

Investigasi Tower Transmisi Roboh pada Backbone Sistem 150 kV Sumatera - Bangka

Daniel Rio Armanda^{1*)}; Weddy B. Sudirman¹; Pricylia Y. V. Pangemanan¹; Indra Widiyanto²

1. PT PLN (Persero) Divisi Konstruksi Sumatera, Kalimantan dan Sulawesi, Jakarta, Indonesia
2. Institut Teknologi PLN, Menara PLN, Jl. Lkr. Luar Barat Lantai 2, RT.1/RW.1, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat, DKI Jakarta 11750, Indonesia

^{*)}Email: danielrioarmanda@gmail.com

ABSTRACT

The operation of Kenten - Tanjung Api-Api high voltage overhead transmission line is become crucial since it is the main backbone of the Sumatera - Bangka 150 kV system. During the operation period, it is known that three breakdowns occurred which resulted in the collapsing tower, thus disrupting the reliability of electrical energy distribution from Sumatera Island to Bangka Island. The research focuses on investigating the main cause of the tower collapse which occurred on November 11th 2023. The investigation and research method was carried out using visual check to collect the primary database, identification of material tower equipment, eyewitnesses interviews, weather data sampling and collect fault recorder history data at the substation. The research results are expected to become reference for continuous improvement in the construction and operation process of high voltage transmission lines in order to maintain the reliability and quality of electrical energy distribution to customers and the surrounding people.

Keywords: tower, transmission line, collapsed

ABSTRAK

Pengoperasian jalur transmisi SUTT 150 kV Kenten – Tanjung Api-Api menjadi krusial karena merupakan jalur penyaluran energi listrik utama atau backbone sistem 150 kV Sumatera – Bangka. Selama masa operasi, diketahui telah terjadi tiga kali gangguan yang mengakibatkan tower roboh, sehingga mengganggu keandalan penyaluran energi listrik dari Pulau Sumatera ke Pulau Bangka. Penelitian fokus pada investigasi terhadap penyebab tower roboh yang terjadi pada tanggal 11 November 2023. Investigasi dan penelitian dilakukan dengan metode pengumpulan data primer secara visual, identifikasi kelengkapan material tower, interview saksi mata, pengambilan sampel data cuaca dan pengambilan data histori fault recorder di gardu induk. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi perbaikan berkelanjutan terhadap proses konstruksi dan pengoperasian jalur transmisi dalam rangka menjaga keandalan dan kualitas penyaluran energi listrik ke pelanggan dan masyarakat sekitar.

Kata kunci: tower, jalur transmisi, roboh

1. PENDAHULUAN

Pembangunan jaringan transmisi saluran udara tegangan tinggi (SUTT) 150 kV dari gardu induk (GI) 150 kV Kenten ke GI 150 kV Tanjung Api-Api dimulai sejak tahun 2010 dan beroperasi di tahun 2014. Pembangunan jaringan transmisi tersebut dibagi menjadi tiga section dengan masing-masing dikerjakan oleh konsorsium pelaksana pembangunan, yang disupervisi langsung oleh PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Proyek Sumatera Bagian Selatan 1 yang bertempat di Kota Palembang. Setelah selesai fase konstruksi, kemudian dioperasikan oleh PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Transmisi Palembang. Sejak tahun 2022, SUTT 150 kV Kenten – Tanjung Api-Api menjadi jalur *backbone* untuk interkoneksi sistem Sumatera – Bangka, yang bermanfaat untuk menurunkan biaya pokok produksi (BPP) di Pulau Bangka.

Dalam masa operasi jaringan transmisi SUTT 150 kV Kenten – Tanjung Api-Api sejak 2014 hingga bulan November 2023, tercatat telah mengalami tiga kali kejadian tower roboh, dengan total kerusakan sebanyak 13 tower, yaitu pada 19 Maret 2022 (tiga tower roboh), tanggal 20 Maret 2023 (lima tower roboh) dan 11 November 2023 (lima tower roboh). Proses *recovery* dilakukan dengan memasang tower ERS (*emergency restoration structure*) di sepanjang jalur yang mengalami gangguan.

Fokus penelitian pada kejadian tanggal 11 November 2023 dengan tujuan untuk mengidentifikasi penyebab tower roboh di T.41, T.42, T.43, T.44, T.45. Kronologis singkat, bermula pada 11 November 2023 sekitar pukul 15:30 WIB, terpantau kondisi cuaca hujan dan berangin kencang pada sekitar jalur SUTT 150 kV Kenten – Tanjung Api-Api. Kemudian pukul 16:12 WIB terindikasi *trip* pada SUTT 150 kV Kenten – Tanjung Api-Api line 2, disusul dengan *trip* line 1. Ditemukan tower roboh pada T.41, T.42, T.43, T.44, T.45 dan tower ERS (*emergency restoration structure*) T.40 line 2. Dampak dari kejadian tersebut adalah putusnya aliran listrik dari Kenten ke Tanjung Api-Api menuju sistem Bangka, sehingga terjadi *blackout* di subsistem Bangka.

2. METODE PENELITIAN

Dalam melakukan investigasi tower roboh, diambil beberapa metode penelitian (mengacu pada literatur terkait investigasi), yaitu pengumpulan data primer dengan cara *visual check* terhadap tower yang roboh [1], identifikasi kelengkapan dan sortir material tower roboh [2], interview terhadap saksi mata di sekitar lokasi kejadian, pengambilan sampel data cuaca di lokasi kejadian [3], [4] dan pengambilan data histori *fault recorder* HMI (*Human Machine Interface*) di GI 150 kV Kenten. Kemudian dilakukan kalkulasi dan simulasi tower roboh menggunakan program MS Tower [5], [6]. Sedangkan pengumpulan referensi dari berbagai literatur dilakukan untuk memperdalam proses pengolahan data.

