

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Menara Transmisi**

Pada suatu sistem tenaga listrik, energi listrik yang dibangkitkan dari pembangkit listrik ditransmisikan ke pusat-pusat pengatur beban melalui suatu saluran transmisi, saluran transmisi tersebut dapat berupa saluran udara atau saluran bawah tanah, namun pada umumnya berupa saluran udara. Energi listrik yang disalurkan lewat saluran transmisi udara pada umumnya menggunakan kawat telanjang sehingga mengandalkan udara sebagai media isolasi antara kawat penghantar tersebut dengan benda sekelilingnya, dan untuk menyanggah/merentang kawat penghantar dengan ketinggian dan jarak yang aman bagi manusia dan lingkungan sekitarnya, kawat-kawat penghantar tersebut dipasang pada suatu konstruksi bangunan yang kokoh, yang biasa disebut menara listrik, dikenal dengan SUTT atau SUTET.

Konstruksi tower SUTT dan SUTET yang digunakan oleh jaringan PLN (Perusahaan Listrik Negara) adalah besi baja. Selain mudah dirakit untuk pemasangan di daerah pegunungan dan jauh dari jalan raya, harganya yang relatif murah serta pemeliharaannya yang mudah dibandingkan dengan penggunaan saluran bawah tanah.

#### **3.2 Tipe Menara**

Komponen utama dari fungsi struktur pada sistem transmisi SUTT / SUTET adalah tiang (menara/tower). Tiang adalah konstruksi bangunan yang kokoh untuk menyangga atau merentang konduktor penghantar dengan ketinggian dan jarak yang aman bagi manusia dan lingkungan sekitarnya dengan sekat insulator. Menurut fungsinya, tiang / tower terbagi terbagi macam, yaitu:

##### **1. Tiang Penegang (*tension tower*)**

Tiang penegang disamping menahan gaya berat juga menahan gaya tarik konduktor-konduktor saluran udara tegangan tinggi (SUTT) atau ekstra tinggi (SUTET). Tiang Penegang terdiri dari:

a. Tower sudut (*angle tower*)

Tower sudut adalah tiang penegang yang berfungsi menerima gaya Tarik akibat perubahan arah jalur transmisi yang mempunyai sudut belok sampai  $90^\circ$  untuk Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Ekstra Tinggi (SUTET) sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 3.1.



Gambar 3.1: Tiang Sudut

Sumber: PT.PLN

b. Tower akhir (*dead end tower*)

Tower akhir adalah Tower penegang yang direncanakan sedemikian rupa sehingga kuat untuk menahan gaya tarik konduktor-konduktor dari satu arah saja. Tiang akhir ditempatkan di ujung Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Ekstra Tinggi (SUTET) yang akan masuk ke *switchyard* Gardu Induk (GI) sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 3.2.



Gambar 3.2: Tiang Akhir

Sumber: PT.PLN

## 2. Tower gantung (*suspension tower*)

Tower yang digunakan untuk meyangga penghantar atau konduktor pada kedua bentang untuk jalur transmisi yang relatif lurus dengan sudut belok antara 0 sampai dengan 3 derajat untuk SUTT dan 0 sampai 5 derajat untuk SUTET sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 3.3.



Gambar 3.3: Tiang Gantung

Sumber: PT.PLN

## 3. Tiang penyekat (*section tower*)

Yaitu tiang penyekat antara sejumlah *tower* penyangga dengan sejumlah *tower* penyangga lainnya karena alasan kemudahan saat pembangunan (penarikan konduktor), umumnya mempunyai sudut belokan yang kecil sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 3.4.



Gambar 3.4: Tiang Penyekat

Sumber: PT.PLN

#### 4. Tiang Transposisi

Adalah tiang penegang yang berfungsi sebagai tempat perpindahan letak susunan fasa konduktor-konduktor Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 3.5.



Gambar 3.5: Tiang Transposisi  
Sumber: PT.PLN

#### 5. Tiang portal (*gantry tower*)

Yaitu *tower* berbentuk portal digunakan pada persilangan antara dua saluran transmisi yang membutuhkan ketinggian yang lebih rendah untuk alasan tertentu (bandara, tiang *crossing*). Tiang ini dibangun di bawah saluran transmisi eksisting sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 3.6.



Gambar 3.6 : Tiang Portal  
Sumber : PT.PLN

#### 6. Tiang kombinasi (*combined tower*)

Yaitu *tower* yang digunakan oleh dua buah saluran transmisi yang berbeda tegangan operasinya sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 3.7.



