



SURAT KETERANGAN
MELAKUKAN KEGIATAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
No. 261/C.02.01/LP2M/III/2018

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Dr. Tarsisius Kristyadi, S.T., M.T.
Jabatan : Kepala
Unit Kerja : LP2M-Itenas
JL. P.K.H. Mustafa No.23 Bandung

Menerangkan bahwa,

Nama	NPP	Jabatan
Dr. Waluyo, S.T., M.T.	20030201	Tenaga Ahli

Telah melakukan kegiatan Pengabdian kepada Masyarakat sebagai berikut:

Nama Kegiatan : Kajian tentang Insulator dan Pole Tower di Wilayah Bali
Tempat : Bali dan Surabaya
Waktu : Januari - Maret 2018
Sumber Dana : PT. PLN (Persero) Transmisi Jawa Bagian Timur dan Bali

Demikian surat keterangan ini dibuat untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Bandung, 29 Maret 2018

Lembaga Penelitian dan Pengabdian
kepada Masyarakat (LP2M) Itenas
Kepala,



itenas
L P P M

Dr. Tarsisius Kristyadi, S.T., M.T.
NPP 960604

Rekondisi Dan Modifikasi Kompartemen
Gis Darmo Grande (GANZ)
(Kajian Tentang Gas Insulated Switchgear (GIS)
Merek GANZ Dan Insulator, Tower Pole Di Wilayah Bali)

LAPORAN AKHIR

Final Report

CODE : PR

17-7598

Oleh:



LAPITB

FINAL REPORT

Kajian Tentang Gas Insulated Switchgear (GIS) Merk Ganz dan Insulator, *Pole Tower* di Wilayah Bali

Surat perjanjian kerjasama No: 037.PJ/DAN.02.02/TRANS-JBTB/2017

LAPI
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
2018

Kata Pengantar

Sesuai dengan penugasan oleh PT PLN (Persero) Transmisi Jawa Bagian Timur dan Bali kepada Yayasan LAPI-ITB melalui kontrak no. 037.PJ/DAN.02.02/TRANS-JBTB/2017 tentang Kajian Tentang Gas Insulated Switchgear (GIS) Merk Ganz dan Insulator, Pole Tower di Wilayah Bali, tim pelaksana telah melakukan kajian awal, studi literature, survey dan pengukuran lapangan, pengumpulan data, komputasi medan listrik dan magnet, dan sejumlah analisis. Khusus untuk GIS tim telah melakukan penilaian GIS eksisting dan perhitungan skenario perbaikan atau penggantian. FINAL REPORT ini menyajikan laporan akhir yang mencakup studi literature, hasil survey lapangan tahap akhir dan sejumlah data yang diperoleh beserta analisis, kesimpulan dan rekomendasi. FINAL REPORT dibagi atas 2 bagian sesuai dengan topik yang dikaji. Bagian A melaporkan tentang laporan akhir kajian terhadap kondisi GIS Merk Ganz di GIS 150 kV Darmogrande berdasarkan data, dan Assessmen PT. PLN Trans-JBTB serta perhitungan dengan sejumlah scenario dengan sejumlah kesimpulan dan rekomendasi. Bagian B FINAL REPORT ini menyajikan hasil kajian tentang SUTT 150 KV *Tower Pole* 150 KV di wilayah Bali termasuk tentang data populasi insulator di wilayah Bali berdasarkan jenis, tipe, dan jenis area terpasangnya; data kegagalan insulator dan gangguan lainnya terhadap sistem tenaga. Bagian B juga membahas hasil survey lapangan dan kajian teoritik tentang medan listrik dan medan magnet di sekitar pole tower berdasarkan data yang telah diperoleh dari PLN APP Bali, pengukuran medan listrik dan megnet di beberapa lokasi serta analisis kimia sumber polusi yaitu air laut. Pada bagian B ini juga disampaikan sejumlah kesimpulan dan rekomendasi untuk meningkatkan keandalan insulator di daerah Bali.

Bandung, 20 Maret 2018

Wassalam,

Tim Pelaksana Kajian Tentang GIS MERK GANS dan Insulator dan Pole Tower di Bali
Yayasan LAPI-ITB

DAFTAR ISI (BAGIAN B)

Kata Pengantar	1
DAFTAR ISI (BAGIAN A)	2
DAFTAR ISI (BAGIAN B).....	4
EXCECUTIVE SUMMARY	6
BAB I PENDAHULUAN.....	83
1.1 Latar Belakang	83
1.2 Tujuan dan Ruang Lingkup Kajian	86
1.3 Deliverability.....	86
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	87
2.1 Insulator.....	87
2.2 <i>Tower</i>	89
2.2.1 Andongan (<i>Sag</i>)	90
2.2.2 Jarak Bebas / ROW (<i>Clearance</i>).....	91
2.2.3 Medan Magnet dan Medan Listrik Sepanjang Saluran Transmisi.....	92
BAB III SISTEM TRANSMISI SUB REGION BALI	93
3.1 Gardu Induk di Bali	93
3.2 Saluran Penghantar di Bali.....	95
3.3 Tower Transmisi di Bali.....	97
BAB IV KAJIAN INSULATOR DI WILAYAH BALI	100
4.1. Data Populasi Insulator 150 KV di Wilayah Bali	100
4.2. Tingkat Polusi di Wilayah Bali	109
4.3. Hasil Uji Air Laut dan Payau di wilayah Bali.....	116
4.4. Data Kegagalan Insulator pada Jaringan Transmisi SUTT 150 kVdi Wilayah Bali.....	117
4.4.1. Kegagalan Insulator yang Menyebabkan Gangguan Sistem	117
4.4.2. Riwayat Penggantian Insulator pada Sistem Transmisi SUTT 150 kV	122
BAB V KAJIAN POLE TOWER DI WILAYAH BALI	128

4.1	Populasi Tower Transmisi.....	128
4.2	Pengukuran Medan Listrik, Medan Magnet, dan ROW.....	133
4.3	Perhitungan Medan Listrik dan Medan Magnet.....	145
	BAB VI KESIMPULAN	153
6.1	Kajian Insulator.....	153
6.2	Kajian Pole Tower.....	154
6.3	Rekomendasi	155
6.4	<i>Coated Insulator</i>	155
	REFERENSI	160

EXECUTIVE SUMMARY

Kajian Tentang Gas Insulated Switchgear (GIS) Merk Ganz dan Insulator, Pole Tower di Wilayah Bali

Sesuai dengan penugasan oleh PT PLN (Persero) Transmisi Jawa Bagian Timur dan Bali kepada Yayasan LAPI-ITB melalui kontrak no. 037.PJ/DAN.02.02/TRANS-JBTB/2017 Amandemen 01.AMD/037.PJ/DAN.02.02/TRANS-JBTB/2018 tentang Kajian Tentang Gas Insulated Switchgear (GIS) Merk Ganz dan Insulator, Pole Tower di Wilayah Bali, tim pelaksana telah melakukan kajian awal, studi literatur, survey dan pengukuran lapangan, pengumpulan data, komputasi medan listrik dan magnet, dan sejumlah analisis.

Pada kajian GIS merk Ganz, tim telah melakukan penilaian GIS eksisting dan perhitungan skenario perbaikan atau penggantian serta memberikan rekomendasi langkah yang dapat dilakukan PT PLN (Persero) kedepannya. Penilaian kondisi GIS mengikuti standar: IEEE Std C37.100-1992; IEEE Std C37.122.3-2011; IEEE Std C37.122.1-2014; IEEE Std C37.122.5-2013; CIGRE 15/23-1 1992; IEC 60376:2005; CIGRE 234-2003; dan IEC 60694. Dalam kajian ini dalam mempertimbangkan skenario perbaikan atau penggantian, perhitungan LCCA (*Life Cycle Cost Analysis*) mengacu pedoman dari CIGRE 448 201; IEC 60300-3-3 2004; dan etc.

Pada Kajian Insulator dan Pole Tower di Wilayah Bali, tim telah melakukan kajian terhadap data populasi insulator di wilayah Bali berdasarkan jenis, tipe, dan jenis area terpasangnya ; data kegagalan insulator dan gangguan lainnya terhadap sistem tenaga, faktor penyebab kegagalan insulator, survey medan listrik, medan magnet, dan ROW di sekitar pole tower di beberapa ruas yang mengalami perkembangan pembangunan yang cukup pesat, disertai rekomendasi atas permasalahan yang ditemukan.

A. Hasil dan Kesimpulan Kajian GIS Merk Ganz di GIS 150 kV Darmogrande

GIS (*Gas Insulated Switchgear*) merk Ganz di GIS 150 kV Darmogrande Surabaya telah beroperasi selama 25 tahun lebih (beroperasi sejak 1992). Pada saat ini, kondisi GIS merk Ganz di Darmogrande telah mengalami banyak gangguan dan kerusakan, ditambah lagi dengan diakuisisinya pabrikan Ganz pada tahun 2006 sehingga dukungan teknis dan spare part untuk GIS ini susah didapatkan.

Kesimpulan yang didapatkan dari kajian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

- Permasalahan utama pada GIS 150 kV Darmogrande merk Ganz mencakup 3 point utama:
 1. Tingginya *Moisture Content* pada kompartemen non-PMT, dikarenakan tidak adanya absorbent.
 2. Kerusakan mekanis, hidrolis, dan kebocoran gas SF6 yang sering terjadi
 3. Kesulitan menemukan spare part serta dukungan teknis dari pabrikan Ganz sehubungan dengan diakuisisinya Ganz pada tahun 2006
- Trend dari tahun 2009 hingga tahun 2017 tidak ditemukan pemburukan yang signifikan pada *Purity*, *Moisture Content*, *Dew Point*, dan *Decomposition Product*. Namun hanya *Moisture Content* dan *Dew Point* pada kompartemen non-PMT yang konsisten tinggi dan tidak menurun, melebihi standar IEC 60694. Hal ini diperkuat dari data assessment GIS Merk Ganz di Ngagel dan Simpang.
- GIS merk Ganz di Darmogrande sudah menjalani 65% dari ekspektasi operasinya, dan telah memasuki daerah kegagalan yang meningkat.
- Mengingat posisinya yang vital terhadap penyaluran beban di Surabaya, diperlukan tindakan segera untuk mengatasi permasalahan utama pada GIS 150 kV Darmogrande.
- Terdapat dua alternatif yang dapat dilakukan PT. PLN (Persero), yaitu Alternatif-A (Overhaul dan Rekondisi), dan Alternatif-B (Penggantian GIS Baru).

Apabila Alternatif A (Overhaul dan Rekondisi) dipilih, maka:

- Overhaul yang dilakukan harus bisa menjamin tiga permasalahan utama GIS eksisting terselesaikan secara tuntas.
- Terdapat kesulitan tersendiri dalam mendapatkan komponen yang dibutuhkan, dan metode yang digunakan untuk pemasangan absorbent.
- Permasalahan mungkin muncul kembali setelah beberapa tahun.

Apabila Alternatif B (Penggantian GIS Baru) dipilih, maka:

- Dapat menyelesaikan permasalahan yang ada secara langsung.
- Manuver beban selama penggantian perlu diperhitungkan lebih detail.

Rekomendasi

- Dari sisi teknis, Alternatif-B (Penggantian) lebih direkomendasikan, karena banyaknya permasalahan yang sering terjadi pada GIS Darmogrande, serta mengingat posisinya yang kritis terhadap kelangsungan penyaluran beban di wilayah Surabaya.

- Alternatif-A direkomendasikan dijalankan hanya jika bisa dijamin bahwa ketiga permasalahan utama, yaitu tingginya moisture content, kerusakan mekanis, hidrolis, serta kebocoran gas SF6 dapat terselesaikan dan tidak muncul kembali di kemudian hari. Dukungan teknis dan suku cadang yang memadai kedepan juga harus tersedia apabila Alternatif-A dipilih.
- Apabila PT PLN (Persero) bisa mendapatkan biaya investasi penggantian sama dengan atau kurang dari 90M*, maka Alternatif-B, yaitu penggantian GIS baru akan lebih efisien dari sisi ekonomis.

*Investment Cost 90 M adalah batas Alternatif B (penggantian) lebih ekonomis dibanding alternatif A (Overhaul) saat OPF 5% dan IR 12% didapatkan dari kajian LCCA yang telah dilakukan.