2.1. Faktor Penyebab Tower Roboh

Berbagai macam kemungkinan dapat menyebabkan terjadinya tower roboh, secara umum penyebab utama dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu penyebab eksternal dan internal.

Penyebab eksternal, antara lain faktor cuaca (badai, angin kencang dan curah hujan tinggi) [3], [4], [7], [8], kondisi geografis (kondisi tanah) [9] dan faktor keamanan (pencurian material tower) [2]. Penyebab internal, antara lain faktor penuaan (*ageing*) material [10], faktor kondisi material konduktor, OPGW (*optical ground wire*), GSW (*ground steel wire*), *fitting*, insulator dan aksesoris [1] serta faktor kualitas pondasi [11].

2.2. Desain Tower Transmisi PLN

Perencanaan pembangunan tower transmisi harus memperhatikan beban-beban [12] sebagai berikut:

- **Beban Mati**

Merupakan parameter yang digunakan sebagai beban tower itu sendiri yang berupa beban konstruksi serta material pendukungnya [13]. Dapat diklasifikasikan menjadi tiga bagian [14], yaitu *Vertical Load* (beban struktur pendukung, beban konduktor, fitting, insulator dan aksesorisnya); *Horizontal Transverse Load* (beban tekanan angin ke struktur tower dan struktur pendukung); dan *Horizontal Longitudinal Load* (beban tekanan angin secara melintang).

- **Beban Dinamis**

Adalah beban yang diterima tower pada saat dilakukan pekerjaan terhadap tower tersebut (pekerjaan *erection*, *stringing* maupun *final check*) [2], [7].

- **Beban Angin**

Beban angin adalah beban yang diterima tower secara alami dan akan selalu ada [3], [13]. Beban angin diperoleh dari tekanan udara maupun laju angin terhadap tower [7]. Beban ini dipengaruhi oleh faktor posisi maupun tempat lokasi tower tersebut berdiri [8].

- **Beban Gempa**

Beban gempa merupakan parameter beban yang diakibatkan adanya pergerakan atau aktivitas tanah di sekitar lokasi tower, dapat juga dipengaruhi akibat pergerakan kendaraan atau alat berat yang melewati area sekitar lokasi tower [1]. Beban gempa berkaitan dengan waktu, sehingga respon yang terjadi pada struktur tergantung dari lamanya waktu pembebanan [9].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mendapat data aktual, dilakukan investigasi pada tanggal 14 sampai 17 November 2023. Pengecekan awal dilakukan ke lokasi tower roboh di T.41 tipe Aa+6, T.42 tipe Aa+12, T.43 tipe Aa+6, T.44 tipe Aa+6 dan T.45 tipe Aa+3 yang keseluruhan tower merupakan tipe tower *suspension*.

Selama masa operasi jalur transmisi SUTT 150 kV Kenten – Tanjung Api-Api, diketahui telah mengalami tiga kali kejadian tower roboh yang mengakibatkan kerusakan 13 tower, dengan rincian sebagai berikut:

- Kejadian tanggal 19 Maret 2022

Sebanyak tiga tower roboh, yaitu T.03 tipe Aa+9, T.04 tipe Cc+9 dan T.05 tipe Aa+9, sampai saat ini masih dioperasikan menggunakan lima tower ERS;

- Kejadian tanggal 20 Maret 2023

Sebanyak lima tower roboh, yaitu T.36 tipe Aa+6, T.37 tipe Bb+6, T.38 tipe Aa+6, T.39 tipe Aa+6 dan T.40 tipe Aa+6, yang sampai dengan kejadian tanggal 11 November 2023 beroperasi dengan enam tower ERS;

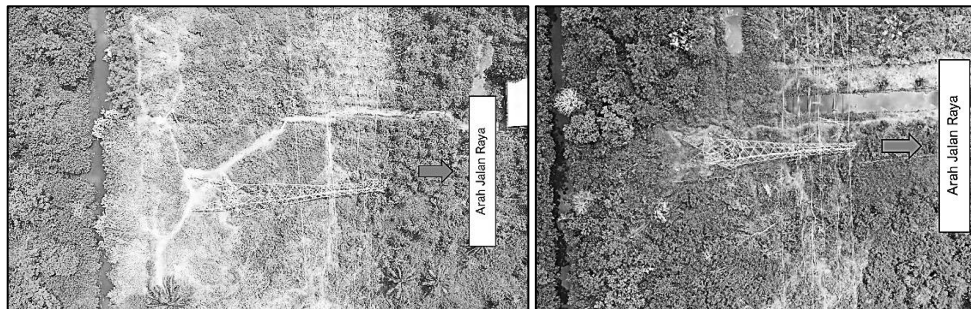
- Kejadian tanggal 11 November 2023

Sebanyak lima tower roboh, yaitu T.41 tipe Aa+6, T.42 tipe Aa+12, T.43 tipe Aa+6, T.44 tipe Aa+6 dan T.45 tipe Aa+3 (gambar 1 dan gambar 2).

