

Modelling Mitigasi Paparan (Exposure) Medan Listrik Melalui Inovasi Penggunaan Kisi-Kisi Kawat Grounding Dan Tanaman Rambat Berbunga

Budi Utama¹

¹ Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Korespondensi : budiutamadautama@gmail.com

ABSTRAK

Pereduksian intensitas paparan medan listrik di bawah Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi, SUTET, (Ultra High Voltage Transmission Lines) dikerjakan melalui remodifikasi modelling Matriks Koefisien Potensial Maxwell pada kondisi ‘dengan dan tanpa’ kawat tanah yang di grounding dan dibentangkan sejajar dengan bentangan konduktor fasanya. Pengembangan melalui inovasi dari satu kawat tanah ini menjadi berbentuk kisi-kisi, yang diletakkan di bawah SUTET, mampu mengurangi paparan intensitas medan listrik di bawah jaringan SUTET. Metode modellingnya dikerjakan dengan menyelesaikan persamaan elektrostatik pada setiap konduktor fasa yang juga disertai dengan kawat tanah (di grounding) yang dibentangkan di bawah SUTET pada ketinggian tertentu dari permukaan tanah. Kawat tanah tunggal ini di bentuk menjadi kawat yang berkisi-kisi. Hasil inovasi ini dapat digunakan untuk rumah-rumah yang berada di bawah rute SUTET dimana bagian atas kawat-kisinya dapat ditambahkan jenis tumbuh tumbuhan rambat/berbunga yang dapat menambah aspek estetika (*aesthetic*).

Kata kunci: Modelling, Mitigasi, Medan-Listrik, Inovasi

ABSTRACT

The reduction of the intensity of the electric field exposure under the Extra High Voltage Transmission Lines was carried out by modifying the Maxwell Potential Coefficient Matrix modelling at condition the "with and without" ground wire which was grounded and stretched parallel to the stretch of the phase conductor. The development through the innovation of this single ground wire into a grid, which was placed under the EHV Transmission Lines, reduced the exposure the intensity of the electric field under the EHV Transmission Lines. The modelling method carried out by solving the electrostatic equation for each phase conductor which also accompanied by a ground wire which was stretched under the EHV Transmission Lines with a certain height above the ground surface. The single grounding wire were formed into the gratings wire. The results of this innovation can be used for houses that located under the EHV Transmission Lines route where the top of the gratings wire can also be added with types of vines/flowering plants that can be increased aesthetic aspects.

Keyword : Modelling, Mitigation, Electric-Field, Innovation.

1. PENDAHULUAN

Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV telah menjadi isu nasional karena diduga berbahaya bagi kesehatan makhluk hidup (jiwa manusia). Saat PLN membangun SUTET 500 kV untuk memperkuat sistem kelistrikan di wilayah Jawa dan Bali, pada tahun 1991 mulai timbul penolakan warga dari Jawa Timur (Gresik, Singosari), dan tahun 2004 timbul penolakan warga dari Jawa Barat (Sumedang, Bogor, Cianjur, Majalengka) yang secara bersama-sama melakukan protes ke Istana Merdeka, dengan alasan membahayakan kesehatan [1]. Terjadi pemadaman listrik sebagian pulau Jawa, 04 Agustus 2019 dikarenakan angka intensitas medan listrik yang terpapar di bawah SUTET-500 kV telah melampaui kekuatan dielektrik medium udara, sehingga terjadi loncatan bunga api listrik / tembus listrik (*breakdown*) ke ranting pohon Sengon di dusun Malon, Desa Gunung Pati, Kecamatan Gunung Pati – kota Semarang. Tembus listrik ini terjadi pada gawang (*tower-span*) antara tiang T.434 dan T.435. Didasarkan hasil simulasi gradien tegangan pada medium udara disekitar konduktor fasa 500 kV saat terjadi tembus listrik ini (*breakdown*) mencapai 66 861 kV/m [2].

Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV sampai dengan saat ini telah membentuk jaringan kelistrikan yang mempunyai rute jalur Utara dan jalur Selatan pulau Jawa, membentang dari sisi ‘Timur – Barat’ pulau Jawa, dan rute ini sudah membentuk jaringan *loop*. Setiap rute yang dilalui oleh SUTET-500 kV ini konsekwensinya di bawah jaringannya selalu terpapar medan elektromagnetik, yaitu paparan medan listrik dan medan magnet. Medan listrik yang timbul ini diidentifikasi sebagai medan listrik yang takhomogen dengan tipe *quasy-static*. Medan listriknya termasuk pada medan listrik frequency rendah yang

ekstrim (*Extremely Low Frequency*, ELF). Nilai kisaran ELF ini antara 30 Hz sampai dengan 300 Hz. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi merupakan sebuah media transmisi daya listrik yang dioperasikan pada level tegangan tinggi dengan frekuensi 50 Hz atau 60 Hz, guna menyalurkan/mengirimkan daya listrik dalam skala besar. Karena media transmisi ini dioperasikan pada level tegangan tinggi maka masalah yang harus dipertimbangkan adalah “teknologi *insulation*”-nya yang selalu berkaitan dengan angka gradien-tegangan (mempunyai satuan kV/m) yang dihasilkan oleh sistem tegangan tinggi.

Rencana besar pemerintah untuk meningkatkan kesejahteraan rakyat melalui industrialisasi tampaknya meru pakan suatu rencana yang patut didukung oleh semua pihak. Berbagai investasi dalam bidang industri pada saat ini telah banyak dilakukan oleh pihak swasta, baik melalui penanaman modal dalam negeri (PMDN) maupun melalui Penanaman Modal Asing (PMA). Sedangkan dari pihak pemerintah sendiri rupanya juga sudah cukup banyak yang dikerjakan melalui sektor industri, antara lain melalui kiprah Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang tergabung dalam kelompok industri strategis (Badan Pengelola Industri Strategis, BPIS) dan juga melalui industri petrokimia, industri semen, industri logam dan industri berat lainnya. Tidak bisa dipungkiri bahwa semua kegiatan industri seperti di atas hanya dapat berjalan apabila tenaga listrik tersedia cukup memadai. Untuk mengatasi kebutuhan tenaga listrik tersebut, pihak pemerintah juga sudah memikirkannya antara lain melalui pembangunan pembangkit tenaga listrik berskala besar seperti yang ada di PLTU Suralaya (Jawa Barat), PLTU Paiton (Jawa Timur) dan PLTU Ujung Jati (Jawa Tengah), Unit Pembangkit (UP) PLTGU *Block I* Muara Karang (MKR) Jakarta-Utara, dan hingga saat ini UP MKR dalam proses pembangunan PLTGU Blok III berkapasitas 500 MW dan telah masuk ke pipa besar SUTET-500 kV tahun 2020 [2]. Selain dari itu, pemerintah juga mengizinkan kepada pihak swasta untuk menanamkan modal dalam bidang penyediaan tenaga listrik dalam rangka pemenuhan kebutuhan listrik untuk industrialisasi. Hanya saja penjualan tenaga listrik yang dihasilkan oleh swasta kepada konsumen masih tetap melalui PLN sesuai dengan ketentuan perundangan yang berlaku. Media saluran transmisi merupakan “pipa-besar” untuk menyalurkan tenaga listrik secara besar besaran dengan regulasinya di pegang oleh pemerintah melalui Perusahaan Listrik Negara (PLN) dengan ketentuan beberapa Peraturan Menteri (Permen).