B. Hasil dan Kesimpulan Kajian Insulator dan Pole Tower di Wilayah Bali

SUTT 150 KV Tower Pole 150 KV di wilayah Bali sudah beroperasi selama 25 tahun lebih (sejak tahun 1992). Historikal operasi (tahun 1995 s.d. tahun 2017) telah terjadi gangguan beberapa kali dengan penyebab paling dominan adalah gangguan tegakan dan insulator yang mengakibatkan padam sehingga menyebabkan terganggunya suplai listrik ke pelanggan. Anomali yang sering terjadi adalah korosi pada insulator untuk SUTT beberapa ruas tertentu di wilayah Bali.

Selain itu dengan banyaknya pembangunan di sekitar jaringan transmisi di wilayah Bali, perlu diadakannya lagi survey tentang kondisi eksisting jarak bebas (*Right of Way*) khususnya di sekitar menara - menara (*Pole Tower*) di Bali.

Kesimpulan yang didapatkan dari kajian ini adalah sebagai berikut:

- Penyebab utama dari banyaknya kegagalan insulator adalah polutan yang berasal dari area pantai (polusi air garam).
- Untuk permasalahan *pole tower*, ditemukan adanya beberapa titik tertentu dimana medan listriknya telah melebihi ambang batas [berdasarkan standar WHO : 5 kV/m] dan jarak ROW lebih kecil dari batas minimum yang diizinkan [berdasarkan Permen ESDM No. 18 Tahun 2015 : ROW 5 meter untuk rumah/bangunan, tanaman/tumbuhan]. Selain itu, pada titik – titik pengukuran lainnya yang saat ini berstatus masih aman, hasil simulasi EMF menunjukkan dalam *range* jarak 2,4 – 2,6 meter dari atas atap bangunan yang berada di bawah SUTT 150 kV, nilai medan listriknya sudah akan mencapai ambang batas.

Rekomendasi

- Alternatif solusi yang ditawarkan adalah penggantian jenis insulator yang dipasang pada rute – rute area berpolusi tinggi dari insulator keramik atau kaca menjadi insulator komposit /

polimer, dan insulator tipe *suspension disc* ke insulator tipe *long rod*. Alternatif lainnya jika tetap akan menggunakan insulator tipe *suspension disc* dengan jenis keramik, pelapisan permukaan insulator menggunakan RTV *silicon rubber* sangat dianjurkan.

- Sangat direkomendasikan untuk mengganti pole tower dengan *lattice tower* atau *pole tower* dengan tinggi *body* yang lebih tinggi dari pada *pole tower* eksisting pada ruas – ruas yang mengalami perkembangan pembangunan yang cukup pesat ini, yaitu pada rute GIS Bandara – Kapal – Pemecutan Kelod, GIS Bandara – Nusa Dua, Pesanggaran – Nusa Dua, dan Sanur – Gianyar.

BAGIAN B.

LAPORAN AKHIR KAJIAN

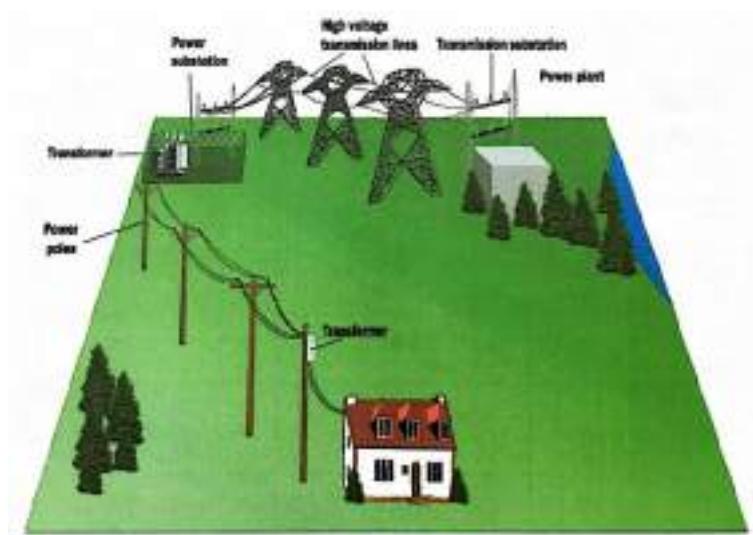
Insulator dan Pole Tower di Wilayah Bali

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan energi listrik di Indonesia senantiasa meningkat dari tahun ke tahun. Energi listrik ini dibangkitkan dari stasiun pembangkit, kemudian disalurkan melalui sistem transmisi dan distribusi sebelum digunakan oleh konsumen. Secara umum, sistem tenaga listrik ini terdiri dari pembangkit, jaringan transmisi, jaringan distribusi dan beban seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1 berikut [1].



Gambar 1. Ilustrasi Sistem Tenaga Listrik [1]

Dalam sistem tenaga listrik ini, terdapat beberapa peralatan tegangan tinggi seperti generator, transformator, kabel dan insulator. Peralatan ini mengandung isolasi gas, cair, atau padat untuk menahan tingginya medan listrik. Dalam kondisi bertegangan, medan listrik berlebih dapat muncul dan menimbulkan discharge di udara dalam bentuk korona, stramer pada isolasi cair, atau treeing pada isolasi padat [1]-[3], sedangkan arus bocor dapat mengalir pada permukaan insulator [1],[4],[5]. Fenomena ini jika berkepanjangan maka akan mengakibatkan aging pada insulator dan kegagalan pada peralatan-peralatan tegangan tinggi tersebut. Kontribusi terhadap kegagalan sistem dan kegagalan yang diakibatkan oleh insulasi pada peralatan utama tegangan tinggi dapat dilihat pada Tabel 1. [1]

Tabel 1. Kontribusi terhadap kegagalan sistem dan kegagalan akibat insulasi pada peralatan utama tegangan tinggi. [1], [6]-[7]

Peralatan	Kontribusi terhadap kegagalan sistem (%)	Kegagalan akibat permasalahan insulasi
Insulator	35	90
Generator	15	47
Transformator	12	84
GIS & switchgear	15	95
Kabel	10	89

Berdasarkan tabel tersebut, dapat terlihat bahwa insulator memegang porsi terbesar dalam kontribusi terhadap kegagalan sistem tenaga yaitu sebesar 35%, dan 90% kegagalan pada insulator diakibatkan oleh permasalahan insulasi. Oleh karena itu dibutuhkan suatu kajian dalam pemeliharaan dan peningkatan kinerja insulator yang bersifat preventif, yang dapat meminimalisir terjadinya gangguan terhadap sistem tenaga.

Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) adalah sarana yang terbentang di udara untuk menyalurkan tegangan listrik dari Pusat Pembangkit ke Gardu Induk (GI) / Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) atau dari GI / GITET ke GI / GITET lainnya yang disalurkan melalui konduktor yang direntangkan antara tiang-tiang (tower) melalui insulator-insulator dengan sistem tegangan tinggi (30 kV, 70 kV, 150 kV) atau tegangan ekstra tinggi (275 kV, 500 kV) [8].

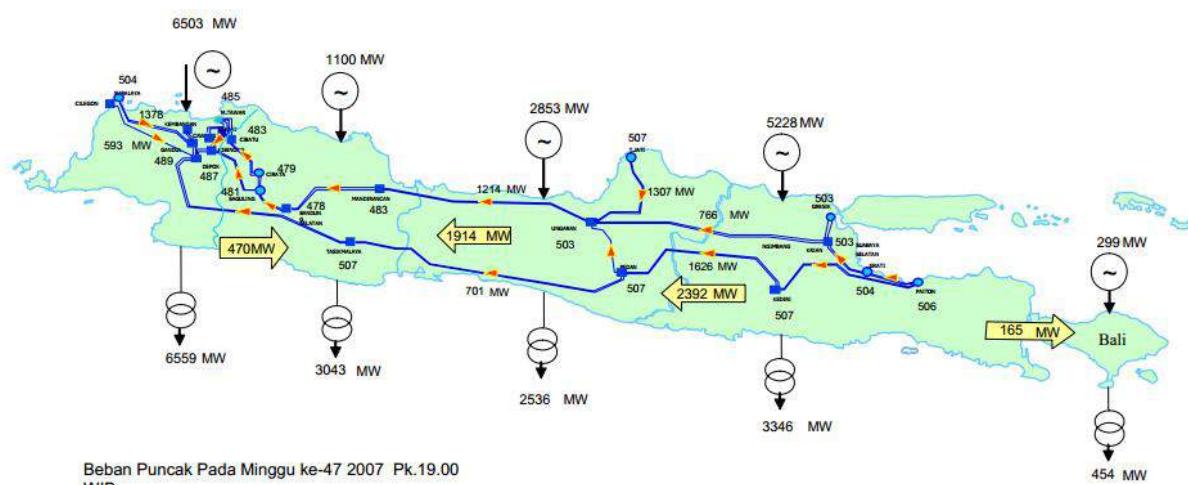
Sistem tenaga listrik Jawa-Bali dihubungkan oleh SUTET 500 kV dan SUTT 150 kV dan 70 kV. Region-region pada sistem dihubungkan oleh sistem transmisi 500 kV yang merupakan tulang punggung pensuplai daya sistem tenaga listrik Jawa-Bali. Daya berkapasitas besar dialirkan oleh pembangkit-pembangkit utama dari region 1 (satu) sampai dengan region 4 (empat) melalui saluran transmisi 500 kV, yang kemudian di GITET 500 kV diturunkan tegangannya menjadi 150 kV melalui Inter Bus Transformer (IBT) 500/150 kV. Hal ini menjadikan IBT 500/150 kV sebagai sumber pasokan utama sistem 150 kV. Pada sistem 150 kV, juga terdapat unit-unit pembangkit yang memasok kebutuhan daya subsistem region yang meliputi daerah yang lebih terbatas. Aliran daya pada sistem 150 kV ini kemudian akan dialirkan pada pusat-pusat beban (GI 150 kV) atau diturunkan lagi level tegangannya menjadi 70 kV melalui IBT 150/70 kV dan dialirkan ke gardu-gardu induk 70 kV melalui saluran

transmisi 70 kV. Region-region ini juga dihubungkan dengan saluran transmisi 150 kV untuk mengalirkan kekurangan daya tambahan atau menyalurkan daya yang berlebihan ke region lain. Aliran daya pada IBT. 500/150 kV ini, dibatasi sebesar 50% dari kapasitas ratingnya untuk memenuhi kriteria N-1.

Aliran daya untuk sistem Jawa-Bali pada saat beban puncak hari kerja dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3. Aliran daya energi dari timur ke barat dan besarnya akan sangat tergantung pada komposisi operasi pembangkit dan topologi jaringan.



Gambar 2. Aliran daya tipikal saat beban puncak siang hari kerja



Gambar 3. Aliran daya tipikal saat beban puncak malam hari kerja

Saat ini Bali memiliki tenaga listrik sekitar 1500 MW. Tenaga listrik 440 MW disuplai dari luar pulau yaitu jaringan Jawa-Madura-Bali (Jamali) melalui kabel bawah laut Jawa-Bali. Sementara sisanya dipasok oleh generator di pulau itu sendiri, seperti 390 MW, 130 MW, 98 MW, dan 3x142 MW melalui pembangkit listrik Pesanggaran, Gilimanuk, Pemaron, dan Celukan Bawang.

