

## PERBANDINGAN DEFLEKSI DAN BERAT TOWER PLTB 24 M DENGAN MENGGUNAKAN PROFIL SIKU DAN PIPA.

**Bobby Asukmajaya R.**<sup>1</sup>

Dosen Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang<sup>1</sup>

Koresponden\*, Email: [bobbyasukma@polinema.ac.id](mailto:bobbyasukma@polinema.ac.id)

### ABSTRAK

Pemenuhan kebutuhan listrik merupakan suatu hal yang fundamental pada era saat ini, seluruh aktivitas kegiatan manusia sangat bergantung pada listrik. Di Indonesia pemenuhan akan listrik sudah dalam kategori yang baik untuk di wilayah yang mudah terjangkau, namun di daerah kepulauan yang terisolasi masih dalam kategori yang kurang, listrik dihasilkan dari bahan bakar minyak yang secara ekonomi kurang efisien. Tentunya untuk mengatasi hal tersebut perlu adanya solusi agar pemenuhan kebutuhan listrik dapat terpenuhi dengan biaya yang cukup murah, salah satunya adalah dengan penggunaan PLTB / pembangkit listrik tenaga bayu, dimana penyediaan listrik dapat dilakukan dengan modal yang cukup ringan dan juga memiliki kelebihan net zero emission atau sistem penyediaan listrik yang ramah lingkungan. Salah satu yang perlu disiapkan selain sistem elektrikan dan mekanikal turbin adalah pemenuhan tower, dalam hal ini tower sangat penting untuk membantu turbin dalam menangkap angin yang dibutuhkan. Pembangunan tower di daerah isolasi memiliki tantangan dari segi transportasi alat dan bahan menuju lokasi, tentunya material yang dapat diangkut umumnya dalam kondisi yang terpisah – pisah dan kecil, sehingga tower dapat direncanakan dalam bentuk rangka batang. Material umumnya yang dapat digunakan adalah profil baja siku, pipa dan material profil baja dengan bentuk lainnya. Dalam penelitian ini akan dibandingkan efek penggunaan profil siku dan pipa pada elemen struktur utama yang akan menghasilkan defleksi akibat beban dari turbin dan berat horisontal akibat angin. Selain itu dengan model desain yang sama bentuk lattice akan dibandingkan berat tower sesuai hasil perhitungan optimalisasi yang telah dianalisa dengan menggunakan software RSAP 2022. Hasilnya didapatkan jika tower dengan profil siku mengalami defleksi sebesar 12 mm dengan berat sebesar 4901,4 kg, sementara tower dengan profil pipa mengalami defleksi sebesar 14mm dengan berat sebesar 3781,7 kg sehingga dapat disimpulkan bahwa tower dengan profil utama pipa memiliki berat yang lebih ringan sehingga efisien diterapkan untuk tower PLTB.

**Kata kunci :** Listrik, PLTB, Tower, Defleksi, Berat

### ABSTRACT

*Filling up for electricity is a fundamental thing in the current era, all human activities are very dependent on electricity. In Indonesia the fulfillment of electricity is already in a good category for areas that are easily accessible, but in isolated areas it is still in the less category, electricity is produced from fuel oil which is economically less efficient. Of course, to overcome this, a solution is needed so that the fulfillment of electricity needs can be met at a fairly low cost, one of which is by using a PLTB / wind power plant, where electricity supply can be carried out with relatively light capital and also has the advantage of net zero emission or environmentally friendly electricity supply system. One thing that needs to be prepared besides the electrical system and mechanical turbines is the fulfillment of the tower, in this case the tower is very important to help the turbine catch the required wind. Construction of towers in isolated areas has challenges in terms of transportation of tools and materials to the location, of course the materials that can be transported are generally in separate and small conditions, so the tower can be planned in the form of a truss. The general materials that can be used are angle section steel profiles, pipes and other steel section materials. In this study, we will compare the effect of using angle section and pipe section which will produce deflection due to turbine loads and horizontal weight due to wind. In addition, with the same design model, the shape of the lattice tower will be compared with the weight of the tower according to the results of optimization calculations that have been analyzed using RSAP 2022 software. The results obtained if a tower deflection with an angle section is 12 mm. with a weight of 4901,4 kg, while a tower with a pipe section deflection is 14 mm with a weight of 3781,7 kg. So it can be concluded that pipe section tower more lightly than angle section tower, so its more efficient to use in PLTB.*

