

# MITIGASI KEGAGALAN *INSULATION* UDARA DI ZONA *RIGHT OF WAY (ROW)* PADA KETINGGIAN POHON *PARASERIANTHES-FALCATARIA*

Budi Utama<sup>1</sup>, Oni Yuliani<sup>1</sup>, Trie Handayani<sup>1</sup>

Prodi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Email: [budiutamaduautama@gmail.com](mailto:budiutamaduautama@gmail.com)

## Abstrak

Pemadaman total (*black-out* 04 Agustus 2019) di DKI Jakarta berdampak pada perekonomian keseharian dan terhentinya layanan transportasi public MRT (*Mass Rapid Transit*), serta sistem komunikasi public. Penentuan nilai gradien tegangan utk mengetahui *black-out* ini dilakukan dengan metoda analisis paparan medan listrik di bawah Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV pada span tower nomor: T.434 dan T.435 di dusun Malon, desa Gunung-Pati, Kec. Gunung-Pati, Semarang, Jawa-Tengah. Analisis dilakukan secara simulasi dengan menggunakan perangkat (pemogram) Matlab dan dengan menyelesaikan model persamaan simultans yang bersesuaian dengan sistem konfigurasi menara dan jumlah konduktor. Hasil simulasi menunjukkan bahwa telah terjadi kegagalan an *insulation* udara antara konduktor fasa dan pepohonan Sengon (*Paraserianthes-Falcataria*) pada angka gradien tegangan sebesar 32 448.10 kV/m, 66 861.13 kV/m, 33 129.75 kV/m untuk lateral distance 10 m, 12 m, dan 14 m dari poros tower T.434 dan T.435.

**Kata Kunci:** Mitigasi, ROW, *Paraserianthes-Falcataria*, Transmisi-lines.

## Abstract

Total blackouts (on August 04, 2019) in the Special Capital Region of Jakarta have an impact to daily the economy and the cessation of MRT (*Mass Rapid Transit*) public transportation services, as well as public communication systems. The determination of the value of the voltage gradient for knowing of the *black-out* was used the method of analyses to the exposure of the electric fields under the Extra High Voltage (EHV) transmission lines 500 kV, at the span of the tower T.434 and T.435 in Malon hamlet, Gunung-Pati village, districts of Gunung-Pati, Semarang city - central Java. The analysis of the electric field exposed has been carried out in a simulation using a Matlab software by solving the simultaneous equations model that corresponding to the tower configuration system and how many conductors were used. The results of the simulation showed that there was a failure of air *insulation* between phase conductors and the trees of Sengon (*Paraserianthes-Falcataria*) at a value of voltage gradient of 32 448.10 kV / m, 66 861.13 kV / m, and 33 129.75 kV / m, each were for the lateral distance of 10 m, 12 m, and 14 m from the tower axis T.434 and T.435.

**Keywords:** Mitigation, ROW, *Paraserianthes-Falcataria*, Transmission-lines

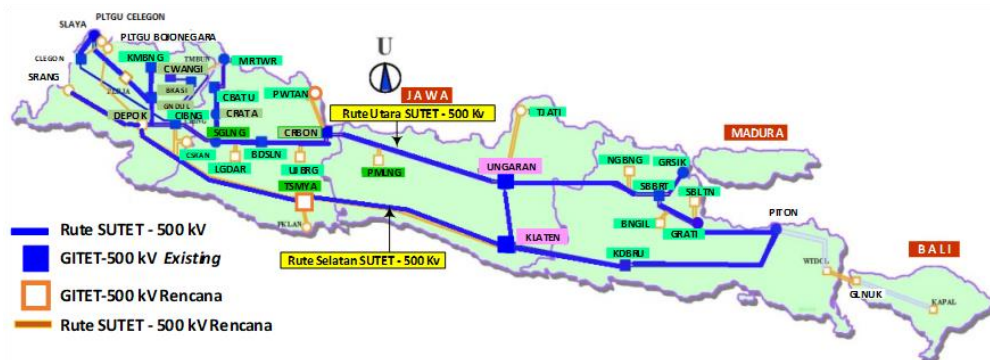
## 1. Pendahuluan

Rute Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV, 50 Hz di pulau Jawa merupakan sistem transmisi kelistrikan yang membentang dari sisi Barat pulau Jawa hingga ke sisi Timur pulau Jawa. Rute SUTET 500 kV di pulau Jawa ada dua bagian: bagian rute jalur Selatan dan rute jalur Utara. Setiap rute mempunyai saluran ganda dimana satu saluran beroperasi dan satu saluran lainnya untuk cadangan (ketika saluran yang satunya dlm pemeliharaan/*maintenance*). Gambar 1 menunjukkan rute SUTET-500 kV yang melintas bagian Utara dan Selatan pulau Jawa.

Di bawah jaringan (di permukaan tanah) SUTET terpapar (*exposed*) medan elektromagnetik yaitu paparan medan magnet dan paparan medan listrik yang menembus medium dielektrik udara. Kekuatan dielektrik udara ini dibatasi oleh gradien tegangan atau intensitas medan listrik sebesar 32 kV/mm atau sama dengan  $(32 \times 10^3)$  kV/m. Kondisi kekuatan dielektrik udara ini harus dijaga jangan sampai terjadi tembus (*breakdown*) pada medium udara. Fenomena tembus pada medium udara ini diindikasikan ketika nilai gradien tegangan melebihi angka  $(32 \times 10^3)$  kV/m.

Konduktor fasa SUTET mempunyai jarak celah udara dengan permukaan tanah (bumi) yang harus dijaga jangan sampai celah ini menjadi mengecil yang dikarenakan oleh kehadiran objek-objek tertentu yang berada di bawah SUTET. Konduktor SUTET ini menghasilkan medan listrik jenis *Quasi Static* dan membentuk pola medan yang tak homogen (jadi bukan medan listrik yang homogen). Medan listrik yang ditimbulkan oleh konduktor fasa SUTET berbanding lurus dengan kerapatan fluks listrik dan

berbanding terbalik dengan angka *permissivity* dari medium yang dilalui. Dalam hal ini medium adalah udara murni, namun ketika terjadi kabut air halus maka akan terjadi nilai *permissivity* gabungan antara butir-butir halus dari air dan udara disekitarnya.



Gambar 1. Rute SUTET-500 kV pulau Jawa

Ada satu rute yang menghubungkan rute jalur Utara dengan jalur Selatan yaitu SUTET-500 kV dari Klaten – Ungaran – Pemalang dan terhubung ke jalur Utara (Gambar 1). Unit Pembangkit (UP) yang berada pada skala Mega watt yang besar, seperti yang ada di Jakarta Utara: PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap) Muara Karang bekerja secara komplementer terhadap pasokan daya ke pipa besar SUTET-500 kV Jawa-Bali. Unit Pembangkit ini berfungsi untuk saling mengimbangi, saling mengisi dan saling melengkapi) dalam rangka memenuhi tuntutan sistem beban yang pada dasarnya meliputi tiga hal, yaitu: kehandalan, keamanan dan ekonomis. Pusat listrik baik tenaga Gas dan Uap maupun air mengemban misi ekonomi, sehingga pusat listrik yang ada bertugas untuk menjaga stabilitas dan keandalan sistem se Jawa-Bali.

Pasokan listrik Jakarta 30 %-nya dipasok dari Unit Pembangkit (UP) Muara Karang (MKR), Jakarta Utara dan terinterkoneksi dengan sistem Jawa-Bali melalui SUTET-500 kV. UP Muara Karang ini memiliki total kapasitas 1 600 Mega-watt (MW) yang disuplai dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap 4-5 (PLTU 4-5), Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap blok I (PLTGU Blok I) dan PLTGU Blok II sehingga total daya listrik yang dapat dibangkitkan sebesar 1 600 MW. Hingga saat ini UP MKR dalam proses pembangunan PLTGU Blok III berkapasitas 500 MW dan akan masuk ke pipa besar SUTET-500 kV tahun 2020. Saat ini kebutuhan tenaga listrik di DKI Jakarta sebesar kurang lebih 5 500 MW dan 30 %-nya di pasok dari Muara Karang, Jakarta Utara dan sisanya dipasok dari UP yang berada di Jawa Timur melalui SUTET-500 kV.