1.2 Tujuan dan Ruang Lingkup Kajian

Tujuan kajian ini yaitu melakukan kajian terhadap kondisi insulator dan tower pole yang berada di wilayah Bali di PT. PLN (Persero) Transmisi Jawa Bagian Timur dan Bali. Adapun ruang lingkup dari pekerjaan adalah sebagai berikut :

- a. Mengkaji dari data insulator dan data kegagalan insulator tegangan tinggi di wilayah Bali
- b. Melakukan kajian penyebab kegagalan insulator di wilayah Bali
- c. Mengkaji tingkat polusi dan kandungan polusi penyebab kegagalan utama insulator di wilayah Bali
- d. Memberikan saran bagi peningkatan kinerja insulator di wilayah Bali
- e. Mengkaji Tower Pole 150 kV di wilayah Bali dari sisi keamanan, standar, dan regulasi
- f. Memberikan saran terkait Tower Pole di wilayah Bali

1.3 *Deliverability*

Hasil dari pekerjaan ini adalah sebagai berikut :

- a. Kajian data hasil asesmen kondisi insulator-insulator di Bali (meliputi populasi insulator, data statistik gangguan insulator beserta penyebabnya, dan mapping level polusi pada daerah-daerah di Bali dimana terdapat jaringan transmisi/distribusi)
- b. Kajian data hasil asesmen pole tower di Bali (kondisi *clearance* saat ini dan komparasinya terhadap standar, kondisi keamanan dari tumbuh-tumbuhan, serta kondisi keamanan dari sisi medan listrik dan medan magnet)
- c. Penilaian kondisi insulator dan pole tower di Bali
- d. Kajian rekomendasi untuk peningkatan kinerja insulator dan keamanan *pole tower*

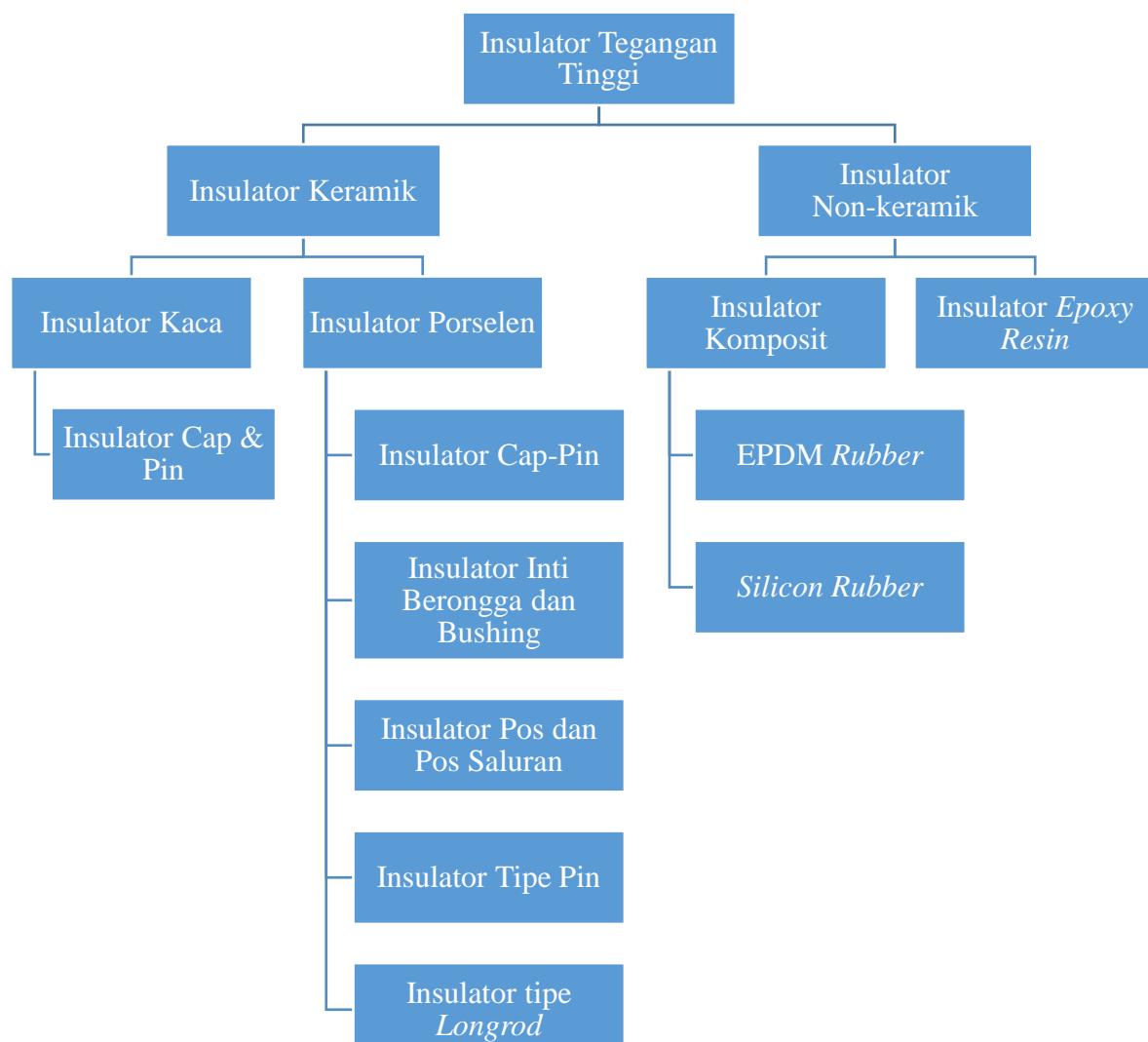
Laporan tertulis secara resmi (*hard copy* dan *soft copy* masing-masing sebanyak 3 buah). Koordinasi progress dan diskusi dalam tahapan kajian dengan tim *counterpart* PT. PLN (Persero) Transmisi Jawa Bagian Timur dan Bali.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Insulator

Insulator merupakan salah satu komponen penting dalam sistem tenaga listrik utamanya pada sistem transmisi dan distribusi untuk memisahkan dua bagian yang memiliki beda tegangan semisal antara konduktor saluran dengan menara transmisi. Insulator diharuskan berasal dari material yang memiliki kekuatan isolasi yang baik khususnya pada kondisi lingkungan yang mampu menurunkan resistansi permukaan insulator. Insulator yang baik adalah insulator yang dapat memenuhi sifat karakteristik elektrik (ketahanan terhadap tegangan impuls petir dan tegangan kerja) dan karakteristik mekanik (untuk menanggung beban tarik konduktor penghantar maupun berat insulator dan konduktor penghantar).



Gambar 4. Klasifikasi insulator sistem tenaga listrik

Secara umum insulator terbagi menjadi insulator keramik dan insulator non-keramik. Insulator keramik terdiri dari dua jenis insulator yaitu insulator kaca dan insulator keramik. Sedangkan insulator non-keramik terdiri dari insulator komposit dan insulator epoxy resin. Masing-masing jenis insulator dapat memiliki bentuk lebih dari satu. Insulator sebagai salah satu pendukung sistem transmisi dan distribusi listrik, sangat penting untuk dipastikan kondisinya agar tetap dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Insulator-insulator yang gagal beroperasi dapat mengganggu sistem distribusi listrik dan dapat mengakibatkan kerusakan yang lebih besar lagi dalam sistem tenaga listrik. Banyak kasus-kasus kegagalan insulator terjadi pada insulator pasangan luar, dimana faktor lingkungan seperti kelembaban, temperatur, dan polusi dapat mempengaruhi kinerja insulator. Untuk itu, insulator keramik banyak digunakan sebagai insulator pasangan luar yang dipasang di daerah-daerah industri dan pantai, karena insulator keramik mempunyai sifat elektrik dan mekanik yang dinilai cukup baik dan juga lebih ekonomis. Namun, dengan adanya faktor-faktor lingkungan tersebut, resistansi permukaan dari insulator keramik dapat menurun dengan mudah, terutama karena adanya polutan yang kemudian dapat menyebabkan korosi pada insulator.

Daerah beriklim tropis seperti Indonesia memiliki faktor iklim yang lebih tinggi dibanding daerah subtropis yang ditandai dengan lama peninjangan matahari sekitar 12 jam pada siang hari, temperatur udara antara 16-35° C, kelembaban nisbi mendekati 100% pada dini hari sampai pagi hari, dan curah hujan tahunan yang cukup tinggi antara 40-500 mm. Pada kondisi seperti ini, insulator pasangan luar akan mengalami pengaruh dari berbagai faktor lingkungan tersebut, dan juga dari pengaruh polusi yang cukup tinggi sehingga dapat menyebabkan terjadinya penurunan kerja dari insulator.

Beberapa parameter penting untuk mengetahui kinerja dari insulator pasangan luar adalah besarnya arus bocor yang mengalir pada permukaan insulator tersebut, sifat hidrofobisitas permukaan insulator, dan hasil *Scanning Electron Microscopy* (SEM) permukaan insulator. Lapisan polutan pada permukaan insulator biasanya terdiri dari lapisan isolatif dan konduktif. Pada kelembaban tinggi, terjadi pembasahan pada lapisan polutan sehingga arus bocor pada permukaan insulator menjadi semakin tinggi. Karena dialiri arus bocor secara kontinyu, maka terbentuklah pita kering (*dry band*). Pada tegangan tertentu akan terjadi pelepasan muatan melintasi pita kering. Busur pelepasan muatan dapat memanjang sehingga terjadi *flash over* melalui seluruh permukaan insulator.

Kegagalan insulator karena terjadinya *flash over* akan menganggu penyaluran daya listrik dan dapat menyebabkan terjadinya kegagalan operasi sistem tenaga. Khususnya di Bali, dimana banyak terdapat insulator-insulator yang bekerja di daerah pantai, diduga faktor lingkungan dengan kelembaban yang tinggi inilah yang sangat mempengaruhi kinerja insulator dan menyebabkan banyaknya kegagalan fungsi kerja insulator.

2.2 *Tower*

Tower adalah konstruksi bangunan yang kokoh yang berfungsi untuk menyangga / merentang kawat penghantar dengan ketinggian dan jarak yang cukup aman bagi manusia dan lingkungan sekitarnya dengan sekat insulator. Berdasarkan bentuknya, tower terbagi menjadi dua jenis yaitu *pole tower* (tiang pole) dan *lattice tower* (tower kisi-kisi). Konstruksi SUTT dengan *pole tower* yang dapat terbuat dari baja atau beton, digunakan pada perluasan SUTT dalam kota yang padat penduduk dan memerlukan lahan relatif sempit. *Lattice tower* ini terbuat dari baja profil yang disusun sedemikian rupa sehingga merupakan suatu menara yang telah diperhitungkan kekuatannya yang dapat disesuaikan dengan kebutuhannya.



Gambar 5. Konstruksi *Pole Tower* di daerah Lembang Ketewel, Bali

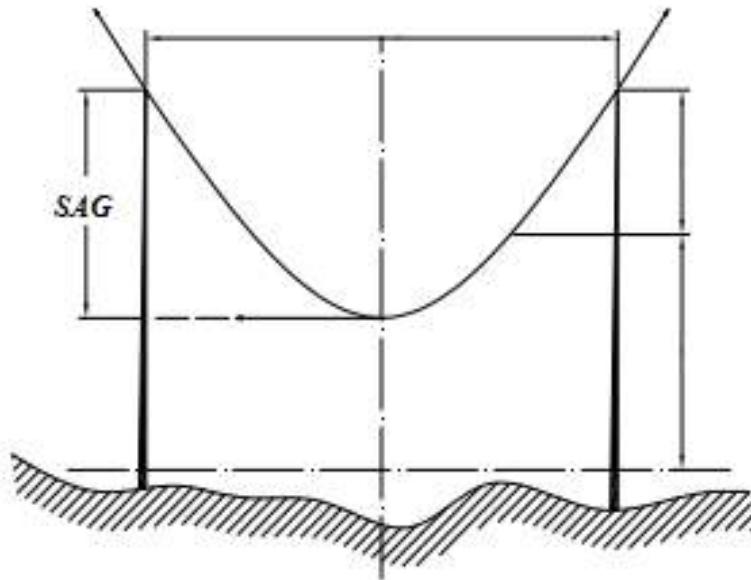


Gambar 6. Konstruksi *Lattice Tower* di daerah dekat GI Kapal, Bali

Di Bali, saluran transmisi menggunakan dua tipe *tower*. *Lattice tower* untuk daerah luar Denpasar dan *concrete pole tower* untuk di dalam kota Denpasar. *Concrete pole tower* digunakan di dalam kota Denpasar karena sebelumnya terdapat kebijakan lokal kota Denpasar bahwa tinggi *tower* transmisi tidak boleh melebihi tinggi pohon kelapa. *Concrete pole* tersebut memiliki jarak maksimum 100 meter. Saat ini, untuk daerah dalam kota, masih menggunakan *pole tower* meskipun penggunaan *lattice tower* sudah diizinkan untuk dipasang di dalam kota Denpasar.

