

PENENTUAN ARUS INDUKSI ELEKTROSTATIS SAAT TERJADI “BLACK-OUT” SEBAGIAN JAWA UNTUK MENDUKUNG REKOMENDASI OMBUDSMAN

Budi Utama^{1*}, Oni Yuliani²

^{1,2} Prodi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

*Email : budiutamaduautama@ymail.com

Abstraks

Tulisan ini menganalisis arus induksi elektrostatik yang ditimbulkan oleh paparan medan listrik di bawah jaringan SUTET 500 kV. Perhitungan dikerjakan melalui simulasi dengan menggunakan pemogram Matlab yang memakai data paparan medan listrik di bawah jaringan SUTET-500 kV. Hasil analisis akan disandingkan dengan hasil investigasi tim Ombudsman Republik Indonesia (ORI) terhadap insiden black out yang disebabkan oleh kegagalan insulation pada span-tower T.434 – T.435 di dusun Malon, Semarang, Jawa-Tengah. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada Jarak Bentang Samping (lateral distance) 8 m, 10 m, 12 m, 14 m, 16 m, dan 18 meter merupakan kawasan yang berpotensi breakdown pada medium udara dengan sejumlah arus induksi di dalam ranting bagian atas pohon Sengon dengan kisaran 441.70 mA sampai dengan 4 726.1 mA. Arus Induksi ini bersesuaian dengan medan listrik yang terpapar di bagian ranting pohon Sengon tsb. Fakta ini menunjukkan bahwa PT PLN (persero) telah lalai dalam hal malmanajemen pada Right of Way, ROW pada span tower T.434 – T.435, dan analisis arus induksi ini bersesuaian baik (good agreement) dengan hasil investigasi tim Ombudsman.

Kata Kunci: ROW, Arus-Induksi, Black-Out, Ombudsman.

Abstract

This paper analyzes the electrostatic induced current generated by exposure to an electric field of 500 kV extra high voltage (EHV) transmission lines. The computations were carried out using the MatLab software and data of electric field exposure of 500 kV EHV transmission lines were been used. The results of the analysis will be juxtaposed with the results of the investigation of Ombudsman's Republic of Indonesia (ORI) upon the black out incident which caused by insulation failure in the span-tower of the T.434 - T.435 at Malon hamlet, Semarang, Central Java. The analysis shows that the lateral distance of 8 m, 10 m, 12 m, 14 m, 16 m, and 18 m were an area that have the potential became breakdown-voltage in the air medium accompanied by the flowing induced current in branches of Sengon's tree. This induced currently have a ranged of 441.70 mA up to 4 726.1 mA which have corresponding to the electric field are in the branches of Sengon's tree. This fact shows that PT. PLN (Persero) has been negligent in terms of mal-management of the Right of Way, ROW, in the span tower T.434 - T.435. The analysis of induced have in good agreement to the results of investigation of the Ombudsman team.

Keywords: ROW, Induced-Current, Black-Out, Ombudsman

1. Pendahuluan

Keterjadian busur api listrik (*electric arc*) dalam bentuk tembus listrik (*break-down*) pada medium dielektrik udara di bawah Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV (SUTET-500 kV) mengindikasikan telah terjadi fenomena elektrostatik yang melampaui kekuatan dielektrik medium udara. Peristiwa elektrostatik merupakan kondisi kelistrikan pada konduktor SUTET yang terakumulasi oleh tegangan yang sangat tinggi (disamping tegangan operasionalnya) yang melebihi Tingkat Isolasi Dasar, TID atau *Basic Insulation Level*, BIL). Sumber yang menimbulkan tegangan yang sangat tinggi ini disebabkan oleh terjadi tegangan lebih (*over voltage*) yang bersumber dari gangguan internal maupun gangguan eksternal. Gangguan internal adalah semua gangguan yang berasal dari dalam sistem yaitu proses *switching*, terlepas beban secara tiba tiba, contoh konduktor/penghantar yang terputus. Sedangkan gangguan eksternal dapat berupa gangguan alam, yaitu sambaran pe tir, sambaran langsung maupun tak langsung (sambaran petir induksi). Tegangan lebih yang sangat ekstrim terjadi pada saat insiden *black-out* 04 Agustus 2019 lalu. Akibat tegangan lebih ini udara sebagai medium *insulation* mengalami kegagalan fungsinya sebagai isolasi yang ditandai dengan terjadi tembus udara (*break down*) antara konduktor SUTET-500 kV dan ranting atas pohon Sengon (*Paraserianthes-Falcataria*) di dusun Malon, desa Gunung-Pati, Kec. Gunung-Pati, Semarang, Jawa-Tengah, pada *span tower* nomor: T.434 dan T.435. Gradien tegangan yang muncul pada bagian atas ranting pohon Sengon, ketika terjadi tembus listrik (*break down*), berdasarkan hasil simulasi adalah sebesar 66 861 kV/m [1]. Gradien tegangan yang sebesar ini dipicu oleh pemunculan tegangan lebih yang sangat ekstrim di dalam konduktor SUTET-500 kV, yaitu sebesar 350 000 kV [1].

Konduktor fase 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 (E) yang ditimbulkan oleh konduktor fase SUTET berbanding lurus dengan kerapatan fluks listrik (D) dan berbanding terbalik dengan angka permitivitas (ϵ) dari medium yang dilalui. Dalam hal ini medium adalah udara murni, namun ketika terjadi kabut air halus maka akan terjadi nilai permitivitas gabungan antara butir-butir halus dari air dan udara disekitarnya [1].

Ketika terjadi tegangan lebih (tegangan yang melebihi tegangan operasional) maka di bawah jaringan /saluran transmisi timbul gradien tegangan yang melonjak naik secara ekstrim dan secara tiba-tiba melena sehingga meningkatkan intensitas medan listrik yang terpapar (*exposed*) di bawah jaringan transmisi tersebut dengan satuan (kV/m) [1]. Peningkatan intensitas medan listrik secara impuls ini dapat menimbulkan hubungan singkat ke tanah dalam bentuk tembus listrik (*breakdown*) antara konduktor SUTET-500 kV dan permukaan tanah atau objek-objek yang berkonduksi dengan tanah, kemudian mengalirlah arus listrik yang namanya arus hubungan singkat ke tanah (*short-circuit current*), I_{sc} . Sedangkan tegangannya dikenal sebagai tegangan hubungan terbuka (*open circuit voltage*), V_{oc} . Tegangan hubungan terbuka ini berupa “tegangan-induksi” (*induced-voltage*) yang muncul pada suatu objek (yang mengambang di atas tanah) ketika berada di bawah SUTET dimana objek tersebut sedang dan telah terpapar oleh medan listrik yang ditimbulkan oleh SUTET tersebut. Jika objek yang mengambang ini menyentuh permukaan tanah maka objek ini berpotensi besar untuk segera mengalirkan arus hubungan singkat ke tanah (I_{sc}) ke dalam tanah.