**Keywords :** Electricity, Wind Power Plant, Tower, Deflection, Weight.

## 1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan fundamental dalam rangka melaksanakan aktivitas keseharian, tenaga listrik dibutuhkan oleh manusia untuk memenuhi beberapa kebutuhan yaitu pada kantor, sarana Pendidikan, sarana rumah sakit, sarana transportasi, komunikasi dan berbagai kebutuhan penting lainnya. Listrik di Negara Indonesia sudah tercukupi dengan baik di daerah kota – kota besar, namun didaerah isolasi yang belum terdapat sarana transportasi yang memadai masih dalam kategori yang sedikit [1]. Pada tahun 2022 melalui forum G20 Presiden Indonesia mendukung dan merencanakan konsep Net Zero ditahun 2060, Indonesia diharapkan menggunakan energi terbarukan sehingga mengurangi banyak akan emisi karbon dalam proses produksi tenaga listrik. Konsep Net Zero adalah menghasilkan energi yang ramah lingkungan dengan zero emission [2]. Salah satu metode dalam menghasilkan listrik dengan konsep Net Zero Emission adalah dengan menggunakan Tenaga Listrik Tenaga Bayu (PLTB), dengan menggunakan angin tentunya emisi yang dihasilkan adalah 0. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu merupakan salah satu sumber dalam penghasil energi listrik di Indonesia. Hal ini dikarenakan Indonesia memiliki bentangan wilayah alam yang luas berupa bibir pantai, laut maupun pegunungan dimana pada daerah tersebut potensi angin cukup baik. PLTB menurut Departemen ESDM RI cukup menarik untuk dikembangkan karena memiliki potensi hingga 9,2 GW namun hanya sekitar 0,5 GW saja yang sampai saat ini sudah dikembangkan. Prospek ini perlu dikembangkan untuk memberikan kesempatan pada daerah – daerah yang terisolasi terutama pada daerah yang transportasi menuju kewilayahnya sulit namun memiliki potensi angin yang baik pada daerahnya untuk diberikan listrik dengan menggunakan PLTB [3]. Komponen yang perlu disiapkan dalam pembangunan PLTB untuk digunakan pada daerah yang sulit dijangkau, adalah berupa alat dan bahan yang mudah diangkut dalam skala kecil / potongan – potongan kecil, sehingga mudah dibawa dengan menggunakan alat transportasi yang terbatas. Salah satu yang perlu disiapkan adalah tower, umumnya elemen struktur yang digunakan berupa material baja profil, bisa dalam bentuk rangka maupun pole. Banyak sekali penelitian terkait optimalisasi desain tower, mulai dari bentuk tower, model tower, material yang digunakan. Hal ini tentunya untuk meningkatkan kualitas, nilai ekonomis, dan yang sangat penting adalah dapat dibangun pada daerah yang dituju [4]–[8]. Material baja yang umumnya digunakan sebagai elemen struktur rangka dalam pembuatan tower memiliki beragam profil, namun umumnya yang sering digunakan adalah profil siku dan pipa, sehingga dalam penelitian ini akan dibandingkan antara defleksi dan berat tower dengan bentuk lattice pada profil

siku dan pipa yang digunakan pada elemen struktur utama tower (kaki, badan dan struktur atas) untuk bracing diantara kedua model masih tetap menggunakan siku dengan pertimbangan kemudahan dalam pelaksanaan dilapangan, sesuai dengan desain tower yang dibutuhkan dalam menangkap angin dengan ketinggian 24 meter dengan menggunakan profil siku dan pipa. Terkait hal ini terdapat penelitian yang berkaitan dengan penggunaan 2 profil tersebut seperti yang dilakukan oleh [9] namun yang direncanakan adalah dalam pembuatan tower BTS, hasilnya dengan menggunakan profil pipa memiliki berat tower yang lebih ringan, sehingga lebih ekonomis dibandingkan dengan tower dengan profil siku.