Unit Pembangkit MKR ini berperan sangat penting (*very very important person*) dalam kelistrikan di Jawa, khususnya DKI- Jakarta. Istana Negara mendapat suplai tenaga listrik dari UP-MKR dan tempat-tempat *Very Very Important Person* (VVIP) lainnya, seperti Gedung MPR/DPR, Bandara Soekarno-Hatta, Bandara Halim Perdana Kusuma, stasiun MRT, dll. Untuk mendukung kelistrikan di sistem Jawa-Bali, unit induk Pembangkit Tanjung Jati B menargetkan pembangunan PLTU Tanjung Jati B unit 5 dan 6 dengan total kapasitas ( $2 \times 1\,000$  MW) dan akan dirampungkan di tahun 2021.

Aspek Medan listrik yang terpapar di bawah oleh SUTET juga mempengaruhi kehandalan penyaluran energi listrik Jawa – Bali. Karena paparan intensitas medan listrik yang melebihi kekuatan dielektrik medium udara akan menimbulkan fenomena tembus udara (*breakdown*). Medan listrik berbanding terbalik dengan jarak suatu titik tertentu dimana angka medan listriknya akan dihitung. Semakin dekat suatu titik dengan konduktor fasa yang bertegangan 500 kV maka akan semakin besar medan listrik yang ditimbulkan apabila titik ini berada dipermukaan dan membuat jarak sedemikian kecilnya dengan permukaan konduktor maka medan listrik di permukaan konduktornya dapat dijadikan indikasi kapan suatu fenomena *corona* akan muncul.

Terjadi pemadaman (*black out*) listrik pada hari Minggu, 04 Agustus 2019, sekitar jam 11:50 WIB dimana kota Banten, DKI Jakarta, Bekasi dan sebagian kecil Jawa Barat, mengalami padam total. Skala pemadaman ini adalah yang terbesar dalam sistem interkoneksi Jawa-Bali sejak 2005 TU (Tarikh Umum). Pada 18 Agustus 2005 TU juga terjadi padam listrik massif yang berdampak pada 120 juta orang. Hanya saja durasi pemadamannya terbatas selama 3 jam. Padam listrik massif yang jauh lebih besar, karena meliputi segenap Jawa-Bali, terjadi pada 17 Agustus 1991 TU malam. Durasinya juga selama 3 jam. Hanya di daerah-daerah dimana terdapat pasokan listrik lokal dan tak bergantung pada pasokan PLTU Suralaya saja

yang tak terpengaruh. Padam listrik massif berikutnya terjadi pada 13 April 1997 TU yang berlangsung selama 10 jam.

Insiden *black out* yang terjadi pada hari Minggu, 04 Agustus 2019 berawal dari SUTET-500 kV pada rute: Ungaran – Pemalang. Gangguan pada SUTET Ungaran – Pemalang membuat tegangan listrik di dua sirkuit tersebut turun drastis, yang kerap disebut dengan istilah N minus 2. Kemudian, turunnya nilai tegangan juga mempengaruhi sirkuit Depok – Tasikmalaya yang sedang berstatus N minus 1 (karena ada pemeliharaan 1 sirkuit), sehingga kejadiannya menimbulkan N minus 3 yang berarti terdapat tiga SUTET padam secara serentak. Pemadaman bermula pada pukul 11:45 detik ke 09 karena terdapat gangguan di Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 KV Ungaran – Pemalang pada sirkuit 1. Selanjutnya, pukul 11.45 WIB detik ke-27, SUTET Ungaran – Pemalang terjadi gangguan pada sirkuit 1, kemudian disusul pada sirkuit 2. Akibatnya terjadi penurunan tegangan yang menyebabkan jaringan SUTET Depok dan Tasikmalaya mengalami gangguan. Akhirnya pada pukul 11:48 detik ke 11, daerah Jawa Barat dan DKI Jakarta padam secara serentak. Padam pada wilayah DKI Jakarta karena Unit Pembangkit (UP) pada PLTGU unit 1 sampai dengan unit 6 melepaskan diri dari SUTET-500 kV karena UP tsb merasakan gangguan penurunan frekuensi operasional 50 Hz menjadi 46 Hz pada generatornya. Dengan demikian rele pada UP ber-*action* untuk penyelamatan unit unit generatornya dari dampak gangguan di rute SUTET-500 kV Ungaran – Pemalang, pada *span tower* nomor: T.434 dan T.435.

Unsur (*agent*) yang dapat memicu kenaikan intensitas medan listrik adalah variabel tegangan yang diterapkan pada konduktor SUTET. Sedang variabel arus (listrik) dapat menimbulkan medan magnet. Ini berarti nilai tegangan dapat menimbulkan besar kecilnya intensitas medan listrik. Di dalam fenomena gangguan tegangan lebih adalah besarnya tegangan yang ada pada jaringan listrik melebihi tegangan nominal, yang diakibatkan oleh beberapa hal antara lain: 1). Sistem jaringan merasakan ada penurunan beban atau jaringan merasakan kehilangan pembebanan secara tiba tiba ini disebabkan oleh proses *switching* karena gangguan atau disebabkan oleh manuever lebih lanjut kondisi ini akan berakibat pada putaran rotor generator menjadi sangat cepat (*over speed*); 2). Terjadi gangguan pada instrument pengatur tegangan yaitu pada *Automatic Voltage Regulator*, (AVR), di generator atau di perubah tap beban transformer (*on load Tap Changer Transformer*); 3). Pemunculan gelombang tegangan surja petir (*lightning surge*) atau surja hubung (*switching surge*).

Ketiga fenomena diatas akan menimbulkan tegangan lebih pada jaringan dan berdampak pada kekuatan *insulation* udara antar/disekitar konduktor fasa pada jaringan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi saluran transmisi. Apabila dalam fenomena ini terjadi kondisi dimana kekuatan dielektrik udara akan dilampaui oleh kenaikan intensitas medan listrik (karena terjadi ‘tegangan lebih transien sangat cepat’ (*Vary Fast Transient Overvoltages*, VFTO) maka di sekitar konduktor akan muncul tembus listrik (*break down*) pada medium udara disekitar jaringan SUTET-nya dan lewat denyar (*flashover*) pada menara/tiang transmisinya. Dengan kejadian peristiwa seperti ini maka di setiap stasiun pembangkit rele proteksi akan beraksi untuk menyelamatkan unit unit generator yang ada di stasiun pembangkit tersebut.

*Vary Fast Transient Overvoltages* (VFTO) adalah suatu gangguan disebabkan oleh pengoperasian *Disconnecting Switch* (DS) pada gardu induk yang menggunakan gas *Sulfur Hexafluoride* (SF6) atau *Gas Insulated Substations*, GIS. VFTO ini mengandung komponen frekuensi sangat tinggi dalam order beberapa puluhan Mega Hertz (MHz) dan dapat juga menyebabkan osilasi frekuensi tinggi di dalam belitan transformator, mengarah kemungkinan terjadi tekanan listrik lebih (*overstressing*) pada media *insulation* transformator [1]. Jadi dapat diringkaskan bahwa dampak pemunculan VFTO ini adalah dapat membuat terjadi tegangan lebih pada sistem yang bersangkutan. Ketika terjadi tegangan lebih pada Gardu induk maka akan diikuti juga terjadi tegangan lebih di SUTET-nya. Selanjutnya, tegangan lebih pada SUTET akan menaikkan medan listrik di bawah Jaringan SUTET, medan listrik ini terpapar (*exposure*) di bagian bawah SUTET atau di permukaan tanah (bumi).

Pada operasi normal SUTET-500 kV akan menghasilkan paparan medan listrik yang bersesuaian dengan *Right of Way* (ROW) yang telah ditentukan. Akan tetapi jika terjadi gangguan yang bersifat dapat menaikkan tegangan maka paparan medan listrik di permukaan tanah juga akan meningkat intensitasnya. Bagi negara dengan kepadatan populasi tinggi desain struktur sistem tenaga pada Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi diperlukan dari titik pandang tidak hanya pada aspek efisiensi pemanfaatan lahan yang tersedia namun juga pada keharmonisan lingkungan (*environmental harmonization*). Hal yang terkait dengan lingkungan /lahan yang dilewati oleh SUTET-500 kV adalah zona/kawasan ‘ruang bebas’ (*Righ of Way*, ROW) yang ada di bawah SUTET. Ruang bebas ini sudah diatur berdasarkan keputusan Menteri Pertambangan dan Energi No. 975/471/mpe/1999 - 11 Mei 1999, *juncto* Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi 01.p/47 /mpe/1992 [2], selanjutnya diadakan perubahan melalui permen ESDM nomor 18 tahun 2015 [3], dan permen nomor 02 tahun 2019 [4].