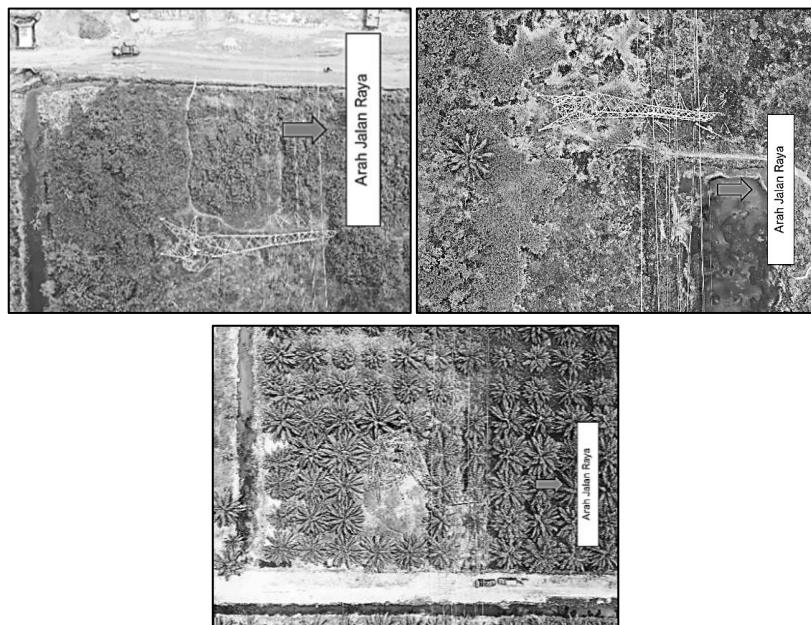
3.1. Visual Check

Seluruh pondasi tower yang roboh dalam kondisi aman, tidak tercabut ataupun tidak pecah (Gambar 1 dan Gambar 2). Diketahui bahwa selain tower tersebut, ada pula tower ERS T.40 line 2

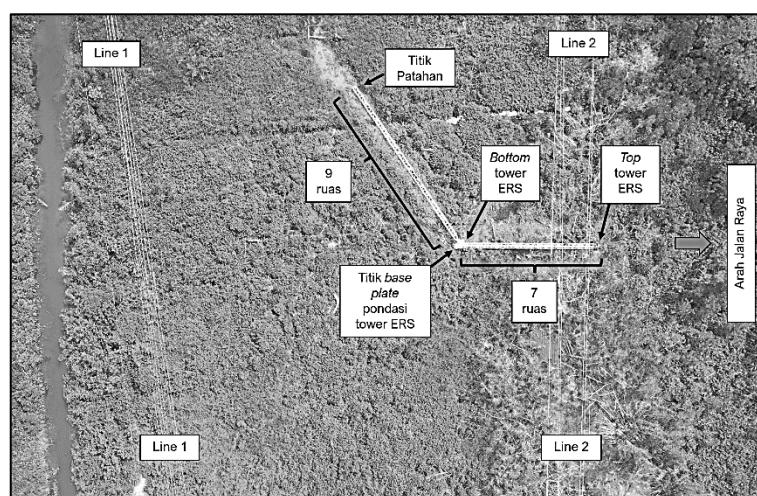
yang ikut roboh (Gambar 3) dengan kondisi patah tengah (patah di ruas ke-9 dari total 16 ruas). Sedangkan tower ERS lainnya (lima tower ERS dari total enam tower ERS) masih berdiri utuh.



Gambar 1. Kiri: Foto Udara Kondisi T.41; Kanan: Foto Udara Kondisi T.42

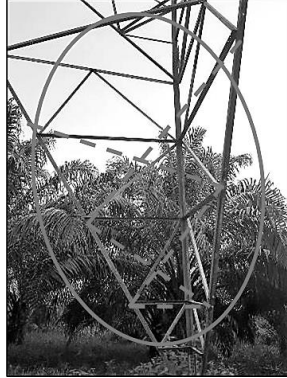


Gambar 2. Kiri: Foto Udara Kondisi T.43; Kanan: Foto Udara Kondisi T.44; Bawah: Foto Udara Kondisi T.45



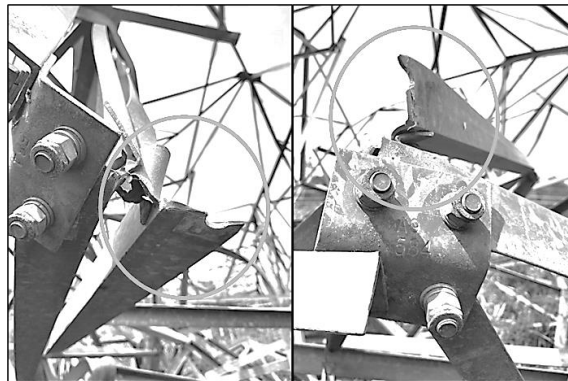
Gambar 3. Foto Udara Kondisi Tower ERS T.40 Line 2

Seluruh tower roboh ke satu sisi mengarah ke sisi jalan raya Palembang – Tanjung Api-Api. *Member* dan *bracing* tower pada T.41, T.42, T.43 dan T.44 masih dalam kondisi lengkap, namun di T.45 ditemukan lima buah *member* leg A hilang (Gambar 4). T.45 sendiri hanya roboh sebagian (di atas *common body*).



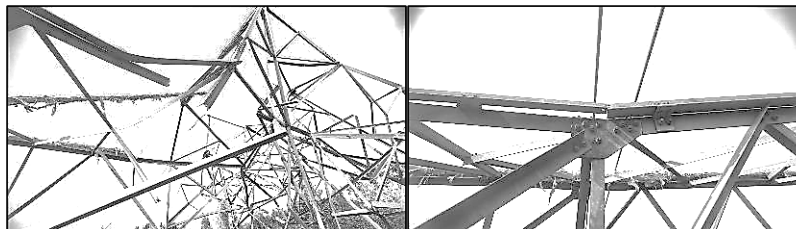
Gambar 4. Kondisi T.45 Kehilangan Beberapa Member di Leg A

Karat ditemukan di T.44 pada permukaan member tower robek yang tidak terlindung galvanis (Gambar 5), terindikasi bahwa permukaan tersebut mulai timbul karat setelah teroksidasi dengan oksigen dan air hujan [15] setelah roboh (tower tercatat roboh pada tanggal 11 November 2023).



