

## **Modelling Mitigasi Kebencanaan *Black Out* pada Kasus Paparan (*Exposure*) Medan Listrik SUTET-500 kV**

Budi Utama<sup>1</sup>, Diah Suwarti<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Prodi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

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

### **ABSTRAK**

Makalah ini memberikan prosedur aplikasi untuk desain pemodelan mitigasi bencana *black out* akibat fenomena me dan tinggi disertai kegagalan *insulation* medium udara. Model kasus diambil pada kejadian kegagalan *insulation* udara pada saluran transmisi Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV, pada rute Ungaran - Pemalang, pada rentang tower: T.434 - T.435, Dusun Malon, Desa Gunung-Pati, Kecamatan Gunung-Pati, Semarang Jawa Tengah.. Mitigasi dilakukan dengan menggunakan dua kawat tanah, di *grounding* dan direntangkan di bawah SUTET, posisinya masing-masing setinggi 7 meter dari permukaan tanah. Desain disimulasi menggunakan Matlab dengan menyelesaikan model persamaan elektrostatis yang dibentuk berdasarkan jumlah konduktor fasa, jumlah kawat tanah di dalam tiang konfigurasi datar (horizontal). Analisis paparan medan listrik dilakukan secara diskrit di permukaan tanah dengan menghitung muatan listrik yang terkandung di dalam konduktor fasa dan kawat tanah dengan menggunakan Matriks Koefisien Potensial *Maxwell* yg bersesuaian dgn jumlah konduktor fasa dan kawat tanah.

Hasil analisis mendapatkan beberapa model mitigasi paparan intensitas medan listrik dengan angka di bawah angka kekuatan tembus listrik (*breakdown*) pada medium udara.

**Kata Kunci** : *Modelling*, Mitigasi, *Breakdown*, Medan Listrik

### **ABSTRACT**

*This paper provides an application procedure for the design of modelling of disaster of a black out mitigation caused by high field phenomena accompanied by a failure of the air insulation. Sample of the case was taken in the incident of air insulation failure at Extra High Voltage (EHV) of the transmission lines 500 kV, at route Ungaran - Pemalang, on the span of the towers : T.434 - T.435, Malon hamlet, Gunung-Pati village, Gunung-Pati district, Semarang central Java. The mitigation is carried out using two ground wires which were grounded and stretched under the EHV-transmission lines, positioned 6 meters above the ground respectively. The design is simulated using Matlab by solving an electrostatic equation model based on the number of phase conductors, the number of ground wires in a flat (horizontal) configuration tower. The analyses of electric field exposure is carried out discrete at ground level by calculating the electric charge contained in the phase conductor and ground wire using the Maxwell Potential Coefficient Matrix which corresponds to the number of phase conductors and ground wire. The results of the analyses obtained several mitigation models for exposure to electric field intensity with numbers below the breakdown strength in the air medium.*

**Keyword** : *Modelling*, Mitigation, *Breakdown*, Electric-Field

### **1. PENDAHULUAN**

*Black Out* merupakan pemadaman / keruntuhan total jaringan daya listrik yang disebabkan oleh ketidakseimbangan antara pembangkitan daya listrik dan konsumsinya atau terjadi gangguan listrik lainnya. Pemutusan daya selektif adalah pemadaman terkontrol catu daya di area tertentu, untuk menghindari pemadaman. Ketika konsumsi daya listrik mengalami kenaikan secara perlahan pada batas waktu yang tak terhingga (ini berarti terjadi kenaikan konsumsi beban berlebih) dampaknya akan dirasakan di zona pembangkitnya, generator yang ada dipembangkit akan merasakan tegangan pada ujung pengiriman transmisi menjadi turun dengan skala besar dan diikuti juga dengan turunnya frekuensi jala jala yang akan menyebabkan proteksi pada pembangkit tersebut segera akan beraksi melepaskan diri dengan saluran transmisi guna untuk menyelamatkan generator dan instrument/peralatan lainnya. Jaringan transmisi yang selalu mengalami gangguan alam (badai petir) atau sering disebut sebagai gangguan eksternal yang dapat menjadi sebuah penyebab terjadinya *black-out*. Kejadian yang terjadi pada hari Minggu, 04 Agustus 2019 pada jalur Utara – Selatan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV, Ungaran – Pemalang, tower nomor : T.434 - T.435, dusun Malon, desa Gunung-Pati, Kec. Gunung -Pati, Kota Semarang – Indonesia [1], merupakan fenomena *breakdown* pada medium dielektrik udara pada tower T.434 dan T.435 ini disebabkan oleh tingginya pohon Sengon (*Paraserianthes-Falcataria*) yang masuk di dalam koridor *right of way* (ROW) sehingga terjadi tembus listrik (*breakdown*) pada medium dielektrik udara dan diikuti dengan terlepas 6 unit

pembangkit PLTGU-Suralaya dari sistem SUTET-500 kV. Karena pelepasan 6 unit pembangkit PLTGU Suralaya ini selaku pemasok terbesar daya listrik utk. Jakarta dan sekitarnya maka terjadilah pemadaman total (*black-out*) di DKI-Jakarta, dan wilayah Jawa Barat [1].

### 1.1 Penyebab dan Dampak *Black Out* 4 Agustus 2019

Pada awalnya PT. Perusahaan Listrik Negara (PLN) alasan pemadaman listrik pada tanggal 4 Agustus 2019 itu karena gangguan pada turbin gas 1 sampai dengan 6 di unit pembangkit (UP) Suralaya dan beberapa gangguan di pembangkit Listrik Cilegon [2]. Akan tetapi, kemudian PLN mengoreksi alasannya bahwa sumber awal terjadi gangguan tersebut adalah diakibatkan oleh terjadi insiden tembus listrik pada rute Ungaran – Pemalang yang disebabkan oleh puncak ranting pohon Sengon (Latin : *Paraserianthes-Falcataria*) yang berada di bawah jaringan SUTET 500 kV pada gawang (*span*) T.434 dan T.435 dusun Malon, Desa Gunung-Pati, Kec. Gunung-Pati – kota Semarang [1][2]. Kejadian tembus listrik (*breakdown*) inilah yang menyebabkan aliran transfer daya listrik dari sisi Timur pulau Jawa ke sisi Barat pulau Jawa mengalami kegagalan melalui aksi rele di UP Suralaya untuk melepaskan diri dari Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET-500 kV) dalam rangka memproteksi enam unit pembangkit /genarator di PLTGU Suralaya. Selanjutnya, inilah titik awal terjadinya pemadaman total (*black-out*) pada hari Minggu, 04 Agustus 2019.

Ketika otoritas MRT (*Mass Rapid Transit*) mulai mendeteksi terjadi kehilangan pasokan listrik, maka hal ini membuat kereta api tidak dapat dioperasikan dan mengharuskan orang-orang terjebak di dalam untuk segera mengungsi. Demikian juga *Commuterline* LRT (*Light Rapid Transit*) dan KRL (Kereta Rel Listrik) Jakarta tidak dapat dioperasikan [2]. Pada sektor telekomunikasi, jaringan telepon juga ikut terganggu. Jaringan telekomunikasi yang terganggu saat *black-out* ini adalah : Telkomsel, Indosat, *XL Axiata* dan *Smartfren* juga menyebabkan layanan *Ride-Hailing* seperti Gojek dan *Grab* mendapatkan masalah besar karena terjadi pengurangan layanan transaksi melalui internet [2]. Pemadaman listrik ini terjadi selama 8 sampai dengan 18 Jam dan memengaruhi 21.3 juta orang, Sebagian besar lampu lalu lintas Jakarta berhenti berfungsi [2]. Ada terjadi kebakaran pada Minggu malam dan hari Senin paginya di delapan lokasi berbeda karena pemadaman listrik total ini. Hal ini mungkin dikarenakan lilin sebagai penerangan selama *black-out* [2].