Fakta dan Info Seputar Pengembangan Saluran Transmisi

Ketika seseorang mengetik kata SUTET pada mesin pencari *Google*, nampaknya mayoritas informasi yang akan diperoleh adalah “bahaya membangun rumah dekat / di bawah jaringan SUTET” atau terpikir tentang “kesehat an” bagi orang yang berdomisili disekitar (di bawah) SUTET. Tinggal di rumah dekat SUTET dianggap memiliki dampak berbahaya bagi kesehatan. Apakah hal ini benar adanya ... ?, lantas apa yang perlu dilakukan jika tinggal di sekitar SUTET ... ?.

Ruang bebas merupakan area/kawasan/zona dengan jarak atau radius tertentu yang diukur dari tapak tiang SUTET yang harus terbebas dari bangunan apapun juga. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menerbitkan Peraturan Menteri Nomor 18, tahun 2015, tentang ruang bebas dan jarak bebas minimum pada SUTET. Dalam peraturan tersebut diatur jarak aman yang harus dipenuhi berdasarkan jenis dan level tegangan operasi saluran transmisi [3][4][5] :

Transmisi SUTT 55 kV jenis tiang baja memiliki ruang bebas 4 meter.

Transmisi SUTT 66 kV jenis tiang beton memiliki ruang bebas 4 meter.

Transmisi SUTT 66 kV jenis menara memiliki ruang bebas 7 meter.

Transmisi SUTT 150 kV jenis tiang baja memiliki ruang bebas 7 meter.

Transmisi SUTT 150 kV jenis tiang beton memiliki ruang bebas 6 meter.

Transmisi SUTT 150 kV jenis tiang beton memiliki ruang bebas 5 meter.

Transmisi SUTT 150 kV jenis menara memiliki ruang bebas 10 meter.

Transmisi SUTET 275 kV jenis sirkuit ganda memiliki ruang bebas 13 meter.

Transmisi SUTET 500 kV jenis sirkuit tunggal memiliki ruang bebas 22 meter.

Transmisi SUTET 500 kV jenis sirkuit ganda memiliki ruang bebas 17 meter.

Transmisi SUTTAS 250 kV memiliki ruang bebas 14 meter.

Transmisi SUTTAS 500 kV memiliki ruang bebas 18 meter.

Catatan : SUTT = saluran Udara Tegangan Tinggi dan SUTTAS = Saluran Udara Tegangan Tinggi Arus Searah.



Gambar 1. Sekelompok Rumah Berada di bawah SUTET dgn tower Konfigurasi Horizontal, 2 Kawat Tanah, Rangkaian Tunggal.

Sejak dahulu masyarakat kita percaya bahwa membangun rumah atau tinggal berdekatan dengan kawasan SUTET memiliki dampak bagi kesehatan dan keselamatan jiwa kita. Tanpa banyak bertanya, berbagai informasi tersebut kita telan mentah-mentah tanpa mencoba untuk mencari tahu kebenarannya.



Gambar 2. Jaringan SUTET-500 kV, Konfigurasi Vertikal, Rangkaian Ganda, di atas jalan dan di atas rumah penduduk setempat

Bermula pada tahun 1979, kekhawatiran akan pengaruh buruk medan listrik terhadap kesehatan manusia dipicu oleh publikasi hasil penelitian yang dilakukan oleh *Wertheimer* dan *Leeper* di Amerika Serikat [6]. Penelitian tersebut secara umum menyimpulkan ada hubungan kenaikan risiko terjadinya kanker pada anak yang memiliki tempat tinggal yang berdekatan dengan jaringan transmisi listrik tegangan tinggi. Tetapi perlu diingat bahwa *Wertheimer* dan *Leeper* hanya meneliti pengaruh dampak ‘medan magnet’ yang ditimbulkan oleh unsur arus yang mengalir di dalam kabel-kabel listrik di Colorado (*United State of America*, USA) pada tahun 1976 – 1977. Jadi, bukan dampak ‘medan listrik’. Medan listrik ditimbulkan oleh unsur (*agent*) variabel tegangan. Sedangkan medan magnet ditimbulkan oleh variabel arus. Ternyata, beberapa tahun berikutnya berbagai penelitian lainnya dilakukan sebagai replikasi dan ekspansi dari penelitian yang dilakukan oleh *Wertheimer* dan *Leeper* yang pada akhirnya diperoleh beberapa kesimpulan yang “cukup beragam”.

Warga dusun Kresen, Bantul, DI Yogyakarta, menggelar demonstrasi di halaman gedung DPRD DIY, Jl. Malioboro Yogyakarta, Senin (9/5/2005) [7]. Para demontran tergabung dalam Forum Peduli Korban SUTET, Kresen. Mereka menolak wilayahnya dilewati jalur SUTET 500 KV. Sebab, wilayah itu merupakan pemukiman padat penduduk. SUTET seharusnya tidak lewat melintasi kecamatan Bantul dan sekitarnya. Saat ini, masih banyak daerah yang jarang penduduk yang bisa dilewati, misalnya melewati wilayah Selatan atau di perbukitan. "Tapi oleh PLN, itu tidak dilakukan, justru melewati dusun Kresen yang padat penduduknya. Intinya, para demontran itu beralasan bahwa jaringan SUTET dapat berdampak pada Kesehatan [7]. Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2018 – 2027 telah direvisi oleh pemerintahan dan sudah disetujui oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) sejak 13 Maret 2018 lalu. Produk dari hasil revisi ini ditetapkan bahwa target bauran energi pembangkit akhir tahun 2025, batu-bara 54.4 %, energi terbarukan 23 %, gas 22.2 % dan BBM 0.4 %. Prosentase unit pembangkit energi ini dilanjutkan dengan pembangunan transmisi 63 855 km, gardu induk 151 424 MVA, jaringan distribusi 526 390 km, dan dihilirnya didukung dengan pembangunan gardu distribusi 50 216 MVA [8]. RUPTL ini telah mengakomodasi percepatan elektrifikasi lebih 2 510 desa yang belum terlistriki [8]. Dengan pengadaan saluran transmisi sepanjang 63 855 km maka aspek *insulation technology* harus disiapkan secara memadai, terutama pada angka gradien tegangan yang terpapar (*exposed*) dipermukaan bumi menjadi keurgensiannya dalam mendukung RUPTL (2018 – 2027), dan juga mengingat bahwa situasi dilapangan semangkin hari akan semangkin terjadi penyempitan ruang bebas (*Righ of Way*) yang disebabkan oleh pertumbuhan populasi dan penyempitan tata kawasan lahan yang dibangun untuk sebuah rumah atau perumahan *public* yang di *plan* oleh sebuah badan pengembang perumahan (*daveloper*).

Makalah ini mencoba menampilkan sebuah inovasi dan pengembangan sebuah kawat tanah (*grounding*) tunggal (dibentangkan di bawah jaringan SUTET dgn. ketinggian tertentu) menjadi berbentuk *modelling* kawat berkisi-kisi yang dikombinasikan dengan jenis tumbuh tumbuhan rambat yang diletakan di atasnya guna mengurangi tingkat gradien tegangan (dalam satuan kV/m) di permukaan tanah yang disebabkan efek elektrostatik oleh SUTET-500 kV.