## 2. METODE

### Model Tower PLTB

Sesuai dengan materialnya tower PLTB dibedakan menjadi beberapa bagian, yaitu beton bertulang, komposit dan baja, tentunya pertimbangan dalam pemilihan material disesuaikan dengan kesiapan akan material yang dapat disediakan pada daerah yang dibangun, selain itu masing – masing material juga memiliki dan kelebihan masing – masing. Selanjutnya pada tower dengan material baja dibagi lagi menjadi beberapa model yang umum digunakan yaitu:

1. Monopole
2. Rangka.

Untuk mengadakan tower pada daerah terpencil monopole cukup sulit untuk diadakan, sehingga model rangka dianggap yang paling memungkinkan karena rangka – rangka batang dapat dibawa dengan potongan – potongan kecil untuk nantinya akan dirangkai didaerah yang dituju. Berikut ini adalah beberapa model rangka yang dapat digunakan:

1. Tower berbentuk segitiga
2. Tower berbentuk segiempat
3. Tower berbentuk kerucut / conical.

Sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh [5], model tower dengan bentuk conical memiliki defleksi yang paling kecil, dan lebih ekonomis dalam menahan beban horizontal dan vertical dari *Wind Turbin*.

### Pembebanan pada Tower

Sistem pembebanan yang digunakan pada desain tower PLTB sesuai dengan SNI 1727-2020 tentang Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan Gedung dan struktur lain [10], SNI 1726-2019 untuk beban gempa.

1. Beban Mati

Beban mati terdiri dari 2 komponen, yaitu berat sendiri tower yang otomatis dihitung dengan menggunakan software RSAP 2022 berupa DL1, dan beban dari turbin lengkap

dengan seluruh komponen yang berada didalamnya berupa DL2.

2. Beban Hidup

Beban hidup berupa beban pekerja yang melaksanakan maintenance pada turbin.

3. Beban Gempa

Beban gempa dianalisa sesuai SNI 1726-2019 dengan metode statik ekuivalen, dengan lokasi ditentukan didaerah Tuban Provinsi Jawa Timur, dengan kelas situs tanah sedang.

**Desain Beban Kerja Turbin**

Desain beban kerja turbin dianalisa sesuai dengan SNI IEC 61400-2:2016 [11], beban kerja yang ditanggung oleh turbin diakibatkan adanya tiupan angin pada poros sehingga turbin dapat mengganti putaran akibat tiupan angin menjadi energi listrik. Beban yang diakibatkan oleh putaran pada rotor menghasilkan beban dinamik, hal ini dapat terjadi karena putaran rotor yang berubah rubah sesuai dengan tiupan angin. Pada pedoman SNI IEC 61400-2:2016 tentang persyaratan rancangan turbin skala kecil memberikan konsep jika beban dinamik disederhanakan dengan menggunakan pendekatan hingga dapat dihitung dengan metode statis.

Dalam peraturan tersebut terdapat beberapa kondisi pembebanan yaitu :

Kondisi	Keterangan
A	Produksi energi dengan operasi normal
B	Produksi energi dengan adanya pengolengan rotor.
C	Produksi energi dengan adanya error pengolengan.
D	Produksi energi dengan desakan maksimum.
E	Dengan kemungkinan kegagalan pada kecepatan rotasi maksimum.
F	Dengan kemungkinan kegagalan pada koneksi beban rendah.
G	Ketika proses pengereman.
H	Ketika rotor dalam kondisi diam
I	Kondisi diam saat kegagalan.
J	Proses pemasangan.