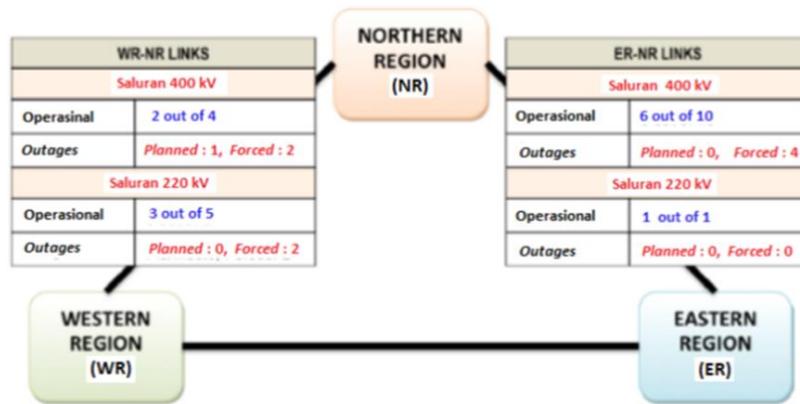
### 1.2 Aspek *Black-Out* pada Level Dunia

Menurut versi *Power Technology*, Indonesia pernah mengalami pemadaman listrik massal (*black-out*) yang melanda pulau Jawa dan pulau Bali pada 18 Agustus 2005 berada pada level di urutan ketiga *black-out* paling buruk di dunia. Dalam peristiwa ini sebanyak 120 juta jiwa terdampak. Pemulihan atas kejadian *black-out* ini berlangsung hingga 24 jam dan menimbulkan dampak yang cukup signifikan, dan ini merupakan salah satu peristiwa terbesar yang pernah ada dalam sejarah pemadaman listrik di Indonesia [3]. Terburuk di peringkat pertama adalah India, *Black-out* terjadi pada hari Senin dan Selasa, 30 dan 31 Juli 2012. *Blackouts* ini merupakan krisis kekuatan terburuk yang pernah ada dalam sejarah umat manusia [4]. Pemadaman pertama dari dua pemadaman mempengaruhi hampir 350 juta orang, sedangkan yang kedua melibatkan 670 juta orang, sepersepuluh dari populasi dunia dan tersebar di 21 dari 28 negara bagian India [4].

### 1.3 Berbagai jenis *Blackout*

#### *Black-Out* di India (30 – 31 Juli 2012)

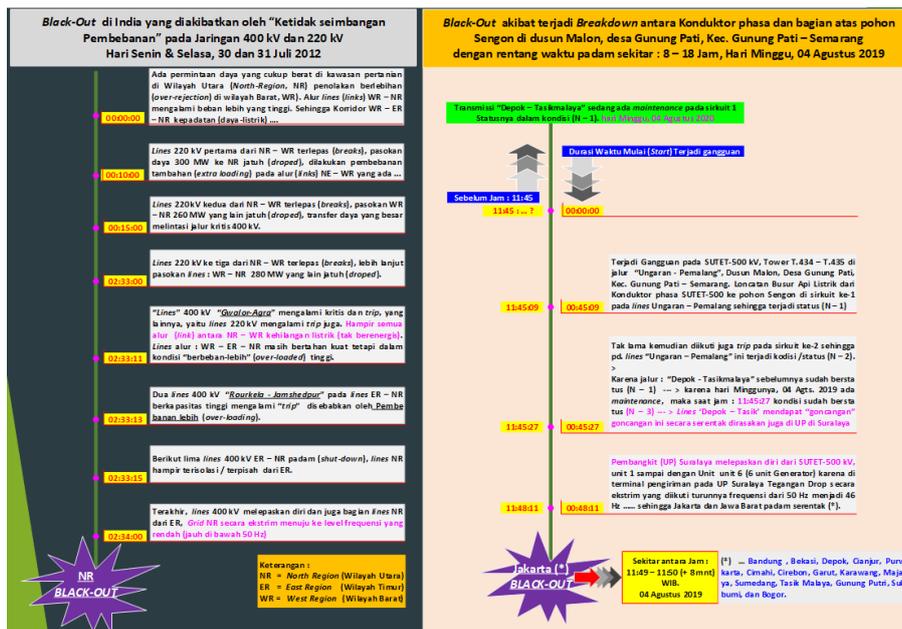
Jenis *blackout* dapat diakibatkan oleh fenomena eksternal dan fenomena internal. Fenomena eksternal meliputi gangguan alam dan sabotase. Sedangkan fenomena internal dapat berupa semua gangguan yang berasal dari dalam sistem kelistrikan itu sendiri. Pemadaman listrik yang terjadi di India (Senin dan Selasa, 30 – 31 Juli 2012) dikarenakan permintaan daya yang cukup besar dibagian wilayah Utara India [4], karena terjadi kegagalan hujan *Monsoon* Barat Daya telah menyebabkan peningkatan permintaan (pada konsumen) pertanian yang belum pernah terjadi sebelumnya di wilayah Utara. Kondisi di wilayah Utara ini disertai lagi oleh surplus (daya) listrik di wilayah Barat, dan ini berdampak pada aliran daya (*load flow*) yang sangat tinggi kuantitasnya ke wilayah Utara tadi [4]. Pada jam 00:10, tanggal 30 Juli dengan pelemahan saluran (*lines*) Barat-Utara yang mengarah terjadi pengisolasian wilayah bagian Utara oleh *Grid* “*North-East-West*” (NEW) dan akhirnya terjadi pemadaman (*blackouts*) [4]. Dari rangkaian peristiwa di atas dapat ditetapkan bahwa terjadi *black-out* adalah “ketidakseimbangan aliran daya yang cukup tinggi ke wilayah Utara” dimana untuk keseimbangan ini tidak dapat dipertahankan oleh “Perusahaan-Jaringan-Listrik-India” (*Power Grid Corporation of India*). Prioritas Lembaga ini adalah untuk memastikan “keseimbangan” pembangkitan beban keseluruhan jaringan [4].



Gambar : 1 Kondisi Awal Pemadaman pada Transmisi 400 kV dan 220 kV 30 Juli 2012 sebagaimana Laporan Central Electricity Regulatory Commission (CERC)-India [4]

**Black-Out di Indonesia (04 Agustus 2019)**

Black-Out yang terjadi di Indonesia hari Minggu, 04 Agustus 2019, adalah karena ada gangguan pada kawasan *Right of Way* pada rute *lines* 500 kV Ungaran – Pemalang, *span tower* nomor : T.434 dan T.435, dusun Malon, desa Gunung pati, Kecamatan Gunung-pati, kota Semarang. Gangguan ini adalah berupa tembus medium dielektrik udara antra andongan konduktor fasa *span* T.434 – T.435 dan ranting teratas pohon Sengon (*Paraserianthes-Falcataria*). Sebagai akibatnya terjadi fenomena tembus udara karena “medan-listrik/gradien-tegangan” telah melam paui kekuatan dielektrik udara , yaitu sebesar :  $(32 \times 10^3)$  kV/m. Jelas kelihatan bahwa : *Black-out* yang terjadi di



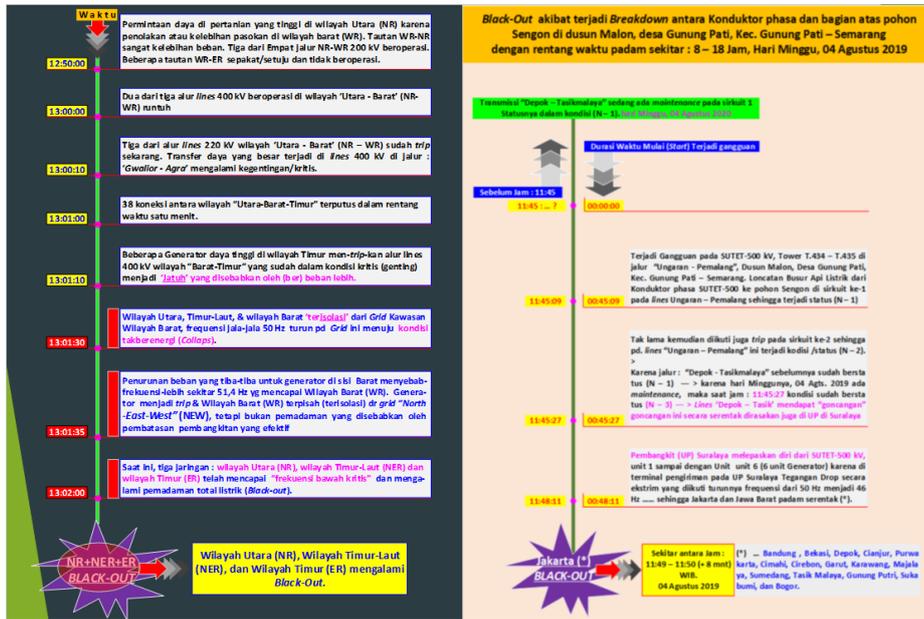
Gambar : 2

**Blackout pertama di India** akibat ketaksimbangan Beban (kiri) [4], 30 Juli 2012 dan **Blackout di Indonesia, 04 Agustus 2019** akibat **Breakdown** pada *lines* Ungaran – Pemalang, *Span* : T.434 dan T. 435 (kanan).

India (Senin dan Selasa 30 – 31 Juli 2012) dikarenakan oleh “ketakseimbangan aliran daya” ketika kebutuhan pasokan daya yang dibutuhkan oleh wilayah Utara India mengalami defisit sementara di wilayah Barat India terjadi surplus.