2. METODE PENELITIAN (10 PT)

2.1 Medium Dielektrik

Bahan atau medium dielektrik (*dielectric*) dalam ilmu kelistrikan terdiri dari 3, yaitu : a). Udara/Gas ; b). Cair ; c), atau dapat juga dibuat dari kombinasi ketiga bahan tersebut. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi tersusun pada komposisi *insulation* medium udara, artinya medium udara bertindak selaku isolasi antar konduktor phasanya dan isolasi antara konduktor phasa dan permukaan tanah yang ada di bawahnya. Udara sebagai medium *insulation* mempunyai nilai kekuatan dielektriknya, yaitu sebesar 32 kV/mm atau sama dengan (32×10^3) kV/m. Karena SUTET-500 kV ini beroperasi pada level tegangan 500 kV (Tegangan Ekstra Tinggi) maka disekeliling konduktor phasanya terisi dengan medan listrik yang mempunyai satuan kV/m. Demikian juga pada permukaan tanah (atau celah udara antara konduktor phasa dan permukaan tanah) akan terpapar medan listrik yang disetiap titiknya mengandung angka nilai gradien tegangan dalam kV per meter (kV/m).

Setiap bahan dielektrik memiliki nilai angka *permittivity* (disimbolkan sebagai ϵ ; dibaca *epsilon*). Jadi karak teristik yang terpenting dari sebuah bahan dielektrik adalah besar kecilnya nilai angka *permittivity*-nya, yakni perbandingan angka *permittivity* bahan/material tsb. dengan nilai angka *permittivity vacuum*-nya,

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Dalam hal mendapatkan bahan tapis untuk pengurangan intensitas medan listrik perlu dibutuhkan material / medium yang mempunyai angka *permittivity* relativ ϵ_r yang besar, sesuai dengan hubungan seperti persamaan (2), sehingga besar kecilnya nilai paparan (*exposure*) medan listriknya berbanding terbalik dengan *permittivity* relativ, ϵ_r , dan berbanding lurus dengan kerapatan fluks listrik (\mathbf{D}) atau kerapatan fluks medannya,

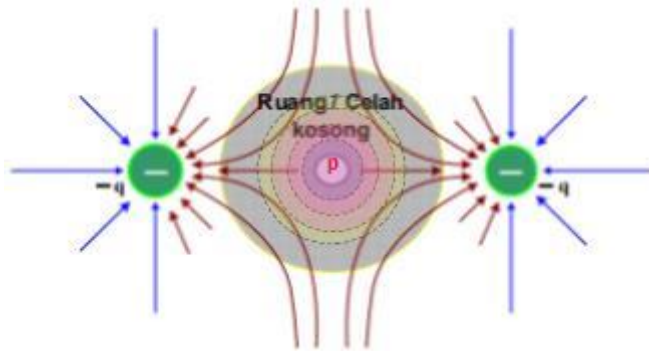
$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{D}}{\epsilon} \quad \left(\frac{\text{kV}}{\text{m}} \right) \quad \text{dengan } \epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (2)$$

Dengan pengertian : \mathbf{E} = intensitas medan listrik, berupa besaran vector dgn satuan (kV/m) ; \mathbf{D} = Kerapatan garis fluks listrik dengan satuan Coulomb per meter persegi (C/m^2), juga berupa besaran vector ; ϵ_r = Nilai *permittivity* relativ bahan dielektrik (tampa satuan), dan ϵ_0 = *permittivity-vacuum* = (8.854×10^{-12}) Farad per meter (F/m). Medium udara mempunyai nilai *permittivity* relativ (ϵ_r) = 1, sehingga untuk udara $\epsilon =$

$(1) \times (8.854 \times 10^{-12}) = (8.854 \times 10^{-12})$ Farad per meter (F/m). Jadi, untuk udara nilai *permittivity*-nya = (8.854×10^{-12}) (F/m).

2.2 Landasan Dasar Teori Pereduksian Medan Listrik

Untuk landasan dasar teori dalam hal mereduksi intensitas medan listrik, diambil dua muatan titik masing masing titik berpolaritas negative. Lalu terpisah dengan jarak tertentu (Gbr. 3). 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/medan (garis warna coklat, Gbr. 3 dengan arah panah menuju ke muatan titiknya, $-q$) tidak akan bertemu satu sama yang lainnya.

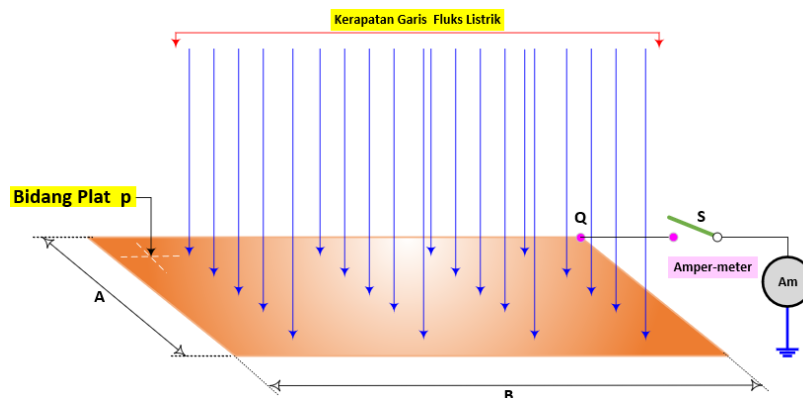


Gambar 3. Ruang 'P' adalah Ruang tidak terdapat Fenomena Kelistrikan karena Ruang 'P' ini tidak mengkaver Lintasan Garis Fluks Listrik.

Karena garis listriknya (warna coklat) tidak saling bertemu, maka konsekwensinya akan ada celah yang kosong terhadap sentuhan garis fluksnya, yaitu lingkaran kecil 'P'. Semakin besar jari-jari lingkaran ini maka ling karannya akan banyak bersentuhan dengan garis fluks listrik dan ini menandakan gejala kelistrikannya akan semang kin 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 se hingga ruang di dalam lingkaran kecil 'P' tidak ada gejala kelistrikan sekecil apapun. Jumlah besar kecilnya kerapat an garis listrik ini menunjukkan besar kecilnya intensitas medan listrik di zona tersebut (lihat persamaan : 2).

2.3 Arus Induksi dan Tegangan Induksi

Jika di bawah SUTET dihadirkan sebuah plat metal tipis (dgn ketebalan ± 1 mm) dan ditempatkan setinggi 1 meter di atas, secara ilustrasi digambarkan seperti di bawah,



Gambar 4. Sejumlah Garis Fluks Listrik dari SUTET yang terpapar (*exposure*) dipermukaan Bidang Plat P dengan Sistem Pentanahan dan Amper meter (Am).

Pada kondisi seperti Gbr. 4 yang mana di atasnya terdapat SUTET, kerapatan garis fluks listrik yang berasal dari SUTET tersebut akan terpapar dipermukaan plat 'p'. Garis fluks listrik ini muncul karena ruang (*space*) antara konduktor SUTET dan posisi bidang plat p terisi sebaran medan listrik, sehingga penggambaran grs. fluks listrik dapat diindikasikan bahwa di zona tsb terdapat sebaran / paparan medan listrik. Garis fluks listrik berawal dari elektroda positif (dalam hal ini konduktor fasa SUTET) dan menabrak permukaan bidang plat p. Dengan ditabraknya bidang plat p (ketika S terbuka) maka semua muatan listrik yang ada di plat p akan terakumulasi di dalamnya selama *switch* S terbuka. Akan tetapi jika

switch S ditutup maka dengan segera muatan listrik yang terakumulasi di bidang plat p tadi akan mengalir masuk kedalam tanah. Sedangkan amper-meter akan menunjukkan besar arus yang masuk ke dalam tanah tadi melalui persamaan fisika listrik : $I = d/dt (q)$, dengan q muatan listrik di dalam plat p yang disebabkan dampak induksi dari SUTET.