2.2.1 Andongan (Sag)

Andongan merupakan jarak proyeksi yang diukur dari tinggi tower saluran transmisi terhadap jarak lengkungan penghantar yang paling rendah. Hal ini terjadi karena kawat penghantar yang direntangkan tidak akan mengikuti garis lurus, akan tetapi karena beratnya akan melengkung kebawah. Besar lengkungan tergantung dari berat kawat persatuan panjang, diameter kawat, jarak antara dua menara (*span*), modulus elastisitas, koefisien perubahan panjang, *ultimate strength* dan kondisi lingkungan sekitar yang mungkin berpengaruh.



Gambar 7. Andongan (Sag)

Besar andongan D awal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini :

$$D = \frac{WS^2}{8T} \quad [m] \quad (1)$$

Dimana S adalah rentangan menara, W adalah berat penghantar per satuan panjang, dan T adalah gaya tarik horizontal pada penghantar.

2.2.2 Jarak Bebas / ROW (Clearance)

Dalam kajian ini difokuskan pada pengertian *clearance* secara vertikal yaitu jarak bebas terhadap kawat konduktor penghantar terendah. Tinggi kawat minimum di atas tanah berdasarkan *safety code formula* yaitu :

$$H = 6,096 + (kV - 50) \cdot 0,0127 + 0,73 \cdot (D_{max} - D_{awal})'' \quad (2)$$

Dimana kV merupakan tegangan nominal, D_{max} merupakan andongan pada suhu maksimum, dan D_{awal} merupakan andongan pada suhu mula-mula (15°C).

Berdasarkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) No. 18 Tahun 2015 tentang Ruang Bebas dan Jarak Bebas pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT), Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) dan Saluran Udara Tegangan Tinggi Arus Searah (SUTTAS) untuk Penyaluran Tenaga Listrik, adapun jarak bebas minimum vertikal antara penghantar dengan tanah dan benda lain ditunjukkan pada Tabel 2 [9]. Standar ini mutlak harus diikuti demi keselamatan manusia, makhluk hidup lainnya, serta demi keamanan operasi

SUTT/SUTET. Jika terdapat ketidaksesuaian pada jarak ini, kegagalan fungsi isolasi udara dapat terjadi akibat *breakdown voltage* yang terlampaui.

Tabel 2. Jarak bebas minimum antara penghantar SUTT 150 kV dengan tanah dan benda lain [9]

No.	Lokasi	SUTT 150 kV [m]
1	Lapangan terbuka atau daerah terbuka ^{a)}	8,5
	Daerah dengan keadaan tertentu :	
2	Bangunan/ Jembatan ^{b)}	5
3	Tanaman/Tumbuhan, hutan, perkebunan ^{b)}	5
4	Jalan/Jalan raya/Rel Kereta Api ^{a)}	9
5	Lapangan Umum ^{a)}	13,5
6	SUTT lainnya, SUTR, SUTM, saluran udara komunikasi, antenna, dan kereta gantung ^{b)}	4
7	Titik tertinggi tiang kapal pada kedudukan air pasang/tertinggi pada lalu lintas air ^{b)}	4

Catatan :

- a) Jarak Bebas minimum vertical dihitung dari konduktor ke permukaan bumi atau permukaan jalan / rel
- b) Jarak Bebas minimum vertical dihitung dari konduktor ke titik tertinggi / terdekatnya

2.2.3 Medan Magnet dan Medan Listrik Sepanjang Saluran Transmisi

Batas eksposur dari medan elektromagnetik dibuat oleh *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP), yaitu organisasi non-pemerintah yang secara resmi diakui oleh WHO (World Health Organization). Standar ini dibuat berdasarkan evaluasi efek biologis yang dapat berpengaruh terhadap kesehatan. Kesimpulan yang diberikan oleh WHO adalah eksposur EMF di bawah batas yang direkomendasikan oleh panduan internasional ICNIRP tampaknya tidak memiliki konsekuensi kesehatan yang diketahui [10]. Adapun batas eksposur EMF tersebut diberikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Batas medan listrik dan medan magnet dalam ruang umum berdasarkan ICNIRP [10]

Frekuensi	Medan Listrik (V/m)	Medan Magnet (μ T)
50 Hz	5000	100
60 Hz	4150	83

BAB III

SISTEM TRANSMISI SUB REGION BALI

3.1 Gardu Induk di Bali

Saat ini Bali memiliki tenaga listrik sekitar 1500 MW. Tenaga listrik 340 MW disuplai dari luar pulau yaitu jaringan Jawa-Madura-Bali (Jamali) melalui kabel bawah laut Jawa-Bali. Sementara sisanya dipasok oleh generator di pulau itu sendiri melalui pembangkit listrik Pesanggaran, Gilimanuk, Pemaron, dan Celukan Bawang. Tabel 4 menunjukkan total pasokan daya mampu pada masing-masing suplai yang ada di pulau Bali.

Tabel 4. Pasokan daya di pulau Bali

Pembangkit	Daya Terpasang (MW)	Daya Mampu (MW)
Pesanggaran	389,50	354,00
Gilimanuk	133,80	130,00
Pemaron	97,60	80,00
Celukan Bawang	426,00	380,00
Total Daya Pembangkit	1.046,90	944,01

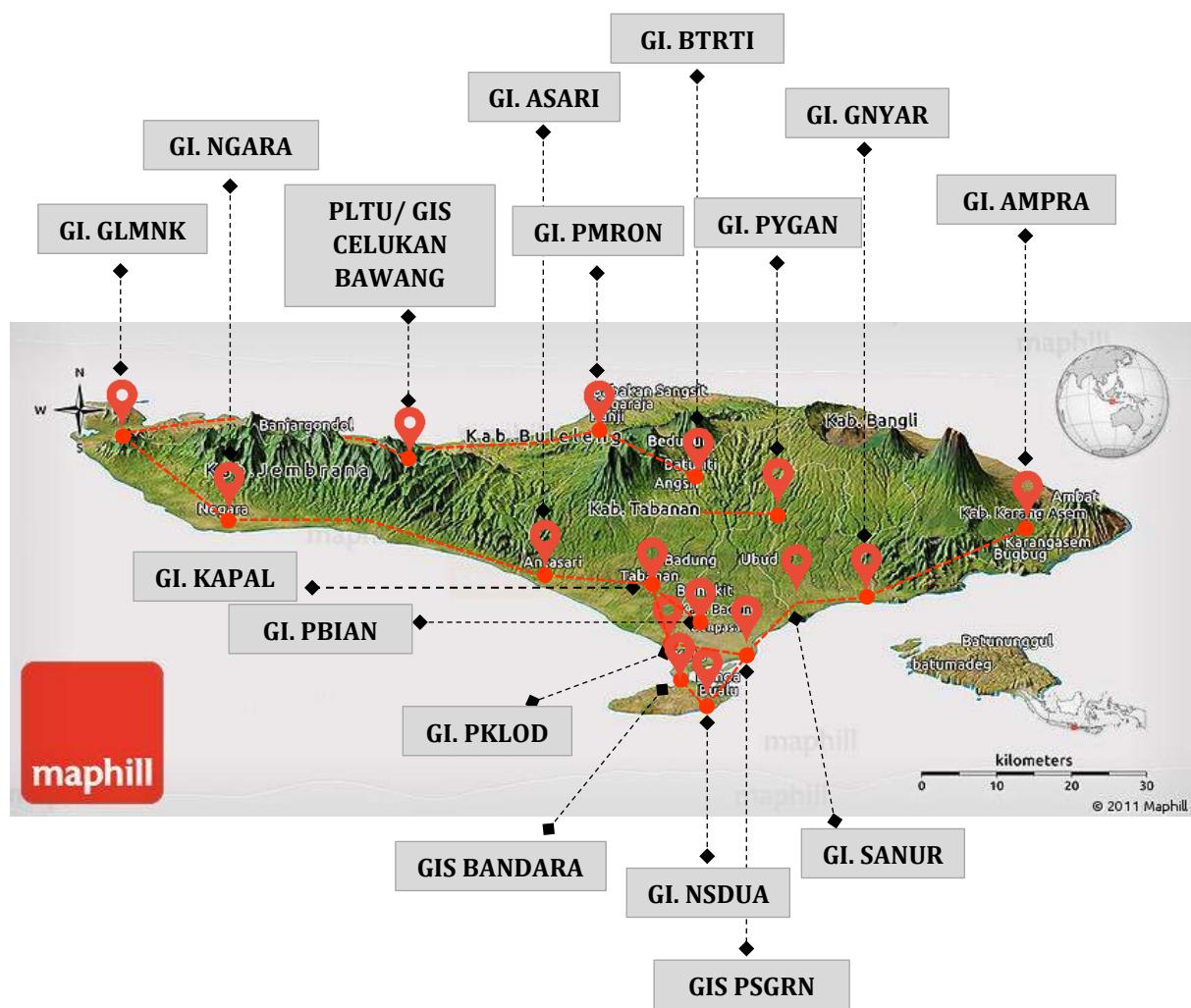
Daya Pasokan dari Jawa	Daya Terpasang (MW)	Daya Mampu (MW)
Kabel Laut 1	110,00	80
Kabel Laut 2	110,00	80
Kabel Laut 3	110,00	80
Kabel Laut 4	110,00	80
Total Pasokan dari Jawa	440,00	360

Total Supply Daya Bali	1.486,90	1.304,01
-------------------------------	-----------------	-----------------

Pada sistem transmisi sub region Bali terdapat 16 buah gardu induk (GI) / GIS yang tersebar dari Gilimanuk di ujung timur hingga ke Amlapura di ujung sebelah barat dengan detail informasi yang ditunjukkan pada Tabel 5. Adapun Gambar 8 menunjukkan persebaran GI / GIS yang ada di pulau Bali.

Tabel 5. Sistem transmisi di pulau Bali

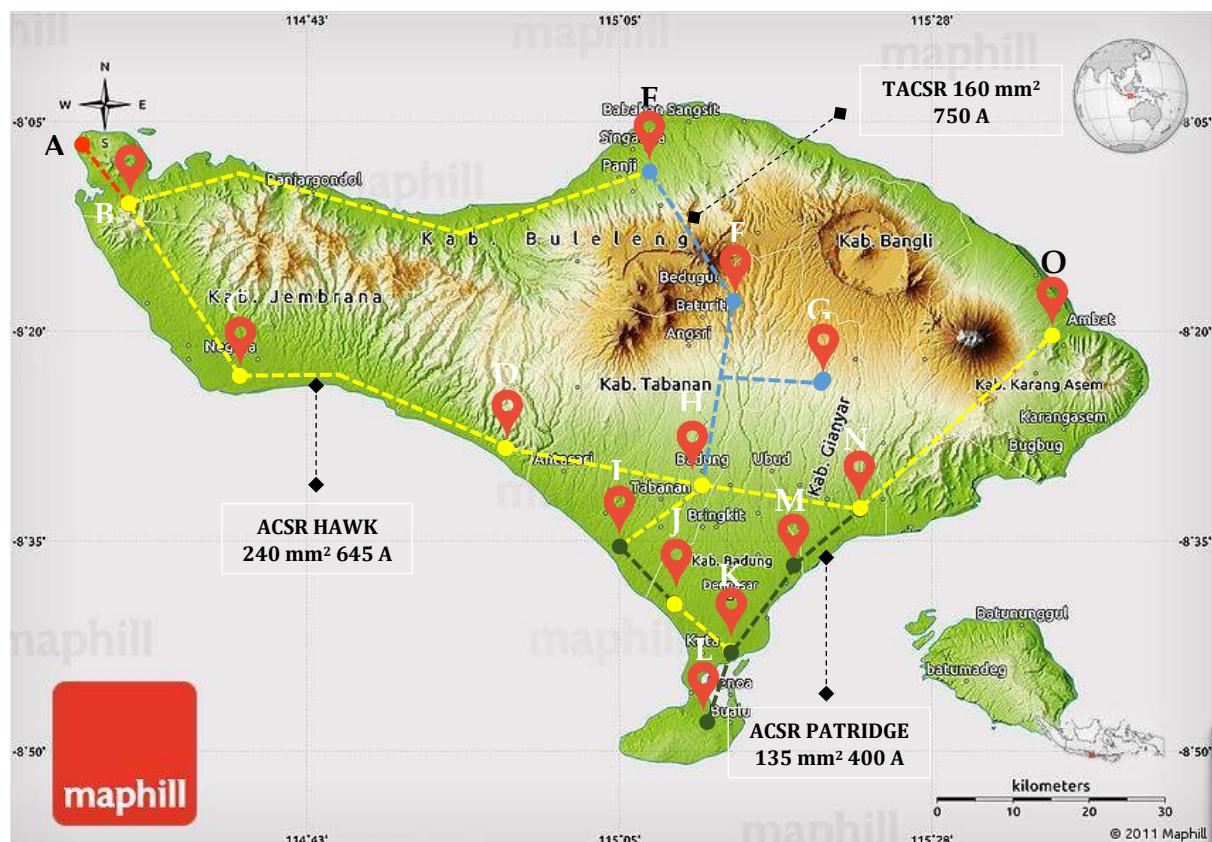
Gardu Induk	GI	13 Buah
	GIS	2 Buah
	GIS milik IPP	1 Buah
Transmisi		888,44 KMS
SKTT		2 Buah OFC 3 Phasa
SKTL		4 Buah
Beban		793,2 MW
Trafo	Jumlah Trafo Operasi	39 unit ; 1971 MVA
	Kapasitor	10 unit ; 400 MVAR