Tembus listrik (*breakdown*) antara konduktor transmisi 500 kV dan ranting teratas dari pohon Sengon dimana insiden ini mengakibatkan *black out* sebagian rute SUTET di Jawa. Fenomena elektrostatik di bawah bentangan *span tower* nomor: T.434 dan T.435 menunjukkan bahwa pengaliran arus hubungan singkat, I_{sc} ke dalam tanah yang disertai dengan suara ledakan yang diikuti kebakaran kecil disekitar / di bawah konduktor SUTET-500 kV mempunyai amplitudo yang sangat besar daripada arus hubungan singkat yang biasanya. Dari hasil pengujian secara simulasi terindikasi bahwa arus hubungan singkat I_{sc} yang sedemikian besar di timbulkan oleh tegangan-lebih impuls sekitar (35×10^4) kV yang terakumulasi di penghantar SUTET 500 kV sehingga menghasilkan paparan medan listrik yang melebihi kekuatan dielektrik udara (berdasarkan simulasi sekitar : 32 060 kV/m sd 66 861 kV/m) pada bentang samping (*lateral distance*) antara 10 m sd 14 m dari poros *tower* [1][2]. Kebakaran kecil pada pohon Sengon dipicu juga oleh nilai tahanan / resistans yang terkandung di dalam pohon Sengon yang cukup besar.



Gambar 1. Terjadi ledakan sebanyak lima kali, sejumlah lahan dan kabel ikut terbakar [3]

Berikut beberapa foto dari lokasi insiden “tembus-listrik / lewat-denyar” (*breakdown / flash-over*) di bawah *span tower* nomor: T.434 – T.435 yg. menimbulkan ledakan dan kebakaran karena busur api listrik [3]. Kejadian dalam foto ini terletak di dusun Malon, desa Gunung-Pati, Kec. Gunung-Pati, 20 kilometer dari pusat kota Semarang. Titik lokasi inilah yang menjadi penyebab terjadi *black-out* massal di wilayah sisi Barat dan sebagian kecil Jawa-Tengah. Insiden *black out* yang terjadi pada hari Minggu, 04 Agustus 2019 ini 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 line SUTET padam secara serentak. Menurut keterangan Ketua RT 01; RW 06, Dusun Malon, Kelurahan Gunung Pati, Supratyo menyatakan, dua warganya menjadi korban ledakan tersebut.



Gambar 2. Lokasi di bawah SUTET yang telah dipasang *Police-Line*

Satu orang mengalami luka berat dan satu luka ringan. Dua warganya, yaitu: ‘Muhammad Said’ dan ‘Usep’ mengalami luka bakar. Said mengalami luka parah dan dirawat di rumah sakit sedangkan Usep luka ringan. Sekarang sudah bisa beraktivitas lagi, tutup Supratyo [4].



Gambar 3. Pohon yang terbakar di bawah SUTET

Gambar 1, Gambar 2, dan Gambar. 3 menunjukkan dampak dari insiden tembus listrik (*breakdown*) antara konduktor transmisi 500 kV dan ranting teratas dari pohon Sengon dimana insiden ini mengakibatkan *black out* sebagian rute SUTET – 500 kV di Jawa. Gambar 4 menunjukkan sebagian pohon sengon yang menjadi sasaran loncatan bunga api listrik (*breakdown*) setelah ditebang dan kawasan disekitarnya dipasangkan garis polisi (*police-line*) guna diinvestigasi lebih lanjut oleh pihak yang berwenang. Pasca ledakan dari tembus listrik sebagian dedaunan pohon terbakar (hangus). Gambar 3 pohon ini berada di bawah SUTET-500 kV, rangkaian ganda, tiang ganda (*double tower*) dengan konfigurasi horizontal (*flat*)



Gambar 4. Box Terminal jaringan listrik 20 kV/220 V ikut meledak

Berikut Gambar 4 menunjukkan *box* terminal jaringan 20 kV/220 Volt ikut meledak / terbakar yang diakibatkan tembus pada medium udara (dielektrikum udara) di bawah SUTET-500 kV juga mengakibatkan kabel telkom ikut terbakar (Gambar 5).



Gambar 5. Tembus-Listrik (*breakdown*) dari konduktor SUTET-500 kV, berlanjut dgn. kebakaran kabel Telkom (video pd segmen durasi detik ke 53) [5]

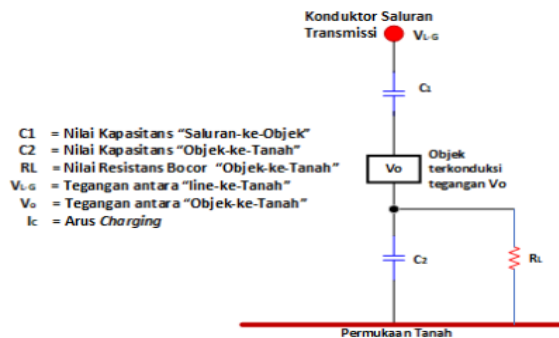
Ombudsman Republik Indonesia yang selanjutnya disebut *Ombudsman* adalah Lembaga Negara yang mempunyai kewenangan mengawasi penyelenggaraan pelayanan publik baik yang diselenggarakan oleh penyelenggara negara dan pemerintahan termasuk yang diselenggarakan oleh Badan Usaha Milik Negara, Badan Usaha Milik Daerah, dan Badan Hukum Milik Negara serta Badan Swasta atau perseorangan yang diberi tugas menyelenggarakan pelayanan publik tertentu yang sebagian atau seluruh dananya bersumber dari anggaran pendapatan dan belanja negara dan/atau anggaran pendapatan dan belanja daerah (Pasal 1 Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2008 tentang *Ombudsman* Republik Indonesia, ORI).

Tulisan ini bertujuan untuk menghitung besar arus induksi yang mengalir di dalam tubuh manusia yang berada di bawah SUTET 500 kV ketika terjadi kegagalan *insulation* medium udara pada *span tower* nomor: T.434 dan T.435, dalam bentuk tembus listrik (*breakdown*), yang berlokasi di dusun Malon, desa Gunung. Pati, Kec. Gunung Pati, Semarang Jawa-Tengah. Hasil perhitungan ini diharapkan dapat mendukung hasil investigasi yang telah direkomendasikan oleh “*Ombudsman* Republik-Indonesia (RI)” yang ditujukan dibidang ketenagalistrikan, dalam hal ini PT. PLN (Persero). Dengan melakukan perhitungan arus induksi ini maka angka arus induksi terbesar dan terkecil dapat diketahui. Demikian juga ketinggian pohon Sengon yang melampau ROW juga dapat diketahui. Zona ROW perlu diketahui (melalui JBS) karena terkait dengan tugas PT PLN melalui mitra kerjanya sebagai *ground patrol*.

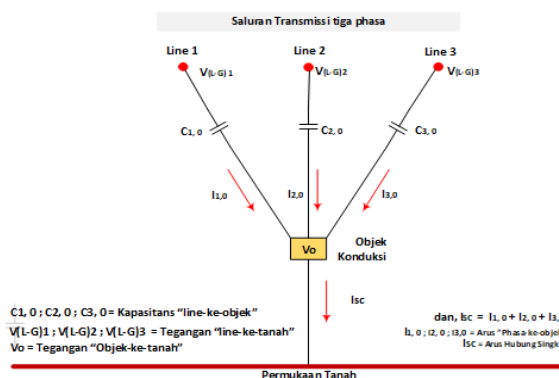
2. Metoda Penelitian

2.1 Modelling Perhitungan V_{oc} dan I_{sc}

Pemodelan (*modelling*) untuk sebuah saluran transmisi dengan tegangan ekstra tinggi dimana di bawahnya terdapat objek yang secara elektrostatis mengalami induksi kelistrikan dari saluran transmisi dapat digambarkan dengan sebuah “model satu-garis sederhana” (Gambar 6 dan Gambar 7) untuk perhitungan tegangan terbuka antara objek dengan permukaan tanah, V_{oc} yang disertai dengan arus *charging* ke objek tersebut [6].