Pada desain tower PLTB ini kasus yang digunakan adalah poin A dan H. Berikut ini adalah parameter dalam perhitungan beban kerja turbin :

Kecepatan angin desain , $V_{desain} = 1,4 \times V_{ave}$ , dimana kecepatan rata – rata didapatkan dari data kecepatan angin yang ditentukan.

$$Q_{desain} = \frac{30 \times P_{desain}}{\mu \times \pi \times n_{desain}} \tag{1}$$

$$\lambda_{desain} = \frac{R}{V_{desain}} \frac{\pi \times n_{desain}}{30} \tag{2}$$

$$\omega_n = \frac{\pi \times n_{desain}}{30} \tag{3}$$

Keterangan:

$\eta$  = Efisiensi Rotor

R = Jari – jari rotor

n desain = kecepatan rotasi rencana

V desain = kecepatan angin rencana

1. Kondisi pembebanan A

Pada kondisi pembebanan A rotor beroperasi dalam kondisi normal, pada kondisi ini dianggap jika beban bekerja secara konstan, berikut adalah rumus yang digunakan dalam penentuan beban desak pada poros dan momen lentur :

$$\Delta F_{x-shaft} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_{desain} Q_{desain}}{R} \tag{4}$$

$$\Delta M_{shaft} = 2m_r g L_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x-shaft} \tag{5}$$

$\Delta F_{x-shaft}$  = gaya desak pada poros

$\Delta M_{shaft}$  = momen lentur pada poros

$\lambda_{desain}$  = rasio kecepatan ujung rencana

$Q_{desain}$  = torsi poros rencana

R = jari – jari rotor

$m_r$  = massa rotor

g = percepatan gravitasi

$L_{rb}$  = jarak antara pusat rotor dengan bantalan pertama.

2. Kondisi beban H

Dalam kondisi ini rotor berada dalam kondisi diam, sehingga tidak menghasilkan energi, kondisi ini terjadi jika angin melebihi batas kecepatan dan pada kondisi darurat.

$$\Delta F_{x-shaft} = 0,17 B A_{proj} B \lambda^2 e50 \rho V^2 e50 \tag{8}$$

Dimana nilai  $\lambda e50$  :

$$\lambda e50 = \eta_{max} \pi R / 30 V_{e50} \tag{9}$$

Keterangan:

B = jumlah sudu

$C_d$  = koefisien seret

$\rho$  = kepadatan udara, diasumsikan 1,225 kg/m<sup>3</sup>

$V_{e50}$  = kecepatan angin ekstrim dengan kala ulang 50 tahun

$A_{proj.B}$  = komponen luas terproyeksi pada sudu

$\lambda e50$  = rasio kecepatan ujung pada  $V_{e50}$

$\eta_{max}$  = efisiensi rotor maksimum

R = jari-jari rotor

**Desain Elemen Struktur Baja**

Desain elemen struktur baja sesuai dengan SNI 1729 : 2020 [12], syarat yang harus dianalisa adalah sebagai berikut :