Gambar 5. Temuan Karat Pada Member Tower Robek di T.44

Ditemukan perkuatan pada *body* tower T.43 dan terlihat *body* tower patah pada ruas sambungan tower yang tidak diperkuat (Gambar 6).

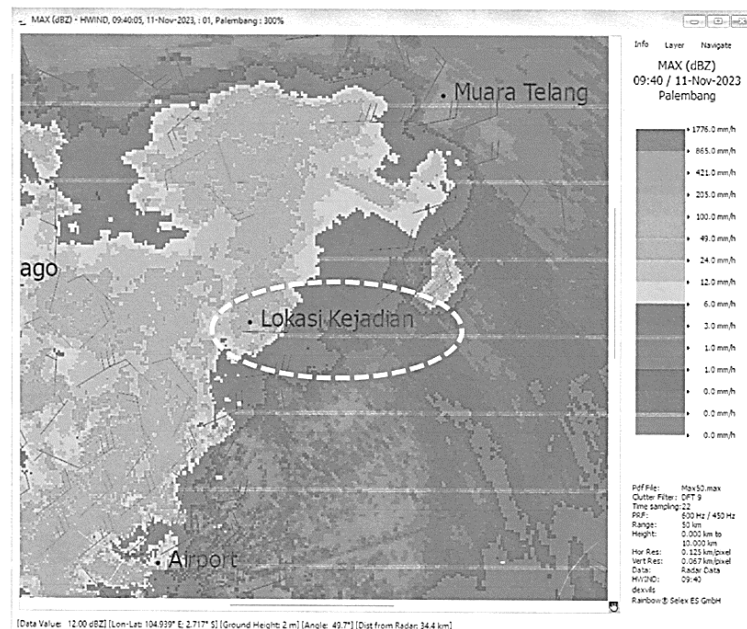


Gambar 6. Perkuatan Tower di T.43

3.2. Data Cuaca

Berdasarkan citra radar cuaca produk MAX tanggal 11 November 2023 pukul 16:40 WIB, terdapat awan konvektif (awan Cumulonimbus) di lokasi kejadian dengan curah hujan berkisar 24 – 49 mm/jam. Selain itu, berdasarkan data citra radar cuaca produk MAX komposit HWIND tanggal

11 November 2023 pukul 16:40 WIB (Gambar 7) menunjukkan kecepatan angin di sekitar lokasi kejadian mencapai 25 knots atau 45 km/jam. Data tersebut disampaikan dalam surat resmi dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) stasiun meteorologi kelas II Sultan Mahmud Badaruddin II Palembang.



Gambar 7. Citra Radar Cuaca BMKG Palembang

Tower transmisi yang didesain PLN mengacu pada standar SPLN T5.014-1:2021 yang menyatakan bahwa batas kemampuan tower transmisi 150 kV menahan beban kecepatan angin sebesar 18 m/s (50 tahun). Kecepatan angin di sekitar lokasi kejadian mencapai 25 knots atau 45 km/jam atau setara 12,5 m/s. Dengan demikian, tower yang dibangun masih masuk dalam *range safety factor* desain tower PLN (≤ 18 m/s).

3.3. Pengukuran Jarak dan Sudut Tower

Pada tanggal 15 November 2023 dilakukan pengukuran jarak dan sudut dari tower ERS T.40 line 2, T.40, T.41, T.42, T.43, T.44, T.45 dan T.46, ditemukan bahwa pemasangan tower ERS T.40 line 2 membentuk sudut $5,9^\circ$ di T.41. Sedangkan T.41 merupakan tower suspension tipe Aa dengan sudut maksimum 3° [12] dan panjang span antara tower ERS T.40 line 2 ke T.41 adalah 445 m, sedangkan panjang span ideal tower suspension adalah 300 – 350 m.

3.4. Interview dengan Warga Sekitar

Proses interview dilakukan dengan mengambil sampling warga di sekitar lokasi kejadian tower roboh. Satu orang warga menyatakan tidak mengetahui kejadian dikarenakan pada saat itu sedang tidak berada di rumah, namun pada saat sebelum kejadian diketahui cuaca hujan disertai angin kencang, kemudian orang tersebut keluar meninggalkan rumah.

Dua orang warga lainnya (Gambar 8) menyatakan bahwa pada saat kejadian terpantau cuaca buruk dengan hujan cukup deras dan angin kencang, lalu terdengar gemuruh dan suara seperti tabrakan kendaraan. Kemudian terlihat tower roboh bermula dari tower yang lokasinya dekat masjid

3.5. Data HMI di GI 150 kV Kenten

KENTEN 150KV

MHI

Admin/kyasey

16-11-23

14:41

105A

105A

ref: DISM

?