Gambar 8. Persebaran gardu induk di pulau Bali

3.2 Saluran Pengantar di Bali

Pada kajian suatu tower transmisi, data yang sebagian besar disajikan yaitu melingkupi *outline tower*. Dari *outline tower* dapat ditentukan ukuran-ukuran jarak bebas (*clearance*) dari suatu tower. Informasi keluaran *outline tower* yaitu terdiri dari andongan, *ground clearance*, dan besar medan magnet dan medan listrik sepanjang saluran transmisi. Jenis penghantar yang digunakan pada saluran transmisi memiliki peran yang cukup penting dalam menentukan jenis tower yang digunakan. Jenis kawat penghantar akan menentukan besar andongan penghantar yang menjadi faktor penting dalam menentukan besar *ground clearance* yang selanjutnya menentukan spesifikasi *tower* transmisi yang akan digunakan. Gambar 9 di bawah ini merupakan persebaran jenis penghantar yang digunakan pada saluran transmisi di pulau Bali.



Gambar 9. Persebaran jenis penghantar di pulau Bali

Pada kajian awal ini akan dilakukan perhitungan andongan maksimum pada jenis-jenis penghantar yang digunakan pada saluran transmisi di pulau Bali yaitu tipe ACSR Hawk, ACSR Partridge, dan TACSR dengan menggunakan CTC Global Program. Perhitungan medan listrik

dan medan magnet juga dilakukan berdasarkan data spesifikasi teknik kawat penghantar serta data tipikal desain rancangan *tower pole* dan *lattice* yang selama ini digunakan berdasarkan referensi yang ada.

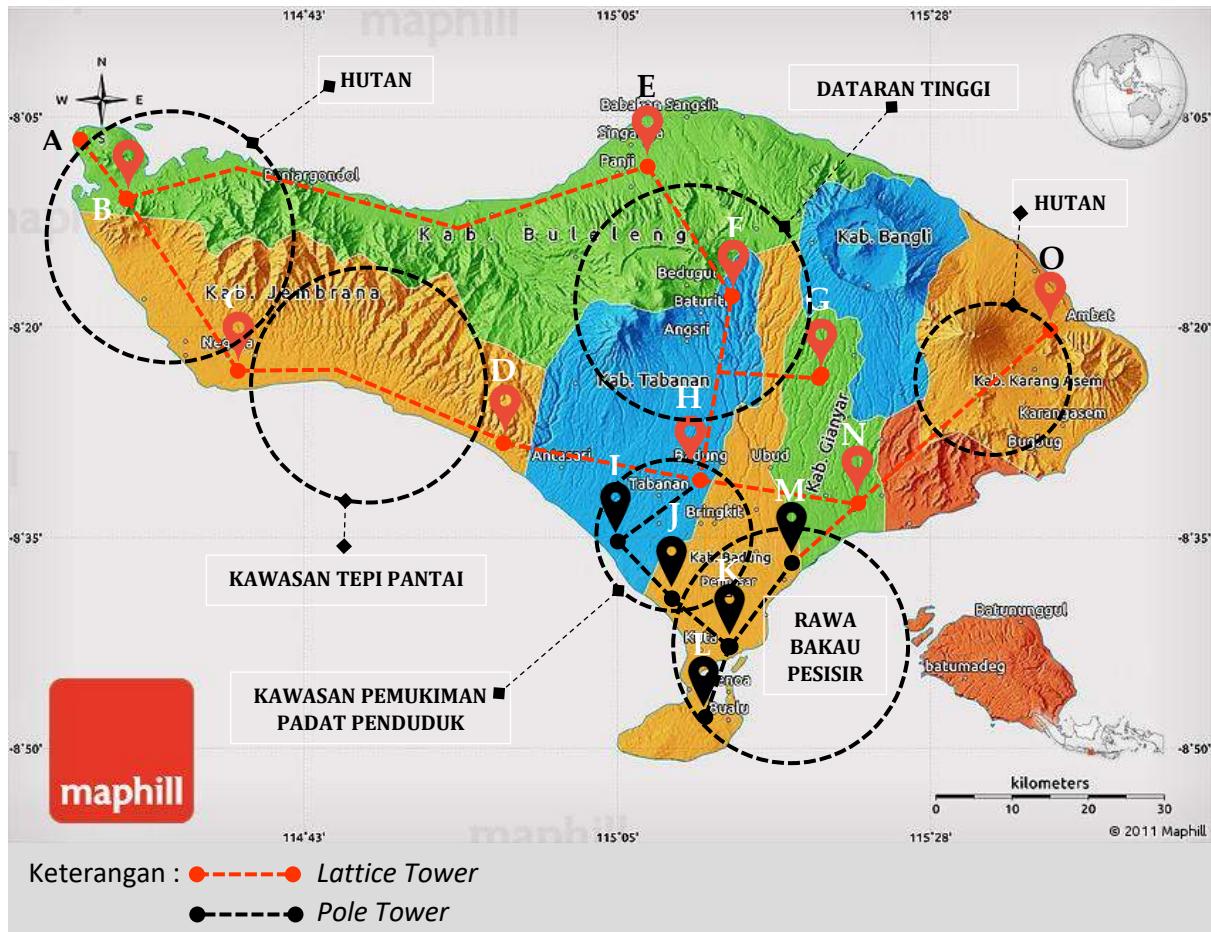
Tabel 6. Spesifikasi teknik saluran transmisi di pulau Bali

Kode	Jurusan	Spesifikasi Teknik Penghantar				
		Panjang		Konduktor		
		KM	KMS	Jenis	Penampang (mm ²)	KHA/ CCC (A)
A-B	GLMNK-BWANGI I,II	1,65	3,3	ACSR	240	645
B-D	GLMNK-NGARA I,II	43,69	87,38	ACSR	240	645
B-E	GLMNK-PMRON	75,9	75,9	ACSR	2 x 240	1290
C-D	NGARA-ASARI I,II	44,23	88,46	ACSR	240	645
D-H	KAPAL-ASARI I,II	23	46	ACSR	240	645
F-H	KAPAL-BTRTI	38,15	38,15	TACSR	160	750
G-H	KAPAL-PYGAN	21,47	21,47	TACSR	160	750
H-N	KAPAL-GNYAR I,II	19,22	19,22	ACSR	240	645
H-L	KAPAL-NSDUA	30,91	30,91	ACSR	135	400
H-I	KAPAL-PD SAMBIAN	9,97	9,97	ACSR	240	645
F-G	PYGAN-BTRTI	27,14	27,14	TACSR	160	750
N-O	GNYAR-AMPRA I,II	33,76	33,76	ACSR	240	645
M-N	GNYAR-SANUR I	16,26	16,26	ACSR	240	675
M-N	GNYAR-SANUR II	16,38	16,38	ACSR	240	675
K-M	SANUR-PSGRN I	7,34	7,34	ACSR	135	400
K-M	SANUR-PSGRN II	7,3	7,3	ACSR	240	645
I-K	PSGRN-PD SAMBIAN	7,76	7,76	ACSR	240	645
I-L	PSGRN-NSDUA	13,41	13,41	ACSR	135	400
E-F	BTRTI-PMRON	20,43	20,43	ACSR	240	645

*Catatan : Data pada Tabel di atas belum termasuk update dengan GI baru yaitu GIS Celukan Bawang.

3.3 Tower Transmisi di Bali

Adapun persebaran jenis tower ditunjukkan pada Gambar 10 di bawah ini. Garis merah putus-putus pada gambar di atas menunjukkan saluran transmisi dengan jenis tower yang digunakan yaitu tipe lattice. Sementara garis hitam putus – putus pada gambar di atas menunjukkan saluran transmisi dengan jenis tower pole tower.



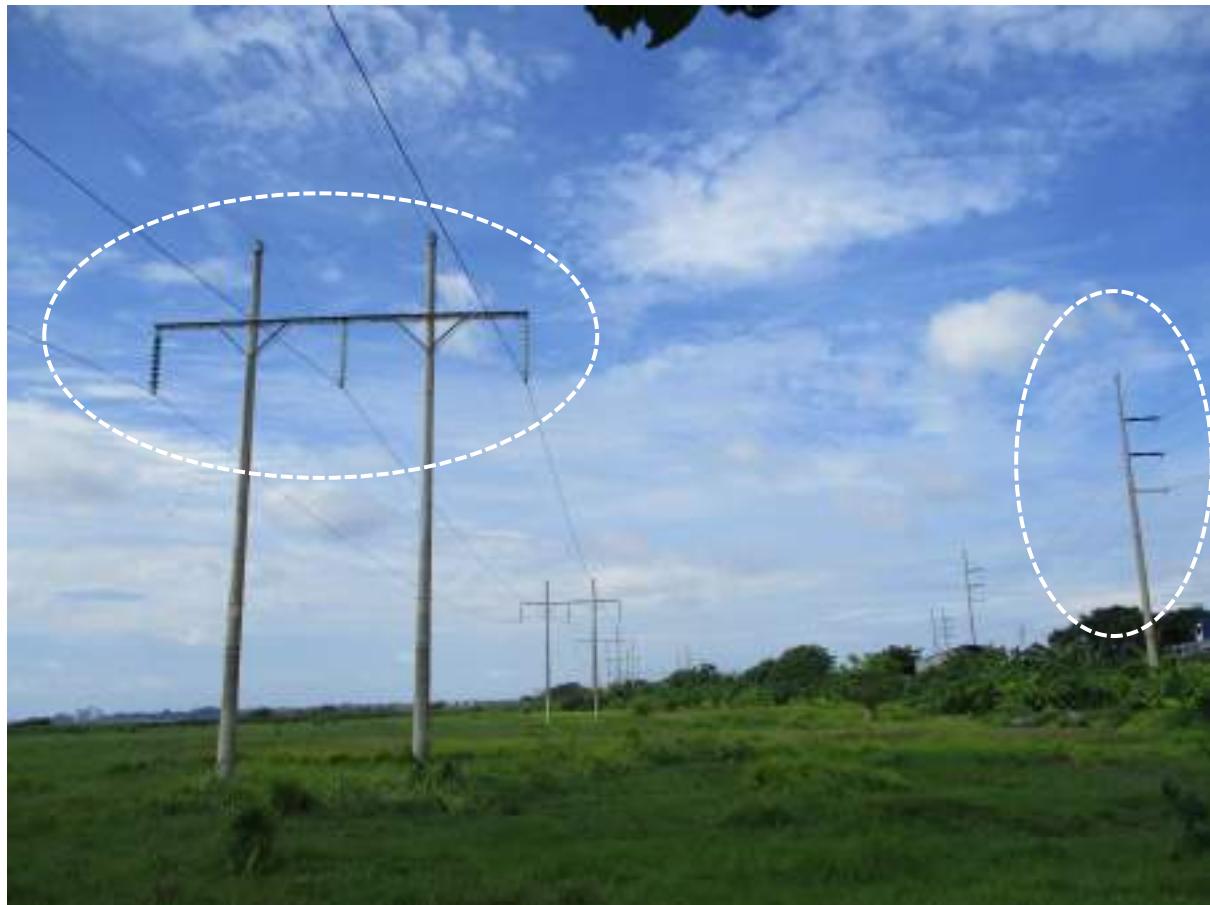
Gambar 10. Persebaran *Tower* dan Karakteristik wilayah saluran transmisi di pulau Bali

Selain itu, pada kajian insulator, persebaran insulator pada *tower* transmisi berdasarkan karakteristik wilayah yang dilalui saluran transmisi sangat penting diketahui guna menentukan kondisi kelembapan dan polutan yang ada disekitar insulator. Insulator pada *pole tower* berada pada wilayah pemukiman pada penduduk disekitar pesisir pantai dan rawa bakau.