1. Komponen Struktur Tarik

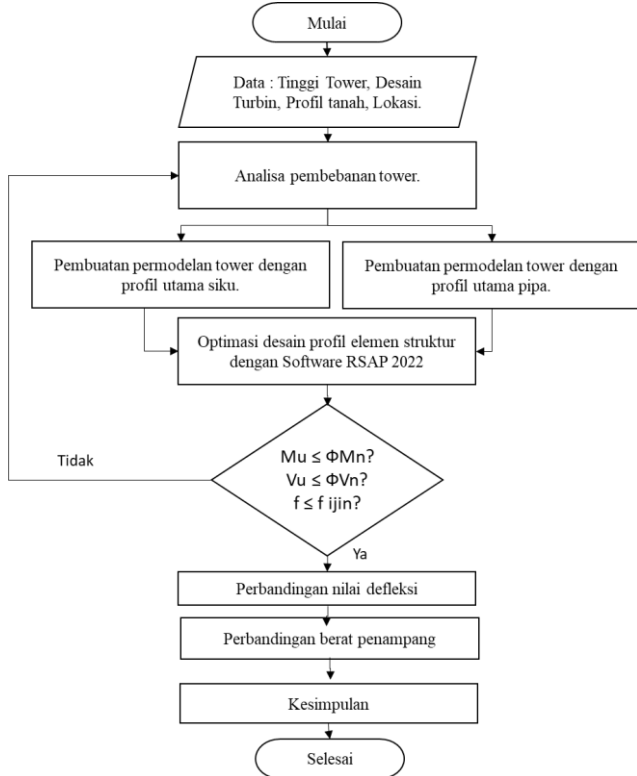
$$\Phi P_n = f_y \cdot A_g \tag{10}$$

$$\Phi P_n = F_u \cdot A_e \tag{11}$$

Nilai Kelangsingan :  $L/r < 300$

- Komponen struktur untuk tekan  
Kekuatan tekan nominal diambil dari nilai yang terendah pada batas tekuk lentur, tekuk torsi dan tekuk torsi lentur.

Berikut adalah diagram alir penelitian :



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Analisa Pembebanan Tower

Berikut ini adalah hasil rangkuman Analisa pembebanan tower :

Tabel 1. Rangkuman Analisa Pembebanan

Hasil Analisa Pembebanan	
DL 1	= Otomatis pada RSAP
DL 2	= 1000 Kg Turbin
LL	= 200 Kg Pekerja
WL- A	= 15 kN Arah X-
WL -H	= 25 kN Arah Y-
Ex	= Beban Gempa arah X
Ey	= Beban Gempa arah Y
Kombinasi Pembebanan	

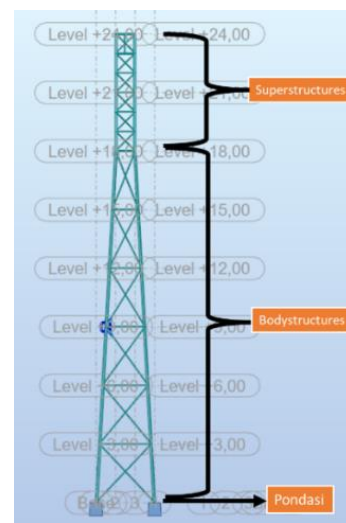
- 1,4 DL
- 1,2 DL + 1LL + 1 WL-A
- 1,2 DL + 1LL + 1 WL-H
- 1,2 DL+ 1,2LL + 1,2 WL-A + 0,3 Ex + 1 Ey
- 1,2 DL+ 1,2LL + 1,2 WL-H + 0,3 Ex + 1 Ey
- 1,2 DL+ 1,2LL + 1,2 WL-A + 0,3 Ey + 1 Ex

$$7. 1,2 DL+ 1,2LL + 1,2 WL-H + 0,3 Ey + 1 Ex$$

#### Permodelan Geometri Struktur Tower

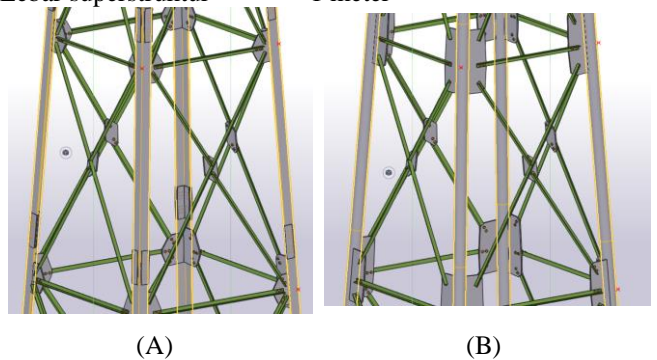
Sesuai dengan kebutuhan dalam mencapai angin rata – rata sebesar 10 m/s pada daerah tuban, maka ketinggian tower adalah 24 meter, dan panjang sudu sebesar 6 meter dengan total diameter rotor ketika berputar adalah 12 meter, sehingga direncanakan geometri tower sebagai berikut :