Help

About

Tools

Hom

Hardware

Help

About

Stop

Alarms

Time

States

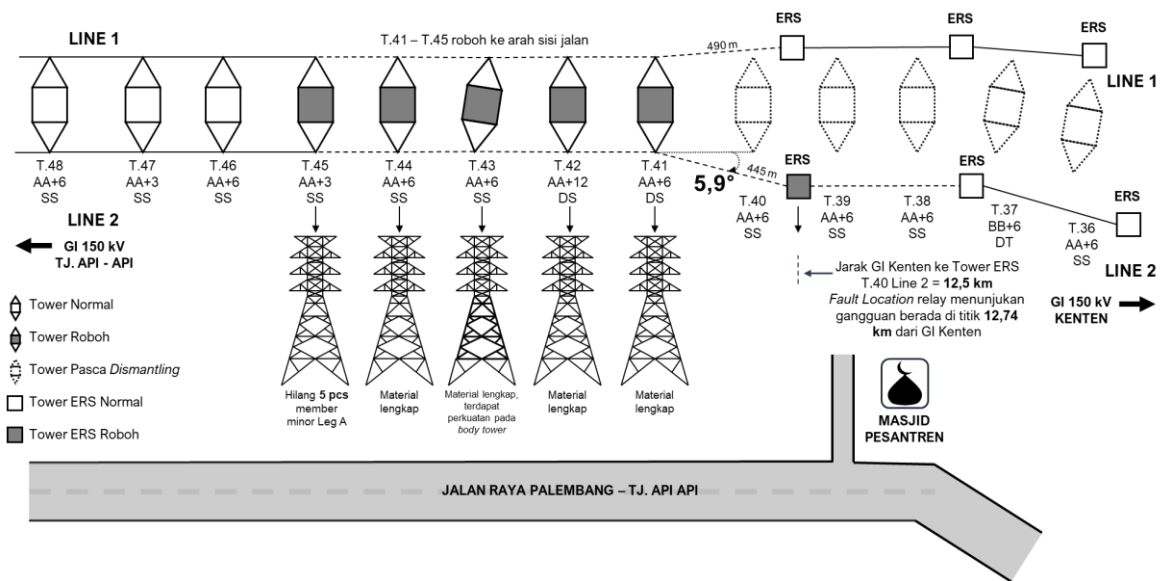
Events

Time of activity	Origin	Name	Status
15/11/2023 01:02:34:535	KENTEN_150KV/A_150KV/7_71052-2/0Q21	Q1 Q3 LOCAL/REMOTE	JAHH01
15/11/2023 12:17:05:00465	KENTEN_150KV/20KV Trafo1/0016 CBVROUET/Earth Fault	Earth Fault Trip	ALARM
15/11/2023 21:07:38:15:174	KENTEN_150KV/20KV Trafo2/0012 YAMABU/CB	CB	JAHH01
15/11/2023 19:41:02:02768	KENTEN_150KV/20KV Trafo2/0016 APRILIA/OCR TRIP 5	Pha 5 Trip	ALARM
12/11/2023 16:20:05:99696	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 1/ALARM.DVCE	PIC Failure	ALARM
12/11/2023 16:20:19:994	KENTEN_150KV/A_150KV/9.DHL.TIAP1 - 2/ALARM.DVCE	PIC Failure	ALARM
12/11/2023 15:35:35:400	KENTEN_150KV/20KV Trafo1/0017 SUBARU/CB	CB	JAHH01
12/11/2023 14:41:41:205	KENTEN_150KV/20KV Trafo1/0017 SUBARU/Earth Fault	Earth Fault Trip	ALARM
12/11/2023 19:13:35:282	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 2/ALARM.BAY	Q1R ES STATUS	JAHH01
12/11/2023 19:12:50:0338	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 4/QLR-E	Q1R ES STATUS	JAHH01
11/11/2023 17:09:02:304	KENTEN_150KV/A_150KV/9.DHL.TIAP1 - 2/ALARM.BAY	Lockout Relay 1 Operated	OPERATED
11/11/2023 17:09:02:303	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 2/ALARM.BAY	Bay Fault Alarm	ALARM
11/11/2023 17:08:38:945	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 1/ALARM.BAY	Lockout Relay 1 Operated	OPERATED
11/11/2023 17:08:38:945	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 1/ALARM.BAY	Bay Fault Alarm	ALARM
11/11/2023 16:12:25:578	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 1/ALARM.CB	Q50 CB Prot. Motor Switch MCB Trip	TRIP
11/11/2023 16:12:22:235	KENTEN_150KV/001 SUPPLY/400/2/100K	Q400 CB-Engng-Engng-Discharge	ALARM
11/11/2023 16:12:22:235	KENTEN_150KV/A_150KV/3.DHL.TIAP1 - 2/50/01310	400/2/100K Inc Distrib Bird 1 Faulty	ALARM
11/11/2023 16:12:22:015	KENTEN_150KV/A_150KV/3.DHL.TIAP1 - 1/21/00151	Earth Fault In-1	TRIP
11/11/2023 16:12:21:009	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 1/21/00151	Distance Zone 1 Phase 5	TRIP
11/11/2023 16:12:21:009	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 1/21/00151	Distance Zone 1 Phase 8	Alarm
11/11/2023 16:12:21:009	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 1/21/00151	Distance Zone 1	Alarm
11/11/2023 16:12:21:009	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 1/21/00151	Tripp On Reclose	Alarm
11/11/2023 16:12:21:009	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 1/21/00151	Telemetry Transmitted	Alarm
11/11/2023 16:12:20:997	KENTEN_150KV/A_150KV/9.DHL.TIAP1 - 2/ALARM.BAY	Bay Fault Alarm	ALARM
11/11/2023 16:12:18:879	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 1/21/00151	Telemetry Received	Alarm
11/11/2023 16:12:13:985	KENTEN_150KV/A_150KV/8.DHL.TIAP1 - 1/ALARM.CB	Q50 CB Prot. Motor Switch MCB Trip	TRIP
11/11/2023 16:12:13:985	KENTEN_150KV/A_150KV/9.DHL.TIAP1 - 2/ALARM.CB	Q50 CB Prot. Motor Switch MCB Trip	TRIP
11/11/2023 16:12:10:603	KENTEN_150KV/A_150KV/9.DHL.TIAP1 - 2/21/00151	Q50 CB Spring Discharge	OPERATED
11/11/2023 16:12:10:603	KENTEN_150KV/A_150KV/9.DHL.TIAP1 - 2/21/00151	Tripp On Reclose	Alarm
11/11/2023 16:12:10:603	KENTEN_150KV/A_150KV/9.DHL.TIAP1 - 2/21/00151	Telemetry Transmitted	Alarm
11/11/2023 16:12:10:603	KENTEN_150KV/A_150KV/9.DHL.TIAP1 - 2/21/00151	Distance Zone 1 Phase 8	Alarm
11/11/2023 16:12:10:603	KENTEN_150KV/A_150KV/9.DHL.TIAP1 - 2/21/00151	Distance Zone 1	Alarm
11/11/2023 16:12:10:603	KENTEN_150KV/A_150KV/9.DHL.TIAP1 - 2/21/00151	Q50 CB STATUS	ALARM
11/11/2023 16:12:09:536	KENTEN_150KV/A_150KV/9.DHL.TIAP1 - 2/21/00151	Telemetry Received	Alarm
05/11/2023 18:04:27:91262	KENTEN_150KV/20KV Trafo2/0016 CBVROUET/Earth Fault	Earth Fault Trip	ALARM
05/11/2023 18:04:27:91264	KENTEN_150KV/A_150KV/2.DHL.BORANG 2/ALARM.DVCE	PIC Failure	ALARM
05/11/2023 18:04:27:91264	KENTEN_150KV/A_150KV/3.DHL.TIAP1 - 2/ALARM.DVCE	PIC Failure	ALARM
05/11/2023 18:04:27:91264	KENTEN_150KV/A_150KV/3.DHL.TIAP1 - 2/ALARM.DVCE	PIC Failure	ALARM
05/11/2023 18:04:27:91264	KENTEN_150KV/A_150KV/2.DHL.BORANG 2/ALARM.DVCE	PIC Failure	ALARM
05/11/2023 18:04:27:91264	KENTEN_150KV/A_150KV/2.DHL.BORANG 2/ALARM.DVCE	PIC Failure	ALARM
05/11/2023 18:04:27:91264	KENTEN_150KV/A_150KV/2.DHL.BORANG 2/ALARM.DVCE	PIC Failure	ALARM
05/11/2023 18:04:27:91			