Gambar 6. Modelling satu-garis sederhana untuk perhitungan V_{oc} dan Arus Charging untuk Objek di bawah Saluran Transmisi [6]



Gambar 7. Modelling satu-garis untuk menghitung I_{sc} dari objek konduksi ke tanah [6]

Penentuan nilai angka induksi pada suatu objek (yang terpapar di kawasan bermedan listrik) dapat dilakukan dengan pengukuran (*measurements*) dan / atau dengan perhitungan (*computation*). Pertama, tentukan angka medan listrik di permukaan tanah, dalam kondisi objek tidak hadir baik dari perhitungan teoritis atau dengan pengukuran. Intensitas medan listrik ini kemudian dikalikan dengan fungsi (bentuk) objek untuk memperoleh nilai/angka arus hubung singkat. Pada akhirnya, digunakanlah "network eivalen Norton" yang mewakili objek dan memanfaatkan arus hubung singkat sebagai inputnya, untuk perhitungan tegangan induksi yang ada di objek tersebut terhadap tanah [7].

2.2 Persamaan Efek Induksi

Persamaan efek induksi yang disebabkan medan elektrostatik dari saluran transmisi atau medan elektrostatik yang ditimbulkan oleh Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) dipisah menjadi dua katagori dalam rangka memprediksi arus dan tegangan induksinya, yaitu: (1). Intensitas medan listrik 'di level' permukaan tanah, E_g , medan listrik ini diasumsikan sebagai medan listrik *uniform* dan (2). Distribusi muatan listrik pada saluran transmisinya di asumsikan tidak dipengaruhi oleh kehadiran objek yang ditanahkan (di *grounding*) dimana objek tersebut berada di bawah SUTET [7]. Dalam kondisi ini, induksi pada suatu objek yang ditempatkan dalam medan listrik *uniform* hanyalah milik dari objek tersebut dan berbanding lurus dengan intensitas medan listrik dimana objek tersebut ditempatkan. Perhitungan arus yang terinduksi di dalam suatu objek yang berada di permukaan tanah dan di bawah jaringan SUTET ini masuk pada solusi problem medan listrik 'berdimensi-tiga' (x, y, z). Penyederhanaan yang sesuai/cocok dari masalah "medan listrik berdimensi tiga" ini memungkinkan kajian tentang "pengaruh bentuk objek" (melalui data dimensi objek) pada arus hubung singkat (I_{sc}) dalam sistem frekuensi 60 Hz yang diinduksikan secara elektrostatik [7]. Berikut urutan menghitung tegangan dan arus induksi pada objek yang berada di permukaan tanah [8]:

1. Ukur angka gradien tegangan pada level-permukaan tanah, E dalam satuan Volt/meter, tanpa kehadiran objek
2. Tentukan luasan Ekvivalen, S dalam satuan m^2
3. Hitung arus Hubung-Singkat dengan persamaan [8]:

$$I_{sc} = j \omega \epsilon_r (E) \cdot S \quad (1)$$

4. Tentukan nilai kapasitans objek ke tanah, C_{og} dalam satuan Farad
5. Tentukan resistans bocor antara obojek dan tanah, R_{og} dalam satuan Ohm, dan evaluasi tegangan hubungan terbuka dengan menggunakan [7]:

$$V_{OC} = \frac{I_{SC}}{(j \omega C_{og} + \frac{1}{R_{og}})} \quad \text{(Volt)} \quad (2)$$

Pada persamaan (2), nilai kapasitans objek terhadap saluran transmisi (sama dengan $C_{1,0}$, $C_{2,0}$, dan $C_{3,0}$ pada Gambar 5) biasanya lebih kecil daripada 1 % dari nilai C_{og} (C_{og} adalah nilai kapasitans objek terhadap tanah, sama dengan C_2 pada Gambar 4) [8].

2.3 Penentuan I_{sc} (Arus Induksi) pada Manusia

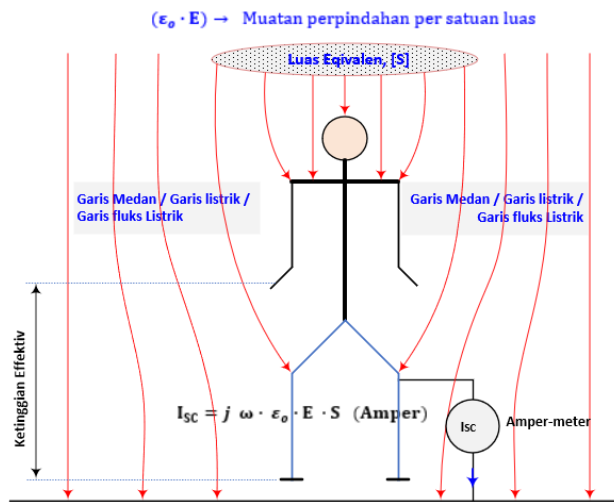
Untuk menentukan besar arus hubung singkat I_{sc} pada seorang manusia yang berada di bawah jaringan SUTET diperlukan beberapa *modelling* pendekatan yang disertai dengan rumusnya. Suatu model rangkaian pembantu *Network Equivalen Norton* diperlukan untuk memprediksi dengan cara yang paling praktis “*Respons Transien Nonlinear*” yang biasanya ditemui dalam situasi nyata. Gambar 8 menunjukkan geometris konseptual dalam rangka menghitung arus hubung singkat I_{sc} [8]. Muatan listrik pada suatu objek terhadap tanah q , dimana objek tersebut telah terpapar medan listrik sebesar E di bawah SUTET, dapat diekspresikan sebagai [8]:

$$q = (E \cdot h) \cdot (C_{og}) \quad \text{[Coulomb]} \quad (3)$$

Dengan : ϵ_0 = permitivitas = 8.854×10^{-12} [Farad/meter] ; h = ketinggian efektif objek dalam satuan meter ; dan C_{og} = kapasitans objek terhadap tanah [Farad]. Kemudian dapat dinyatakan bahwa, arus hubung singkat I_{sc} berbanding lurus dengan q (persamaan 3),

$$I_{SC} = j \omega \cdot q \quad \text{[Amp]} \quad (4)$$

$$I_{SC} = (j \omega \cdot E) \times (h) \times (C_{og}) \quad \text{[Amp]} \quad (5)$$



Gambar 8. Luasan Ekuivalen Tubuh [8]

$$I_{SC} = (j \omega \cdot \epsilon_0 \cdot E) \times \left(\frac{h \cdot C_{og}}{\epsilon_0}\right) \quad \text{[Amp]} \quad (6)$$

Bagian --- $(j \omega \cdot \epsilon_0 \cdot E_m)$ mempunyai dimensi rapat arus [A/m²] atau yang disebut dengan “Arus Perpindahan” (*displacement current*) maka sebagai konsekwensinya pada pers. (6) bagian :

$$\left(\frac{h \cdot C_{og}}{\epsilon_0} \right) \text{ tentunya mempunyai dimensi satuan luas [m}^2\text{]}$$

Sehingga dengan demikian persamaan (6) dapat di tulis menjadi,

$$I_{SC} = J (\omega \cdot E_m) \times (\epsilon_0) \times (A_{eq}) \quad (7)$$

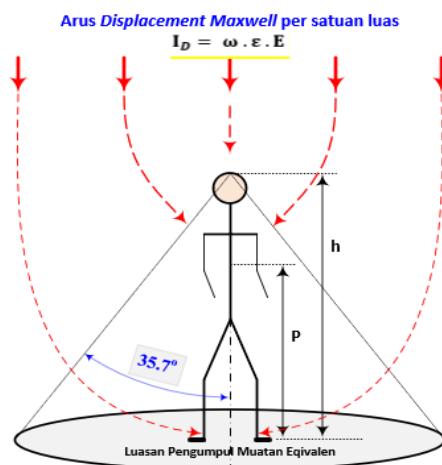
Dengan A_{eq} adalah luasan eqivalen objek dalam satuan [m²]

2.4 Arus Induksi Total yang Masuk ke tubuh Manusia

Variabel A_{eq} (pada persamaan 7) adalah luasan eqivalen bidang dimana seseorang berdiri tegak (lurus) di bawah paparan medan listrik. Luasan eqivalen berupa lingkaran dengan jari-jari sebesar $(\pi \cdot h^2 \cdot \tan^2 35.7^\circ)$. Dengan demikian persamaan (7) menjadi [9], dan bersesuaian dengan Gambar 9.