Menurut pedoman Asosiasi Perlindungan Radiasi Internasional (*International Radiation Protection Association, IRPA*) [5] [6], batas paparan adalah 10 kV/m-rms selama seluruh hari kerja dan 30 kV/m selama waktu singkat, baik untuk paparan pekerjaan maupun 5 kV/m secara terus menerus dan 10 kV/m untuk selama beberapa jam per hari, maupun untuk masyarakat umum. Medan listrik yang terpapar (*exposed*) di atas permukaan tanah akan berinteraksi dengan medium yang dilewatinya dengan nilai *permittivity* medium sebagai kekuatan dielektriknya yang diukur dengan satuan (kV/mm). Hubungan antara medan listrik yang terpapar dan kerapatan fluks listrik yang dihasilkan oleh konduktor SUTET adalah  $E = (D/\epsilon)$ , dimana  $E$  adalah medan listrik (kV/m),  $D$  adalah kerapatan fluks listrik ( $C/m^2$ ) dan  $\epsilon$  adalah *permittivity* dari medium [6]. Pengoperasian yang aman dan stabil untuk *insulator* pada Gardu Induk yang menggunakan gas (*Gas Insulated Substation*) bergantung pada distribusi dari intensitas medan listrik disekitar *insulator* khususnya di bawah tegangan impuls. Sementara itu, dalam hal tegangan impuls *switching* juga dapat menghasilkan tegangan yang sangat tinggi dalam waktu yang singkat. Hal ini dapat menyebabkan kegagalan *insulation* [7]. Ini berarti terjadi fluktuasi tegangan yang semakin tinggi dan menghasilkan medan listrik yang tinggi juga, sehingga dapat menyebabkan terjadinya tembus listrik (*breakdown*) pada medium dielektriknya dan menyebabkan terjadi kegagalan media *insulation*. Kegagalan *insulation* dapat terjadi jika intensitas medan listriknya semakin membesar sampai melampaui kekuatan dielektrik dari bahan / medium *insulation*. Sedangkan jarak (dalam satuan panjang) antara sumber yang mengeluarkan medan listrik dan objek yang terinvansi oleh medan listrik juga memainkan peranan penting dalam hal kejadian kegagalan *insulation*. Tegangan lebih transien karena *switching* pemutus sirkuit (*circuit breaker*) dapat terjadi jika kondisi tertentu mengenai tata letak sistem dan jenis operasi *switching* terpenuhi [8]. Pemunculan tegangan lebih *very fast front transient* (VFFT) sebagai akibat dari efek induksi sebuah sambaran petir dapat juga terjadi pada unit instalasi pembangkit *photovoltaic* [9].

Persyaratan untuk peningkatan keandalan perangkat daya listrik dan optimalisasi desain isolasi dielektrik dari medium udara sangat berarti oleh karena itu analisis dampak akibat tegangan lebih adalah sangat penting. Analisis ini juga harus mempertimbangkan penyebaran tegangan lebih yang ditransfer melalui gulungan transformator daya dari suatu gardu induk ke bagian lain dari jaringan listrik umpamanya pada Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi. Suatu investigasi yang telah dikerjakan, dapat diketahui bahwa pada konfigurasi yang dipilih dari tegangan menengah dan pada jaringan tegangan rendah sistem isolasi transformator dan jalur bertegangan rendah serta perangkat listriknya dapat menjadi sasaran tegangan lebih dengan nilai ‘maksimal besar’ yang ditransfer melalui transformator distribusi [10]. Oleh karena itu, sangat penting untuk meningkatkan perlindungan tegangan lebih di jaringan tegangan rendah.

Pada deskripsi di atas ada beberapa hal yang dapat diinventarisir bahwa fenomena tegangan lebih yang terjadi di Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) maupun di Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET), Jaringan Tegangan Menengah (JTM), dan pada Jaringan Tegangan Rendah (JTR) serta, di kawasan pembangkit *photovoltaic* (*Plant Photovoltaic*) yang tervisualisasi dalam bentuk ‘tegangan lebih transien yang sangat cepat’ (*very fast transient overvoltage, VFTO*) dan dalam bentuk “tegangan lebih dengan muka gelombang transien yang sangat cepat” (*very fast front transient overvoltage, VFFTO*) bahwa insiden ini dapat merambat luas ke pemasok (*feeder*) lainnya. Peningkatan nilai pada variabel tegangan di atas nilai tegangan nominal sistem SUTET juga diikuti dengan kenaikan paparan (*exposure*) intensitas medan listrik di bawah saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) yang akan menggeser nilai/batasan kawasan “*Right of Way*” yang sebelumnya telah ditetapkan dan bersesuaian dengan tegangan operasional SUTET-nya.

Tulisan ini akan menguji seberapa besar tegangan lebih yang dapat menimbulkan paparan medan listrik di bawah Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi sehingga terjadi tembus listrik (*breakdown*) dan seberapa besar perubahan kawasan “ruang bebas” (*Right of Way*) ketika terjadi fenomena VFTO dan VFFTO, dan juga akan menguji seberapa besar paparan medan listrik secara “bentang samping” (*lateral distance*) yang terpapar (*exposed*) pada pepohonan tinggi di bawah Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) ketika terjadi VFTO / VFFTO dan Tegangan impuls pascasambaran petir.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Rute SUTET-500 kV

Konfigurasi konduktor SUTET 500 kV menggunakan *tower* dengan konfigurasi horizontal dan konfigurasi vertikal, rangkaian tunggal dan ganda (*single circuit* dan *double circuit*). Sedangkan konfigurasi untuk rute “Klaten – Ungaran – Pemalang” menggunakan konfigurasi *tower* horizontal dengan dua *line*.



**Gambar 2.** Span tower 434 – 435, Konfigurasi Horizontal, dengan Tower Ganda

Dua *line* ini terdiri dari: satu *line* beroperasi dan satu *line* lagi digunakan untuk cadangan ketika satu *line* lainnya sedang dalam proses pemeliharaan (*maintenance*). Rute yang dilalui berupa kawasan perumahan penduduk, persawahan, pepohonan dengan ketinggian rendah, sedang dan pohon tinggi, lapangan terbuka, dan perlintasan jalan raya / kereta api. Khusus di rute: Klaten – Ungaran – Pemalang yang banyak dilalui / dilintasi adalah pepohonan Sengon dengan ketinggian: sedang dan tinggi.

## 2.2 Tembus Listrik (*breakdown*)

Pada Tower 434 – 435, berkonfigurasi horizontal, telah terjadi tembus listrik (*breakdown*) pada *insulation* dielektrik medium udara. Tower 434 – 435 ini terletak di wilayah dusun Malon, Desa Gunung pati, Kecamatan Gunungpati, kota Semarang. *Span* antara tower 434 dan tower 435 media dielektriknya adalah udara yang mempunyai “kekuatan dielektrik” sebesar 3.000 Volt/mm atau 3 kV/mm. Kondisi ‘tembus listrik’ ini menunjukkan bahwa medan listrik pada media udara antara tower 434 dan tower 435 sudah melampaui angka 3 000 Volt/mm atau 3 000 kV/meter. Pada fenomena seperti ini maka akan timbul busur api listrik yang menyerupai ‘lidah petir’ (dalam konsep teori sambaran petir ‘lidah petir’ ini disebut sebagai *stepped leader* atau ‘lidah lompat’). *Agent* (unsur) yang dapat menaikkan nilai medan listrik ini adalah besar an tegangan yang ada pada konduktor saluran udara tegangan ekstra tinggi. Tegangan operasional SUTET sebesar 500 kV, nilai tegangan ini dapat melonjak naik jika mengalami anomali tegangan akibat dampak gangguan eksternal maupun internal. Gambar 3 mengilustrasikan urutan *stage* beberapa detik sebelum terjadi *black out* yang diakibatkan oleh kegagalan *insulation* medium udara pada bentangan (*span*) tower SUTET-500 kV nomor: 434 – 435.