Pada survey pertama yang dilakukan di Bali, yaitu pada tanggal 17-18 Januari 2018, terdapat tiga lokasi yang dikunjungi yaitu :

1. Lembeng Ketewel (Daerah dekat pantai di sebelah utara Sanur)
2. Dam Estuari (Area dekat rawa / air payau)
3. Pesanggaran – GH 57 (Area dekat hutan bakau)

Gambar 11 hingga Gambar 13 menunjukkan jaringan transmisi 150 kV dengan tower *jenis pole* pada lokasi – lokasi yang dikunjungi.



Gambar 11. Jaringan transmisi 150 kV dengan *pole tower* tipe :

AA-3 (sebelah kiri) dan AA-0 (sebelah kanan)

di daerah Lembeng Ketewel (Area dekat pantai, sebelah utara Sanur)



Gambar 12. Jaringan transmisi 150 kV dengan *pole tower* di daerah Dam Estuari
(Area dekat rawa / air payau)



Gambar 13. Jaringan transmisi 150 kV dengan *pole tower* di daerah Pesanggaran – GH 57
(Area dekat hutan bakau)

BAB IV

KAJIAN INSULATOR DI WILAYAH BALI

4.1. Data Populasi Insulator 150 KV di Wilayah Bali

Data populasi insulator berdasarkan jenisnya pada tegangan kerja 150 kV yang tersebar di wilayah Bali dapat dilihat dari grafik pada Gambar 14 di bawah ini. Berdasarkan data yang didapat total insulator yang terpasang pada tower – tower saluran transmisi 150 kV di wilayah Bali adalah 189.744 buah. Seperti yang telah dikemukakan di bagian pendahuluan bahwa insulator dapat dibedakan dengan tipe dan jenis materialnya, hal tersebut juga dilakukan pada populasi insulator di wilayah Bali ini. Detail klasifikasi insulator yang terdapat di Bali dapat dilihat pada Tabel 7 - 9 di bawah ini.

Tabel 7. Klasifikasi dan Jumlah Insulator yang Terpasang pada *Tower* Saluran Transmisi di wilayah Bali, berdasarkan Tipe-nya

No.	Tipe Insulator	Jumlah	Persentase
1	Suspension (Disc)	185,418	97.72%
2	Longrod	2,433	1.28%
3	Post	1,893	1.00%
Total		189,744	100.00%

Tabel 8. Klasifikasi dan Jumlah Insulator yang Terpasang pada *Tower* Saluran Transmisi di wilayah Bali, berdasarkan Jenis Materialnya.

No.	Jenis	Jumlah	Persentase
1	Kaca	71,016	37.43%
2	Keramik	114,714	60.46%
3	Komposit	180	0.09%
4	Polimer	360	0.19%
5	Keramik/Kaca*	2,436	1.28%
6	Keramik/Komposit**	1,038	0.55%
Total		189,744	100.00%

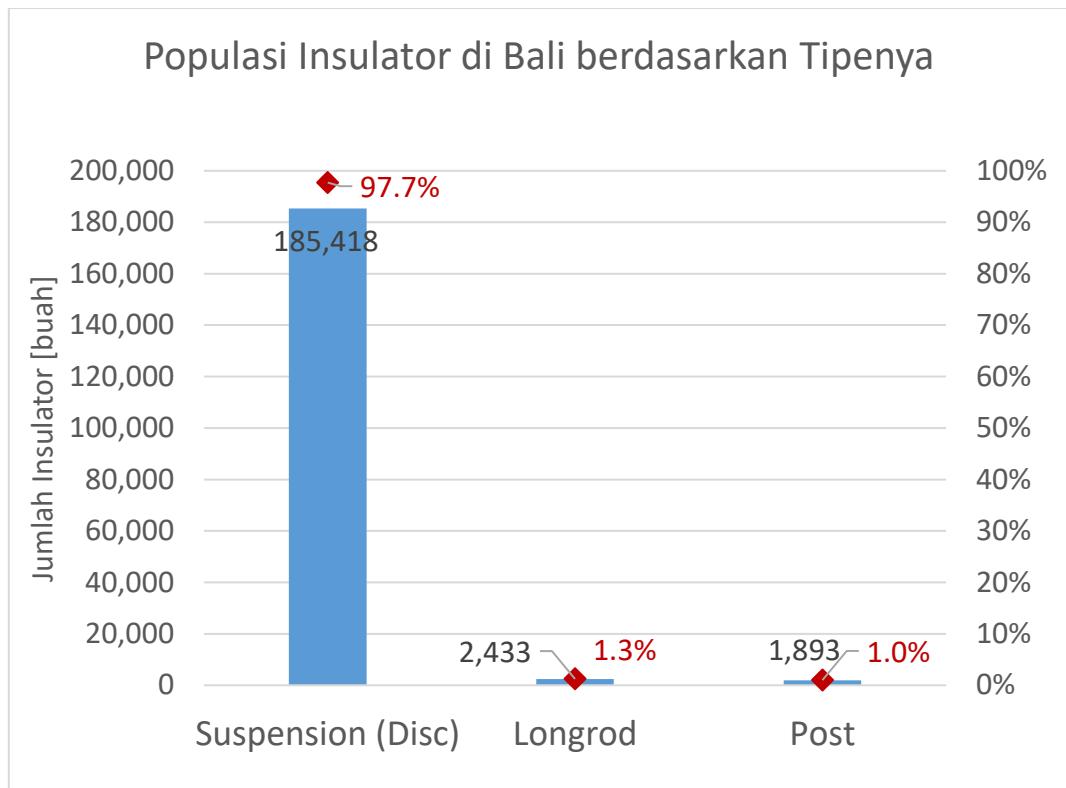
Keterangan :

- * Tidak diketahui persisnya jenis material untuk insulator yang dimaksud, namun berdasarkan merk dan tipe-nya diperkirakan merupakan jenis material keramik atau kaca
- ** Tidak diketahui persisnya jenis material untuk insulator yang dimaksud, namun berdasarkan merk dan tipe-nya diperkirakan merupakan jenis material keramik atau komposit

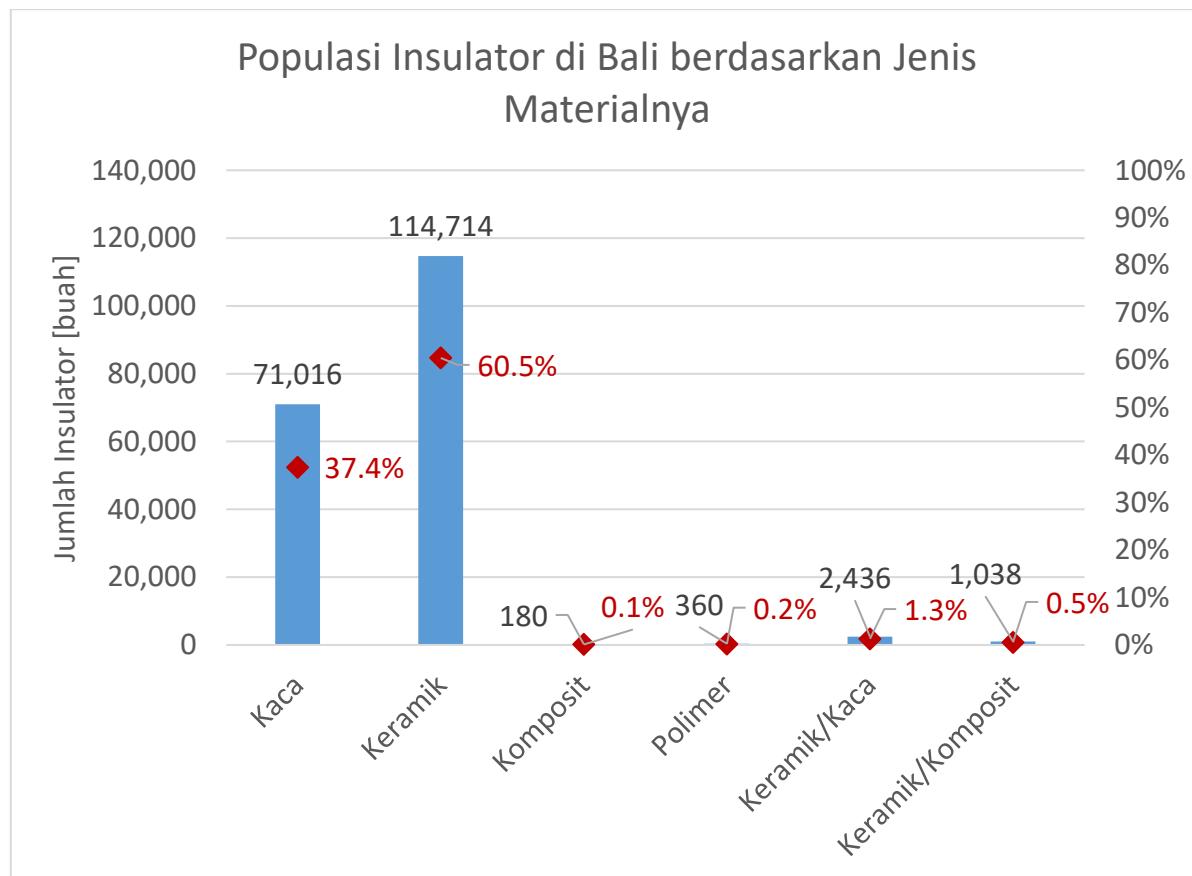
Tabel 9. Klasifikasi dan Jumlah Insulator yang Terpasang pada *Tower* Saluran Transmisi di wilayah Bali, berdasarkan Merk-nya

No.	Jenis	Jumlah	Persentase
1	Dalian	39,888	21.02%
2	Dulmison	180	0.09%
3	E.S.A Fog Type	534	0.28%
4	NGK	54,435	28.69%
5	NGK Fog Type	18,120	9.55%
6	NGK / LAPP	504	0.27%
7	SEDIVER	26,886	14.17%
8	SEDIVER Fog Type	17,280	9.11%
9	Shicuan Yibin	26,712	14.08%
10	UNELL	204	0.11%
11	ZIBO	312	0.16%
12	ZIBO Fog Type	2,112	1.11%
13	<i>unknown</i>	2,577	1.36%
Total		189,744	100.00%