Arus dan tegangan induksi yang terjadi di bawah SUTET ketika sesuatu objek hadir bersifat kapasitiv dan arusnya dikenal sebagai “Arus-Perpindahan” atau “Displacement-Current” (jadi bukan arus sebagaimana arus yang mengalir di dalam Amper-meter tadi). Sedangkan tegangan yang ada di plat p (tentunya switch S masih terbuka) adalah tegangan yang terinduksi ke plat p dikarenakan plat tersebut berada di bawah SUTET dan terpapar dengan medan listrik. Kemudian arusnya, yaitu arus perpindahan (yang terakumulasi di dalam plat p), berkompeten dapat mengalir sebagai arus konduksi jika switch S ditutup.

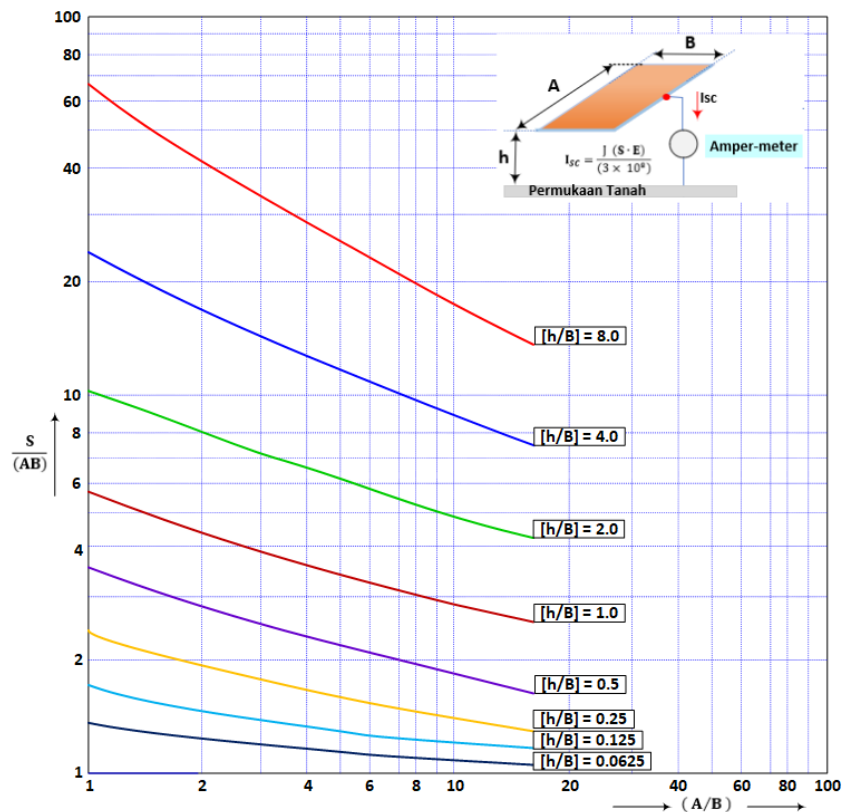
Arus Perpindahan ini, mempunyai satuan (A/m²), dapat dihitung melalui persamaan [9] :

$$I_{displ} = j \omega \cdot \epsilon_0 \cdot E \quad \left(\frac{\text{Amper}}{\text{A}^2} \right) \quad (3)$$

Bila Arus-Perpindahan (I_{displ}) ini dikalikan dengan luasan permukaan plat, yaitu (A · B) maka diperoleh arus yang ada di bidang plat p atau disebut sebagai arus induksi (I_{indk}). Untuk mengukur besar arus yang ada di bidang permukaan p, plat tersebut harus di tanahkan melalui sebuah penghantar yang dicantelkan di titik Q (lihat Gbr. 4), dan amper meter akan menunjukkan besar arus yang mengalir ke tanah. Besar arus induksi yang mengalir ke tanah ini dapat dihitung dengan persamaan (4) [9].

$$I_{indk} = j \omega \cdot \epsilon_0 \cdot E \cdot S \quad (\text{Amper}) \quad (4)$$

Dengan : S = luas permukaan plat p pengumpul muatan [m²] yaitu (A × B) ; E = intensiti medan listrik di titik plat diletakan (V/m) ; $\omega = 2 \pi f$ dimana f adalah frequensi jala-jala = 50 Hz ; $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ (F/m). Catatan : *permittivity* relatif untuk udara = 1.



Gambar 5. Beberapa Kurva (h/B) untuk Mengevaluasi Arus Induksi (I_{sc}) dengan Memakai Persamaan (4) [9].

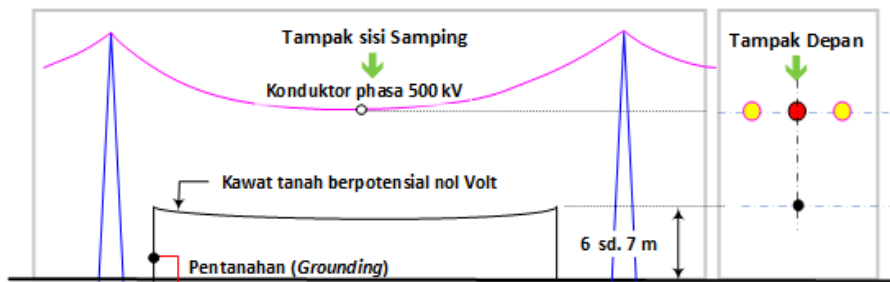
Sedangkan tegangan yang terakumulasi pada permukaan plat p (V_{oc}) berbanding lurus dengan arus induksi (I_{sc}). Tegangan yang terakumulasi di plat p dengan arus induksi (I_{sc}) perlu dievaluasi guna mengetahui level / tingkat nilai kejut listrik (*electrical shock*) yang membahayakan bagi mahluk hidup saat mendesain kisi-kisi kawat untuk mitigasi paparan medan listrik di bawah SUTET. Besar tegangan yang terakumulasi ini dapat dihitung melalui persamaan berikut di bawah ini [9],

$$V_{OC} = I_{SC} \times \left(\frac{1}{j \omega \cdot C_{og} + \frac{1}{R_{og}}} \right) \quad (\text{Volt}) \quad (5)$$

C_{og} = Nilai kapasitans plat p terhadap tanah pada ketinggian h meter (Farad) ; R_{og} = Nilai Resistans pada alur yg dilewati oleh arus induksi (I_{sc}).

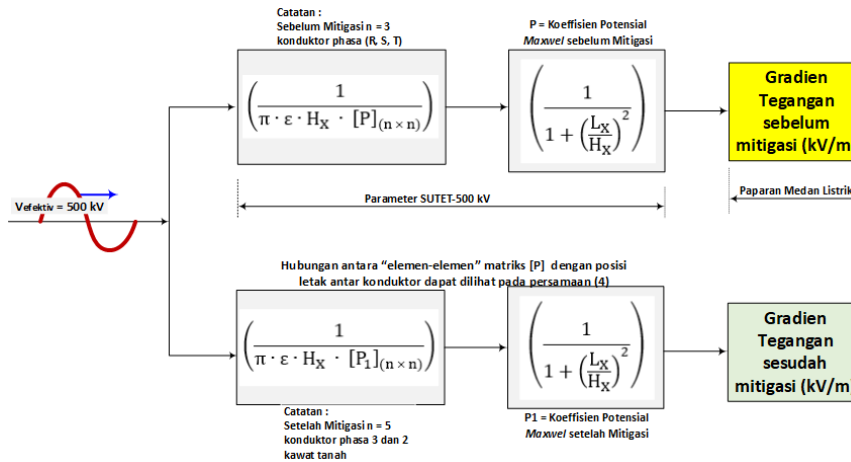
2.4 Modelling Mitigasi Paparan (Exposure) Medan Listrik

Bahan mitigasi berupa kawat baja dengan diameter antara 1.50 mm sd 2.50 mm, yang ditarik sejajar dengan konduktor fase SUTET dan diletakan di bawah jaringan, gambar 6. Penggunaan kawat tanah dibawah jaringan SUTET sebagai cara untuk mengurang intensitas medan listrik (*electrostatic effects*) juga pernah dikerjakan oleh Pro yek Penelitian SUTET yang di sponsori oleh *Electric Power Research Institute (EPRI)*, Palo Alto, California (CA)-*United State of America (USA)* [10].