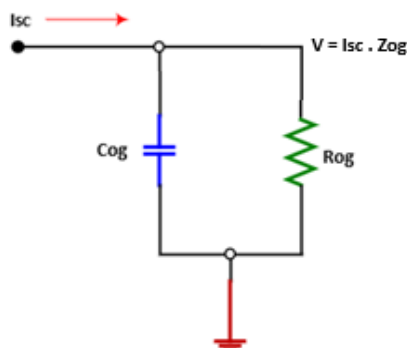
$$I_{SC} = (\omega \cdot \epsilon \cdot E) \times (\pi \cdot h^2 \cdot \tan^2 35.7^\circ) = (5.4 \times 10^{-9}) \cdot h^2 \cdot E \quad [\text{Amper}] \quad (8)$$

Ketika objek ditanahkan secara langsung, arus hubung singkat, I_{sc} , dapat diterapkan ke *network* eqivalen *Norton*, seperti pada Gambar 6 sehingga dapat memprediksi respons transient *nonlinear* yang biasanya ditemui dalam situasi nyata.



Gambar 9. Luasan Pengumpul Muatan Ekvivalen untuk Seorang Manusia [9]

Ketika objek tidak ditanahkan secara langsung, arus hubung singkat, I_{sc} , dapat diterapkan ke *Network* eqivalen *Norton*, seperti pada Gambar 10 supaya dapat memprediksi respons transient *nonlinier* yang biasanya ditemui dalam situasi nyata.



Gambar 10. *Network* Ekvivalen Norton [10]

Nilai *phasor* tegangan dalam kondisi mantap (*steady-state*) dihitung melalui persamaan (2). Nilai Z_{og} adalah besar impedans objek terhadap tanah, yaitu:

$$Z_{og} = \frac{1}{\left(j \omega \cdot C_{og} + \frac{1}{R_{og}} \right)} \quad [\text{Ohm}] \quad (9)$$

2.5 Modelling Formulasi Medan Listrik

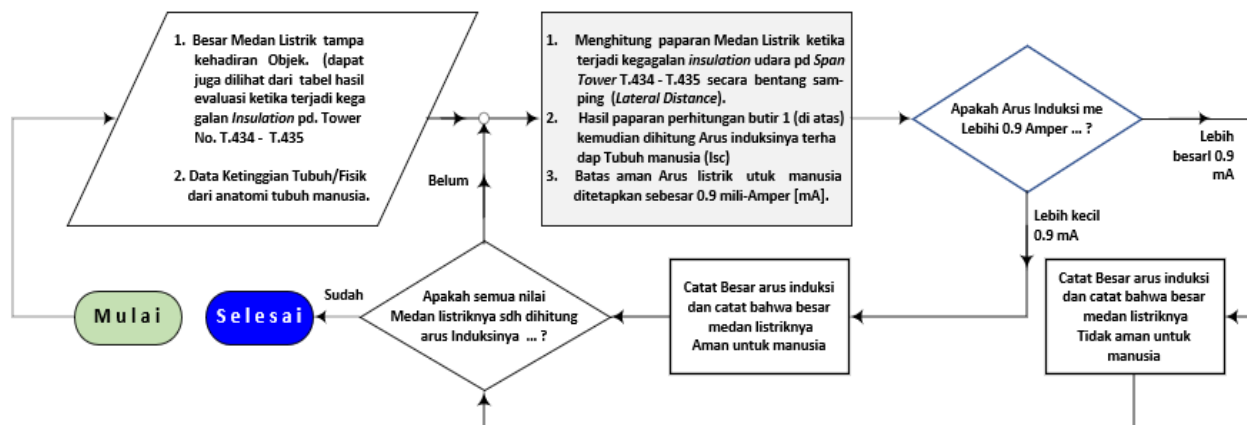
Konduktor SUTET ini menghasilkan medan listrik jenis *Quasi Static* dan membentuk pola medan yang tak homogen (jadi bukan medan listrik yang homogen). Medan listrik ini dirumuskan sebagai berikut [10]:

$$E_x = \left(\frac{q_{rx} + j q_{ix}}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \right) \times \left(\frac{2 H_x}{H_x^2 + L_x^2} \right) \quad [\text{kV/m}] \quad (10)$$

$(q_{rx} + j q_{ix})$ = Muatan listrik yang ada di dalam konduktor SUTET [kC] ; H_x = Ketinggian konduktor SUTET [m] ; L_x = jarak bentang samping (*lateral distance*) dimana intensitas medan listrik akan dihitung [m] ; ϵ_0 = nilai permitivitas = (8.854×10^{-12}) [Farad per meter].

2.6 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian untuk mendapatkan arus induksi elektrostatis ditampilkan dalam diagram alir (*flow-chart*) Gambar 11 berikut,



Gambar 11. Diagram Alir Prosedur Penelitian

3. Hasil dan Analisis

3.1 Paparan Medan Listrik untuk Tegangan Uji Impuls 350 000 kV

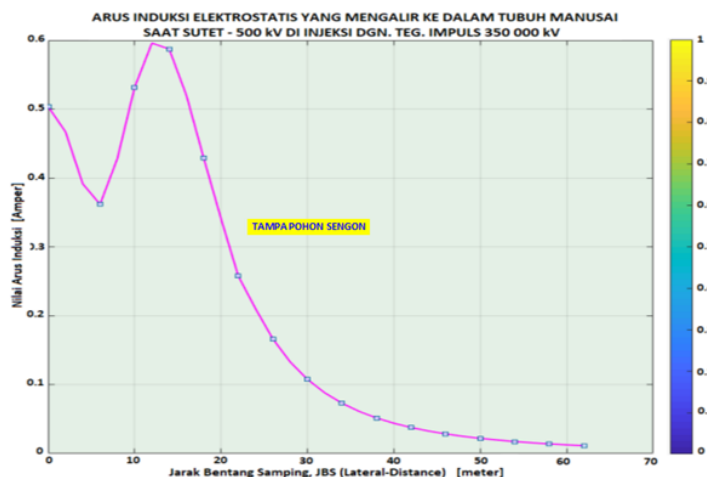
Hasil yang disajikan adalah besar arus induksi elektrostatis ketika sosok seseorang hadir di bawah SUTET, yaitu: arus induksi elektrostatis saat diterapkan tegangan uji impuls 350 000 kV terhadap SUTET-500 kV, pada kondisi: (1). tanpa kehadiran pohon Sengon, dan (2) dengan kehadiran pohon Sengon. Kedua kondisi ini dikerjakan melalui simulasi.