Jurnal Energi dan Ketenagalistrikan | 138

Untuk memastikan bahwa tower ERS T.40 line 2 lebih dulu roboh, kemudian dicocokkan data laporan gangguan dari ULTG status FL (*fault location*) dengan panjang span aktual di dokumen STP (serah terima proyek) dan hasil plotting pengukuran tower dari PLN Unit Induk Pembangunan Sumatera Bagian Selatan. Diketahui bahwa pada data laporan gangguan ULTG, titik gangguan berada 12,74 km dari GI 150 kV Kenten, sedangkan berdasarkan data span aktual plotting tower, lokasi T.40 berada 12,5 km dari GI 150 kV Kenten (Gambar 10). Terdapat deviasi jarak sejauh 240 meter. Hal ini membuktikan bahwa tower ERS T.40 lebih dulu roboh.

Dari keseluruhan rangkaian investigasi lapangan, diperoleh kesimpulan bahwa tower ERS T.40 Line 2 roboh lebih dulu, kemudian menarik tower T.41-T.45 sampai roboh pada saat terjadi hujan deras dan angin kencang di tanggal 11 November 2023. Kemudian untuk membuktikan bahwa T.41-T.45 roboh karena tertarik oleh robohnya tower ERS T.40 line 2, akan dijelaskan pada subbab Kalkulasi dan Simulasi.



Gambar 10. Layout T.41 – T.45 SUTT 150 kV Kenten – Tanjung Api-Api

3.6. Kalkulasi dan Simulasi

Perhitungan dilakukan berdasarkan SPLN T.5.014-1: 2021 kriteria desain saluran udara tegangan tinggi dan saluran udara tegangan ekstra tinggi bagian 1. Sesuai SPLN, desain tipe tower Aa menggunakan sudut belok jalur maksimum 3° [12], dan sesuai data lapangan ketika konduktor dan *earth wire* line 2 dipindahkan ke tower ERS T.40 menyebabkan penambahan sudut belok jalur menjadi 5,9°.

Perhitungan beban transversal (F_y), menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$PW_{oc} = n_c \cdot W_{ts} \cdot d_c \cdot PW_c \quad (1)$$

Dimana:

PW_{oc} = Beban transversal di konduktor akibat tekanan angin pada kondisi normal (kN)

n_c = Jumlah konduktor

W_{ts} = *Weight span* (m)

d_c = Diameter konduktor (m²)

PW_c = Tekanan angin pada konduktor (kg/m²)

$$PW_{oi} = A_i \cdot PW_i \quad (2)$$

Dimana:

PW_{oi} = Beban transversal di isolator akibat tekanan angin pada kondisi normal (kN)

A_i = Luasan area isolator yang terkena tekanan angin (m^2)

PW_i = Tekanan angin pada isolator (kg/m^2)

$$P_{aL} = n_c \cdot \frac{1}{2} \alpha \cdot MW_{tc} \quad (3)$$

Dimana:

P_{aL} = *Line angle* (kN)

n_c = Jumlah konduktor

α = Sudut belok ($^\circ$)

MW_{tc} = Tarikan kerja konduktor maksimum (kN)

Diketahui bahwa konduktor yang digunakan pada jalur SUTT 150 kV Kenten – Tanjung Api-Api adalah 2xACSR 340/55 mm^2 . Kemudian diperoleh hasil perhitungan beban transversal tower pada kondisi normal (Tabel 1) dan perhitungan beban transversal pada kondisi abnormal (Tabel 2), sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Kalkulasi Beban Transversal Tower Normal (sudut 3°)

Parameter	Hasil (kN)
PW_{oc}	9,23
PW_{oi}	1,06
P_{aL}	2,88
Total	13,17

Tabel 2. Hasil Kalkulasi Beban Transversal Tower T.41 (sudut $5,9^\circ$)

Parameter	Hasil (kN)
PW_{oc}	7,25
PW_{oi}	1,06
P_{aL}	5,66
Total	13,97

Penambahan sudut belok jalur menjadi $5,9^\circ$ menyebabkan penambahan beban transversal (F_y) tower di T.41 sebesar 6,12%.