Aspek lain yang menstimulus terjadi tembus listrik adalah jarak antara anoda dan elektroda yang mengecil. Dalam hal ini anodanya adalah konduktor konduktor SUTET sedangkan elektrodanya adalah permukaan kontur tanah di bawah konduktor. Jarak ini akan menyempit jika di permukaan tanah itu ada struktur pohon tinggi. Pohon Sengon yang ada di bawah SUTET-500 kV, dusun Malon itu, mempunyai ketinggian antara 7 meter sampai dengan 8.5 meter.



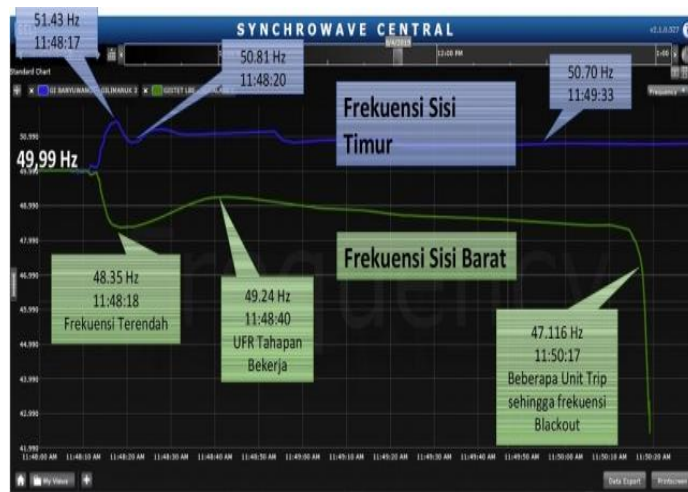
**Gambar 3.** Proses Keterjadian *Black-Out* untuk Kasus Kegagalan *Insulation* Media Udara pada SUTET-500 kV, 50 Hz, *Span* 434 – 435 Dusun Malon, Ds. Gunung pati, Kecamatan Gunung pati – Kota Semarang

Pohon Sengon (latin: *Paraserianthes-Falcataria*) dapat mencapai ketinggian 40 meter, ranting cabangnya dimulai pada ketinggian 20 meter dengan diameter dapat mencapai 1 meter. Usia sebuah pohon Sengon berkisar 0.5 tahun sampai dengan 2.1 tahun dan dapat bertahan hingga 15 tahun pada kondisi iklim tropis. Sesaat pasca-*breakdown* pada (*span* 434 – 435) yang terjadi pada struktur bagian atas ranting pohon Sengon dengan lonjakan arus yang sangat ekstrim tinggi (sekitar: 3000 Amper sampai dengan 4870 Amper), dan diikuti penurunan frekuensi pada sisi Barat (jalur Selatan mencapai 47.116 Hz, sedangkan frekuensi di sisi Timur tetap stabil, sekitar 50.7 Hz sampai dengan 51.43 Hz).



**Gambar 4.** Lokasi *Tower* 434 dan 435 dengan posisi GITET-500 kV Ungaran [11]

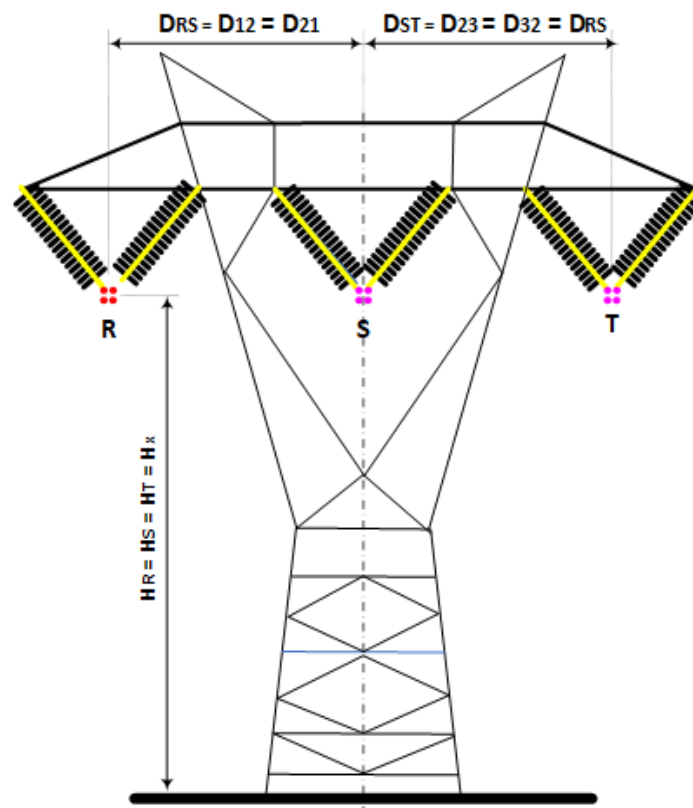
Penurunan frekuensi ini merupakan titik awal menuju terjadi pemadaman massif (*black-out*) di sisi Barat pulau Jawa (yaitu: Banten, DKI Jakarta, Bekasi dan sebagian kecil kawasan Jawa Barat) pada Gambar 4 dan Gambar 5.



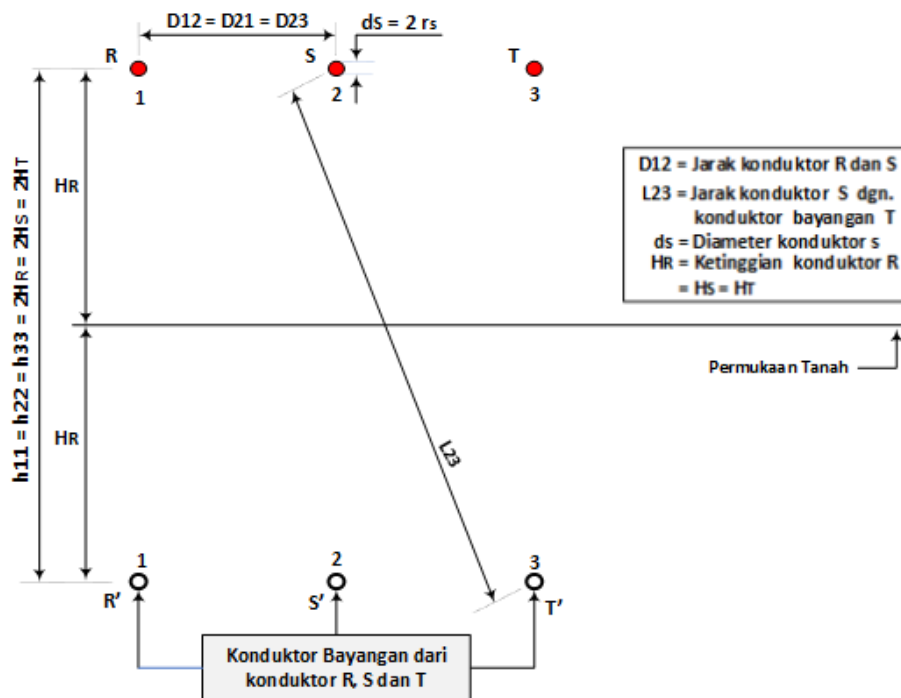
Gambar 5. Fluktuatif frekuensi SUTET-500 kV pada sisi Barat & sisi Timur Pulau Jawa [12]

### 2.3 Konfigurasi Konduktor SUTET 500 kV

SUTET 500 kV yang melintasi dusun Malon, desa Gunung-Pati, Kecamatan Gunung Pati – Semarang pada *span* 434 – 435 mempunyai *tower* dengan konfigurasi horizontal, rangkaian ganda (*double circuit*) sebagaimana ditunjukkan Gambar 6a. Komposisi konfigurasi semacam ini, Gambar 6a, dalam konsep ‘teori bayangan’ (konsep *dipole*) digambarkan seperti Gambar 6b.