Sedangkan *blackout* yang terjadi di Indonesia (Minggu, 04 Agustus 2019) terjadinya tembus pada kekuatan dielektrik udara karena ada sebuah tegangan *impulse* dengan magnitudo tegangan sangat amat tinggi dan menurunkan angka frekuensi jala jala 50 Hz, dan sebagai konsekwensinya medan listrik di bawah *tower* : T434 – T.435 naik secara *impulse* sampai melampaui kekuatan dielektrik udara  $(32 \times 10^3)$  kV/m. Pemunculan

tegangan *impulse* ini kemungkinan dari gangguan eksternal. Gambar : 2 dan 3 menunjukkan perbedaan antara *black-out* yang terjadi di India (30 dan 31 Juli 2012) dan di Indonesia (04 Agustus 2019).



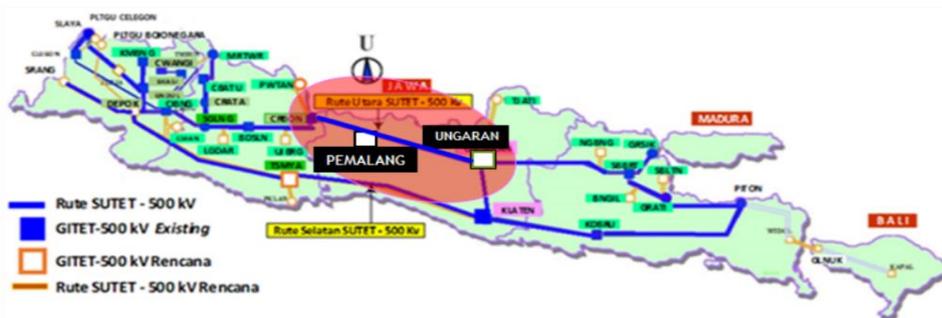
Gambar : 3  
 Blackout kedua di India, Selasa, 31 Juli 2012, [4] dibandingkan dengan *Blackout* di Indonesia, Minggu 04 Agustus 2019.

Tulisan ini menyajikan *modelling* pembentukan matrik koefisien potensial *Maxwell* untuk membuat medan listrik di bawah SUTT-500 kV menjadi kecil sehingga potensi kebencanaan tembus dielektrikum udara (yang menimbulkan *blackout*) terhindari, dengan demikian semua unit pembangkit yang teraut (*link*) dengan SUTET-500 kV tetap dapat beroperasi secara normal dan kontinyu.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Rute SUTET-500 kV

Rute SUTET-500 kV Ungaran – Pemalang mempunyai konfigurasi horizontal/*flat* dimana pada *span tower* : T.434 – T.435 telah terjadi insiden tembus listrik antara konduktor phasa dan ranting teratas pohon Sengon. Rute ini adalah bagian rute saluran transmisi yang menghubungkan rute saluran transmisi Utara dan Selatan pulau Jawa.



Gambar : 4  
 Rute SUTET-500 kV pulau Jawa

2.2 Proses Pembuatan *Modelling*

*Modelling* Matriks Koefisien Potensial *Maxwell* (MKPM)

Kegiatan *Blackout* pada hari Minggu, 04 Agustus 2019 adalah disebabkan oleh kegagalan kekuatan dielektrik udara sebagai medium *insulation* pada *span Tower* : T.434 – T.435 rute Ungaran – Pemalang. Kemudian gangguan *insulation* ini berkembang dan dirasakan oleh unit-unit pembangkit di sisi Barat, yaitu unit pembangkit PLTGU- Suralaya. Pada saat terjadi kegagalan ini, bentuk *modelling* Matriks-Koefisien Potensial *Maxwell* (MKPM) pada *span tower* T.434 – T.435 yang telah dihitung secara simulasi (dgn. program Matlab) adalah :

	1	2	3
1	4.1635e+10	2.4637e+08	6.2227e+07
2	2.4637e+08	4.1635e+10	2.4637e+08
3	6.2227e+07	2.4637e+08	4.1635e+10

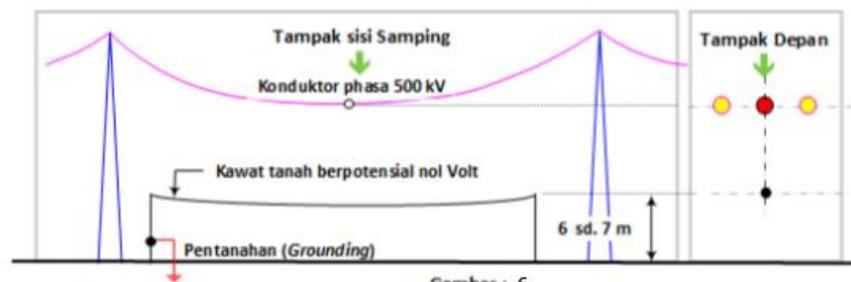
Gambar : 5  
Bentuk Matriks Koeffisien Potensial *Maxwell* untuk  
SUTET 500 kV, 3 Konduktor Fase

Angka angka yang ada di dalam matrik merupakan elemen matriks ( $3 \times 3$ ) yang mengindikasikan terdapat tiga konduktor fase pada konfigurasi horizontalnya dengan tiga persamaan simultans dan tiga variabel yang tidak diketahui. Variabel yang tidak diketahui itu adalah muatan listrik ( $Q$ ) yang ada di ketiga konduktor phasanya.

Untuk mendapatkan Matriks Koeffisien Potensial *Maxwell* (MKPM) dari sebuah susunan konduktor fase suatu konfigurasi saluran transmisi diperlukan sebuah konsep *dipole* listrik dari konfigurasi SUTET tersebut. *Span tower* : T.434 – T.435 yang megalami insiden tembus listrik (*breakdown*) mempunyai konfigurasi konduktor fase horizontal / *flat* , dua kawat tanah udara, 3 konduktor fase.

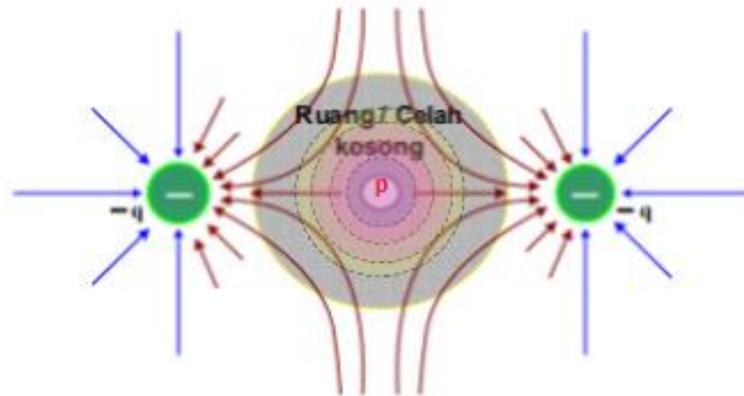
#### Modelling Mitigasi Tembus Listrik (*Breakdown*)

Model MKPM saat dikerjakan untuk mitigasi adalah menambahkan sebuah kawat penghantar yang berpotensi nol Volt di bawah SUTET-500 kV dengan jarak sedemikian rupa terhadap konduktor fase sehingga dipastikan tidak akan terjadi tembus listrik (*breakdown*) antar konduktor fase 500 kV dan kawat tanah yang dibentangkan di bawah konduktor tersebut. Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan diameter kawat-tanah dapat diatur (*setting*) melalui persamaan elektrostatis dalam bentuk matriks.



Gambar : 6  
Model Pemasangan Kawat-Tanah untuk Mitigasi  
Kegagalan Insulation Udara

Saat kondisi dilakukan mitigasi maka jumlah konduktor menjadi 5 buah kawat terdiri dari 2 kawat-tanah dengan potensial nol Volt dan 3 konduktor fase bertegangan 500 kV. Kawat tanah berbentuk selinder dengan jari jari yang sangat kecil dan mempunyai panjang yang jauh lebih besar dengan jari jarinya yang dibentangkan memanjang mengikuti arah lebar *span* dua *tower* (Gbr. 6). Sebuah kawat dapat diekspresikan/dimodelkan dengan sebuah garis lurus, dan sebuah garis lurus merupakan susunan titik-titik dengan jumlah yang banyak. Sekarang, diambil satu titik yang analoginya berupa sebuah muatan titik dengan polaritas negative (karena kawat tanahnya di *grounding*, Gbr. 6). Muatan titik ini kita pisahkan sebagaimana ditunjukkan oleh Gbr. 7, satu muatan titik mewakili kawat-tanah dan satu lagi mewakili permukaan bumi [5]. Dalam contoh ini : sisi kiri bermuatan  $-q$  Coulomb katakanlah ini mewakili kawat-tanah, dan sisi kanan mewakili permukaan tanah, juga bermuatan  $-q$  Coulomb. Ternyata, garis fluks/listrik/me dan (garis warna coklat, Gbr. 7 dengan arah panah menuju ke muatan titiknya,  $-q$ ) tidak akan bertemu satu sama yang lainnya. Konsekwensinya akan ada celah yang kosong terhadap sentuhan garis fluksnya, yaitu lingkaran kecil 'P'. Semakin besar jari jari lingkaran ini maka lingkarannya akan banyak bersentuhan dengan garis fluks listrik dan ini menandakan gejala kelistrikannya akan semakin besar magnitudnya. Semakin kecil lingkarannya maka semakin sedikit garis fluks yang disentuhnya, ini menandakan semakin kecil gejala kelistrikannya. Lingkaran 'P' terbebas sama sekali dari sentuhan garis fluks sehingga ruang di dalam lingkaran kecil 'P' tidak ada gejala kelistrikan sekecil apapun.