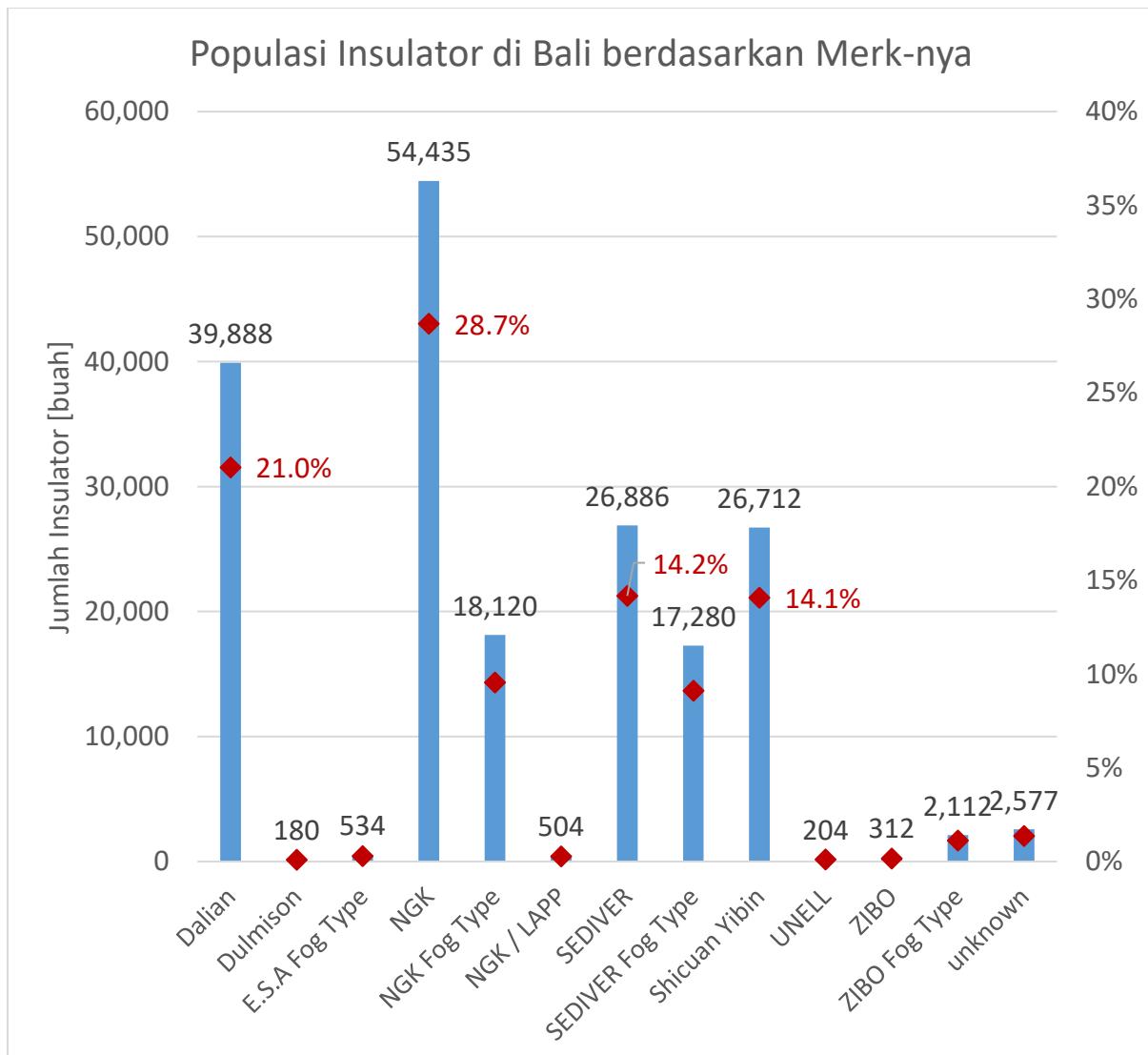
Adapun distribusi populasi insulator berdasarkan tipe, jenis material dan merk-nya tersebut dapat dilihat juga pada Gambar 14, 15, dan 16.



(a) berdasarkan Tipenya



(b) berdasarkan Jenis Materialnya



(c) Berdasarkan Merk-nya

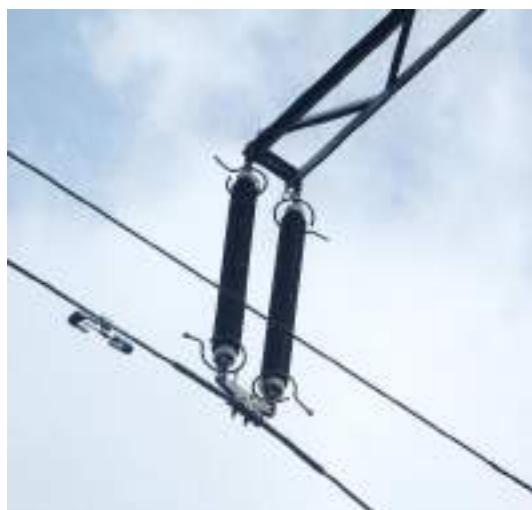
Gambar 13. Distribusi Insulator berdasarkan Klasifikasinya di Jaringan Transmisi 150 kV Bali

Berdasarkan data – data di atas tersebut, tipe insulator yang paling banyak digunakan adalah tipe *suspension disc* sebanyak 185.418 buah atau 97,7% dari keseluruhan insulator yang terpasang pada *tower – tower* transmisi 150 kV di Bali dimana 1 string insulator terdiri dari 12 buah insulator *suspension disc*. Selain itu, terdapat juga insulator jenis *long rod* sebanyak 2.433 buah (1,3%) dan insulator *post* sebanyak 1.893 buah (1,0%).

Pada setiap *tower* transmisi, baik yang jenis *lattice* maupun yang *pole*, insulator – insulator terpasang dengan berbagai jenis konfigurasi yang di PLN biasa disebut dengan istilah – istilah sebagai berikut.

1. SS (*Single Suspension*)
2. DS (*Double Suspension*)
3. ST (*Single Tension*)
4. DT (*Double Tension*)

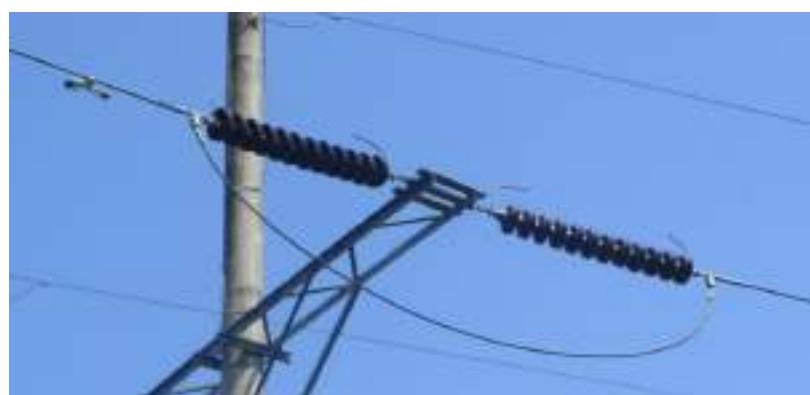
Baik SS maupun ST terdiri dari 1 (satu) *string* insulator, sedangkan DS maupun DT terdiri 2 (dua) *string* insulator yang diparalelkan. 1 (satu) *string* insulator tersebut dapat terdiri dari 12 buah insulator *suspension disc* yang direntengkan atau 1 buah insulator tipe *long rod*. Istilah *suspension* dan *tension* tergantung pada fungsi tower yang bersangkutan. Jika terpasang pada *tower suspension*, maka konfigurasi insulatornya adalah SS atau DS, sedangkan jika terpasang pada *tower tension*, maka konfigurasi insulatornya bisa berupa ST atau DT. Khusus untuk insulator tipe *post* hanya digunakan pada *tower suspension* dengan konfigurasi SS saja.



(a) Konfigurasi DS (*Long Rod*)



(b) Konfigurasi SS (*Suspension Disc*)



(c) Konfigurasi ST/ST (*Suspension Disc*)



(d) Konfigurasi DT / DT (*Suspension Disc*)



(e) Konfigurasi ST / DT (*Suspension Disc*)

Gambar 14. Jenis – Jenis Konfigurasi Insulator yang Terpasang pada *Tower Transmisi 150 kV* di Bali

Seperti yang telah ditunjukkan pada Tabel 9 dan grafik pada Gambar 13 tentang distribusi populasi insulator berdasarkan merk-nya, dapat diketahui bahwa di wilayah Bali pada khususnya, insulator-insulator di-*supply* dari berbagai vendor yang berbeda – beda untuk setiap tipe dan jenis materialnya, yang dapat dijabarkan seperti pada Tabel 10 di bawah ini.

Tabel 10. Korelasi Tipe, Jenis Material dan Merk Insulator yang digunakan

Tipe	Jenis Material	Merk		Image
<i>Suspension Disc</i>	Keramik	NGK	Normal	
			<i>Fog Type</i>	
		Dalian		
		Uni Electric (UNEL)		
		LAPP		

Tipe	Jenis Material	Merk		Image
<i>Suspension Disc</i>	Keramik	Zibo	Normal	
			<i>Fog Type</i>	
		Dulmison		
	Kaca	Sediver	Normal	
			<i>Fog Type</i>	
	Kaca	Shicuan Yibin		
	<i>E.S.A. Fog Type</i>			

Tipe	Jenis Material	Merk	Image
<i>Suspension Disc</i>	Komposit	LAPP	
<i>Long Rod</i>	Keramik	NGK	
		LAPP	
	Komposit / Polimer	NGK	
<i>Post</i>	Keramik	NGK	
		Zibo	

Tipe	Jenis Material	Merk	Image
Post	Keramik	Uni Electric (UNEL)	
	Komposit	LAPP	
	Komposit	Dalian	

*Sumber : Masing – masing gambar diambil dari laman perusahaan insulator yang bersangkutan

Dari tabel di atas, salah satu jenis insulator yang juga banyak digunakan di wilayah Bali adalah insulator *suspension disc* tipe *fog*, atau biasa disebut Antifog di lingkungan PLN, yang di-supply oleh NGK dan Zibo untuk jenis keramik, serta Sediver dan E.S.A untuk jenis kaca. Jenis insulator ini sangat berguna untuk saluran transmisi di daerah berpolusi tinggi seperti pantai atau area perindustrian, karena dapat mengurangi kemungkinan polutan yang menempel sehingga memperkecil arus bocor pada permukaan insulator. Oleh karena di wilayah Bali terdapat banyak daerah pantai, maka insulator tipe Fog ini pun banyak sekali digunakan.

4.2. Tingkat Polusi di Wilayah Bali

Insulator-insulator di wilayah Bali tersebar ke berbagai rute jaringan transmisi dengan jenis area yang berbeda-beda. Jenis area dimana insulator-insulator ini terpasang adalah daerah pantai, perkebunan, persawahan, pegunungan, perkotaan, permukiman. Di wilayah Bali tidak ada area perindustrian yang dilewati oleh jaringan transmisi, oleh karena itu polutan yang dipertimbangkan dalam kajian ini adalah polutan air garam pada daerah dekat pantai.

Berdasarkan jenis areanya, level polusi pada masing – masing area pun tentunya berbeda – beda, dan hal ini berpengaruh pada penentuan jenis insulator yang akan dipasang pada area tersebut. Seperti yang telah dikemukakan pada bab sebelumnya, dimana untuk level polusi yang tinggi, insulator tipe *fog* akan lebih kuat dibandingkan tipe normal.

Adapun klasifikasi level polusi rendah, sedang, tinggi berdasarkan standar yang terdapat pada SPLN 10-3B Tahun 1993, tentang Tingkat Intensitas Polusi sehubungan dengan pedoman pemilihan insulator. Berikut ini adalah deskripsi level polusi yang dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Tingkat Intensitas Polusi dengan Ciri Lingkungan dalam SPLN 10-3B : 1993

No.	Tingkat Polusi	Contoh Ciri Lingkungan yang Khas
1	Rendah	<ul style="list-style-type: none"> • Kawasan tanpa industri & kepadatan-rumah rendah yang dilengkapi sarana pembakaran • Kawasan dengan kepadatan-industri rendah atau kepadatan-rumah rendah tetapi sering terkena angin dan/atau hujan • Kawasan pertanian • Kawasan pegunungan <p>Semua kawasan ini harus terletak paling sedikit 10-20 km dari laut, dan bukan kawasan terbuka bagi hembusan angin langsung dari laut</p>
2	Sedang	<ul style="list-style-type: none"> • Kawasan dengan industri yang tidak secara khusus menghasilkan asap polusi dan/atau dengan kepadatan-rumah sedang yang dilengkapi sarana pembakaran • Kawasan dengan kepadatan-rumah tinggi dan/atau kepadatan-industri tinggi, tetapi sering terkena angin dan/atau hujan • Kawasan terbuka bagi angin dari laut tetapi tidak terlalu dekat dengan pantai (paling sedikit berjarak beberapa km)*
3	Berat (Tinggi)	<ul style="list-style-type: none"> • Kawasan dengan kepadatan-industri tinggi dan pinggiran kota besar dengan kepadatan sarana pembakaran tinggi yang menghasilkan polusi. • Kawasan dekat laut atau dalam setiap keadaan terbuka bagi hembusan angin yang relatif kencang dari laut*

No.	Tingkat Polusi	Contoh Ciri Lingkungan yang Khas
4	Sangat Berat	<ul style="list-style-type: none"> Kawasan yang umumnya luasnya cukupan, terkena debu konduktif dan asap industri yang khususnya menghasilkan endapan konduktif yang tebal. Kawasan yang umumnya luasnya cukupan sangat dekat dengan pantai dan terbuka bagi semburan air laut atau hembusan angin yang sangat kencang dan terpolusi dari laut Kawasan padang pasir, yang ditandai dengan tidak adanya hujan untuk jangka waktu yang lama, terbuka bagi angin kencang yang membawa pasir dan garam serta terkena kondensasi yang tetap.