Tabel 1. Besar arus induksi Elektrostatis saat Tegangan Impuls 350 000 kV diinjeksikan ke SUTET-500 kV dengan asumsi tanpa kehadiran pohon Sengon

No	JBS [m]	Paparan Medan Listrik dipermukaan tanah saat tegangan impuls 350 000 kV diinjeksikan ke SUTET-500 kV		Arus Induksi Elektrostatis pada manusia saat teg. Impuls 350 000 kV diinjeksikan ke SUTET-500 kV		No	JBS [m]	Paparan Medan Listrik dipermukaan tanah saat tegangan impuls 350 000 kV diinjeksikan ke SUTET-500 kV		Arus Induksi Elektrostatis pada manusia saat teg. Impuls 350 000 kV diinjeksikan ke SUTET-500 kV	
		[kV/m]	[V/m]	[A]	[mA]			[kV/m]	[V/m]	[A]	[mA]
1	0	7125.67	7125670	0.5037	503.7	17	32	1245.32	1245320	0.0880	88.0
2	2	6609.08	6609080	0.4672	467.2	18	34	1030.71	1030710	0.0729	72.9
3	4	5539.88	5539880	0.3916	391.6	19	36	861.95	861950	0.0609	60.9
4	6	5119.36	5119360	0.3619	361.9	20	38	727.73	727730	0.0514	51.4
5	8	6058.28	6058280	0.4282	428.2	21	40	619.80	619800	0.0438	43.8
6	10	7522.90	7522900	0.5318	531.8	22	42	532.11	532110	0.0376	37.6
7	12	8432.19	8432190	0.5960	596.0	23	44	460.18	460180	0.0325	32.5
8	14	8310.16	8310160	0.5874	587.4	24	46	400.65	400650	0.0283	28.3
9	16	7355.03	7355030	0.5199	519.9	25	48	350.97	350970	0.0248	24.8
10	18	6065.78	6065780	0.4288	428.8	26	50	309.19	309190	0.0219	21.9
11	20	4822.80	4822800	0.3409	340.9	27	52	273.81	273810	0.0194	19.4
12	22	3784.79	3784790	0.2675	267.5	28	54	243.64	243640	0.0172	17.2
13	24	2971.96	2971960	0.2101	210.1	29	56	217.76	217760	0.0154	15.4
14	26	2351.43	2351430	0.1662	166.2	30	58	195.44	195440	0.0138	13.8
15	28	1880.41	1880410	0.1329	132.9	31	60	176.09	176090	0.0124	12.4
16	30	1521.39	1521390	0.1075	107.5	32	62	159.22	159220	0.0113	11.3

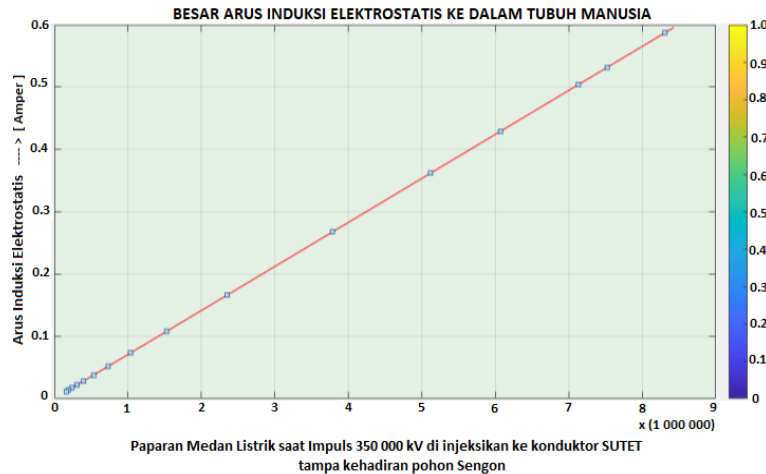
JBS = Jarak Bentang Samping = *Lateral Distance*

Untuk batasan arus yang dapat dirasakan dan tidak menimbulkan bahaya pada manusia atau tidak ada bentuk sensasi sekecil apapun pada tangan di pilih sebesar 0.9 mA atau 1 mA [11]. Dengan demikian nilai arus sebesar 0.9 mA ini nanti akan dibandingkan dengan arus induksi yang telah ditabulasikan ke dalam Tabel 1 (nomor 1 sd nomor 32) tampak semuanya lebih besar daripada 0.9 mA, dan ini akan membahayakan bagi manusia yang sedang berada di bawah SUTET-500 kV, saat SUTET tersebut diinjeksi dgn. tegangan uji impuls 350 000 kV. Arus induksi saat diuji dengan impuls 350 000 kV mengikuti bentuk grafik paparan medan listriknya (gambar 12).



Gambar 12. Arus induksi di dalam tubuh manusia Versus JBS

Perlakuan simulasi tegangan impuls 350 000 kV ini dikerjakan dalam rangka mewakili insiden kondisi dilapangan, ketika terjadi *black-out* 04 Agustus 2019 yang lalu, dimana dengan tegangan sebesar 350 000 kV terjadi kegagalan *insulation* medium udara, antara konduktor fase dan pohon Sengon (setinggi 8 meter) yang terletak di rute Ungaran – Pemalang, *span tower* T.434 – T.435 Dusun Malon, desa Gunung-Pati, Kec. Gunung-Pati, kota Semarang. Berikut hubungan *linear* antara arus induksi elektrostatis (I_{ind}) dan paparan medan listrik (E) di bawah SUTET ketika diinjeksi tegangan uji impuls 350 000 kV (Gambar 13).



Gambar 13. Arus Induksi Elektrostatis berbanding lurus dgn Paparan Medan Listrik

Nilai arus induksi berbanding lurus (*linear*) dengan paparan medan listrik yang ada di bawah SUTET (Gbr. 13). Hal ini ‘bersesuaian-dengan’ (*corresponding to*) pernyataan yang diekspresikan oleh persamaan (7) dan (8). Dengan kehadiran pohon Sengon di bawah SUTET-500 kV yang telah di injeksi dengan tegangan impuls 350 000 kV, kemudian secara virtual, disimulasikan kehadiran seseorang berdiri di titik ranting teratas pohon Sengon (melalui ilustrasi *modelling* sebagaimana gambar 10 & gambar 11) maka arus induksinya di dalam cakupan luasan ekuivalen, S, dan di beberapa tempat (JBS = 0 m sd JBS = 62) dapat dilihat sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 2.

Untuk nilai JBS 8 meter sd 18 meter adalah jarak posisi kawasan pohon Sengon terhadap poros menara SUTET secara *lateral distance*. Nilai paparan medan listrik dan arus induksi elektrostatis pada Tabel 2 untuk JBS 8 m sd 18 m, saat “kehadiran” pohon Sengon lebih besar daripada nilai JBS yang tertera pada tabel 1, ketika “tanpa” kehadiran pohon Sengon. Tabel 1 dan Tabel 2 adalah kondisi terjadi insiden *breakdown* listrik pada ranting teratas pohon Sengon.