Gambar 6 Letak Posisi Kawat Tanah berpotensi nol Volt dibentangkan sejajar Konduktor Fase SUTET

Hubungan antar parameter SUTET yang diformulasikan dengan variabel *input* berupa tegangan sistem SUTET-500 kV dan dengan *output* berupa gradien tegangan sebelum dan sesudah dilakukan mitigasi terhadap paparan medan listrik.



Gambar 7 Block-Diagram Operasional Parameter Mitigasi Paparan Medan Listrik SUTET 500 kV dalam Kondisi *Steady-State*

dengan H_x = ketinggian konduktor fase di atas tanah (meter) ; L_x = jarak titik dimana medan listrik ditentukan (kV/m) ; $[P]_{(n \times n)}$ = Matriks Koeffisien Potensial *Maxwell* (meter/Farad) ; $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_o$ adalah nilai *permittivity* medium, dengan ϵ_r = *permittivity* relative, untuk udara = 1 dan $\epsilon_o = 8.854 \times 10^{-12}$ (Farad/meter). *Block*-diagram, Gbr. 7, dipergunakan untuk mendapatkan gambaran seberapa besar penurunan angka gradien tegangan yang mengisi kawasan bermedan listriknya, di bawah jaringan SUTET sebelum dan sesudah pemasangan kawat tanah (dgn diameter tertentu), dengan demikian mitigasi paparan (*exposure*) medan listriknya dapat dikerjakan/diterapkan. Medan listrik dan grafik paparannya dihitung melalui [11],

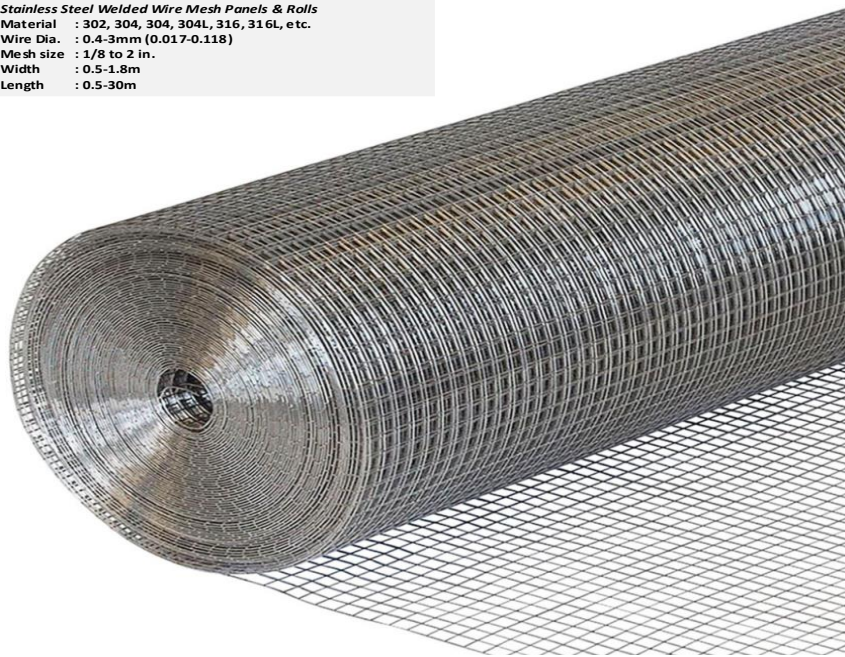
$$E_x = (V_z) \times (H_L) \quad (\text{kV/m}) \quad (6)$$

dengan : $V_E = (Q/2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0)$ (kV) ; $H_L = (2 H_x/H_x^2 + H_L^2)$ (m^{-1}) ; Q = Muatan dlm konduktor (kC) ; $\epsilon_0 = (8.854 \times 10^{-12})$ (F/m) ; H_x = ketinggian konduktor (m) ; H_L = posisi titik dimana medan listriknya dihitung (m).

2.5 Pengembangan Penggunaan Kawat Tanah

Sebuah desain kawat-tanah untuk sebuah mitigasi paparan medan listrik dimungkinkan untuk dikerjakan pada jaringan listrik yang beroperasi pada level tegangan listrik yang tinggi dan ekstra/ultra tinggi. Kawat tanah untuk mitigasi paparan medan listrik ini membentuk ruang (*space*) yang mempunyai beda potensial dan polaritas sama dengan bumi (permukaan tanah), yaitu nol volt. Bentuk dan dimensi kawat tanah arus membentuk segmen terkecil, yang dir

Stainless Steel Welded Wire Mesh Panels & Rolls
 Material : 302, 304, 304L, 316, 316L, etc.
 Wire Dia. : 0.4-3mm (0.017-0.118)
 Mesh size : 1/8 to 2 in.
 Width : 0.5-1.8m
 Length : 0.5-30m



Gambar 8 Lebar gulungan : 0.5 m sd 1.8 m ; panjang gulungan : 0.5 m sd 30 m

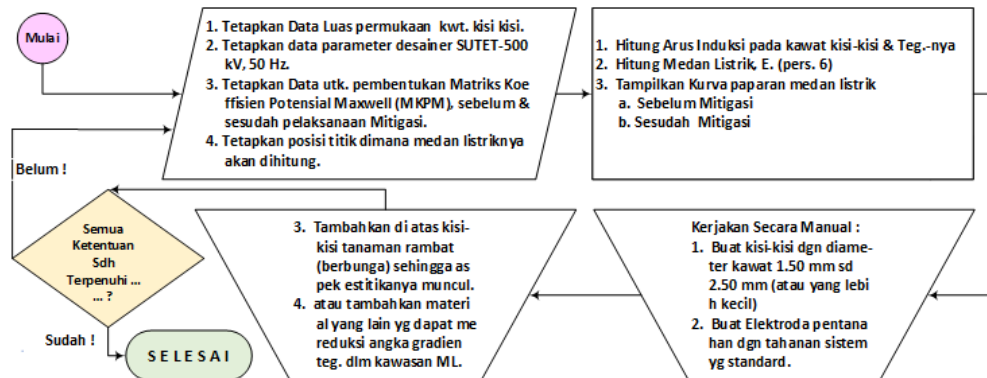
jut (menjadi bentuk “kisi-kisi”) yang terbuat dengan dimensi diameter 1.50 mm sampai dengan 2.50 mm. Pilihan diameter yang lebih besar daripada 2.50 mm justru akan mengkhawatirkan dapat menimbulkan fenomena listrik yang membahayakan, khususnya untuk variabel listrik : arus (I) dan tegangan (V). Kisi-kisi kawat tanah harus “selalu” terhubung dengan potensial nol yaitu dengan melakukan hubungan ke sistem pentanahannya. Jika hubungan pentanahan ini terputus kisi-kisi ini akan sangat membahayakan bagi manusia dan makhluk hidup yang ada disekitarnya. Inilah alasan “kuat”-nya mengapa kawat-tanah yang diketanahkan untuk keperluan mitigasi ini harus dibuat dengan ukuran diameter (d) yang kecil, yaitu : 1.50 mm sd 2.50 mm ($1.50 \text{ mm} \leq d \leq 2.50 \text{ mm}$).