Gambar 6 (a). Tower Konfigurasi Horizontal [13]



Gambar 6 (b). Penerapan konsep bayangan (konsep *dipole*) [6] [14]

#### 2.4 Model Persamaan Elektrostatik

Model persamaan elektrostatik untuk SUTET berbentuk matrik yang terdiri dari matriks kolom tegangan  $V$  dan matriks kolom muatan listrik  $Q$  yang ada di konduktor fase, dan sebuah matriks koefisien potensial *Maxwell*. Karena SUTET berupa 3 konduktor fase (R, S, T), Gambar 6b, maka hanya ada 3 nilai tegangan yaitu  $V_1$ ,  $V_2$ , dan  $V_3$ . Ketiga besaran ini membentuk matrik kolom tegangan  $[V]_{(3 \times 1)}$ . Ketika sebuah penghantar konduktor (yang tak berisolasi) diletakkan di atas permukaan tanah setinggi  $H$  meter dan diberi tegangan listrik sebesar  $V$  maka konduktor tersebut terhadap permukaan tanah akan menimbulkan muatan listrik sebesar  $Q$  Coulomb. Besar kecilnya nilai muatan  $Q$  ini bergantung pada magnitude dimensi pola ruang dan konfigurasi jumlah konduktor fase dan kawat tanah udaranya, juga tergantung pada jarak antar konduktor serta ketinggiannya terhadap permukaan tanah. Bentuk pola ruang dan konfigurasi akan menciptakan angka Koeffisien Potensial *Maxwell* yang berbentuk sebagai Matriks koefisien Potensial *Maxwell* (MKPM) dengan ukuran matriknya bergantung dengan jumlah konduktor fase SUTET-nya. Untuk SUTET konfigurasi horizontal, 3 konduktor fase (yaitu : fase R, S, dan fase T) persamaan MKPM-nya adalah berbentuk matriks  $[P]_{(3 \times 3)}$  sebagaimana ditunjukkan persamaan (1) [14][15].

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

atau,

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = [Q_i] = [P]^{-1} \times [V_i] \quad (2)$$

Dengan elemen matriks yang bersesuaian dengan Gambar 6b maka:

$$P_{11} = \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \right) \ln \left( \frac{h_{11}}{r_1} \right) \quad ; \quad P_{23} = \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \right) \ln \left( \frac{L_{23}}{D_{23}} \right) = P_{32}$$



Dengan:  $h_{11}$  = ketinggian konduktor fasa pertama (fasa R) terhadap permukaan tanah;  $r_1$  = jari jari konduktor fasa pertama;  $L_{23}$  = kontribusi garis (lurus) antara konduktor ke dua dengan konduktor bayangan 3 (Gambar 6b);  $D_{23}$  = jarak antara konduktor 2 dan konduktor 3 yang masing masing bukan konduktor bayangannya ;  $P_{11}$  dan  $P_{23}$  = adalah elemen matriks potensial *Maxwell* yang terletak pada baris satu kolom satu ( $P_{11}$ ) dan pada baris dua kolom tiga ( $P_{23}$ ). Sedangkan  $V_1$ ,  $V_2$  dan  $V_3$  adalah besar tegangan *line-to-line* yang diinjeksikan di konduktor fasa 1, fasa 2, dan konduktor fasa 3. Atau dalam bentuk umum,

$$P_{xy} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{L_{xy}}{D_{xy}} = P_{yx} \tag{3}$$

Jari jari utk konduktor *bundle* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4)

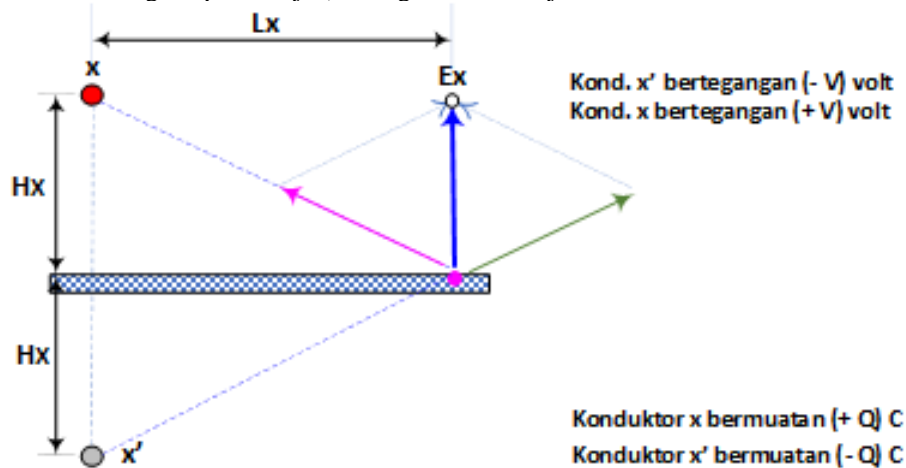
$$d_{eq} = D \sqrt[n]{\frac{n \cdot d}{D}} \tag{4}$$

Dengan D adalah diameter konduktor *bundle*, yaitu diameter sebuah lingkaran yang terletak pada konduktor berkasnya (*subconductor*); n adalah jumlah konduktor berkas dan d adalah diameter konduktor berkas.

Paparan medan listrik di bawah SUTET ditampilkan kearah bentang samping (*lateral distance*) dengan pola bidang (berdimensi dua). Besar nilai gradien tegangan ( $E_x$ ) yang ditimbulkan oleh satu konduktor 'x' yang bertegangan V, setinggi  $H_x$  dari permukaan tanah adalah [15]:

$$E_x = \left( \frac{Q = (q_{rx} + j q_{ix})}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_o} \right) \times \left( \frac{2 H_x}{H_x^2 + L_x^2} \right) \tag{5}$$

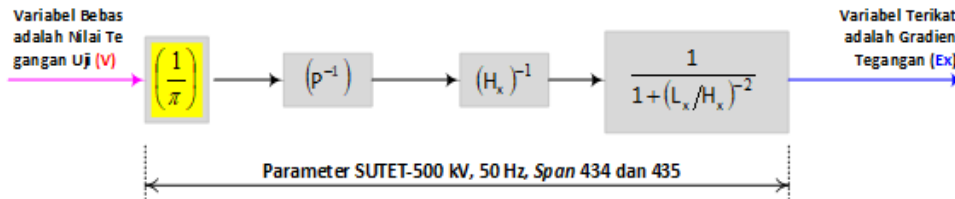
Persamaan (5) bersesuaian dengan Gambar 7, yaitu mengilustrasikan sebuah konduktor x yang berada di atas permukaan tanah dan mempunyai bayangannya x' yang berjarak  $H_x$  di atas permukaan tanah. Konduktor x ini menimbulkan medan listrik sebesar  $E_x$  sejauh  $L_x$  meter dari posisi horizontal dengan konduktor x.  $E_x$  adalah medan listrik total yang merupakan resultansi vector medan kanan dan kirinya (garis panah merah dan garis panah hijau), sebagaimana ditunjukkan Gambar 7.



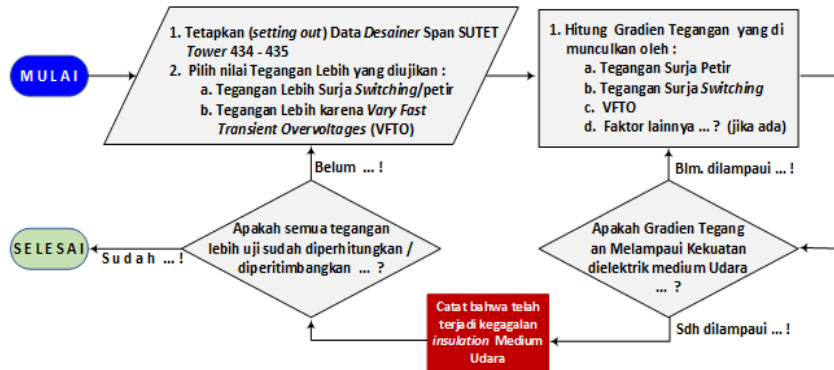
**Gambar 7.** Gradien Tegangan  $E_x$  dipermukaan tanah yang disebabkan oleh konduktor 'x' [15]

**2.5 Model Parameter SUTET**

Model hubungan antara variabel tegangan, (satuan Volt), dan gradien tegangan, (satuan Volt/meter), untuk sebuah SUTET yang dikaitkan dengan beberapa parameternya, pada rentang *span tower* 434 dan 435 adalah diperlukan, dalam hal pengujian *breakdown* untuk zona *Right of Way* (ROW). Diagram *block* pengujianya dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hubungan antara Variabel Tegangan Uji (V) dan Variabel Gradien tegangan / Medan listrik yang diamati (Ex)