- Tinggi Tower (H) = 24 m
- Tinggi Kolom Pedestal (h1) = 1 m
- Panjang Sudu (h<sub>r</sub>) = 5,5 m
- Tinggi Super Structure (h2) = 6 m
- Tinggi Body Tower ( H1- h2) = 24 -6 = 18 m.
- Elevasi Turbin (H+h1) = 25 m



Gambar 2. Rencana Geometri Tower

- Lebar kaki tower = 3 meter
- Lebar superstruktur = 1 meter



Gambar 3. (A) Model tower dengan kaki profil siku, (B) Model Tower dengan kaki pipa.

#### Optimalisasi Desain Profil dengan Software RSAP 2022

Setelah melaksanakan permodelan sesuai dengan geometri yang direncanakan dan juga input data pembebanan pada software RSAP langkah selanjutnya adalah melakukan optimalisasi desain profil dengan software RSAP 2022, hal

ini dilakukan karena terdapat fitur dalam aplikasi tersebut untuk memudahkan menentukan profil yang layak dan sesuai dengan kontrol kapasitas penampang, berikut adalah rangkuman hasil optimalisasi desain :

1. Profil Optimal Model A

Berikut adalah hasil optimalisasi penampang, dengan beban kombinasi yang menghasilkan gaya dalam terbesar adalah kombinasi beban 6.

Tabel 2. Hasil Optimalisasi Profil Model A

Member	Section	Material	Lay	Laz	Ratio	Case
Code group : 1 PROFIL UTAMA						
10	LE 120x120x8	SS400	64.37	126.60	0.39	4 KOMBINASI 6
	LE 130x130x9	SS400	59.43	117.17	0.31	
Code group : 2 BRACING						
1	LE 65x65x6	SS400	40.39	78.94	1.08	4 KOMBINASI 6
	LE 75x75x6	SS400	34.92	68.11	0.93	

Sesuai dengan tabel diatas, digunakan profil utama siku pada model A sebesar 120x120x8 dan bracing sebesar 75x75x6.

2. Profil Optimal Model B

Berikut adalah hasil optimalisasi penampang, dengan beban kombinasi yang menghasilkan gaya dalam terbesar adalah kombinasi beban 6.

Tabel 3. Hasil Optimalisasi Profil Model B

Member	Section	Material	Lay	Laz	Ratio	Case
Code group : 1 PROFIL UTAMA						
104	PIP 60.5x4	SS400	49.91	49.91	1.36	4 KOMBINASI 6
	PIP 76.3x4	SS400	39.08	39.08	0.84	
	PIP 89.1x4	SS400	33.20	33.20	0.61	
Code group : 2 BRACING						
1	LE 65x65x6	SS400	40.39	78.94	1.08	4 KOMBINASI 6
	LE 75x75x6	SS400	34.92	68.11	0.93	

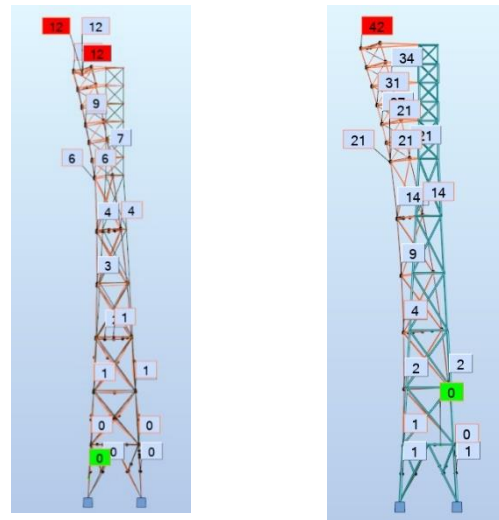
Sesuai dengan tabel diatas, digunakan profil utama pada Tower model B Pipa sebesar 76.3 x 4 dan bracing sebesar 75x75x6.