Kawat penghantar untuk ke sistem pentanahan sebaiknya dibungkus dengan pipa paralon yang diameternya sedikit lebih besar dari kawat pengantar ke sistem pentanahannya. Ketinggian yang pantas meletakkan kawat tanah ini adalah sama dan/atau di bawah 7 meter. Sebagai penyangga dapat menggunakan pipa paralon (dengan diameter yang pantas) yang diisi dengan semen-coran.

2.5 Diagram Alir (Flow-Chart)

Diagram alir pelaksanaan pembuatan mitigasi terhadap paparan medan listrik ini terdiri beberapa bagian *statement-box* yang harus dijadikan beberapa pertimbangan pendesaian :

1. Penetapan batasan arus untuk manusia
2. Penetapan tegangan yang terakumulasi di kawat kisi-kisi
3. Pembentukan Matriks Koefisien Potensial *Maxwell* (MKPM)
4. MKPM sebelum dan sesudah dilakukan mitigasi
5. Hitung medan listrik sebelum dan sesudah mitigasi
6. Hitung arus & tegangan induksi yang muncul pada kawat kisi-kisi
7. Tetapkan apakah kawat tanah yang berbentuk kisi kisi sudah layak (aman) digunakan dengan cara meng hitung besar arus yang terinduksi di dalam kisi kisi tsb (gunakan persamaan 4).



Gambar 9 Diagram Alir Pengerjaan Proses Mitigasi

2.6 Bahan / Material Tambahan untuk Mitigasi

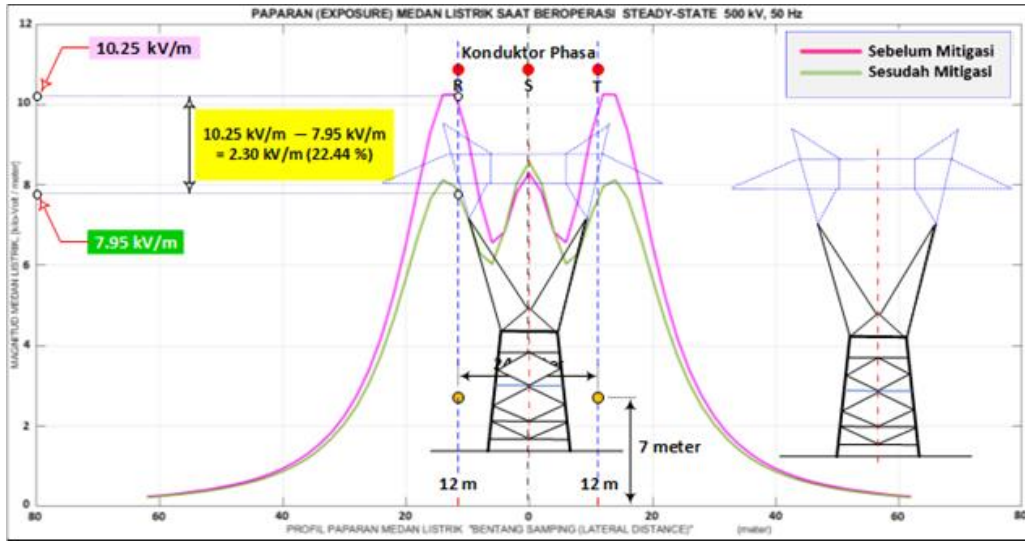
Bahan tambahan untuk mitigasi paparan medan listrik ini bisa menggunakan *styrofoam* (atau material yang mirip dengan karet/gabus) dengan memperhatikan angka nilai *permittivity relativ*-nya. Selain dari karet dapat juga menggunakan material yang terbuat dari batang bambu yang sudah diolah menjadi kepingan kepingan kecil (kira kira : 5 cm × 5 cm). kepingan kecil dari bambu ini disusun seperti menyusun sebuah permainan hurup *puzzle*. Namun demikian dapat juga dikerjakan dengan komposisi bahan *permittivity* gabungan dari kedua bahan tersebut. Perlengkapan sistem pentanahan (*grounding system*) juga diperlukan, terutama elektroda pentanahan vertikal, umumnya digunakan adalah bahan/ material jenis tembaga murni (*Bare-Copper*, BC) dan klem penyambungannya. Untuk memunculkan aspek estetika di atas kisi-kisi kawat dapat ditambahkan tanaman rambat berbunga (Gbr. 11).

3. HASIL DAN ANALISIS

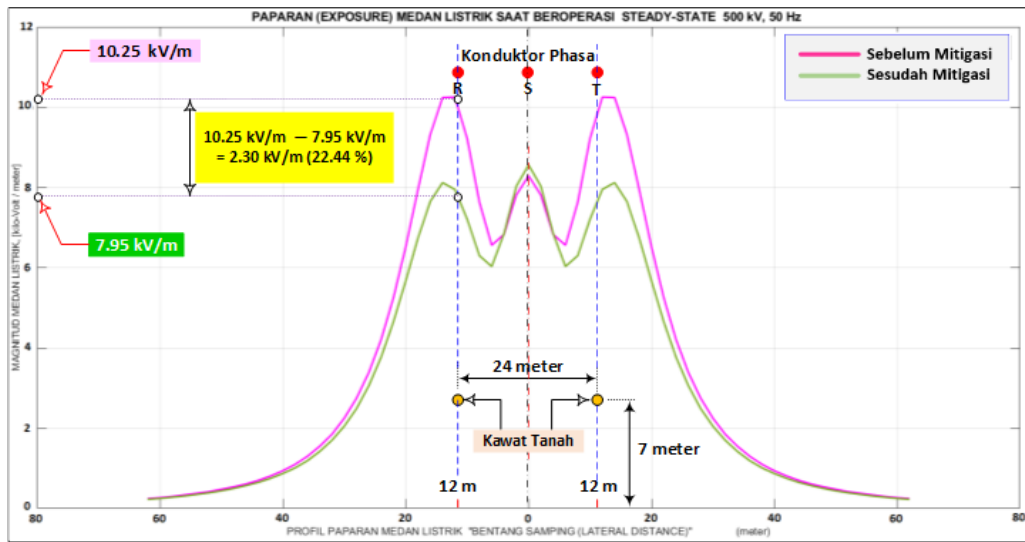
Setelah melakukan simulasi melalui *flow-chart* (sebagaimana ditunjukkan Gbr. 9 di atas), diperoleh hasil paparan medan listrik sebelum dan sesudah mitigasi sepanjang “jarak bentang samping”-nya (*lateral distance*), mulai dari *axis* 0 meter sampai dengan 62 meter dengan interval jarak setiap 2 meter.