Tabel 2. Besar arus induksi Elektrostatis saat Teg. Impuls 350 000 kV di injeksikan ke SUTET-500 kV Dengan asumsi kehadiran pohon Sengon

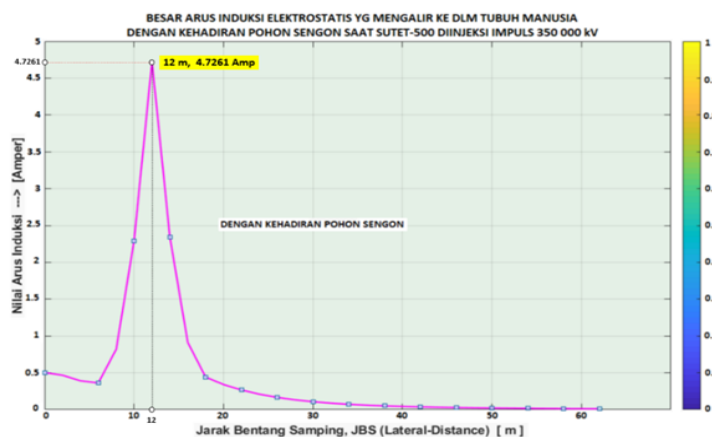
No	JBS [m]	Paparan Medan Listrik di permukaan tanah saat tegangan impuls 350 000 kV di injeksikan ke SUTET-500 kV		Arus Induksi Elektrostatis pada manusia saat Teg. Impuls 350 000 kV di injeksikan ke SUTET- 500kV		No	JBS [m]	Paparan Medan Listrik di permukaan tanah saat tegangan impuls 350 000 kV di injeksikan ke SUTET-500 kV		Arus Induksi Elektrostatis pada manusia saat Teg. Impuls 350 000 kV di injeksikan ke SUTET- 500kV	
		[kV/m]	[V/m]	[A]	[mA]			[kV/m]	[V/m]	[A]	[mA]
1	0	7 125.67	7 125 670	0.5037	503.70	17	32	1 245.32	1 245 320	0.0880	88.00
2	2	6 609.08	6 609 080	0.4672	467.20	18	34	1 030.71	1 030 710	0.0729	72.90
3	4	5 539.88	5 539 880	0.3916	391.60	19	36	861.95	861 950	0.0609	60.90
4	6	5 119.36	5 119 360	0.3619	361.90	20	38	727.73	727 730	0.0514	51.40
5	8	11 589.40	11 589 400	0.8192	819.20	21	40	619.80	619 800	0.0438	43.80
6	10	32 448.10	32 448 100	2.2936	2 293.6	22	42	532.11	532 110	0.0376	37.60
7	12	66 861.13	66 861 130	4.7261	4 726.1	23	44	460.18	460 180	0.0325	32.50
8	14	33 129.75	33 129 750	2.3418	2 341.8	24	46	400.65	400 650	0.0283	28.30
9	16	12 915.15	12 915 150	0.9129	912.90	25	48	350.97	350 970	0.0248	24.80
10	18	6 248.26	6 248 260	0.4417	441.70	26	50	309.19	309 190	0.0219	21.90
11	20	4 822.80	4 822 800	0.3409	340.90	27	52	273.81	273 810	0.0194	19.40
12	22	3 784.79	3 784 790	0.2675	267.50	28	54	243.64	243 640	0.0172	17.20
13	24	2 871.96	2 871 960	0.2101	210.10	29	56	217.76	217 760	0.0154	15.40
14	26	2 351.43	2 351 430	0.1662	166.20	30	58	195.44	195 440	0.0138	13.80
15	28	1 880.41	1 880 410	0.1329	132.90	31	60	176.09	176 090	0.0124	12.40
16	30	1 521.39	1 521 390	0.1075	107.50	32	62	159.22	159 220	0.0113	11.30

JBS = Jarak Bentang Samping = *Lateral Distance*

Untuk tegangan uji impuls 350 000 kV yang diterapkan saat kondisi pohon Sengon dihadirkan pada JBS dari 8 meter sampai dengan 18 meter dari sisi tiang (*tower*), besar arus induksi (diumpamakan dihadirkan seseorang secara *virtual* di atas ranting pohon Sengon) maka besar arus yang terinduksi di dalam tubuh orang tersebut pada BJS = 8 m sampai dengan 18 m masing tang berturut turut adalah (Tabel 2) : 819.20 mA ; 2 293.6 mA ; 4 726.1 mA ; 2 341.8 mA ; 912.90 mA ; dan 441.70 mili-Amper. Semua magnitud arus ini jauh di atas 0.9 mA. Jadi semua arus induksi pada Tabel 1 dan Tabel 2 harus tidak boleh terjadi.

Pada pengujian tegangan impuls sebesar 350 000 kV terhadap SUTET-500 kV dalam kondisi “tampa kehadiran” pohon Sengon, dan pada kondisi “dengan kehadiran” pohon Sengon, terlihat bahwa arus induksi terbesar adalah 4726.1 mA = 4.7261 Amper (Tabel 2, pada JBS = 12 m). Sedangkan arus induksi terkecil adalah 0.0163 mA (Tabel 3, pada JBS = 62 m). Namun demikian, arus yang terinduksi di dlm pohon Sengon tentu saja akan menjadi lebih besar daripada 4.7261 Amper, karena sebuah pohon Sengon strukturnya melebar dengan ranting melba yang meluas secara acak, seluruh ranting pada pohon Sengon terpapar oleh medan listrik dan arus induksi yang mengalir di dalam ranting acai tsb akan menyatu ke dalam batang pohonnya yang kemudian menuju masuk ke tanah melalui akar akarnya. Total arus di dalam batang yang mengalir kebumi inilah yang membuat sebagian pohon menjadi terbakar. Secara pendekatan, melalui *modelling* sosok anatomi manusia (Gambar 6 & Gambar 7), dapat dikatakan bahwa kawasan dengan JBS = 8 meter sampai dengan JBS = 18 meter adalah kawasan yang rawan dan berpotensi terhadap pemunculan arus induksi elektrostatis yang “terbesar” (tabel 2). Semua arus induksi elektrostatis di dalam tabel 1 dan tabel 2 masih *relative* sangat amat besar jika dibandingkan batasan arus yang dapat di tahan oleh manusia yaitu sebesar 0.9 mA.

Berikut gambar 14 menunjukkan arus induksi yang mengalir di dalam struktur pohon Sengon ketika pohon Sengon itu dihadirkan di bawah *span tower tower* nomor: T.434 – T.435 yang terletak di dusun Malon, desa Gunung-Pati, Kec. Gunung-Pati, 20 kilometer dari pusat kota Semarang.



Gambar 14. Arus Induksi ketika Pohon Sengon dihadirkan (secara simulasi) Dimana SUTET diinjeksi impuls 350 000 kV

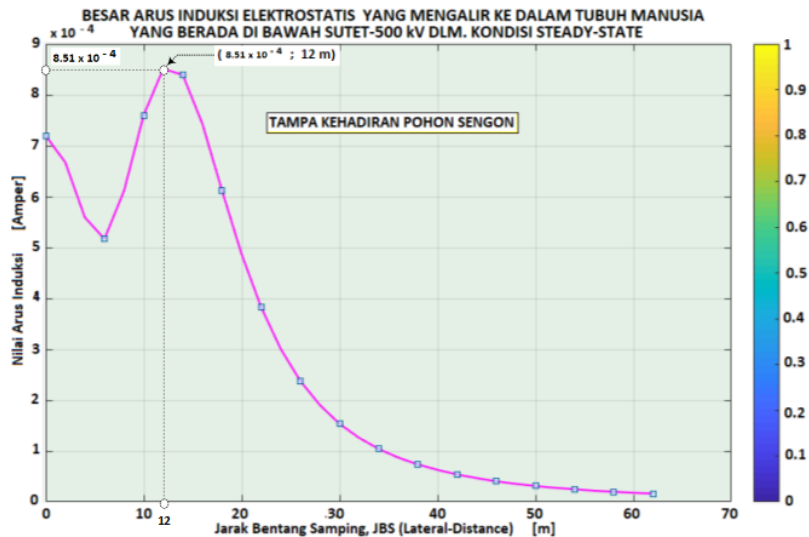
3.2 Paparan Medan Listrik untuk *Steady-State* SUTET- 500 kV