Gambar 3.7 : Tiang Kombinasi

Sumber : PT.PLN

#### 3.2.1 Komponen Menara

Secara umum menara/tower listrik transmisi terdiri dari:

- a. Pondasi, yaitu suatu konstruksi beton bertulang untuk mengikat kaki tower (*stub*) dengan bumi.
- b. *Stub*, bagian paling bawah dari kaki tower, dipasang bersamaan dengan pemasangan pondasi dan diikat menyatu dengan pondasi.
- c. *Leg*, kaki tower yang terhubung antara *stub* dengan bodi tower. Pada tanah yang tidak rata perlu dilakukan penambahan atau pengurangan tinggi *leg*, sedangkan bodi harus tetap sama tinggi permukaannya.
- d. *Common Body*, badan tower bagian bawah yang terhubung antara *leg* dengan badan tower bagian atas (*superstructure*). Kebutuhan tinggi tower dapat dilakukan dengan pengaturan tinggi *common body* dengan cara penambahan atau pengurangan.

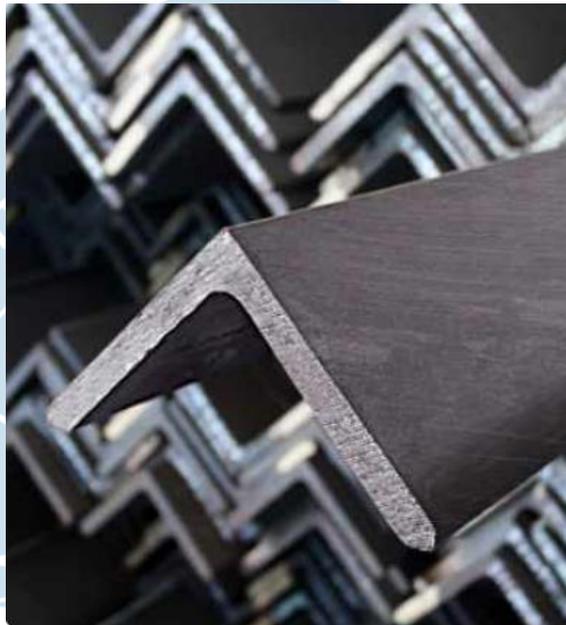
- e. *Super structure*, badan tower bagian atas yang terhubung dengan *common body* dan *cross arm* kawat fasa maupun kawat petir. Pada tower jenis delta tidak dikenal istilah *superstructure* namun digantikan dengan “K” frame dan bridge.
- f. *Cross arm*, bagian tower yang berfungsi untuk tempat menggantungkan atau mengaitkan *isolator* kawat fasa serta *clamp* kawat petir. Pada umumnya *cross arm* berbentuk segitiga kecuali tower jenis tension yang mempunyai sudut belokan besar berbentuk segi empat.
- g. *Step bolt*, baut panjang yang dipasang dari atas ACD ke sepanjang badan tower hingga *superstructure* dan *arm* kawat petir. Berfungsi untuk pijakan petugas sewaktu naik maupun turun dari tower.

### 3.3 Struktur Rangka Menara

Struktur rangka meliputi baja sistem frame, dimana terdapat ukuran batang dan simpul hubung atau sambungan las dari rangka batang baja dan komponen penunjang lainnya. Baja sendiri adalah logam paduan, logam besi sebagai unsur dasar dengan beberapa elemen lainnya, termasuk karbon dan memiliki beragam bentuk dan ukuran sesuai dengan pengaplikasiannya.

Perencanaan tower ataupun bangunan struktur rangka baja biasanya menggunakan metode ASD (Allowable Stress Design). Namun, analisa dan desain berdasarkan metode tersebut belum mencerminkan faktor keamanan struktur sesungguhnya. Metode ASD (Allowable Stress Design) dalam struktur baja telah lama cukup lama digunakan, namun beberapa tahun terakhir metode desain dalam struktur baja mulai beralih ke metode lain yang lebih rasional, yakni metode LFRD (Load And Resistance factor Design). LRFD (Load And Resistance Factor Design) adalah suatu metode dalam perencanaan bangunan gedung dan menara yang memperhitungkan faktor beban dan faktor ketahanan material. Konsep desain ini pada prinsipnya tegangan yang terjadi dalam setiap elemen struktur harus lebih kecil dari tegangan yang di iijinkan. Dengan pengertian lain, beban yang bekerja harus lebih kecil dari kapasitas kekuatan elemen dibagi dengan suatu faktor keamanan *safety factor*. Metode ini didasarkan pada ilmu probabilitas, sehingga dapat

mengantisipasi segala ketidakpastian dari material maupun beban. Sebagai contoh, Peraturan Perencanaan Bangunan Baja Indonesia (PBBBI 1987) telah diganti dengan Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung, SNI 03-1729-2002 yang berbasis pada metode LFRD.



