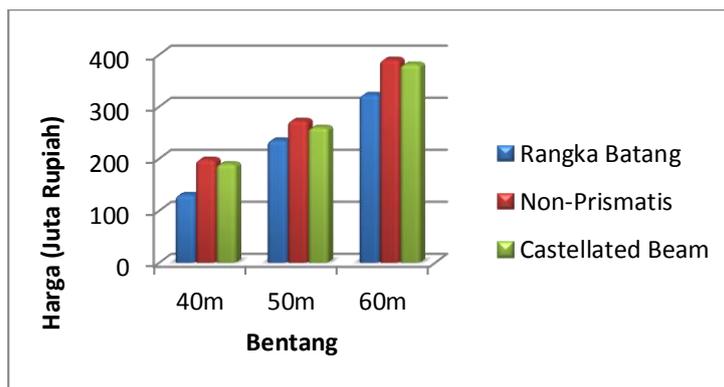
Gambar 2. Hasil Perbandingan Harga Kebutuhan Material

Selain itu, didapat juga hasil perbandingan biaya pekerjaan struktur baja yang terdiri dari biaya fabrikasi, *erection*, pengecatan seperti yang terlihat pada **Gambar 3**. Dapat dilihat dalam segi biaya pekerjaan, struktur rangka batang paling efisien bila dibandingkan dengan struktur lainnya. Biaya pekerjaan struktur ini didapat dari wawancara dengan berbagai perusahaan fabrikator di Surabaya.



Gambar 3. Hasil Perbandingan Biaya Pekerjaan Struktur Baja

Setelah mendapat hasil perbandingan harga kebutuhan material dan biaya pekerjaan struktur, didapat hasil perbandingan harga keseluruhan struktur. Harga tersebut merupakan gabungan harga material dan biaya pekerjaan struktur seperti yang terlihat pada **Gambar 4**. Dapat dilihat bahwa dari segi harga keseluruhan, struktur rangka batang paling efisien apabila dibandingkan dengan struktur lainnya.



Gambar 4. Hasil Perbandingan Harga Keseluruhan Struktur Baja

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisis yang didapat dari penelitian yang telah dibuat, secara umum dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Berat struktur rangka batang dengan model *Warren* lebih ringan daripada model *Pratt*.
- Struktur non-prismatis lebih hemat dalam segi harga material untuk bentang 50 m ke atas dan lebih mahal dalam segi biaya pekerjaan struktur daripada struktur lainnya.
- Struktur *castellated beam* bukan struktur yang paling hemat dalam segi apapun.
- Struktur rangka batang paling hemat dalam segi biaya pekerjaan struktur dan biaya total struktur pada semua bentang, serta harga material pada bentang 40 m.

5.2. Saran

Karena keterbatasan waktu, penelitian ini hanya mencakup 3 bentang panjang yaitu bentang 40 m, 50 m, dan 60 m. Beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya mengenai perbandingan struktur baja non-prismatis, rangka batang dan *castellated* adalah:

- Dalam segi desain dapat dibuat lebih bervariasi lagi seperti:
 - Mengubah profil *rafter* pada struktur rangka batang seperti pipa.
 - Menggunakan *castellated beam* dengan lubang berbentuk lingkaran.
 - Mengubah bahan profil non-prismatis dari pelat baja menjadi profil *WF* yang dipotong miring lalu ditumpuk menjadi bentuk non-prismatis.
- Diharapkan peneliti selanjutnya dapat meneliti dalam bentang menengah seperti 20 m, 25 m, dan 30 m.

6. DAFTAR REFERENSI

- Suyono, Nt. (2007). *Catatan Penggunaan SAP2000*. Indonesia.
- Tim Penyusun PPIUG. (1983). *Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1983*. Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, Bandung, Indonesia.
- Tim Penyusun SNI. (2002). *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung, SNI 03-1729-2002*. Puslitbang Perumahan Departemen Pekerjaan Umum, Indonesia.