Untuk kondisi SUTET-500 kV dalam operasi *steady-state*, besar arus induksi elektrostatis dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Besar arus induksi Elektrostatis saat SUTET-500 kV beroperasi dalam kondisi *steady-state* Tanpa Kehadiran Pohon Sengon

No	JBS [m]	Paparan Medan Listrik di permukaan tanah saat SUTET-500 kV dlm. Kondisi <i>Steady State</i>		Arus Induksi Elektrostatis pada Manusia saat SUTET-500 kV dlm Kondisi <i>Steady-State</i>		No	JBS [m]	Paparan Medan Listrik di permukaan tanah saat SUTET-500 kV dlm. Kondisi <i>Steady State</i>		Arus Induksi Elektrostatis pada Manusia saat SUTET-500 kV dlm Kondisi <i>Steady-State</i>	
		[kV/m]	[V/m]	[A]	[mA]			[kV/m]	[V/m]	[A]	[mA]
1	0	10.18	10 180	7.19×10^{-4}	0.719	17	32	1.780	1780	1.26×10^{-4}	0.126
2	2	0.944	944	6.67×10^{-4}	0.667	18	34	1.470	1470	1.04×10^{-4}	0.104
3	4	0.791	791	5.59×10^{-4}	0.559	19	36	1.230	1230	8.69×10^{-5}	0.0869
4	6	0.731	731	5.17×10^{-4}	0.517	20	38	1.040	1040	7.35×10^{-5}	0.0735
5	8	0.865	865	6.11×10^{-4}	0.611	21	40	0.890	890	6.29×10^{-5}	0.0629
6	10	10.750	10 750	7.59×10^{-4}	0.759	22	42	0.760	760	5.37×10^{-5}	0.0537
7	12	12.040	12 040	8.51×10^{-4}	0.851	23	44	0.660	660	4.66×10^{-5}	0.0466
8	14	11.870	11 870	8.39×10^{-4}	0.839	24	46	0.570	570	4.03×10^{-5}	0.0403
9	16	10.510	10 510	7.43×10^{-4}	0.743	25	48	0.500	500	3.53×10^{-5}	0.0353
10	18	8.660	8 660	6.12×10^{-4}	0.612	26	50	0.440	440	3.11×10^{-5}	0.0311
11	20	6.890	6 890	4.87×10^{-4}	0.487	27	52	0.390	390	2.76×10^{-5}	0.0276
12	22	5.410	5 410	3.82×10^{-4}	0.382	28	54	0.350	350	2.47×10^{-5}	0.0247
13	24	4.250	4 250	3.00×10^{-4}	0.300	29	56	0.310	310	2.19×10^{-5}	0.0219
14	26	3.360	3 360	2.37×10^{-4}	0.237	30	58	0.280	280	1.98×10^{-5}	0.0198
15	28	2.690	2 690	1.90×10^{-4}	0.190	31	60	0.250	250	1.77×10^{-5}	0.0177
16	30	2.170	2 170	1.53×10^{-4}	0.153	32	62	0.230	230	1.63×10^{-5}	0.0163

Jika diamati dari hasil simulasi untuk tabel 3 dimana SUTET-500 kV dikondisikan dan diinvestigasi (secara simulasi) pada keadaan beroperasi “Steady-State” ternyata terlihat nilai “Jarak Bentang Samping”, JBS = 0 meter sampai dengan JBS =62 meter, kondisi arus yang terinduksinya di bawah angka 0.9 mA. Ini berarti tidak ada arus induks yang membahayakan untuk sosok seorang manusia yang berada di bawah jaringan SUTET dimana pohon Sengon dikondisikan tidak ada (tabel 3 & gambar 15). Sebaliknya (gambar 16 & tabel 4), jika pohon Sengon dihadirkan (disimulasikan berada pada JBS = 8 meter sampai dengan 18 meter), maka arus yang terinduksi ke dalam tubuh manusia yang berada di bawah SUTET-500 kV pada JBS = 8 meter sampai dengan 18 meter, dan secara virtual (disimulasikan) berada di atas ranting pohon Sengon, masing-masing berturut-turut adalah sebesar 1.2 mA; 3.3 mA ; 6.8 mA ; 3.3 mA ; dan 1.3 mA semuanya lebih besar daripada 0.9 mA. Sedangkan untuk nilai JBS diluar interval 8 m sampai dengan 18 m, magnitud arus yang terinduksi di bawah angka 0,9 mA.



Gambar 15. Arus induksi di dalam tubuh manusia Versus JBS

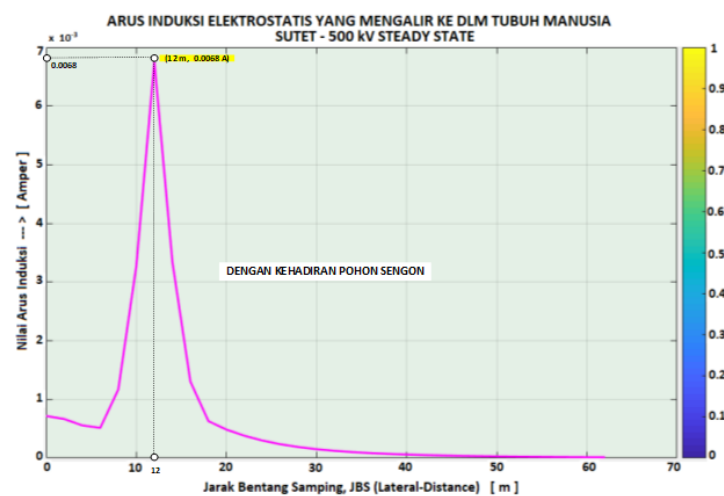
Tabel 4. Besar arus induksi Elektrostatik saat SUTET-500 kV beroperasi Dalam kondisi steady-state dengan Kehadiran Pohon Sengon

No	JBS [m]	Paparan Medan Listrik di permukaan tanah saat SUTET-500 kV dlm Konsisi Steady-State		Arus Induksi Elektrostatik pada Manusia saat SUTET-500 kV dlm Kondisi Steady-State		No	JBS [m]	Paparan Medan Listrik di permukaan tanah saat SUTET-500 kV dlm Konsisi Steady-State		Arus Induksi Elektrostatik pada Manusia saat SUTET-500 kV dlm Kondisi Steady-State	
		[kV/m]	[V/m]	[A]	[mA]			[kV/m]	[V/m]	[A]	[mA]
1	0	10.18	10 180	0.00072	0.720	17	32	1.78	1 780	0.00013	0.130
2	2	9.44	9 440	0.00067	0.670	18	34	1.47	1 470	0.00010	0.100
3	4	7.91	7 910	0.00056	0.560	19	36	1.23	1 230	0.000087	0.087
4	6	7.31	7 310	0.00052	0.520	20	38	1.04	1 040	0.000073	0.073
5	8	16.55	16 550	0.0012	1.200	21	40	0.89	890	0.000063	0.063
6	10	46.35	46 350	0.0033	3.300	22	42	0.76	760	0.000054	0.054
7	12	95.51	95 510	0.0068	6.800	23	44	0.66	660	0.000047	0.047
8	14	47.32	47 320	0.0033	3.300	24	46	0.57	570	0.000040	0.040
9	16	18.45	18 450	0.0013	1.300	25	48	0.50	500	0.000035	0.035
10	18	8.93	8 930	0.00063	0.630	26	50	0.44	440	0.000031	0.031
11	20	6.89	6 890	0.00049	0.490	27	52	0.39	390	0.000028	0.028
12	22	5.41	5 410	0.00038	0.380	28	54	0.35	350	0.000025	0.025
13	24	4.25	4 250	0.00030	0.300	29	56	0.31	310	0.000022	0.022
14	26	3.36	3 360	0.00024	0.240	30	58	0.28	280	0.000019	0.019
15	28	2.69	2 690	0.00019	0.190	31	60	0.25	250	0.000018	0.018
16	30	2.17	2 170	0.00015	0.150	32	62	0.23	230	0.000016	0.016