Tabel 4. Rangkuman hasil optimalisasi Profil Penampang

Model Tower	Profil Utama	Bracing
A	Siku 120x120x8	
B	Pipa 76.3 x 4	Siku 75x75x6

Defleksi Lateral pada Tower PLTB

Defleksi lateral dianalisa dengan menggunakan software RSAP 2022, nilai yang diberikan pada gambar dibawah adalah nilai defleksi terbesar:



Model A

Model B

Gambar 4. Nilai defleksi lateral pada tower.

Hasilnya didapatkan jika Model A memiliki defleksi lateral lebih kecil yaitu 12 mm, sementara Model B memiliki defleksi lateral terbesar yaitu 42 mm. Hal ini menunjukkan jika defleksi lateral dengan profil utama siku lebih kecil.

Berat Tower PLTB

Setelah didapatkan nilai profil optimal dan defleksi lateral selanjutnya akan dibandingkan berat sendiri antara tower model A dan model B. Perhitungan berat tower dilakukan dengan bantuan software RSAP 2022. Berikut adalah hasil analisa tower PLTB model A dan B:

Tabel 5. Berat penampang model A.

Section	Group	Protection	Weight (kg)
LE 120x120x8	Group_1	Protection_1	1414,45
LE 75x75x12	Group_1	Protection_1	3486,98
Total			4901,43

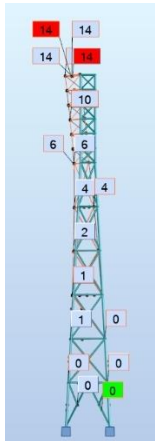
Sesuai dari hasil perhitungan volume pekerjaan, didapatkan berat total penampang model A, tanpa sambungan adalah sebesar 4901,43 kg.

Tabel 6. Berat penampang model A.

Section	Group	Protection	Weight (kg)
LE 75x75x6	Group_1	Protection_1	1876,31
PIP 76.3x4	Group_1	Protection_1	683,17
Total			2559,48

Sesuai dari hasil perhitungan volume pekerjaan, didapatkan berat total penampang model A, tanpa sambungan adalah sebesar 2559,48 kg.

Perbandingan berat antara tower model A dan model B cukup jauh, sekitar 52%, namun defleksi yang dihasilkan lebih baik dengan model A yaitu sekitar 12 mm, untuk itu dilaksanakan pembesaran profil pipa pada model B sehingga nilai defleksi mendekati tower model A. Tower model A awalnya menggunakan profil 76.3 x 4 mm, diperbesar menggunakan pipa dengan profil 139,8 x 6 mm, sehingga hasil defleksi tower model B yang baru adalah sebesar 14 mm.



Section	Group	Protection	Weight (kg)
LE 75x75x6	Group_1	Protection_	1876,31
PIP 139.8x6	Group_1	Protection_	1905,39
<b>Total</b>			<b>3781,70</b>

Gambar 5. Nilai defleksi lateral dan berat profil Tower model B setelah dilakukan pergantian penampang utama.

Hasilnya berat penampang masih lebih kecil dengan tower model B dengan berat sebesar 3781,70 kg.

Tabel 7. Hasil Akhir Penelitian

Model Tower	Profil Utama	Bracing	Defleksi Lateral (mm)	Berat Tower (kg)
A	Siku 120x120x8	Siku 75x75x6	12	4901,4
B	Pipa 139,8 x 6		14	3781,7

4. KESIMPULAN

Hasil dari penelitian model tower dengan profil utama siku dan profil utama pipa didapatkan hasil sebagai berikut :

- Setelah melalui tahap permodelan dan optimalisasi dengan software RSAP 2022 digunakan profil utama siku pada model A sebesar 120x120x8 dan bracing sebesar 75x75x6, sementara Tower model B Pipa sebesar 76.3 x 4 dan bracing sebesar 75x75x6.
- Defleksi lateral hasil optimasi penampang yang dihitung berdasarkan kekuatan penampang dalam menahan beban Tarik dan Tekan dari RSAP 2022, didapatkan nilai defleksi sebesar 12 mm untuk tower model A dan 42 mm untuk tower model B, sehingga perlu dilakukan pergantian penampang tower B agar nilai defleksi lateral tidak terlalu jauh perbedaannya sehingga tower model B diganti dengan pipa dengan profil 139,8 x 6 mm sehingga didapatkan perbandingan defleksi lateral akhir,

Tower model A = 12 mm dan Tower model B = 14 mm.