Gambar 3.8 : Profil Siku

Dalam menara transmisi digunakan baja dengan profil Siku, profil Siku dapat di lihat pada gambar 3.8. Adapun perhitungan yang didasarkan pada ASCE 10-97, yang meliputi kekuatan tarik dan tekan dari baja yang digunakan nantinya dengan perumusan sebagai berikut:

### 3.3.1 Kekuatan Tarik Izin

Kekuatan tarik adalah tegangan maksimum yang bisa ditahan oleh sebuah baja ketika diregangkan atau ditarik, sebelum bahan tersebut patah atau terpisah. Kekuatan tarik pada setiap benda berbeda. Beberapa bahan dapat patah begitu saja tanpa mengalami deformasi, yang berarti benda tersebut bersifat rapuh atau getas (*brittle*). Kekuatan tarik pada baja terjadi pada setiap permukannya, sehingga didapat rumus:

$$T_a = A_e \cdot f_u \dots \dots \dots (3.1)$$

Keterangan:

- $T_n$  : tahanan nominal penampang  
 $A_e$  : luas penampang efektif ( $\text{mm}^2$ )  
 $F_u$  : tegangan tarik putus (Mpa)

### 3.3.2 Kekuatan Tekan Izin

Kekuatan tekan adalah kapasitas dari suatu bahan atau struktur dalam menahan beban yang akan mengurangi ukurannya. Beberapa bahan akan patah pada batas tekan, beberapa mengalami deformasi yang tidak dapat dikembalikan. Kuat tekan izin yang terjadi pada daerah yang terkena gaya tekan atau area yang mengalami pengurangan karena gaya aksial. Rumus yang dapat dipakai dalam menentukan tuktat tekan izin, yaitu:

$$P_n = \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{KL}{Cc} \right)^2 \right] F_y ; \frac{KL}{r} \leq C_c \dots \dots \dots (3.2)$$

$$C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{F_y}} \dots \dots \dots (3.3)$$

### 3.3.3 Kontrol Batang Tarik dan Tekan

Setelah perhitungan dilakukan perlu adanya pengecekan yang didasarkan pada acuan yang digunakan, untuk mengetahui apakah rencana pemakaian profil baja yang diinginkan sesuai dan dapat menahan gaya atau bebam yang terjadi pada profil tersebut. Pengontrolan pada batang, yaitu:

#### a. Batang Tekan

Dalam pengontrolan batang tekan sama dengan batang tarik bahwa semua komponen yang mengalami gaya tekan konsentris akibat beban harus memenuhi syarat:

$$P_u = \phi P_n \dots \dots \dots (3.4)$$

Keterangan:

$P_u$  = gaya aksial terfaktor

$\phi$  = faktor tahanan

$P_n$  = tahanan nominal penampang

b. Batang Tarik

Dalam pengontrolan batang tarik mengikuti standar dinyatakan bahwa semua komponen struktur yang memikul gaya tarik aksial memenuhi syarat:

$$T_u \leq \phi T_n \dots \dots \dots (3.5)$$

Keterangan:

$T_u$  = gaya aksial terfaktor

$\phi$  = faktor tahanan

$T_n$  = tahanan nominal penampang

### 3.4 Sambungan Las

Sambungan adalah suatu proses penyambungan bahan logam yang menghasilkan peleburan bahan dengan memanasinya hingga suhu yang tepat dengan atau tanpa pemberian tekanan dan dengan atau tanpa pemakaian bahan pengisi.

#### 3.4.1 **Jenis-Jenis Las**

Las tumpul, las ini dipakai untuk menyambung batang-batang sebidang karena las ini harus menyalurkan secara penuh beban yang bekerja, maka las ini harus memiliki kekuatan yang sama dengan batang yang disambungnya.

Las sudut, tipe las ini paling banyak dijumpai dibandingkan tipe las yang lain, 80 % sambungan las menggunakan tipe las sudut. Tidak memerlukan presisi tinggi dalam pengerjaannya.

Las baji dan pasak, jenis las ini biasanya digunakan bersama-sama dengan las sudut. Manfaat utamanya adalah menyalurkan gaya geser pada sambungan lewatan bila ukuran panjang las sudut.