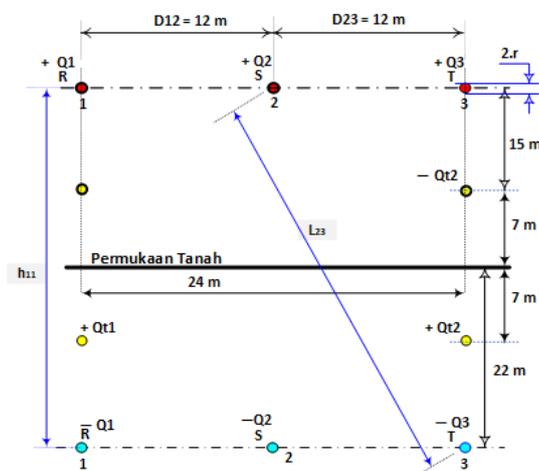


Gambar : 7 Konsep kekosongan celah-ruang dari fenomena kelistrikan [5]

Garis fluks listrik berawal dari muatan titik positif dan berakhir pada muatan titik negative dengan arah vector garis fluksnya mengarah/masuk ke muatan titik negative. Konsep muatan titik yang sama besar muatannya dengan polaritas yang senama akan terjadi gaya listrik yang tolak menolak dan akan ada suatu ruang kosong yang sama sekali tidak tersentuh oleh satupun garis fluks listrik atau garis fluks medan. Sifat kondisi inilah yang di implementasikan di bawah jaringan listrik tegangan ekstra tinggi untuk mengurangi intensitas medan listrik dengan menggunakan ben tangan kawat tanah (Gbr.6). Dengan kehadiran kawat-tanah ini maka Matriks Koeffisien Potensial *Maxwell* (MKPM) elemen-elemen matriksnya akan bertambah sesuai dengan jumlah konduktor dan jumlah bentangan kawat tanah yang digunakan. Cara mereduksi intensitas medan listrik seperti ini sudah dikerjakan pada saluran transmisi tegangan Ultra tinggi 1145 kV oleh *Electric Power Research Ins titute* (EPRI), Palo Alto – California (CA), Amerika Serikat (USA) [6].

### 2.3 Modelling Persamaan untuk Proses Mitigasi

Sebelum melakukan mitigasi kegagalan *insulation* medium-udara, persamaan elektrostatis harus ditentukan terlebih dahulu. Dalam hal ini persamaan elektrostatisnya hanya mempunyai tiga persamaan simultans dengan tiga va



Gambar : 8 Aplikasi konsep *Dipole* Listrik pada 3 Konduktor-fasa SUTET

riabel muatan listrik ( $Q_1$ ,  $Q_2$ , dan  $Q_3$ ) yang belum diketahui besarnya [5][6][7][8]. Muatan  $Q_1$ ,  $Q_2$ , dan  $Q_3$  dapat ditentukan dengan menyelesaikan persamaan simultansnya. Akan tetapi setelah menggunakan kawat-tanah sebanyak dua buah, di sisi kiri dan kanan (Gbr. 8) maka akan diperoleh 5 kawat masing masing 3 konduktor fasa 500 kV dan 2 bentangan kawat-tanah di bawah jaringan 500 kV. Konfigurasinya ditunjukkan Gbr. 8. Jadi untuk Gbr. 8 akan ada persamaan elektrostatis membentuk 5 persamaan simultans dengan 5 variabel muatan listrik yang tidak diketahui besarnya (yaitu :  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_{t1}$ , dan  $Q_{t2}$ ). Masing masing muatan listrik ini akan ditentukan lewat persamaan Matriks Koeffisien Potensial *Maxwell* ( $5 \times 5$ ) yang di inverskan kemudian dikalikan dengan matriks tegangan [V] dengan ukuran ( $5 \times 1$ ).

## 2.4 Persamaan Elektrostatis sebelum Mitigasi

Persamaan elektrostatis sebelum dilakukan mitigasi adalah persamaan simultans dengan tiga variabel muatan yang belum diketahui, bentuk pola ruang dan konfigurasinya akan menciptakan angka Koeffisien Potensial *Maxwell* yang berbentuk Matriks Koeffisien Potensial *Maxwell* (MKPM) dengan ukuran matriknya bergantung dengan jumlah konduktor fasa SUTET-nya. Untuk SUTET konfigurasi horizontal, 3 konduktor fasa (yaitu : fasa R, S, dan fasa T) persamaan MKPM-nya adalah berbentuk matriks  $[P]_{(3 \times 3)}$  sebagaimana ditunjukkan persamaan (1).

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

$V_1, V_2,$  dan  $V_3$  adalah nilai tegangan *line-to-neutral* dalam satuan kV.  $Q_1, Q_2, Q_3$  masing masing adalah muatan yang terakumulatif pada konduktor fasa R, S, dan T dengan satuan kC.  $P_{11}$  sampai dengan  $P_{33}$  adalah elemen elemen Matriks Koeffisien Potensial *Maxwell* (MKPM) dengan satuan meter per Farad (m/F).

## 2.5 Persamaan Elektrostatis saat Mitigasi

Ketika melakukan mitigasi, konfigurasi berubah menjadi 3 konduktor fasa dan 2 bentangan kawat tanah setinggi 7 meter dari permukaan tanah. Sehingga dengan demikian jumlah konduktor / penghantar menjadi 5 (3 konduktor fasa dan 2 kawat tanah). Bentuk konfigurasi, (Gbr. 8), di ekspresikan dalam persamaan elektrostatis dengan 5 buah persamaan simultans dengan 5 variabel muatan  $Q$  yang akan ditentukan besarnya ( $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4,$  dan  $Q_5$ ). Persamaannya sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_{t1} \\ V_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_{t1} \\ Q_{t2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$V_{t1}, V_{t2}$  adalah tegangan yang ada di bentangan kawat tanah di bawah SUTET-500 kV (lihat Gbr. 8) ;  $Q_{t1}, Q_{t2}$  muatan yang ada di kawat tanah di bawah SUTET. Dengan melakukan operasional invers pada MKPM-nya maka nilai  $Q$  dapat ditentukan. Dengan cara yang sama dapat dilakukan juga pada persamaan (1).

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_{t1} \\ Q_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_{t1} \\ V_{t2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dengan elemen matriks Koeffisien Potensial *Maxwell*,

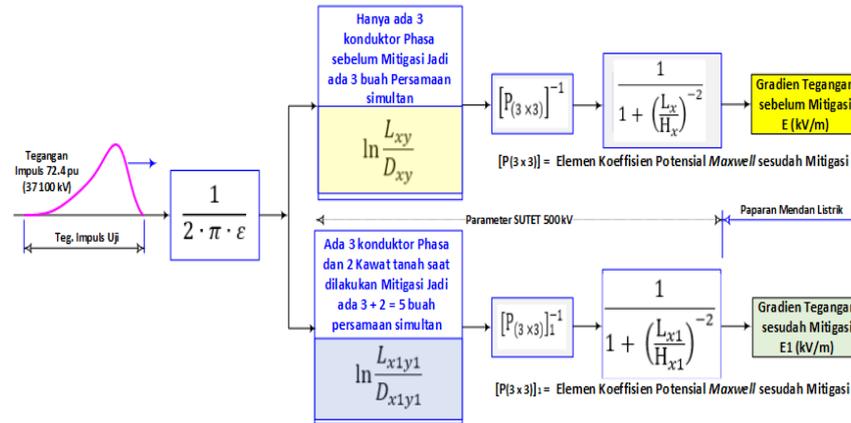
$$P_{11} = \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \right) \ln \left( \frac{h_{11}}{r_1} \right) \quad ; \quad P_{23} = \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \right) \ln \left( \frac{L_{23}}{D_{23}} \right) = P_{32}$$

Sehingga untuk “n” baris dan “m” kolom (jumlah konduktor/penghantar) dapat ditulis,

$$P_{xy} = \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \right) \ln \left( \frac{L_{xy}}{D_{xy}} \right) = P_{yx} \quad (4)$$