Dilakukan simulasi beban longitudinal (F_x) akibat tarikan tower ERS T.40 line 2 (Tabel 4). Sesuai SPLN (Tabel 3), beban tarikan kawat (konduktor dan *earth wire*) putus pada tower dua sirkit disyaratkan kombinasi dua kawat putus. Perhitungan kombinasi beban (*loading tree*) untuk tower dua sirkit menggunakan kombinasi pembebanan dua kawat putus (kombinasi antara *earth wire* dan konduktor atau kombinasi dua konduktor) [16]. Saat tower ERS T.40 line 2 roboh, tiga konduktor dan *earth wire* pada line 2 menarik tower T.41 secara bersamaan sehingga kombinasi tarikan kawat yang terjadi melampaui yang disyaratkan SPLN.

Tabel 3. Kombinasi Kawat Putus Sesuai SPLN T.5.014-1: 2021

No.	Jumlah Sirkit	Kombinasi Kawat Putus
1.	Satu sirkit	Satu kawat putus
2.	Dua sirkit	Dua kawat putus
3.	Lebih dari dua sirkit	1/3 dari jumlah fasa konduktor

Perhitungan beban longitudinal (F_x), menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$PS_c = 60\% \cdot \cos \alpha \cdot MW_{tc} \quad (4)$$

Dimana:

PS_c = Beban longitudinal konduktor (kN)

α = sudut belok minimum ($^\circ$)

MW_{tc} = Tarikan kerja konduktor maksimum (kN)

$$PS_{ew} = 60\% \cdot \cos \alpha \cdot MW_{tc} \quad (5)$$

Dimana:

PS_{ew} = Beban longitudinal *earth wire* (kN)

α = sudut belok minimum ($^\circ$)

MW_{tc} = Tarikan kerja konduktor maksimum (kN)

Beban longitudinal yang bekerja pada tower T.41 sebagai berikut:

Parameter	Hasil (kN)
PS_c	32,98
PS_{ew}	8,24

Beban kombinasi maksimum akibat dua kawat putus (beban longitudinal) sesuai SPLN:

$$F_x = 2 \times 32,98 \text{ kN} = 65,96 \text{ kN}$$

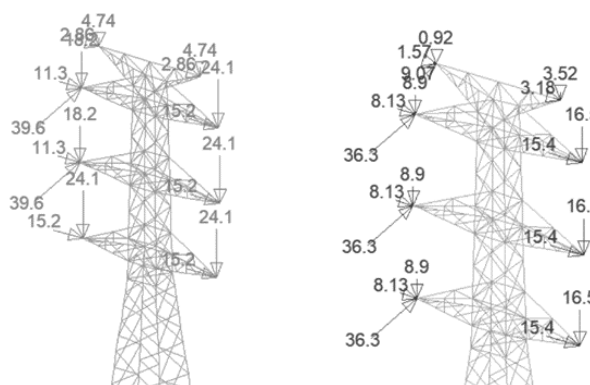
Saat tower ERS T.40 line 2 roboh, total beban tarikan (beban longitudinal) yang terjadi:

$$F_x = (1 \times 8,24) + (3 \times 32,98)$$

$$F_x = 107,18 \text{ kN}$$

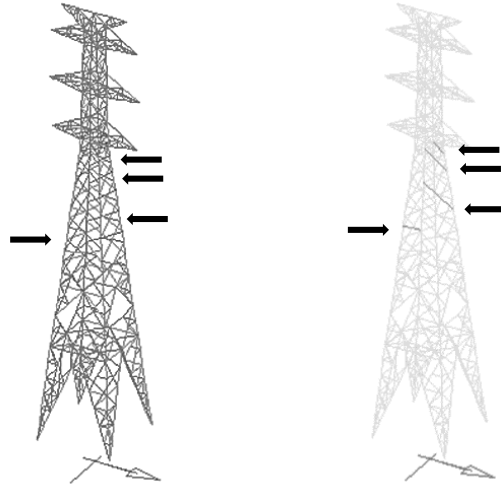
Terjadi penambahan beban longitudinal (F_x) sebesar 162,5%, beban tersebut mengakibatkan tower *collapsed* atau roboh karena $F_x > 100\%$.

Kemudian dilakukan simulasi perhitungan menggunakan program MSTower sesuai kondisi aktual T.41 akibat tarikan tower ERS T.40 line 2, dimana terdapat penambahan beban transversal (F_y) dan penambahan jumlah kawat putus (tarikan kawat tower ERS T.40 line 2). Simulasi menunjukkan terdapat empat member tower yang mengalami *over stress* (*stress ratio* > 1) sehingga menyebabkan *failed* pada tower T.41 (gambar 11 dan gambar 12).

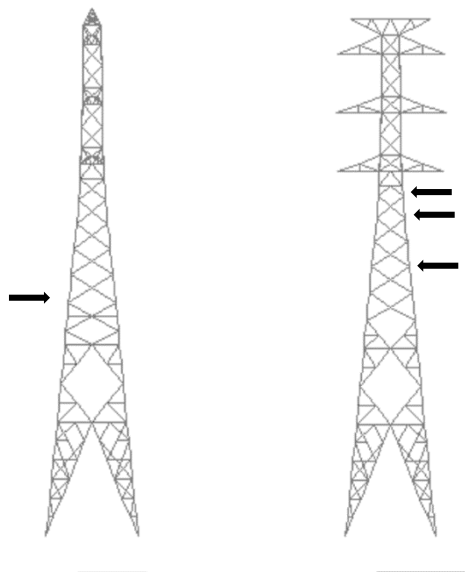


Gambar 11. Kiri: *Loading tree* T.41 pada kondisi normal; Kanan: *Loading tree* T.41 akibat tarikan tower ERS T.40 line 2.