- Berat tower PLTB model A adalah sebesar 4901,43 kg, dan Tower PLTB model B sebesar 3781,70, dapat disimpulkan jika tower model B memiliki berat sendiri yang lebih kecil dibandingkan Model A, sehingga dari segi biaya material didapatkan jika tower dengan profil utama pipa lebih murah dibandingkan tower model B dengan profil utama siku.

Pada penelitian selanjutnya dapat dianalisa pengaruh bracing dengan pipa, sambungan yang sudah didetailkan dengan menggunakan metode Building Information Modelling, dengan harapan untuk mendapatkan perencanaan tower PLTB dengan biaya yang efisien dan layak untuk dilaksanakan didaerah yang masih belum terpenuhi listriknya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Judul *et al.*, “PADA MENARA TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL RANGKA BATANG BAJA TINGGI 30 M,” 2016.
- [2] V. R. Yandri, “Prospek Pengembangan Energi Surya Untuk Kebutuhan Listrik Di Indonesia,” J. Ilmu Fis. | Univ. Andalas, vol. 4, no. 1, pp. 14–19, 2012, doi: 10.25077/jif.4.1.14-19.2012.
- [3] P. Siagian and Fahreza, “Rekayasa Penanggulangan Fluktuasi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dengan Vehicle to Grid (V2G),” Semin. Nas. Teknol. Komput. Sains , pp. 356–361, 2020, [Online]. Available: <https://prosiding.seminar-id.com/index.php/sainteks>.
- [4] U. K. N, P. Bharath, and M. F. Iyaz, “Design and Analysis of 2-Mw Wind Turbine Tower,” Int. J. Mech. Prod. Eng., no. 410, pp. 2320–2092, 2016, [Online]. Available: [http://www.iraj.in/journal/journal\\_file/journal\\_pdf/2-302-147833002313-17.pdf](http://www.iraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/2-302-147833002313-17.pdf).
- [5] A. Das, “Modelling and Analysis of Lattice Towers for Wind Turbines,” Int. J. Sci. Res., vol. 4, no. 4, pp. 999–1003, 2015, [Online]. Available: <https://www.ijsr.net/archive/v4i4/SUB153189.pdf>.
- [6] B. Gencturk, A. Attar, and C. Tort, “Optimal Design of Lattice Wind Turbine Towers,” 15 Wcee, 2012, [Online]. Available: [https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_0582.pdf](https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0582.pdf).
- [7] M. C. Tenorio, U. F. De Alagoas, M. A. A. Cavalcante, and U. F. De Alagoas, “Optimized Structural Design of Lattice Towers for Wind Turbines Optimized Structural Design of Lattice Towers for Wind Turbines,” no. February, 2021.
- [8] A. M. Tah, “Comparison of Various Bracing System for Self-Supporting Steel Lattice Structure Towers,” Am. J. Civ. Eng., vol. 5, no. 2, p. 60, 2017, doi: 10.11648/j.ajce.20170502.11.
- [9] H. Purwanto, F. Rifalka, and K. Kunci, “DAN BIAYA PELAKSANAAN PEMBANGUNAN,” vol. 1, pp. 20–30, 2016.
- [10] BSN, “Beban desain minimum dan Kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain,” Badan Standarisasi Nas. 17272020, no. 8, pp. 1–336, 2020.
- [11] S. N. I. Iec, “Turbin angin Bagian 2: Persyaratan rancangan turbin angin skala kecil,” 2016.