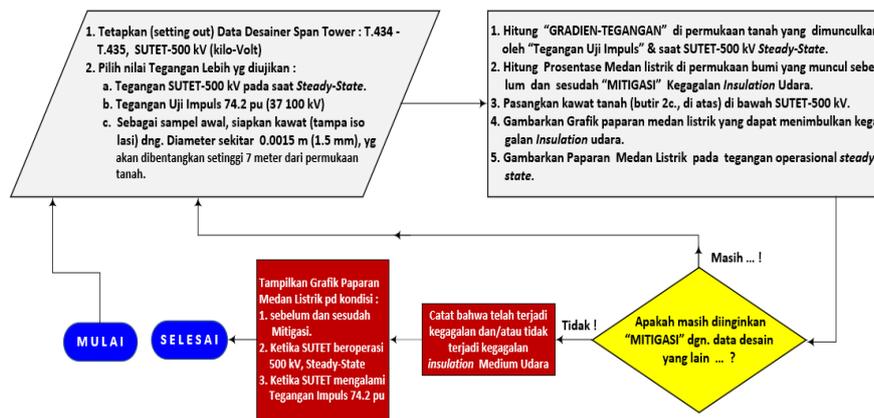
## 2.6 Model Penerapan Mitigasi

Parameter untuk suatu proses mitigasi pada SUTET-500 kV diperlukan beberapa dimensi desain yang terkait dengan pembentukan Matriks Koeffisien Potensial *Maxwell*. Besaran desain ini meliputi tinggi konduktor fasa dan jarak antar konduktor fasa serta diameter konduktor fasa dan kawat tanah yang diletakan di bawah jaringan SUTET-500 kV. Gambar : 9 menunjukkan hubungan antar beberapa parameter yang menimbulkan nilai gradien tegangan (sebagai variabel terikat) ketika SUTET-500 kV di injeksikan (diuji) secara simulasi terhadap tegangan impuls (sebagai variabel bebas).



Gambar : 9 Hubungan Tegangan Impuls Uji dengan Gradien Tegangan, E. untuk Mitigasi Kebencanaan Kegagalan *Insulation* Udara

$L_{xy}$  adalah kontribusi garis dari sebuah konduktor *real*, 'x', ke bayangan konduktor y (contoh :  $L_{23}$  pada Gbr. 8). Sedangkan  $D_{xy}$  adalah jarak antara konduktor *real* 'x' dan konduktor *real* 'y' (contoh :  $D_{12}$  pada Gbr. 8).  $L_x$  dan  $H_x$  masing masing adalah jarak bentang samping (*lateral distance*) posisi titik diskrit dimana medan listriknya hendak dihitung, dan  $H_x$  merupakan ketinggian konduktor fasa terhadap permukaan tanah. Diagram alir proses mitigasi ke bencanaan kegagalan *insulation* udara digambarkan sbb.,



Gambar : 10 Diagram Alir Penerapan Mitigasi pada Paparan Medan Listrik

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah dikerjakan, secara simulasi, uji tegangan impuls terhadap kekuatan dielektrik medium udara pada SUTET 500 kV yang konfigurasi konduktor phasanya ditambahkan dua kawat tanah di bawah jaringan SUTET. Kedua bentangan kawat tanah tersebut berjarak horizontal 24 meter dan diletakan pada titik axis dimana terjadi angka gradien tegangan tertinggi. Hasil yang diperoleh setelah melakukan mitigasi terhadap gradien tegangan maksimum adalah medan listrik yang menimbulkan tembus pada kekuatan dielektrik udara menjadi mengecil. Pengecilan intensitas medan listrik ini dapat dilihat pada grafik paparan medan listrik di permukaan bumi pada saat : sebelum dipasangkan kawat tanah dan sesudah pemasangan kawat tanah di bawah jaringan SUTET 500 kV.

#### 3.1 Paparan medan listrik saat beroperasi *steady-state*

Grafik paparan medan listrik pada kondisi *steady-state*, dengan tegangan operasional 500 kV *line-to-line*, dalam kondisi tanpa kehadiran pohon Sengon (Latin : *Paraserianthes-Falcataria*), ditunjukan seperti tabel berikut.

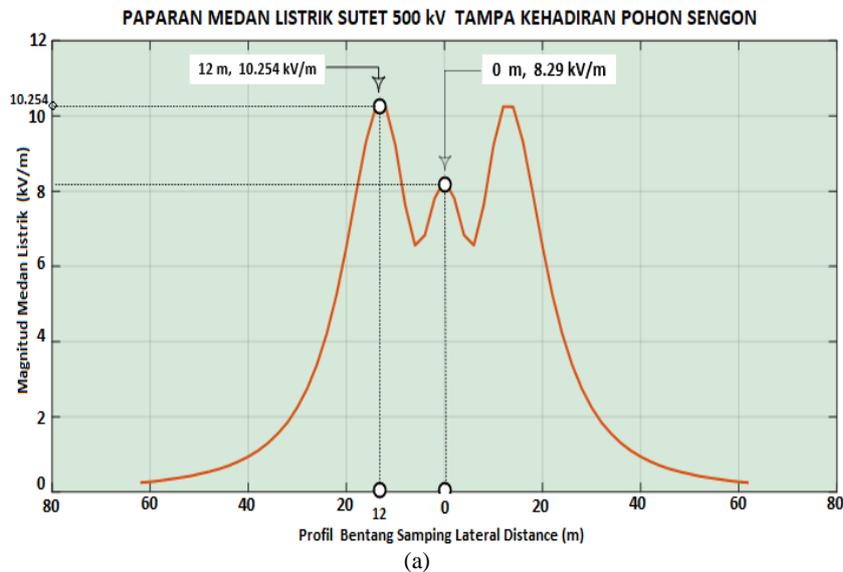
Tabel 1. Paparan Medan Listrik di Bawah SUTET 500 kV saat *Steady-State* tanpa Kehadiran Pohon Sengon

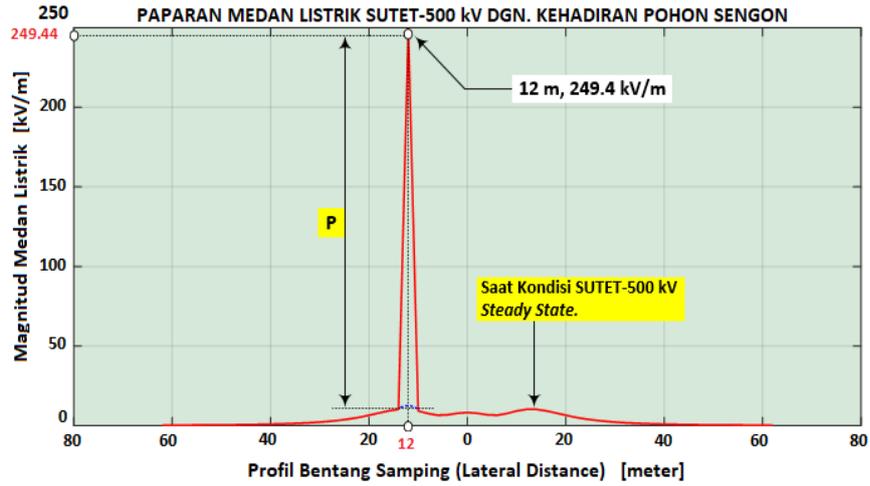
Jarak Bentang Samping JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	S u d u t (derajad)	Jarak Bentang Samping JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	S u d u t (Derajad)
0	8.2937	- 120.00	32	1.8553	129.16
2	7.8057	- 133.80	34	1.5460	129.61
4	6.8295	- 153.59	36	1.3000	130.04
6	6.5584	178.95	38	1.1025	130.43
8	7.6312	154.48	40	0.9425	130.79
10	9.2199	140.07	42	0.8118	131.12
12	10.254	132.73	44	0.7039	131.42
14	10.243	129.11	46	0.6143	131.68
16	9.3222	127.41	48	0.5392	131.92
18	7.9465	126.74	50	0.4758	132.14
20	6.5191	126.64	52	0.4220	132.33
22	5.2539	126.85	54	0.3760	132.49
24	4.2150	127.23	56	0.3364	132.64
26	3.3920	127.69	58	0.3023	132.76
28	2.7489	128.18	60	0.2726	132.87
30	2.2476	128.68	62	0.2467	132.96

Tabel 1. Paparan Medan Listrik di Bawah SUTET 500 kV saat *Steady-State Steady-State* dengan kehadiran Pohon Sengon

Jarak Bentang Samping JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	S u d u t (derajad)	Jarak Bentang Samping JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	S u d u t (Derajad)
0	8.2937	- 119.99	32	1.8553	132.54
2	7.8057	- 121.23	34	1.5460	133.39
4	6.8295	- 131.39	36	1.3000	134.18
6	6.5584	179.97	38	1.1025	134.89
8	7.6312	132.39	40	0.9425	135.54
10	9.2199	121.78	42	0.8118	136.14
12	249.44	120.03	44	0.7039	136.69
14	10.243	120.68	46	0.6143	137.20
16	9.3222	122.08	48	0.5392	137.67
18	7.9465	123.67	50	0.4758	138.11
20	6.5191	125.26	52	0.4220	138.51
22	5.2539	126.76	54	0.3760	138.89
24	4.2150	128.14	56	0.3364	139.24
26	3.3920	129.40	58	0.3023	139.57
28	2.7489	130.55	60	0.2726	139.88
30	2.2476	131.59	62	0.2467	140.16

Paparan medan listrik di bawah jaringan Saluran Udara Tegangan Ekstr Tinggi 500 kV tanpa kehadiran pohon Sengon mempunyai nilai maksimum sebesar 10.254 kV/m, terletak di titik 12 meter dari poros tiang menara pada permukaan bumi. Paparan medan listrik di bawah jaringan SUTET ditunjukkan pada Gbr. 11a. dan angka paparan nya secara keseluruhan tercantum pada tabel : 1 di atas. Sedangkan pada Gbr. 11b adalah paparan medan listrik di bawah jaringan SUTET (secara simulasi) ketika hadir sebuah pohon Sengon (mewakili banyak pohon Sengon yang lainnya), sejauh 12 meter ke sisi samping dari poros menara tiang SUTET. Berikut di bawah ini disajikan grafik paparan medan listrik saat *steady-state* dan saat di injeksikan dengan tegangan impuls 74.2 pu atau sebesar 37 100 kV pada jaringan SUTET-500 kV.