Perhitungan desain tower dengan *loading tree* akibat tarikan kawat tower ERS T.40 line 2, dengan hasil terdapat member dengan *stress ratio* >1 pada *common body* III dan *common body* IV tower T.41 (gambar 12 dan gambar 13).



Gambar 12. Kiri: Member dengan *stress ratio* >1 di T.41; Kanan: Diketahui terdapat empat member *failed*.



Gambar 13. Kiri: Tampak samping terdapat satu member *failed*; Kanan: Tampak depan terdapat tiga member *failed*.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dengan memperhatikan rangkaian hasil investigasi lapangan dan perhitungan dalam simulasi, diperoleh kesimpulan bahwa line 2 lebih dulu trip, yang mengindikasikan bahwa tower ERS T.40 line 2 roboh lebih dulu, kemudian menarik tower T.41, T.42, T.43, T.44 dan T.45 sampai roboh pada saat terjadi hujan deras dan angin kencang di tanggal 11 November 2023. Saran yang dapat diberikan terhadap sisi pengoperasian dan pemeliharaan jalur transmisi adalah pada proses *recovery* jalur terdampak, agar tidak terlalu lama menggunakan tower ERS untuk pengoperasian jalur transmisi, terutama untuk jalur *backbone* sistem.

Penelitian selanjutnya dapat dilakukan untuk menghitung nilai kerugian secara finansial terhadap padamnya jalur *backbone* 150 kV Sumatera – Bangka setelah kejadian tower roboh hingga proses *recovery* selesai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada pihak PLN UIP SBS, PLN UPP SBS 1, PLN PUSMANPRO, serta pihak lainnya yang tidak dapat kami sebutkan satu per satu yang telah mendukung penuh proses penulisan hasil penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Albermani, S. Kitipornchai, and R. W. K. Chan, "Failure analysis of transmission towers," *Eng Fail Anal*, vol. 16, no. 6, pp. 1922–1928, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.engfailanal.2008.10.001.
- [2] N. Prasad Rao, G. M. S. Knight, N. Lakshmanan, and N. R. Iyer, "Investigation of transmission line tower failures," *Eng Fail Anal*, vol. 17, no. 5, pp. 1127–1141, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.engfailanal.2010.01.008.
- [3] L. Tian, Q. Yu, R. Ma, and C. Wang, "The Collapse Analysis of A Transmission Tower Under Wind Excitation," 2014.
- [4] J. Zhang and Q. Xie, "Failure analysis of transmission tower subjected to strong wind load," *J Constr Steel Res*, vol. 160, pp. 271–279, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.05.041.
- [5] X. Fu, W. L. Du, H. N. Li, G. Li, Z. Q. Dong, and L. D. Yang, "Stress state and failure path of a tension tower in a transmission line under multiple loading conditions," *Thin-Walled Structures*, vol. 157, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.tws.2020.107012.
- [6] X. Fu, H. N. Li, and J. Wang, "Failure analysis of a transmission tower subjected to combined wind and rainfall excitations," *Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 28, no. 10, Jul. 2019, doi: 10.1002/tal.1615.
- [7] S. E. Salaam, N. P. Rao, and P. K. Raju, "Failure analysis of transmission line tower subjected to combined wind and dust loads," *Curr Sci*, vol. 121, no. 4, pp. 511–520, Aug. 2021, doi: 10.18520/cs/v121/i4/511-520.
- [8] K. Luo, H. Zhang, Y. Li, and L. Weng, "Collapse Analysis on 500kV Transmission Tower under Combined Action of Typhoon and Microtopography," 2021. doi: 10.1088/1742-6596/2033/1/012197.
- [9] Hong Yu, Halo Li, Zhi-Qiang Zhang, Gui-Feng Zhang, Da-Hai Wang, and Hua-Dong Zheng, "Failure Patterns of Transmission Tower-Line System Caused by Landslide Events," *Energies (Basel)*, pp. 2–17, Sep. 2022.
- [10] C. Klinger, M. Mehdiانpour, D. Klingbeil, D. Bettge, R. Häcker, and W. Baer, "Failure analysis on collapsed towers of overhead electrical lines in the region Münsterland (Germany) 2005," *Eng Fail Anal*, vol. 18, no. 7, pp. 1873–1883, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.engfailanal.2011.07.004.
- [11] N. Prasad Rao, G. M. Samuel Knight, S. Seetharaman, N. Lakshmanan, and N. R. Iyer, "Failure Analysis of Transmission Line Towers," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 25, no. 3, pp. 231–240, Jun. 2011, doi: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000161.
- [12] PT PLN (Persero), *SPLN T.5.014-1: 2021 KRITERIA DESAIN SALURAN UDARA TEGANGAN TINGGI DAN SALURAN UDARA TEGANGAN EKSTRA TINGGI BAGIAN 1: TOWER RANGKA BAJA (LATTICED STEEL TOWER)*. INDONESIA, 2021.

- [13] H. W. Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Bengkulu Jl Supratman Kandang Limun Bengkulu, “Analisa Defleksi Struktur Tower Transmisi Menggunakan Metode Elemen Hingga,” 2012.
- [14] T. J. Wipf, F. Fanous, M. Baenziger, and Y. H. Hahm, “STRUCTURAL FAILURE ANALYSIS OF 345 KV TRANSMISSION LINE,” 1994.
- [15] P. Fisika, F. Sains dan Teknologi, and U. Alauddin Makassar, “Uji Laju Korosi Material Besi Tulangan Struktur Bangunan Dengan Media Air Hujan,” 2022. [Online]. Available: <http://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/sainfis>
- [16] Q. Xie and J. Zhang, “Experimental study on failure modes and retrofitting method of latticed transmission tower,” *Eng Struct*, vol. 226, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111365.