Gambar 9. Diagram Alir Proses Pengujian Insulation Medium Udara

### 3. Hasil dan Pembahasan

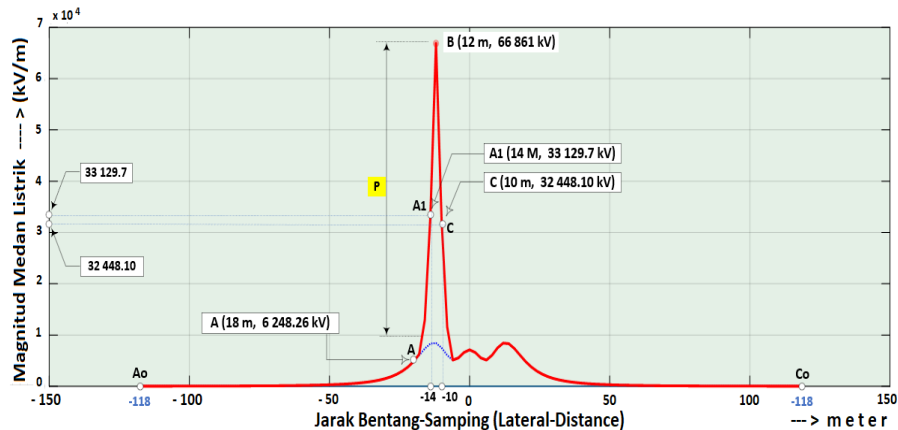
#### 3.1. Pemetaan Paparan (Exposure) Medan Listrik

Besaran luaran hasil simulasi merupakan visualisasi (dua dimensi) paparan medan listrik SUTET-500 kV terhadap uji tegangan lebih impuls yang di injeksikan ke parameter SUTET 500 kV (Gbr. 7), pada span tower: T.434 dan T.435, dan menghasilkan: 1). Paparan (exposure) medan listrik untuk SUTET-500 kV tanpa dan dengan kehadiran pohon Sengon; 2). Paparan medan listrik untuk SUTET-500 kV dengan tegangan lebih impulse 350 000 kV tanpa dan dengan kehadiran pohon Sengon. Masing-masing keduanya ditunjukkan Gambar 10 dan Gambar 11, visualisasi paparan medan listrik ini bersesuaian dengan angka-angka pada Tabel 1 sampai dengan Tabel 4.



Gambar 10. Paparan Medan Listrik saat terjadi Tegangan Impuls 350 000 kV pada SUTET-500 kV Tanpa kehadiran pohon Sengon (*Paraserianthes-Falcataria*)

Besar paparan medan listrik yang ada di bawah *span tower* T.434 – T.435, pada kondisi uji tegang an lebih impuls ( $350 \times 10^3$  kV) tanpa kehadiran pohon Sengon ditunjukkan Gbr. 9. Gradien tegangan tertinggi terjadi pada koridor 12 meter dari poros menara (*tower*) SUTET-500 kV, yaitu sebesar 8432.19 kV/m. Pada kondisi ini diasumsikan bahwa pohon Sengon belum ada sama sekali, yang ada hanyalah permukaan (lapangan terbuka) tanah rata. Sedangkan pada koridor 6 meter dan 0 meter dari poros masing masing nilai gradien tegangan 5 119.36 kV/m dan 7 125.67 kV/m (Gambar 10). Secara keseluruhan kondisi gradien tegangan tidak melampaui kekuatan tembus dielektrik medium udara (kekuatan dielektrik udara:  $32 \times 10^3$  kV/m ) sehingga tidak terjadi tembus listrik (*breakdown*).



**Gambar 11.** Gradien Tegangan pada puncak Pohon Sengon yang menyebabkan Kegagalan Dielektrik Medium Udara pada *Span* T.434 – T.435

Selanjutnya, uji tegangan lebih impuls dilakukan pada kehadiran pohon Sengon yang tingginya berkisar antara 7 meter sampai dengan 8,5 meter, berada pada koridor 12 meter dari poros menara (*tower*). Saat kondisi seperti ini yang terjadi adalah : di puncak pohon Sengon gradien tegangan terakumulasi sebesar 66 861 kV/m, angka ini melebihi kekuatan dielektrik medium udara yang besarnya ( $32 \times 10^3$  kV/m). Oleh karena itu terjadilah loncatan alur/lidah api dari konduktor SUTET ke puncak pohon tersebut yang dikenal sebagai “tembus pada medium udara” (*air breakdown*). Kondisi ini divisualisasikan sebagaimana Gambar 11. Zona posisi koridor kritis (pada Gambar 11) untuk SUTET-500 kV yang mengalami lonjakan tegangan impuls sebesar ( $350 \times 10^3$ ) kV, terletak pada titik A1 dan titik C dengan gradien tegangan masing-masing sebesar 33 129.7 kV/m dan 32 448.10 kV/m dan terletak sejauh 14 meter dan 10 meter dari poros menara (*tower*) SUTET.

### 3.2 Intensitas Medan Listrik pada Struktur Pohon Sengon (*Paraserianthes-Falcataria*)

Pada Tabel 1 terlihat bahwa tidak satupun jarak bentang samping (*lateral-distance*) yang medan listriknya melebihi gradien tegangan kekuatan dielektrik udara (32 000 kV/m) ketika diberikan simulasi tegangan lebih impuls 350 000 kV seandainya pada koridor 10 meter sampai 14 meter tidak ditanami sama sekali oleh pohon Sengon. Nilai medan listrik yang tertinggi hanya mencapai 8 432.19 kV/m, terjadi pada koridor 12 meter dari poros menara SUTET (Gambar 10).

Sebaliknya, Tabel 3 menunjukkan bahwa SUTET-500 kV, dalam simulasinya, diberi tegangan lebih impuls 350 000 kV, tetapi dengan kehadiran pohon Sengon pada koridor 10 meter sampai 14 meter dari poros menara SUTET, ternyata menimbulkan gradien tegangan yang melebihi kekuatan dielektrik medium udara pada titik titik 10 meter sampai 14 meter dan berlanjut menimbulkan tembus listrik (*break down*). Namun demikian, untuk Tabel 4, SUTET-500 kV disimulasikan dengan tidak menginjeksikan tegangan lebih impuls 350 000 kV ternyata, tak satupun gradien tegangan (angka medan listriknya), mulai dari JBS = 0 meter sampai dengan JBS = 62 meter, dapat melebihi kekuatan dielektrik medium udara 32 000 kV/m.

Pada Tabel 2 disajikan nilai kenaikan gradien tegangan saat posisi pohon Sengon berada di bawah SUTET-500 kV. Kenaikan gradien tegangan ini terjadi dari jarak bentang-samping mulai dari 8 m, 10 m, 12 m, 14 m, 16 m, dan 18 m. Untuk melihat perbandingan kenaikan nilai gradien tegangan antara tabel : 1 dan tabel : 3, dengan jarak bentang-samping : 8 m, 10 m, 12 m, 14 m, 16 m, dan 18 m, maka sebaran nilai gradien tegangannya disajikan di dalam tabel : 2. Seandainya belum ada kehadiran pohon Sengon maka medan listrik pada posisi 10 m, 12 m, dan 14 meter sebesar : 7 522.90 kV/m, 8 432.19 kV/m, dan 8 310.16 kV/m. Angka angka medan listrik ini jauh lebih kecil dengan angka tembus untuk medium udara atau keku

atan dielektrik udara, yaitu sebesar  $(32 \times 10^3)$  kV/m. Akan tetapi ketika pada jarak bentang samping 10 m, 12 m, dan 14 m ada berdiri pohon Sengon dengan ketinggian 8.5 meter maka pada bagian atas pohon Sengon itu segera terjadi loncatan bunga api yang menembus medium udara antara konduktor fasa SUTET 500 kV dan ujung ranting bagian atas pohon Sengon, dan terjadilah tembus udara (*breakdown*) yang menandakan telah terjadi kegagalan *insulation*.