3.3 Hasil Investigasi Ombudsman

Hasil investigasi dari tim *Ombudsman* adalah, bahwa, PT PLN dianggap lalai dalam melaksanakan kewajiban hukum untuk melakukan pemangkasan pohon yang sudah melewati jarak bebas minimum/*Right Of Way* (ROW), sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral nomor 2 Tahun 2019 [12][13][14][15]. Hal ini bersesuaian baik (*good agreement*) dengan hasil simulasi yang telah dikerjakan, yaitu: setelah SUTET-500 kV di uji dengan tegangan impuls 350 000 kV, terjadi tembus listrik pada medium udara ke arah ranting teratas pohon Sengon yang tingginya sekitar, antara: 8 m sampai dengan 9 m.

Ketika menggunakan tegangan impuls sebesar 350 000 kV (sekitar 7 pu) dalam simulasi, terjadi kega galan medium *insulation* udara pada *span tower* T.434 – T.435. Sementara disisi lain, berdasarkan hasil investigasi tim *Ombudsman* bahwa tegang impuls yang besarnya sangat ekstrim ini, kemungkinan besar berasal dari gardu yang terdekat dengan *tower* T.434-T.435, yaitu Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi – 500 kV (GITET-500 kV) Pemalang, karena menurut hasil investigasi Tim-*Ombudsman* GITET-500 kV Pemalang ini belum layak untuk dioperasikan [15] sebab pada saat terjadinya *black out*, belum memiliki Sertifikat Laik Operasi (SLO). SLO itu sendiri baru diterbitkan pada tanggal 9 Agustus 2019, yang artinya SLO terbit setelah peristiwa *blackout* (4 Agustus 2019). Berdasarkan analisa tim ahli [15], terjadi kesalahan kerja *relay* (*mal operation*) pada tanggal 4 Agustus 2019 yang pada umumnya disebabkan adanya *setting relay* yang kurang tepat oleh operator.



Gambar 16. Arus Induksi ketika Pohon Sengon dihadirkan (secara simulasi) Dimana SUTET-500 kV beroperasi *Steady-State*

Gambar 16 dan Tabel 4 menunjukkan saat SUTET-500 kV beroperasi dalam *steady-state* dan tidak ada indikasi angka yang memicu untuk terjadi tembus listrik (*breakdown*) hanya saja terjadi arus induksi yang melewati ambang batas (yaitu melebihi 0.9 mA) pada JBS 8 meter sampai dengan JBS 16 meter di sisi *tower* SUTET (lihat Tabel 4).

4. Kesimpulan

Setelah melakukan beberapa bahasan dan analisis dari hasil simulasi dan tinjauan hasil investigasi tim *Ombudsman* dapat disimpulkan beberapa *point*,

1. Telah terjadi kelebihan ketinggian dari pohon Sengon sehingga terjadi *breakdown* atau tembus listrik pada medium udara yang ada diantara konduktor SUTET-500 kV dan ranting teratas pohon Sengon.
2. *Breakdown* ini mengalirkan arus induksi elektrostatis yang lebih besar dari 0.9 mili-Amper atau di atas nilai arus yang dapat dirasakan oleh seorang manusia. Nilai arus induksi elektrostatis yang terbesar adalah 4.7261 Amper atau 4 726.1 mili-Amper, dan yang terkecil sebesar 0.0163 mili-Amper.
3. PT PLN lalai memangkaskan pohon yang ketinggiannya sudah melampaui / melewati jarak bebas *Right of Way* (ROW).
4. Hasil simulasi mempunyai kesesuaian baik (*good agreement*) dengan investigasi yang dilakukan oleh tim *Ombudsman* Republik Indonesia (ORI).
5. Berdasarkan simulasi terungkap bahwa untuk terjadi *breakdown* dengan ranting teratas pohon Sengon dibutuhkan tegangan 350 000 kV, yaitu tegangan pada celah udara antara konduktor fase SUTET-500 kV dan ranting teratas pohon Sengon, celah udara tsb sebesar 2 meter.

Daftar Pustaka

- [1] 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, pp. 97- 111.
- [2] Utama, B., dan Suwarti, D., “Modelling Mitigasi Kebencanaan Black Out pada Kasus Paparan (Exposure) Medan Listrik SUTET-500 kV”, Prossidings Seminar Nasional ReTII-XV- Institut Teknologi Nasional Yogyakarta (ITNY), Oktober 2020; XV : 75 – 89.
- [3] Penampakan Pohon Sengon dan Desa Malon Diduga Sumber Blackout
Sumber : <http://bit.ly/foto-ledakan-pohon-sengon> ; 06 Agustus 2019.
- [4] Polisi Selidiki Ledakan Tower Transmisi Listrik Gunung Pati Sebelum Listrik Padam
Sumber : <http://bit.ly/selidiki-ledakan> ; 06 Agustus 2019.
- [5] Ledakan Terdengar Sebelum Listrik Padam Total di Jabodetabek dan Sebagian Jawa
Sumber : <http://bit.ly/kabel-telkom-terbakar> ; 07 Agustus 2019
- [6] Tranen, JD., dan Wilson, GL., “Electrostatically Induced Voltages and Currents on Conducting Objects Under EHV Transmission Lines”, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Trans. on Power Apparatus Systems, March/April 1971; Vol. PAS-90, No. 2, pp.768-775.
- [7] Deno, DW., “Electrostatic Effect Induction Formulae”, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions on Power Apparatus Systems, September/October 1975; Vol. PAS-94, No. 5, pp. 1524 – 1537.
- [8] Deno, DW., “Calculating Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines“, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Transactions on Power Apparatus Systems, September / 1974; Vol. PAS-93, Issue No. 5, pp. 1458 – 1471.
- [9] Deno, DW., “Current Induced in the Human Body by High Voltage Transmission Line Electric Field Measurement and Calculation of Distribution and Dose”, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions on Power Apparatus Systems, September / Oktober 1977 ; Vol. PAS-96, No. 5, pp. 1517 – 1529.
- [10] 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, CA-USA; 1975 ; pp. 248 – 249 (280).
- [11] 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 ; pp. 422 – 426.
- [12] Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi tentang: “Ruang Bebas Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) & Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET utk Penyaluran Tenaga Listrik)”, Menteri Pertambangan dan Energi Republik Indonesia, 7 Februari 1992, Lamp., hal. 9.
- [13] Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 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.
- [14] Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 02, Thn 2019, Tentang Perubahan atas 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.
- [15] Ungkap Hasil Investigasi Pemadaman Listrik, Ombudsman: PLN Lalai Sumber : <http://bit.ly/Investigasi-ombudsman> ; 14 November 2019.