Grafik paparan (*exposure*) medan listrik sebelum menggunakan dua bentangan kawat tanah ditunjukkan sebagaimana Gbr. 6a dan 6b, kurva warna merah dan kurva warna hijau. Mitigasi paparan medan listrik dengan menggunakan dua kawat tanah akan menghasilkan medan listrik pada jarak bentang samping (*lateral distance*) dengan intensitas yang lebih ringan/melonggar dan mengindikasikan bahwa kerapatan garis listrik/medan-nya (nilai *D*, pada persamaan : 2) menjadi melonggar dan sebagai konsekwensinya puncak kurva warna merah akan tertarik ke bawah sebesar 22.36 %, yaitu intensitas medan listriknya (nilai *E*, pada persamaan : 2) turun dari 10.25 kV/m menjadi 7.95 kV/m (Gbr. 6b). Penurunan intensitas medan listrik ini disebabkan oleh *modelling* (ukuran / jumlah) elemen Matriks Koeffisien Potensial *Maxwell*-nya membesar, yaitu dari $[P]_{(3 \times 3)}$ menjadi $[P]_{(5 \times 5)}$, Gbr. 7.

Setiap elemen Matriks Koeffisien Potensial *Maxwell* (MKPM) mengandung parameter desain rancang bangun (pola-ruang) dari sebuah struktur Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) yang meliputi dimensi : jari-jari konduktor fasa dan perlindungan kawat tanah udaranya, dimensi jarak antar konduktor fasa dan kawat tanah udara, pola-ruang konduktor bayangan yang tercipta (menggunakan konsep *dipole*), dan posisi ketinggian konduktor fasa dan kawat tanahnya dari permukaan tanah [12].



(a)
Superimposed antara Kurva Medan Listrik dan Struktur Tower



(b)
Gambar 10 Penurunan Intensitas Medan Listrik sebelum dan sesudah Mitigasi dengan pemasangan dua kawat tanah di bawah jaringan Sejauh 12 meter dari poros menara dan 7 meter di atas permukaan tanah

Pada gambar 10b terlihat bahwa, untuk jarak bentang-samping 12 meter (kanan & kiri dari poros menara SUTET) dimana kawat tanah diletakan, intensitas medan listrik yang dihasilkan turun dari 10.25 kV/m menjadi 7.95 kV/m, yaitu sekitar 22.44 %. Pada kasus ini jarak 12 meter adalah tepat ada sebuah *carport* dari sebuah rumah warga, Gbr. 11. Kawat kisi-kisinya dibentangkan pada kerangka atap seluas (3 × 6) m². Kerangka atap ini dipasangkan kisi-kisi kawat yang terbuat dari jenis *Stainless Steel*, diameter 0.4 – 3.0 mm, dengan ukuran *mesh* (mata-jaring) : (1/8 sd 2) *inch* atau sekitar 5 cm. Puncak paparan medan listrik sebelum mitigasi mencapai 10.25 kV/m, terjadi pada jarak bentang samping (*lateral distance*) sejauh 12 meter.

Sedangkan kawasan yang benar-benar aman terletak pada jarak 60 meter dari poros menara / tiang SUTET-500 kV. Namun dilapangan, karena desakan populasi kawasan ini tidak terpelihara sehingga banyak bangunan atau struktur struktur objek lainnya masuk ke dalam zona *Righ of Way* (RoW).

Kawasan / zona RoW adalah zona atau kawasan yang harus dibebaskan dari segala bentuk bangunan fisik permanen maupun yang tak permanen. Karena di dalam kawasan ini cukup membahayakan, lebih lebih pada kondisi hujan lebat dan disertai dengan badai petir (*thunderstorm*). Sehingga dengan demikian dapat dimengerti bahwa, ruang bebas adalah ruang sekeliling penghantar yang dibentuk oleh jarak bebas minimum sepanjang SUTT atau SUTET yang didalam ruang itu harus dibebaskan dari benda-benda dan kegiatan

lainnya. Tabel : 1 yang menyajikan paparan medan listrik sejauh 62 m dari poros menara SUTET-500 kV, saat beroperasi *steady-state* (kondisi mantap/ajek).

Tabel : 1
Paparasi Medan Listrik kondisi SUTET *Steady-State*

Jarak Bentang samping, (Lateral-Distance) [meter]	Sebelum dilakukan Mitigasi dimana Kawat-Tanah belum dipasang di bawah jaringan SUTET		Setelah dilakukan Mitigasi dengan memasang Kawat-Tanah di bawah jaringan SUTET	
	Medan-Listrik [kV/meter]	Sudut [Derajad]	Medan-Listrik [kV/meter]	Sudut [Derajad]
0	8.29	- 1.199	8.56	- 1.200
2	7.81	- 1.338	8.04	- 1.315
4	6.83	- 1.536	6.86	- 1.479
6	6.56	1.789	6.03	- 1.724
8	7.63	1.545	6.30	1.617
10	9.22	1.401	7.22	1.442
12	10.25	1.327	7.95	1.347
14	10.24	1.291	8.12	1.299
16	9.32	1.274	7.66	1.277
18	7.95	1.267	6.74	1.269
20	6.52	1.266	5.67	1.268
22	5.25	1.268	4.65	1.271
24	4.22	1.272	3.77	1.276
26	3.39	1.277	3.06	1.281
28	2.75	1.282	2.50	1.287
30	2.25	1.287	2.05	1.293
32	1.86	1.292	1.70	1.299
34	1.55	1.296	1.42	1.305
36	1.30	1.300	1.19	1.310
38	1.10	1.304	1.01	1.315
40	0.94	1.308	0.87	1.319
42	0.81	1.311	0.75	1.324
44	0.70	1.314	0.65	1.328
46	0.61	1.317	0.57	1.332
48	0.54	1.319	0.50	1.335
50	0.48	1.321	0.44	1.338
52	0.42	1.323	0.39	1.341
54	0.38	1.325	0.35	1.344
56	0.34	1.326	0.31	1.346
58	0.30	1.328	0.28	1.348
60	0.27	1.329	0.25	1.350
62	0.25	1.330	0.23	1.352



Gambar 11 Kawat kisi-kisi *Stainless Steel*, diameter 0.4 – 3.0 mm, ukuran *mesh* (mata-jaring) : (1/8 sd 2) *inch*

Gambar 11 menunjukkan kawat-tanah yang pada tampilan simulasi dalam Gbr. 10b, dengan jumlah dua buah , masing masing berjarak 12 meter dan dipasangkan di bawah jaringan SUTET, telah di innovasikan menjadi kawat yang berkisi-kisi dalam melakukan mitigasi terhadap paparan medan listrik. Hal ini dilakukan supaya pengurangan intensitas medan listriknya menjadi merata dipermukaan kawat kisi kisi tersebut. Sehingga dengan demikian kawasan pada *car-port*-nya lebih aman terhadap radiasi medan listrik.

Pada kurva medan listrik (Gbr. 10), angka paparan medan listrik yang semula 10.25 kV/m turun menjadi 7.95 kV/m. Menurut IRPA (*International Radiation Protection Association*) / INIRC (*International Non-ionizing Radiation Committee*) batasan paparan medan listrik adalah 10 kV/m sepanjang jam kerja (batasan paparan medan listrik di tempat kerja). Sedangkan batasan paparan medan listrik di tempat umum (*public space*) 5 kV/m [13].

Penggunaan kawat kisi kisi yang terbuat dari metal (*stainless steel*) tentunya harus diberi proteksi keamanan tambahan yaitu dengan melakukan pentanahan yang memenuhi standar keamanan (*safety standard*). Untuk tujuan ini maka perlu diketahui besar “arus dan tegangan” yang teinduksi di dalam kawat kisi-kisi tersebut dalam rangka mengupayakan pengamanan bahaya kejut listrik secara komprehensif. Evaluasinya menggunakan kurva grafik gambar 5 yang disertai (dikaitkan) dengan persamaan (4) dan (5).