(b)

Gambar : 11



(a)



(b)

Gambar : 12 (a). Paparan medan listrik tanpa pohon Sengon dan (b) ketika ada pohon Sengon pada posisi 12 meter sisi kiri menara SUTET-500 kV

### 3.2 Paparan medan listrik saat merasakan tegangan impuls 72.4 per-unit

Dengan menggunakan tegangan impuls sebesar 72.4 pu (37 100 kV) yang diinjeksikan ke dalam jaringan se cara simulasi dan melakukan uji kekuatan dielektrik medium udara pada kondisi kehadiran dan tanpa kehadiran pohon Sengon hasilnya ditunjukkan di dalam Gbr. 11 dan Gbr. 12. Tampak paparan medan listrik di titik 12 meter hanya sebe sar 1 318 kV/m jauh di bawah kekuatan dielektrik medium udara, yaitu sebesar 32 000 kV/m. Akan tetapi jika pada jarak 12 meter itu ada kehadiran pohon Sengon setinggi 9 meter maka secara ekstrim akan muncul gradien te gangan di ranting teratas dari pohon Sengon tersebut sebesar 32 060 kV/m (Gbr. 12b), dan inilah yang menyebabkan kegagal an udara sebagai medium *insulation* karena angkanya melebihi kekuatan dielektrik udara yang ada di ranting atas po hon Sengon tersebut.

### 3.3 Implementasi Mitigasi

Mitigasi dikerjakan dengan menggunakan sebuah bentangan kawat tanah di bawah jaringan SUTET-500 kV. Data ten tang fisik kawat tanah ini, seperti : diameter, panjang bentangan kawat tanah, ketinggian di atas tanah te lah diinstalasikan pada *input* program simulasi komputernya. Berikut hasil simulasi ditunjukkan dalam bentuk papar an medan listrik pada tabel : 3 dan tabel : 4 dalam kondisi sebelum dan setelah pemasangan kawat tanah yang disertai dengan menginjeksikan sebuah tegangan impuls sebesar 37 100 kV.

Tabel : 3  
Paparan Medan Listrik Tanpa Kawat-Tanah di Bawah SUTET dgn. Teg. Impuls 37 100 kV (sekitar 74.2 pu), tidak ada Pohon Sengon

Jarak Bentang Samping JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	S u d u t (derajad)	Jarak Bentang Samping JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	S u d u t (Derajad)
0	1066.00	-120.00	32	238.48	129.17
2	1003.40	-133.81	34	198.72	129.62
4	877.98	-153.59	36	167.10	130.05
6	843.15	178.95	38	141.72	130.44
8	981.00	154.48	40	121.16	130.80
10	1185.10	140.08	42	104.35	131.13
12	1318.00	132.74	44	90.48	131.43
14	1316.50	129.12	46	78.96	131.70
16	1198.20	127.42	48	69.31	131.94
18	1021.40	126.75	50	61.16	132.15
20	837.92	126.65	52	54.24	132.34
22	675.30	126.86	54	48.33	132.51
24	541.78	127.24	56	43.25	132.65
26	435.99	127.70	58	38.86	132.78
28	353.33	128.19	60	35.04	132.89
30	288.90	128.69	62	31.71	132.98

Tabel : 4  
Paparan Medan Listrik setelah Pemasangan Kawat-Tanah di bawah SUTET Tegangan Impuls 37 100 kV (sekitar 74.2 pu), tidak ada pohon Sengon

Jarak Bentang Samping JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	S u d u t (derajad)	Jarak Bentang Samping JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	S u d u t (Derajad)
0	1100.40	-120.00	32	218.00	129.90
2	1032.60	-131.50	34	182.10	130.50
4	881.00	-147.90	36	153.40	131.00
6	774.80	172.40	38	130.30	131.50
8	810.00	161.70	40	111.50	132.00
10	927.30	144.20	42	96.10	132.40
12	1021.60	134.70	44	83.40	132.80
14	1043.30	129.90	46	72.80	133.20
16	983.80	127.70	48	63.90	133.50
18	866.40	126.90	50	56.40	133.80
20	728.40	126.80	52	50.10	134.10
22	597.20	127.10	54	44.60	134.40
24	484.80	127.60	56	39.90	134.60
26	393.40	128.10	58	35.90	134.80
28	320.70	128.70	60	32.30	135.00
30	263.30	128.30	62	29.30	135.20

Untuk kondisi mitigasi pada saat SUTET-500 kV dalam kondisi *steady-state*, kawat tanah tetap dilokasikan pada jarak 12 meter dari poros menara SUTET masing masing ke kanan dan ke kiri. Pada uji dengan tegangan impuls akan dilihat perubahan paparan medan listrik di permukaan tanah saat SUTET-500 kV mengalami atau terakumulasi dengan sebuah besaran tegangan impuls. Kemudian di bawah jaringan SUTET dikondisikan saat ada pohon Sengon, dan saat tidak ada pohon Sengon.

### 3.4 Pembahasan

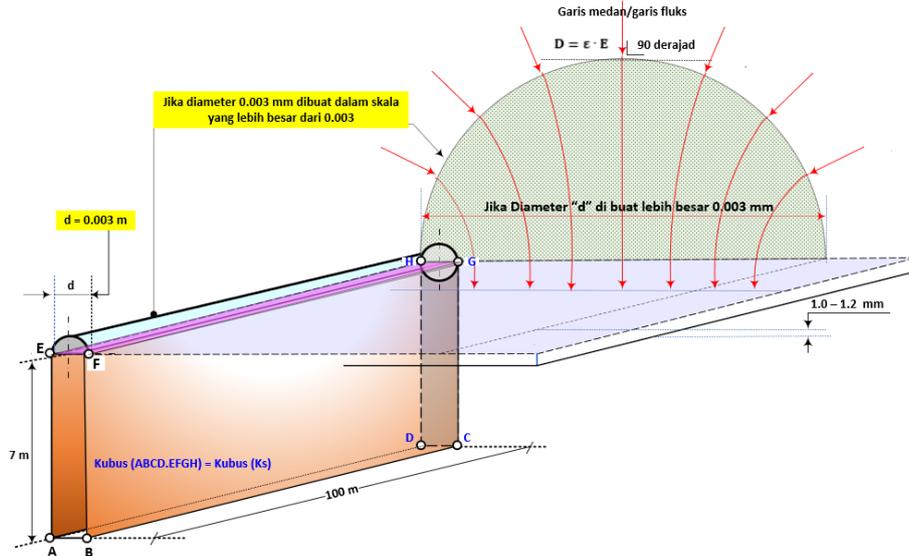
Penggunaan 2 buah kawat-tanah yang dibentangkan di bawah jaringan SUTET-500 kV sebagaimana terlihat pada Gbr. 8, dan kemudian di kedua ujungnya di tanahkan (*grounding*) akan membuat dua kawat tanah ini menjadi berpotensi nol Volt. Sementara itu permukaan tanah yang di bawahnya berpotensi nol Volt juga. Sehingga ke dua elektroda ini (kawat tanah dan permukaan tanah) berpolaritas sama sama negative, efeknya adalah garis listriknnya (fluks listrik) terputus (tidak tersambung/bertemu), Gbr. 7.