**3.4.2 Tahanan Nominal**

Persyaratan keamanan suatu struktur, dalam hal ini terutama untuk las adalah terpenuhinya persamaan:

$$\phi \cdot R_{nw} \geq R_u \dots\dots\dots (3.6)$$

Keterangan:

$R_{nw}$  = tahanan nominal per satuan panjang las

$\phi$  = faktor tahanan

$R_u$  = beban terfaktor per satuan panjang las

Kuat rencana per satuan panjang las sudut, ditentukan sebagai berikut :

$$\phi \cdot R_{nw} = 0.75 \cdot t_e (0,6 \cdot f_{uw}) \text{ (las)} \dots\dots\dots (3.7)$$

$$\phi \cdot R_{nw} = 0.75 \cdot t_e (0,6 \cdot f_u) \text{ (bahan dasar)} \dots\dots\dots (3.8)$$

**3.5 Pembebanan Pada Struktur Menara**

Dalam merencanakan beban untuk suatu bangunan diharuskan memperlihatkan penggunaan beban-beban yang diijinkan dalam perencanaan tersebut. Beban yang terjadi pada konstruksi menara rangka baja SUTT dan SUTET digunakan untuk menentukan dimensi batang dan baut dari tower yang menentukan kekuatan menara pada kondisi rencana pembebanan normal dan abnormal. Terdapat beberapa beban yang diperhitungkan dalam perencanaan struktur menara:

a. Beban Mati

Beban mati dari suatu menara transmisi adalah berat sendiri menara dengan seluruh kelengkapannya, berat kawat penghantar dan kawat tanah, insulator berikut serta beban lainnya jika ada, yang setiap saat selalu berada pada tower tersebut.

$$F = n \cdot L \cdot W \dots\dots\dots(3.9)$$

**Keterangan:**

F = beban konduktor (vertikal)

N = jumlah konduktor

L = panjang rentang konduktor antar menara

W = Berat konduktor

**b. Beban Angin**

Beban angin adalah beban yang ditimbulkan oleh angin yang mengenai permukaan menara, konduktor dan insulator. Besarnya beban angin tersebut mengacu pada *International IEC 60826, 2003* namun tidak boleh kurang dari besaran tekanan angina minimum yang ditentukan dalam standar PLN T5.004:2010. Pada tabel 3.1 dan tabel 3.2 menunjukkan kategori tekanan angin minimum berdasarkan tinggi menara pada satu sisi permukaan yang digunakan untuk menghitung beban kerja akibat menara struktur dan angin pada konduktor adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1. Kategori Beban Angin Berdasarkan Ketinggian Pada Struktur Menara

Height of Wire at Structure In feet (meters)	Exposure Coefficient $k_z$	Gust Response Factor GRF for Various Span Lengths in feet (meters)			
		251–500 (76.5 to 152.4)	501–750 (152.7 to 228.6)	751–1000 (229 to 305)	1001–1500 (305.1 to 457.2)
Up to 33 (10.0)	1.00	0.86	0.79	0.75	0.73
34–50 (10.4 to 15.2)	1.10	0.82	0.76	0.72	0.70
51–80 (15.5 to 24.4)	1.20	0.80	0.75	0.71	0.69
81–115 (24.7 to 35.1)	1.30	0.78	0.73	0.70	0.68
116–165 (35.4 to 49.5)	1.40	0.77	0.72	0.69	0.67

(Source: RUS/USDA)

Tabel 3.2. Kategori Beban Angin Berdasarkan Ketinggian pada Konduktor

Height of Structure <i>In feet (meters)</i>	Velocity Pressure Exposure Coefficient	Gust Response Factor
	$k_z$	$G_{RF}$
Up to 33 (10.0)	0.92	1.02
34–50 (10.4 to 15.2)	1.00	0.97
51–80 (15.5 to 24.4)	1.10	0.93
81–115 (24.7 to 35.1)	1.20	0.89
116–165 (35.4 to 50.3)	1.30	0.86

(Source: RUS/USDA)

#### c. Beban Khusus

Beban yang terjadi selama pembangunan, pemeliharaan dan beban untuk menghindari kerusakan beruntun pada jaringan transmisi. Beban khusus ini adalah beban maksimum dan tidak dapat dianalisis secara static. Acuan yang digunakan dalam menentukan kriteria dan besarnya beban khusus adalah *IEC 60826, 2003* dan *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.74, 1991*.