Sebagai batasan arus yang membahayakan diambil batasan sebesar 0.9 milli-Amper yaitu arus yang dapat dirasakan dan tidak akan menimbulkan bahaya kejut listrik (*electric shock*) pada manusia, dan arus sebesar 0.9 mA ini juga tidak menimbulkan “sensasi” sekecil apapun pd tangan [14][15]. Hasil evaluasi arus induksi pd kisi-kisi kawat tanah sebagai mitigasi paparan medan listrik SUTET 500 kV disandingkan/dibandingkan dengan batasan arus sebagai mana 0.9 mA ini, tabel : 2.

Tabel : 2
Mitigasi Paparan (*exposure*) Medan Listrik disertai Arus dan Tegangan Induksinya

Sebelum Mitigasi			Sesudah Mitigasi			Batasan Arus yg aman [mA]	Keterangan
Medan Listrik, E_1 [kV/m]	Arus Induksi I_1 [mA]	Tegangan Induksi, V_1 [Volt]	Medan Listrik, E_2 [kV/m]	Arus Induksi I_2 [mA]	Tegangan Induksi, V_2 [Volt]		
10.25	0.31408	23848	7.95	0.2436	30742	0.9	Arus Induksi sebelum & sesudah Mitigasi di bawah/lebih kecil dari pada 0.9 mA. > Kelemahan/kekurangan sistem mitigasi ini adalah sulit pengontrolan nilai tahanan pentanahan secara rutin
Setelah mitigasi ternyata terjadi penurunan intensitas medan listrik dari 10.25 kV/m menjadi 7.95 kV/m, yaitu sebesar 22.44 %. Hal terpenting dalam mitigasi ini adalah menjaga sistem pentanahan (<i>grounding-system</i>) tetap baik yaitu memenuhi standar yang telah ditetapkan. Penurunan intensitas medan listrik dapat diatur melalui letak/posisi pemasangan kisi-kisi terhadap titik poros menara SUTET.							

4. KESIMPULAN

1. Mitigasi paparan medan listrik dapat dikerjakan dan dibuat melalui kawat (penghantar tak berisolasi) berstruktur kisi-kisi yang terbuat dari material metal yang tidak membawa proses korosi, yaitu : material *stainless-steel* atau logam /baja lainnya.
2. Keuntungan dari kawat berkisi-kisi dapat ditambahkan tumbuh tumbuhan rambat berbunga sehingga aspek estetika terpenuhi
3. Hal terpenting dari dedaunan tumbuh tumbuhan adalah dedaun tersebut mempunyai nilai angka *permittivity* (ϵ) dimana semangkin tinggi nilai *permittivity* suatu bahan/material/medium maka intensitas medan listrik yang berkontinyunitas akan semangkin kecil.
4. Tegangan Induksi akan hilang dengan sendirinya ketika sistem pentanahan (*grounding system*) pada kisi-kisi tetap pada standar yang dibutuhkan, dan tegangan induksi ini bersifat kapasitif murni.

Adapun saran karena sistem mitigasi ini terkait sangat erat dengan pentanahan (*grounding*), maka supaya diupayakan pemeliharaan sistem pentanahan ini “selalu dievaluasi” dan diukur tanah pentanahannya ketika masuk pada musim kemarau. Untuk kawasan yang mempunyai komposisi tanah kering sistem mitigasi dengan kisi-kisi ini supaya tidak digunakan, misalnya pada kawasan yang berada di kab. Gunung-Kidul. Sebaliknya sistem mitigasi ini sangat cocok untuk kawasan kab. Bantul dan kawasan di Selatan Bantul. Sedangkan untuk kawasan Sleman, Kulonprogo, dan kota Yogyakarta tetap masih dapat menggunakan sistem mitigasi berkawat kisi-kisi ini. Pentanahan yang kurang baik akan membuat kawat kisi-kisi tersebut bertegangan dan kondisi seperti ini sangat tidak diperbolehkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Joedo, LA., Darmawan, IP., “Peningkatan Batas Aman Induksi Elektromagnetik Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 Kv bagi Kesehatan Manusia Berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No.18, Thn. 2015 Juncto No. 2 Taun 2019”, *Journal Kilat*, 2020, Vol. 9 (1), hal. 49 – 56.
- [2]. Utama, B., Yuliani, O., Handayani, Trie., “Mitigasi Kegagalan Insulation Udara di Zona Right of Way (ROW) pada Ketinggian Pohon *Paraserianthes-Falcataria*”, *Journal Kurvatek - Institut Teknologi Nasional Yogyakarta (ITNY)*, April 2020; Vol. 5, No. 1, hal. 97- 111.
- [3]. 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.
- [4]. 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 Saluran Udara Tegangan Tinggi Arus Searah untuk penyaluran Tenaga Listrik.
- [5]. 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.
- [6]. Wertheimer N., Leeper E., “Electrical Wiring Configurations and Childhood Cancer”, *American Journal of Epidemiology*, 1979, Vol. 109, Issue No. 3 : p. 273 – p. 284.
- [7]. Demo di Yogya : SUTET Datang, Birahiku Hilang Detik-news : Senin, 09 Mei 2005 14:48 WIB
Sumber : <https://news.detik.com/berita/d-357624/demo-di-yogya-sutet-datang-birahiku-hilang>
- [8]. Rencana Penyediaan Tenaga Listrik 2018-2027, Energi Terbarukan Banyak Terpangkas daripada Batubara Della Syahni [Jakarta] : Selasa, 20 Maret 2018 Sumber : <https://bit.ly/rencana-energi-listrik-2018-2027>
- [9]. Deno, DW., “Calculating Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines”, IEEE Power and Energy Society (PES) Winter Meeting, New York, New York, NY., 27 January – 01 February, 1974, Vol. ... ?, No. ?, p. 1458 – 1471.
- [10]. Deno, DW., Zaffanella, LE., “Transmission Line Reference Book 345 kV and Above”, Edisi ... ?, Palo Alto – California, Electric Power Research Institute, 1975 ; p. 270 - 272
- [11]. Utama, B., “Visualisasi Medan Listrik Impulse Petir pada Sistem Pemodelan SUTET 500 kV, 50 Hz”, Thesis Yogyakarta, Pascasarjana Universitas Gadjah Mada (UGM), 2002.
- [12]. Utama, B., Suwarti, D., “Modelling Mitigasi Kebencanaan Black Out pada Kasus Paparan (Exposure) Medan Listrik SUTET-500 kV”, Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi (ReTII), Yogyakarta 2020 ; XV : hal. 75 – 89.
- [13]. Isaka, K., Hayashi, N., Naito, K., Mizuno, Y., Sirait, KT., Pakpahan, P., Anggoro, B., “Report of 1995 Joint Research on the Electric and Magnetic Field Measurement in Indonesia”. Seminar on Effects of EMF on Biological Systems in Indonesia (focusing on emf quantities). Bandung, March 5th 1997 : 1 – 6.
- [14]. Barthold, LO., Lambert, EG., Finney, WG., Richard J., Lemire, WAR., Scholmann, RH., Zaffanella, LE., “Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines Part 1 – Hazards and Effects”. Paper 71 TP 644-PWR, Presentation At the IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing, Portland, Oregon-USA, July 18 – 23, 1971 ; p. 422 – 426.

- [15]. Utama, B., Yuliani, O., “*Penentuan Arus Induksi Elektrostatik saat terjadi Black-Out sebagian Jawa untuk Mendukung Rekomendasi Ombudsman*”, Kurvatek, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta (ITNY), April 2021, Vol. 6, No. 1, hal. 103 – 116.