Keterputusan garis fluks listrik ini menimbulkan suatu ruang (*space*) celah kosong yang berada diantara kawat tanah (yang sudah terpasang) dan permukaan tanah. Ruang kosong ini intensitas volumenya bergantung pada diameter kawat tanah yang digunakan ( $2 \times 0.0015 \text{ m} = 0.003$ ), letak tinggi kawat-tanah di atas permukaan tanah (7 m)

dan panjang bentangan kawat tanah (katakanlah sepanjang 100 m). Dengan demikian volume celah ruang kecil yang terbentuk oleh pemasangan kawat tanah ini adalah :  $(0.003 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 7 \text{ m}) = 2.1 \text{ m}^3$ . Jadi, untuk mendapatkan volume yang besar, yang paling praktis adalah dengan memperbesar diameter kawat tanah yang

*Modelling Mitigasi Kebencanaan Black Out pada Kasus Paparan (Exposure) Medan Listrik SUTET-500 kV*  
(Budi Utama)

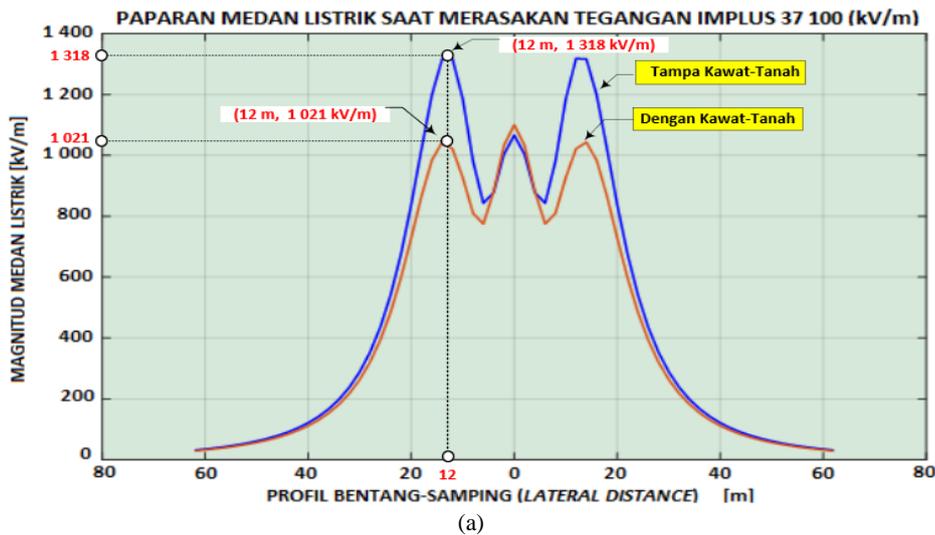
akan dipasangkan tetapi dalam bentuk plat tipis, dgn. ketebalan berkisar 1.0 mm sd 1.2 mm. Ilustrasi pembesaran volume dapat dilihat pada Gbr. 13.

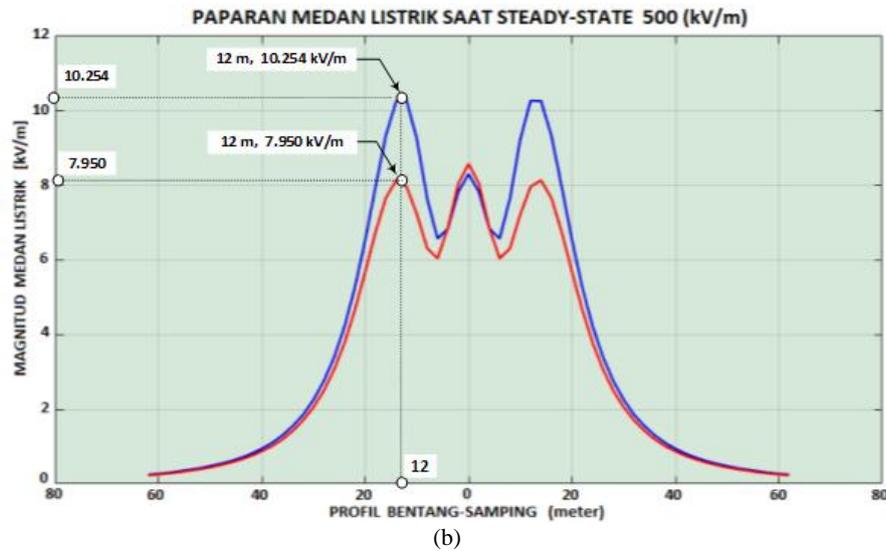


Gambar : 13 Modelling Pengembangan celah ruang Kubus antara kawat-tanah dan permukaan tanah

Tujuan pembesaran diameter ini supaya mendapatkan permukaan elektroda berpolaritas negative yang lebih luas, sementara permukaan tanah juga berpolaritas negative. Efek polaritas yang sama ini tidak akan menimbulkan gejala medan listrik atau tidak terdapat fenomena kelistrikan di dalamnya. Celah ruang udara yang terbentuk antara permukaan sebelah bawah kawat tanah dan permukaan tanah berbentuk kubus [Ks] Gbr. 13. Sisi AB = sisi EF = DC = HG = diameter kawat-tanah yang di pasangkan di bawah jaringan SUTET.

Gambar : 14.a menunjukkan paparan medan listrik di permukaan tanah ketika SUTET merasakan suatu tegangan impuls 37 100 kV kemudian di bandingkan paparan (*exposure*) medan listriknya sebelum dan sesudah dipasangkan kawat tanah di bawah jaringan, sejauh 12 meter dari poros menara/tiang (*tower*) transmisi. Kurva warna biru ada lah paparan medan listrik sebelum menggunakan kawat tanah, dan kurva warna merah sesudah menggunakan kawat tanah.





(b) Gambar : 14 Paparan (*Exposure*) Medan Listrik di Permukaan Tanah

Untuk mengimplementasikan mitigasi ini supaya diperoleh kawasan (*zone*) di bawah jaringan SUTET dimana tingkat gradien tegangan (medan listrik) dapat ditekan menjadi rendah, perlu mengganti kawat tanah dengan plat material tipis bersifat anti karat dan membentangkannya sebagai pengganti kawat tanah (Gbr. 13). Dengan demikian akan di dapat margin eivalen diameter yang lebih besar daripada diameter sebuah kawat-tanah yang berbentuk silinderis, tujuannya adalah untuk mendapatkan bentangan kawasan yang lebih besar dimana intensitas medan listriknya dapat direduksi.

Untuk kasus kejadian *black-out* hari Minggu, 04 Agustus 2019, ini disebabkan oleh pohon Sengon yang mencapai ketinggian 9 meter, sehingga memperkecil celah antara konduktor fasa dan ranting bagian atas pohon Sengon dan menimbulkan kegagalan pada *insulation* udara dalam bentuk *breakdown*. Ini berdampak pada unit pem bangkit di Suralaya yang ikut *trip* dan terputus pasokan aliran daya di Jakarta dan sebagian Jawa-Barat. Untuk mengan tisipasi pohon dengan tinggi 9 meter ini kawat tanah yang dipasang di bawah (tingginya cuma 7 meter) jaringan tidak memungkinkan karena ketinggian pohon melebihi ketinggian kawat tanah yang dipasang.

Tabel : 5  
Paparan Medan Listrik di bawah SUTET 500 kV saat beroperasi *Steady-State* Sebelum Pemasangan Kawat-Tanah di bawah Jaringan

Jarak Bentang Samping JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	S u d u t (derajad)	Jarak Bentang Samping JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	S u d u t (Derajad)
0	8.2937	- 120.00	32	1.8553	129.16
2	7.8057	- 133.80	34	1.5460	129.61
4	6.8295	- 153.59	36	1.3000	130.04
6	6.5584	178.95	38	1.1025	130.43
8	7.6312	154.48	40	0.9425	130.79
10	9.2199	140.07	42	0.8118	131.12
12	10.254	132.73	44	0.7039	131.42
14	10.243	129.11	46	0.6143	131.68
16	9.3222	127.41	48	0.5392	131.92
18	7.9465	126.74	50	0.4758	132.14
20	6.5191	126.64	52	0.4220	132.33
22	5.2539	126.85	54	0.3760	132.49
24	4.2150	127.23	56	0.3364	132.64
26	3.3920	127.69	58	0.3023	132.76
28	2.7489	128.18	60	0.2726	132.87
30	2.2476	128.68	62	0.2467	132.96

Tabel : 6  
Paparan Medan Listrik di bawah SUTET 500 kV saat beroperasi *Steady-State* Setelah Pemasangan Kawat-Tanah di bawah Jaringan

Jarak Bentang Samping JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	S u d u t (derajad)	Jarak Bentang Samping JBS (m)	Besar Medan Listrik (kV/m)	S u d u t (Derajad)
0	8.560	- 120.00	32	1.700	129.91
2	8.030	- 131.47	34	1.420	130.47
4	6.850	- 147.88	36	1.190	130.99
6	6.030	- 172.43	38	1.010	131.49
8	6.300	161.69	40	0.870	131.95
10	7.210	144.23	42	0.750	132.38
12	7.950	134.71	44	0.650	132.78
14	8.120	129.91	46	0.570	133.15
16	7.650	127.73	48	0.500	133.49
18	6.740	126.93	50	0.440	133.80
20	5.670	126.84	52	0.390	134.09
22	4.650	127.11	54	0.350	134.35
24	3.770	127.58	56	0.310	134.60
26	3.060	128.13	58	0.280	134.82
28	2.490	128.73	60	0.250	135.02
30	2.050	129.32	62	0.2300	135.21