#### d. Kombinasi Beban

Pada desain menara, perhitungan beban harus dilakukan dengan meninjau kombinasi antara beban normal dan beban abnormal yang akan menentukan ukuran dimensi batang dan baut dari menara.

##### 1. Beban Normal

Kombinasi antara beban mati (beban permanen) dan beban angin (beban acak) yang dianggap mungkin untuk terjadi secara bersamaan. Beban normal yang diperhitungkan adalah beban vertikal, beban transversal dan beban longitudinal. Beban vertikal terdiri dari berat

sendiri menara, berat konduktor, berat isolator. Beban transversal berasal dari tekanan angin transversal pada bagian menara, konduktor, isolator serta akibat jalur transmisi. Sedangkan beban longitudinal berasal dari perbedaan tarikan pada seluruh kawat penghantar dan kawat tanah pada bentang yang bersebelahan.

## 2. Beban Abnormal

Kombinasi beban mati, beban angin dan beban khusus tertentu yang dianggap mungkin untuk terjadi secara bersamaan. Beban abnormal yang diperhitungkan terdiri dari beban vertikal, beban transversal, beban longitudinal dan beban torsional yang diakibatkan oleh beban mati, beban angin, serta beban khusus. Beban vertikal terdiri dari berat sendiri menara, berat konduktor, berat isolator. Beban transversal berasal dari tekanan angin transversal pada bagian menara, konduktor, isolator serta akibat jalur transmisi. Sedangkan beban longitudinal berasal dari tarikan kawat penghantar putus sedangkan beban torsional terjadi diakibatkan oleh tarikan kawat penghantar putus pada satu sisi.

### 3.6 Kombinasi Pembebanan Pada Struktur Menara

Desain menara transmisi listrik direncanakan sesuai dengan kombinasi pembebanan standar ASCE (*American Society of Civil Engineers*) dijabarkan sebagai berikut:

- a) Kombinasi 1 :  $L = \text{Wire Tension}$
- b) Kombinasi 2 :  $L = \text{Wire Tension} + \text{Wind Structure X}$
- c) Kombinasi 3 :  $L = \text{Wire Tension} + \text{Wind Structure X}$
- d) Kombinasi 4 :  $L = \text{Wind Structure X}$
- e) Kombinasi 5 :  $L = \text{Wind Structure Y}$
- f) Kombinasi 6 :  $L = \text{Wire Tension} + \text{Wind Structure X} + \text{Wind on Wire}$
- g) Kombinasi 7 :  $L = \text{Wire Tension} + \text{Wind Structure Y} + \text{Wind on Wire}$
- h) Kombinasi 8 :  $L = \text{Wire Tension} + \text{Wind Structure Y} + \text{Wind Structure Y} + \text{Wind on Wire}$

Kombinasi Pembebanan diambil dalam perencanaan tower menara SUTT 150 Kv dalam tugas akhir ini ialah Load Case 1 sebagaimana terdapat di tabel 3.3 Kombinasi Pembebanan pada struktur menara. Load Case 2,3 dan 4 di Indonesia dinilai kurang relevan, karena di Indonesia tidak terdapat salju.

Tabel 3.3. Kombinasi Pembebanan Pada Struktur Menara

<i>Load Case</i>	<i>Load Factors and Combinations</i>
1	1.1 D + 1.2 W IFW + 0.75 SC + 1.1 TW
2	1.1 D+1.2 I <sub>w</sub> I <sub>FI</sub> * + 1.2 W <sub>I</sub> I <sub>FIW</sub> ** + 0.75 SC + 1.1 TW
3	1.1 D+1.0 SC + 1.1 TW
4	1.1 D + 1.25 E (or E <sub>FS</sub> ) I <sub>FE</sub> + 0.75 SC + 1.1 TW

(with permission from ASCE).

\*The importance factor for ice is applied to the thickness.

D = structure and wire dead load

W = extreme wind load

WI = wind load in combination with ice

IW = ice load in combination with wind

E = earthquake load, FE (without IFW)

EFS = earthquake load reactions from first support imposed on the rest of the structure (without IFW)

TW = horizontal wire tension

SC = short circuit load

IF = importance factors

IFW ,IFI = importance factors for wind and ice loads

Earthquake Load FE = (Sa/R) Wd (IFE) (IMV) applied at center of gravity of structure R = structure response modification factor, a function of structural system(e.g.: cantilever = 2.0)

IFE = importance factor for earthquake loads

$W_d$  = dead load

$S_a$  = spectral response acceleration

IMV = 1.0 for single mode behavior