**Tabel 1.** Paparan Medan Listrik SUTET-500 kV ketika merasakan Tegangan Lebih Impuls 350 000 kV dgn tidak ada pohon Sengon (*Paraserianthes-Falcataria*)

Jarak Bentang samping, JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	Sudut	Jarak Bentang samping, JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	Sudut
0	7125.67	- 120.00 <sup>0</sup>	32	1245.32	129.22 <sup>0</sup>
2	6609.08	- 132.30 <sup>0</sup>	34	1030.71	129.73 <sup>0</sup>
4	5539.88	- 151.44 <sup>0</sup>	36	861.95	130.20 <sup>0</sup>
6	5119.36	179.18 <sup>0</sup>	38	727.73	130.64 <sup>0</sup>
8	<b>6058.28</b>	<b>152.45<sup>0</sup></b>	40	619.80	131.03 <sup>0</sup>
10	<b>7522.90</b>	<b>137.70<sup>0</sup></b>	42	532.11	131.39 <sup>0</sup>
12	<b>8432.19</b>	<b>130.73<sup>0</sup></b>	44	460.18	131.71 <sup>0</sup>
14	<b>8310.16</b>	<b>127.55<sup>0</sup></b>	46	400.65	132.00 <sup>0</sup>
16	<b>7355.03</b>	<b>126.24<sup>0</sup></b>	48	350.97	132.27 <sup>0</sup>
18	<b>6065.78</b>	<b>125.87<sup>0</sup></b>	50	309.19	132.50 <sup>0</sup>
20	4822.80	126.01 <sup>0</sup>	52	273.81	132.71 <sup>0</sup>
22	3784.79	126.41 <sup>0</sup>	54	243.64	132.89 <sup>0</sup>
24	2971.96	126.94 <sup>0</sup>	56	217.76	133.05 <sup>0</sup>
26	2351.43	127.52 <sup>0</sup>	58	195.44	133.19 <sup>0</sup>
28	1880.41	128.10 <sup>0</sup>	60	176.09	133.32 <sup>0</sup>
30	1521.39	128.68 <sup>0</sup>	62	159.22	133.42 <sup>0</sup>

**Tabel 2.** Kenaikan gradien tegangan sebelum dan sesudah Kehadiran Pohon Sengon (*Paraserianthes-Falcataria*)

Jarak Bentang Samping, JBS (m)	Medan Listrik sebelum ada pohon Sengon (kV/m)	Medan Listrik pada ranting teratas pohon Sengon (kV/m)	K e t e r a n g a n
8	6 058.28	11 589.40	Tidak terjadi BD
10	<b>7 522.90</b>	<b>32 448.10</b>	<b>Terjadi BD (*)</b>
12	<b>8 432.19</b>	<b>66 861.13</b>	<b>Terjadi BD (*)</b>
14	<b>8 310.16</b>	<b>33 129.75</b>	<b>Terjadi BD (*)</b>
16	7 355.03	12 915.15	Tidak terjadi BD
18	6 065.78	6 248.26	Tidak terjadi BD

Catatan: BD = *Breakdown* (Tembus-listrik).

(\*) = melampaui kekuatan dielektrik medium udara (32 000 kV/m).

Angka medan listrik yang berubah hanya pada JBS 8, 10, 12, 14, 16, dan 18 meter saat kehadiran pohon *Paraserianthes-Falcataria*

**Tabel 3.** Paparan Medan Listrik SUTET-500 kV ketika terjadi Tegangan Lebih Impuls 350000 kV dengan kehadiran pohon Sengon (*Paraserianthes-Falcataria*)

Jarak Bentang Samping, JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	Sudut	Jarak Bentang Samping, JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	Sudut
0	7125.67	- 120.00 <sup>0</sup>	32	1245.32	129.22 <sup>0</sup>
2	6609.08	- 132.30 <sup>0</sup>	34	1030.71	129.73 <sup>0</sup>
4	5539.88	- 151.44 <sup>0</sup>	36	861.95	130.20 <sup>0</sup>
6	5119.36	179.18 <sup>0</sup>	38	727.73	130.64 <sup>0</sup>
8	<b>11 589.40</b>	<b>133.72<sup>0</sup></b>	40	619.80	131.03 <sup>0</sup>
10	<b>32 448.10 (BD)</b>	<b>122.49<sup>0</sup></b>	42	532.11	131.39 <sup>0</sup>
12	<b>66 861.13 (BD)</b>	<b>120.37<sup>0</sup></b>	44	460.18	131.71 <sup>0</sup>
14	<b>33 129.75 (BD)</b>	<b>120.78<sup>0</sup></b>	46	400.65	132.00 <sup>0</sup>
16	<b>12 915.15</b>	<b>122.03<sup>0</sup></b>	48	350.97	132.27 <sup>0</sup>
18	<b>6248.26</b>	<b>123.52<sup>0</sup></b>	50	309.19	132.50 <sup>0</sup>
20	4822.80	126.01 <sup>0</sup>	52	273.81	132.71 <sup>0</sup>
22	3784.79	126.41 <sup>0</sup>	54	243.64	132.89 <sup>0</sup>
24	2971.96	126.94 <sup>0</sup>	56	217.76	133.05 <sup>0</sup>
26	2351.43	127.52 <sup>0</sup>	58	195.44	133.19 <sup>0</sup>
28	1880.41	128.10 <sup>0</sup>	60	176.09	133.32 <sup>0</sup>
30	1521.39	128.68 <sup>0</sup>	62	159.22	133.42 <sup>0</sup>

Catatan: BD = Terjadi tembus listrik (*breakdown*)

Pola paparan medan listrik pada Tabel 3 digambarkan secara bersesuaian dengan Gambar 11 dimana posisi terjadi kegagalan *insulation* bagi medium udara terjadi pada koridor di titik: 10 meter, 12 meter, dan 14 meter dari poros menara (*tower*) SUTET-500 kV.

Pada Tabel 3 terlihat bahwa tegangan lebih sebesar 350 000 kV adalah tegangan impuls petir yang menyebar pada konduktor konduktor fasa dan menimbulkan gradien tegangan yang melebihi kekuatan dielektrik medium udara. Sedangkan jika sebuah sambaran petir mengenai bagian atas struktur *tower* maka tegangan yang terinduksi ke konduktor konduktor fasa (fasa R, S, dan fasa T) jauh lebih kecil, yaitu sebesar: untuk fasa R = 1 163 kV, fasa S = 1 961 kV, dan fasa T = 1 961 kV [16]. Dengan demikian untuk tegangan impuls 350 000 kV yang terakumulasi di dalam konduktor fasa besar kemungkinan berasal dari sambaran petir langsung yang mengenai konduktor fasa SUTET-nya. Karena posisi T.434 – T.435 berdekatan dengan GITET-500 kV di jalan Semarang – Surakarta nomor 21 (Gambar 4) ada kemungkinan gelombang tegangan impuls sebesar 700 p.u. ini berasal dari GITET tersebut.

Jadi, gangguan tegangan lebih (*over-voltage*) pada SUTET-500 kV pada *span* T.434 – T.435 sebesar  $(350.000/500) = 700$  p.u. yang memunculkan gradien tegangan pada pohon Sengon setinggi 8,5 meter sebesar 32.448 kV/m, 33.129,75 kV/m dan 66.861,13 kV/m akan segera langsung mengalami kegagalan *insulation* medium udara. Insiden inilah yang membuat kestabilan tegangan disisi barat (Banten, Bekasi, DKI Jakarta, dan sebagian kecil Jawa Barat) menurun drastis dan diikuti penurunan frekuensi jala jala menjadi 47.116 Hz pada jam 11:50:17 WIB (Gambar 5) sehingga mengakibatkan instrumen proteksi yang ada di Unit-Pembangkit (UP) ber-*action* (bekerja) dalam rangka untuk menyelamatkan semua unit unit pem bangkit dari gangguan tersebut, dan akhirnya terjadi pemadaman di sisi Barat secara menyeluruh (masif).