Cara satu satunya untuk mengantisipasi kondisi ini adalah dengan mempertinggi menara / tiang transmisinya sedemikian rupa sehingga jarak *Clearance* antara ujung ranting teratas pohon dengan konduktor fasa masih mem punyai celah udara minimal 6 meter atau menerapkan aturan menteri tentang ruang bebas (*Right of Way*, ROW) [9] [10][11]. *Right Of Way* atau ruang bebas adalah ruang yang dibatasi oleh bidang vertikal dan

horizontal di sekeliling dan di sepanjang konduktor SUTT, SUTET, atau SUTTAS di mana tidak boleh ada benda di dalamnya demi keselamatan manusia, makhluk hidup, dan benda lainnya serta keamanan operasi SUTT, SUTET, dan SUTTAS. Kegiatan untuk menjaga ROW ini merupakan kegiatan rutin yang dilakukan untuk mengamankan ruang bebas minimum vertikal dari konduktor Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) yang ada di wilayah kerja Unit Induk Transmisi. Kegiatan yang dilakukan berupa pemangkasan dan penebangan beberapa pohon yang sudah melewati jarak batas aman, di sepanjang jaringan SUTET 500 kV.

Pada saat SUTET-500 kV beroperasi dalam kondisi *steady-state* pemasangan kawat tanah dapat menurunkan angka gradien tegangan dipermukaan tanah. Pada Gbr. 11b. kehadiran pohon Sengon (setinggi 9 meter) pada jarak *lateral distance* sejauh 12 meter dari poros menara/tiang transmisi, saat SUTET-500 kV beroperasi dalam kondisi *steady-state*, ternyata hanya menaikkan paparan medan listrik di titik ranting teratas pohon Sengon sebesar 249.4 kV/m. Kondisi gradien tegangan ini tidak membuat terjadi kegagalan *insulation medium udara* (karena di bawah harga kekuatan dielektrik medium udara, yaitu sebesar : 32 000 kV/m atau 32 kV/mm). oleh karena itulah “**sebelum**” terjadi insiden tembus udara pada *span tower* : T.434 – T.435 kondisi aman-aman saja, dan ini wajar, tetapi jangan lupa, walaupun gradien tegangannya 249.4 kV/m namun sudah ada ‘**arus induksi**’ yang masuk di dalam batang pohon Sengon menuju tanah, dan berpotensi menimbulkan tegangan langkah di permukaan tanah meskipun dalam kondisi transmisi SUTET beroperasi *steady-state* dengan tegangan operasional 500 kV. Kemudian, pada tanggal 04 Agustus 2019 terjadilah fenomena tembus udara (*breakdown*) pada rute Ungaran – Pemalang di *span* : T.434 – T.435, dusun Malon. Pada *point* ini terindikasi bahwa ada terjadi tegangan lebih (*over-voltage*) yang “**sangat ekstrim**” yang berdasarkan simulasi, *over-voltage*-nya sebesar 37 100 kV. Selanjutnya, apa yang menyebabkan *over voltage* sedemikian besarnya ... ?, dan sampai disini, belum bisa dipastikan sumbernya dari mana ... ?.

Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa mitigasi yang dikerjakan dengan menggunakan bentangan kawat-tanah di bawah jaringan SUTET-500 pada kondisi *steady-state* hasilnya mempunyai persesuaian yang baik (*good agree ment*) dengan apa yang dikerjakan oleh *Electric Power Research Institute*, EPRI, halaman : 270 – 272 [6][8], meskipun EPRI mengerjakan pd level teg. 1145 kV. Dalam simulasi ini pd kondisi *steady-state* 500 kV, setelah mitigasi dengan pemasangan kawat tanah di bawah jaringan SUTET-500 kV, penurunan medan listrik pada titik 12 meter sebesar  $(10.254 - 7.950) \text{ kV/m} = 2.304 \text{ kV/m}$  atau sebesar 22.469 %  $\approx$  22.5 % (lihat : Gbr. 14b, Tabel : 5 dan Tabel : 6).

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

##### Kesimpulan

Setelah melakukan simulasi komputer untuk mitigasi kebencanaan *black-out* pada aspek paparan (*exposure*) medan listrik di bawah jaringan SUTET-500 kV didapat beberapa *point* kesimpulan, yaitu :

1. Mitigasi dapat dikerjakan dengan memasang sebuah bentangan kawat tanah (berbentuk silinderis dengan diameter sangat kecil) di bawah jaringan SUTET-500 kV pada titik dimana gradien medan listriknya ingin direduksi. Mitigasi ini mampu menurunkan intensitas medan listrik sebesar 22.5 %, yaitu dari 10.254 (kV/m) menjadi 7.95 (kV/m) setelah pemasangan kawat-tanah di bawah jaringan SUTET.
2. Penggunaan kawat tanah di bawah jaringan tidak dapat dilakukan mitigasi pada kasus kehadiran pohon Sengon karena ketinggian kawat tanah hanya 7 meter sedangkan ketinggian pohon Sengon 9 meter.
3. Untuk mengantisipasi kesimpulan butir dua (2) di atas perlu memakai kebijakan tentang ruang bebas dan jarak bebas minimum sebagaimana peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor : 02 tahun 2019 atau melakukan modifikasi dimensi ketinggian *tower* pada kawasan tertentu dimana rawan terhadap tembus (*breakdown*) medium udara.

##### SARAN

Untuk mendapatkan unsur “**estetika**” dalam pemasangan kawat tanah di bawah jaringan SUTET perlu di tentukan solusi tentang : bentuk, pola, dimensi ruang dan struktur material yang digunakan sebagai pengganti kawat tanah silinderis tunggal (Gambar. 13). Hal ini bisa dikerjakan dengan metoda **Triz** melalui 40 prinsip matriks kontradiksi **Triz**.

**Daftar Pustaka**

- [1] Utama, B., Yuliani, O, Handayani, T., “Mitigasi Kegagalan *Insulation* Udara di Zona *Right of Way* (ROW) pada Ketinggian Pohon *Paraserianthes-Falcataria*”, KURVATEK, 2020; 05 (1): 97 – 111. “2019 Pemadaman Jawa”[https://translate.google.com/translate?u=https://en.wikipedia.org/wiki/2019\\_Java\\_blackout&hl=id&sl=en&tl=id&client=srp&prev=search](https://translate.google.com/translate?u=https://en.wikipedia.org/wiki/2019_Java_blackout&hl=id&sl=en&tl=id&client=srp&prev=search)
- [2] “Aksi Presiden SBY dan Sejarah mati Listrik di Jawa – Bali Tahun 2005”<https://tirto.id/aksi-presiden-sby-sejarah-mati-listrik-di-jawa-bali-tahun-2005-efFp>
- [3] Anubhav Rath, “Indian Blackouts of Juli 2012 : What Happened and Why ... ?”, Desember 01, 2016, <https://medium.com/clean-energy-for-billions/indian-blackouts-of-july-2012-what-happened-and-why-639e31fb52ad>
- [4] Utama, B., “Pengurangan Pollusi Radiasi Medan Elektromagnetik dengan Penempatan Kawat *Grounding* antara Konduktor Phasa dan Kontur Permukaan Tanah”, Prosidings ReTII-VIII, Yogyakarta – Indonesia, tahun 2013, hal. E59 – E64.
- [5] Deno, DW., Zaffanella, LE., “*Transmission Line Reference Book 345 kV and Above*”, Edition 2, Palo-Alto, California (CA) 94304 - Amerika Serikat (USA), 1975 : 270 – 272.
- [6] Chaston, AN., LaForest, JJ., Ramirez, AR., “*Electrical Characteristics of EHV-UHV Conductor Configurations and Circuit* in : *Transmission Lines Reference Book 345 kV and Above*”, 2nd ed., Electric Power Reseach Institute (EPRI), Palo alto, CA-USA ; 1975: 118 – 120.
- [7] Deno, DW., Zaffanella, LE., “*Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines and Station in: Transmission Lines Reference Book 345 kV and Above* 2 nd ed. Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, California (CA 94304) -USA; 1975: 248 – 269 ; 270 – 272 ; 273 – 280.
- [8] Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi tentang : “Ruang Bebas Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET utk Penyaluran Tenaga Listrik)”, Menteri Pertambangan dan Energi Republik Indonesia, 7 Februari 1992, Lamp., hal. 9.
- [9] Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 18 Thn. 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.
- [10] 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 pd. Saluran Udara Tegangan Tinggi, Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi dan Saluran Udara Tegangan Tinggi Arus Searah untuk Penyaluran Tenaga Listrik