**Tabel 4.** Paparan Medan Listrik SUTET-500 kV dengan dan tanpa kehadiran Pohon Sengon (*Paraserianthes-Falcataria*)

Jarak Bentang samping, JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	Sudut	Jarak Bentang samping, JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	Sudut
0	10.18 (t)	- 119.99 <sup>0</sup>	32	1.78 (t)	129.21 <sup>0</sup>
2	9.44 (t)	- 132.29 <sup>0</sup>	34	1.47 (t)	129.72 <sup>0</sup>
4	7.91 (t)	- 151.43 <sup>0</sup>	36	1.23 (t)	130.190
6	7.31 (t)	179.18 <sup>0</sup>	38	1.04 (t)	130.62 <sup>0</sup>
8	8.65 (^) 12.80 (#)	152.45 <sup>0</sup> 132.39 <sup>0</sup>	40	0.89 (t)	131.02 <sup>0</sup>
10	10.75 (^) 48.65 (#)	137.69 <sup>0</sup> 121.78 <sup>0</sup>	42	0.76 (t)	131.37 <sup>0</sup>
12	12.04 (^) 249.55 (#)	130.72 <sup>0</sup> 120.03 <sup>0</sup>	44	0.66 (t)	131.70 <sup>0</sup>
14	11.87 (^) 49.31	127.54 <sup>0</sup> 120.68 <sup>0</sup>	46	0.57 (t)	131.99 <sup>0</sup>
16	10.51 (^) 14.10 (#)	126.23 <sup>0</sup> 122.08 <sup>0</sup>	48	0.50 (t)	132.25 <sup>0</sup>
18	8.66 6.26 (#)	125.86 <sup>0</sup> 123.67 <sup>0</sup>	50	0.44 (t)	132.48 <sup>0</sup>
20	6.89 (t)	126.00 <sup>0</sup>	52	0.39 (t)	132.69 <sup>0</sup>
22	5.41 (t)	126.40 <sup>0</sup>	54	0.35 (t)	132.87 <sup>0</sup>
24	4.25 (t)	126.93 <sup>0</sup>	56	0.31 (t)	133.03 <sup>0</sup>
26	3.36 (t)	127.51 <sup>0</sup>	58	0.28 (t)	133.18 <sup>0</sup>
28	2.69 (t)	128.09 <sup>0</sup>	60	0.25 (t)	133.30 <sup>0</sup>
30	2..17 (t)	128.67 <sup>0</sup>	62	0.23 (t)	133.40 <sup>0</sup>

Catatan: (#) = Medan Listrik pada dahan ranting teratas pohon *Paraserianthes-Falcataria*.

(^)= Medan Listrik sebelum kehadiran pohon *Paraserianthes-Falcataria*.

(t) = Angka Medan Listrik ‘tetap’ tidak berubah baik saat ada pohon *Paraserianthes-Falcataria* maupun saat tidak ada pohon *Paraserianthes-Falcataria*.

#### 4. Kesimpulan

Hasil pemetaan paparan (*exposure*) medan listrik pada tegangan operasional SUTET 500 kV dan simulasi tegangan lebih impuls (*impulse*) serta dengan memperhatikan struktur ketinggian pohon Sengon (*Paraserianthes-Falcataria*) dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Nilai tegangan lebih impuls yang dapat melampaui kekuatan dielektrik medium udara sebesar 350 000 kV sudah mampu membuat terjadi tembus (*breakdown*) udara pada *span* T.434 – T.435.
2. Besar angka medan listrik pada dahan tertinggi pohon *Paraserianthes Falcataria* terletak pada:
  - a. Titik koridor 10 meter dari poros *tower* SUTET-500 kV sebesar 32 448.10 kV/m
  - b. Titik koridor 12 meter dari poros *tower* SUTET-500 kV sebesar 66 861.13 kV/m
  - c. Titik koridor 14 meter dari poros *tower* SUTET-500 kV sebesar 33 129.75 kV/m
3. Kondisi angka medan listrik pada kesimpulan 2 sudah membuat kegagalan medium di elektrik udara di bawah *span tower* T.434 – T.435
4. Mitigasi kebencanaan dilakukan dengan menebang pohon pohon tinggi pada titik koridor JBS 10 m, 12 m, dan titik koridor 14 m pada *Span Tower*: T.434-T.435, sesuai *Right of Way* menurut Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 02 Tahun 2019.

#### Daftar Pustaka

- [1]. Pincus. DS., Al-Tai, MA., “Vary Fast Transient Overvoltage Generated by Gas Insulated Substations” *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 2008, pp 1 – 5.
- [2]. Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi tentang: “Ruang Bebas Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET untuk Penyaluran Tenaga Listrik)”, Menteri Pertambangan dan Energi Republik Indonesia, 7 Februari 1992, Lamp., hal. 9.
- [3]. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 18 Tahun 2015, Tentang Ruang bebas dan jarak bebas minimum pada saluran udara tegangan tinggi, Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi, dan Saluaran Udara Tegangan Tinggi Arus Searah untuk penyaluran Tenaga Listrik.
- [4]. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 02 Tahun 2019, Tentang Perubahan atas Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 18 Tahun 2015 Tentang Ruang Bebas

- dan Jarak Bebas Minimum pada Saluran Udara Tegangan Tinggi, Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi, dan Saluran Udara Tegangan Tinggi Arus Searah untuk Penyaluran Tenaga Listrik
- [5]. Sirait, KT., Pakpahan, P., Anggoro, B., Naito, K., Mizuno, Y., Isaka, K., Hayashi, N., "Report of 1995 Joint research on the Electric and Magnetic Field Measurement in Indonesia". Proceedings: Seminar on Effects of EMF (Electromagnetic Field) on Biological Systems in Indonesia. Bandung. March 5<sup>th</sup>, 1997: 1 – 6.
  - [6]. Utama, B., "The Effect of Dew and Raindrops on Electric Field Around EHV Transmission Lines", *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 2018; 16 (3): 974 – 982.
  - [7]. Yang. Xi., Zhan. X. "Transient Electric Field Computation for GIS Insulator Under Switching Impulse Voltage", *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2018, pp 227 – 230.
  - [8]. Lindell. E., Liljestrand. L., "Effect of Different Types of Overvoltage Protective Devices against Vacuum Circuit Breaker Induced Transients in Cable Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016; 31 (4): 1571-1579.
  - [9]. Oliveira. R., Bokoro. P., Doorsamy. W., "Investigation of Very Fast-front Transient Overvoltage for Selection and Placement of Surge Arresters", *IEEE Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2018 : 31 (4)
  - [10]. Florkowski. M., Furgal. J., Kuniewski. M., "Propagation of Overvoltages Transferred Through Distribution Transformers in Electric Networks", *The Institution of Engineering and Technology (IET) Generation, Transmission, and Distribution*, 2016; 10 (10): 2531-2537.
  - [11]. Google Maps: GITET Ungaran, Kali-Tengah, Gedanganak, Kec. Ungaran Tim., Semarang, Jawa Tengah menuju ke Jl. Malon, Gunungpati, Kec. Gn. Pati, Kota Semarang, Jawa Tengah 50229. <https://www.google.com/maps/dir/-7.1571706,110.4094463/Jl.+Malon,+Gunungpati,+Kec.+Gn.+Pati,+Kota+Semarang,+Jawa+Tengah+50229/@-7.1236896,110.3814189,10342m/data=!3m1!1e3!4m19!4m18!1m10!3m4!1m2!1d110.4036026!2d-7.127621!3s0x2e7088bd467d0c41:0xe0a015b3e6a52bfd!3m4!1m2!1d110.403734!2d-7.1236937!3s0x2e7088bde0d0f473:0x52c8b04dfdb82e0b!1m5!1m1!1s0x2e7089b6a79340cf:0xa17a0f86baab7593!2m2!1d110.3595494!2d-7.0974945!3e0>
  - [12]. Synchronwave Central Record <https://ekliptika.wordpress.com/2019/08/07/kabel-menjantai-dan-listrik-pun-membre/>
  - [13]. Charies J.T., "EHV-UHV Transmission Systems" in: *Transmission Lines Reference Book 345 kV and above*, 2<sup>nd</sup> ed. Electric Power Research Institute (EPRI), Palo alto, CA-USA; 1975: pp 37 – 42.
  - [14]. Chaston, AN., LaForest, JJ., Ramirez, AR., "Electrical Characteristics of EHV-UHV Conductor Configurations and Circuit" in: *Transmission Lines Reference Book 345 kV and above*, 2<sup>nd</sup> ed. Electric Power Research Institute (EPRI), Palo alto, CA-USA; 1975: 118 – 120
  - [15]. Deno, DW., Zaffanella, LE., "Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines and Station in: *Transmission Lines Reference Book 345 kV and above* 2<sup>nd</sup> ed. Electric Power Research Institute (EPRI), Palo alto, CA-USA; 1975: 248 – 280.
  - [16]. Utama, B., "Perhitungan Tegangan-Lebih Konduktor Fasa SUTET-500 kV Pascasambaran Petir pada Puncak Menara", *Kurvatek*, 2017; 2 (1): 45 – 54.