Tabel 11 di atas menggambarkan standar klasifikasi level polusi secara kualitatif. Sedangkan secara kuantitatif, tingkat polusi tersebut juga dapat diukur dari uji polusi buatan khusus pada insulator *cap* dan *pin / long rod* berdasarkan standar IEC 507 yang ditunjukkan pada Tabel 12 berikut ini. Standar ini juga disebut di dalam SPLN 10-3B: 1993.

Tabel 12. Standar Uji Polusi Buatan Khusus berdasarkan IEC 507.

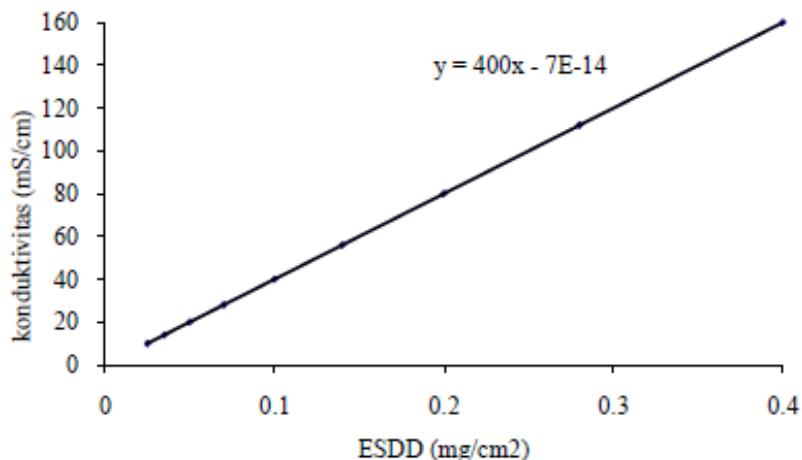
Tingkat Polusi	Jarak Rambat Spesifik [mm/kV]	Uji Polusi Buatan		
		Nilai ketahanan terhadap intensitas polusi		
		Metode Kabut Garam [kg/m ³]	Metode Lapis Padat	
Ringan	16	5 – 14	0.03 – 0.06	15 – 20
Sedang	20	14 – 40	0.10 – 0.20	24 – 35
Berat	25	40 – 112	0.30 – 0.60	36
Sangat Berat	31	> 160	–	–

Namun, dari IEC sendiri sudah terdapat pembaharuan standar yaitu IEC 815 tentang Tingkat Intensitas Polusi berdasarkan kontaminasinya atau nilai ESDD (Equivalent Salt Deposit Density) yang ditunjukkan pada Tabel 13 berikut.

Tabel 13. Tingkat Intensitas Polusi dan standar nilai ESDD berdasarkan IEC 815.

Klasifikasi Kontaminasi	ESDD [mg/cm ²]	Konduktivitas [mS/cm]
Bersih atau polusi sangat ringan	0 – 0.03	0 – 12
Polusi ringan	0.03 – 0.06	12 – 24
Polusi sedang	0.06 – 0.1	24 – 40
Polusi berat	> 0.1	> 40

Adapun nilai konduktivitas pada Tabel 13 merupakan hasil konversi dari nilai ESDD menggunakan perhitungan yang berdasarkan pada IEC 507 tahun 1989, dengan grafik pada Gambar 15 berikut ini.



Gambar 15. Korelasi Konduktivitas terhadap nilai ESDD berdasarkan IEC 507 Tahun 1989.

Berdasarkan standar level polusi tersebut, maka area – area pada sistem transmisi Gambaran 150 kV di Bali dapat diklasifikasikan menjadi level polusi sedang dan tinggi. Untuk wilayah Bali, tidak terdapat daerah – daerah berpolusi rendah atau sangat tinggi dimana terdapat saluran transmisi 150 kV di dalamnya. Persebaran ruas saluran transmisi dengan jenis level polusi pada areanya dapat ditunjukkan pada Gambar 16 berikut, sedangkan data yang lebih detail terkait persebaran insulator dilengkapi dengan jenis area terpasang, level polusi pada jenis area tersebut, beserta jenis tower dimana insulator tersebut terpasang ditunjukkan oleh Tabel 14.



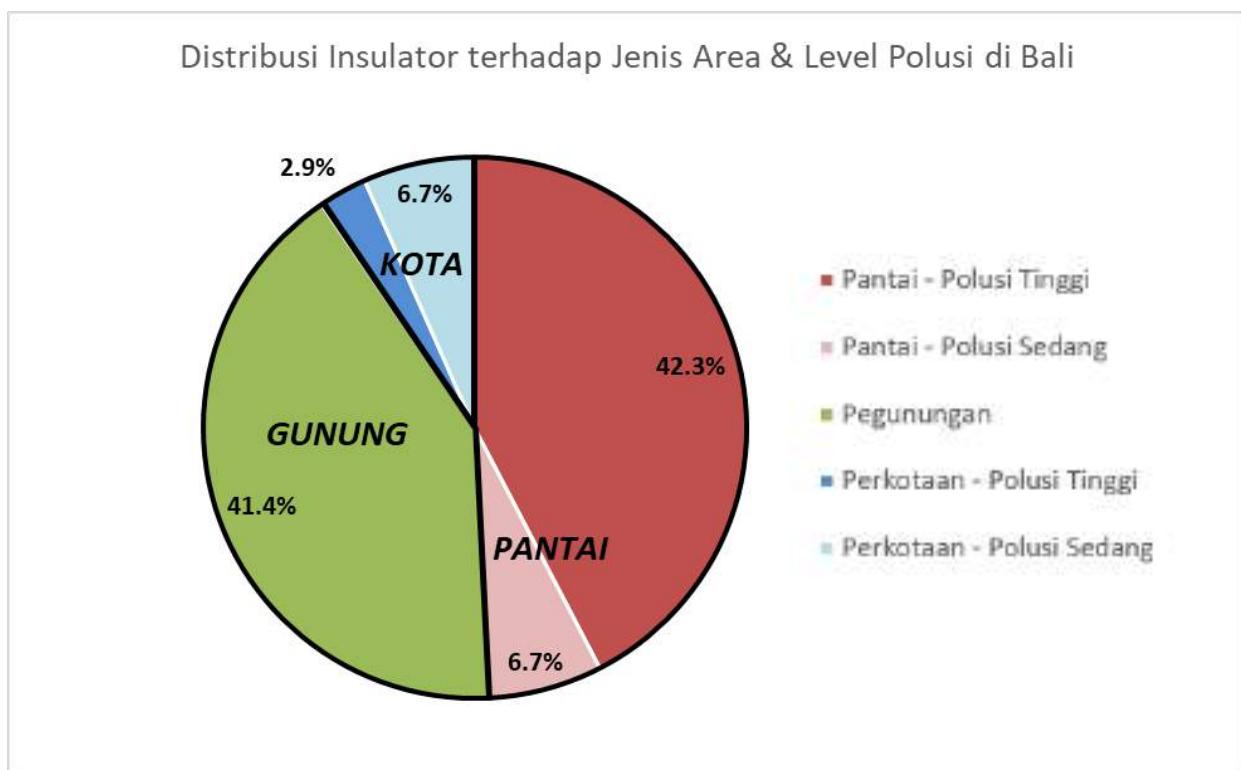
Gambar 16. Ruas Koridor Transmisi 150 kV di wilayah Bali beserta Level Polusi di Areanya.

Tabel 14. Data Pesebaran Insulator pada Jaringan Transmisi 150 KV di Bali

NO	NAMA KORIDOR	JML TOWER	JML INSULATOR	LEVEL POLUSI	JENIS AREA TERPASANG	JENIS TOWER
1	CH GILIMANUK - GILIMANUK	7	1.080	TINGGI	DAERAH DEKAT PANTAI	LATTICE
2	NEGARA - GILIMANUK	114	10.872	TINGGI	DAERAH DEKAT PANTAI, PERKEBUNAN & PERSAWAHAN	LATTICE
3	ANTOSARI - NEGARA	145	15.840	TINGGI	DAERAH DEKAT PANTAI, PERKEBUNAN & PERSAWAHAN	LATTICE
4	KAPAL - ANTOSARI	78	7.344	TINGGI	DAERAH DEKAT PANTAI, PERKEBUNAN & PERSAWAHAN	LATTICE
5	GILIMANUK - PEMARON	240	18.864	TINGGI	DAERAH DEKAT PANTAI, PERKEBUNAN & PERSAWAHAN	LATTICE
6	CELUKAN BAWANG - KAPAL	220	39.888	SEDANG	DAERAH PEGUNUNGAN, PERKEBUNAN & PERSAWAHAN	LATTICE
7	BATURITI - PEMARON	74	8.568	SEDANG	DAERAH PEGUNUNGAN, PERKEBUNAN & PERSAWAHAN	LATTICE
8	KAPAL - BATURITI	131	18.864	SEDANG	DAERAH PEGUNUNGAN, PERKEBUNAN & PERSAWAHAN	LATTICE
9	INC PAYANGAN - PAYANGAN	18	2.664	SEDANG	DAERAH PEGUNUNGAN, PERKEBUNAN & PERSAWAHAN	LATTICE
10	KAPAL - GIANYAR	71	8.484	SEDANG	DAERAH PEGUNUNGAN, PERKEBUNAN & PERSAWAHAN	LATTICE
11	GIANYAR - AMLAPURA	106	12.780	SEDANG	DAERAH DEKAT PANTAI, PERKEBUNAN & PERSAWAHAN	LATTICE
12	KAPAL - PEMECUTAN KELOD	2	24	SEDANG	DAERAH PERKOTAAN, DAERAH PEMUKIMAN	LATTICE
13	P. SAMBIAN - PESANGGARAN	2	144	SEDANG	DAERAH PERKOTAAN, DAERAH PEMUKIMAN	LATTICE
14	P. KELOD - CH BANDARA	1	72	TINGGI	DAERAH PERKOTAAN, DAERAH PEMUKIMAN	LATTICE
15	CH NUSA DUA - NUSA DUA	2	432	TINGGI	DAERAH DEKAT PANTAI, PERKOTAAN, & PEMUKIMAN	LATTICE
16	KAPAL - PADANG SAMBIAN	111	4.944	SEDANG	DAERAH PERKOTAAN, DAERAH PEMUKIMAN	POLE
17	KAPAL - PEMECUTAN KELOD	140	3.753	SEDANG	DAERAH PERKOTAAN, DAERAH PEMUKIMAN	POLE
18	P. SAMBIAN - PESANGGARAN	76	3.771	SEDANG	DAERAH PERKOTAAN, DAERAH PEMUKIMAN	POLE
19	P. KELOD - CH BANDARA	109	5.436	TINGGI	DAERAH PERKOTAAN, DAERAH PEMUKIMAN	POLE
20	PESANGGARAN - SANUR	168	5.661	TINGGI	DAERAH DEKAT PANTAI, PERKOTAAN, & PEMUKIMAN	POLE
21	SANUR - GIANYAR	377	10.287	TINGGI	DAERAH DEKAT PANTAI, PERKEBUNAN & PERSAWAHAN	POLE
22	PESANGGARAN - NUSA DUA	137	5.904	TINGGI	DAERAH DEKAT PANTAI, PERKOTAAN, & PEMUKIMAN	POLE
23	CH BANDARA #2 - NUSA DUA	87	4.068	TINGGI	DAERAH DEKAT PANTAI, PERKOTAAN, & PEMUKIMAN	POLE
TOTAL		2.416	189.744			

Dari Tabel 14, dapat diketahui bahwa terdapat 189.744 buah insulator yang terpasang pada 2.416 tower transmisi (baik jenis *lattice* maupun *pole*) dan tersebar di 23 ruas koridor di wilayah Bali. Dari tabel tersebut juga dapat dilihat bahwa ruas koridor yang menjadi bagian dari daerah pantai pasti memiliki level polusi yang tinggi, kecuali satu ruas yaitu Gianyar – Amlapura yang berlevel polusi sedang. Selain daerah pantai, salah satu daerah perkotaan / permukiman memiliki level polusi yang tinggi juga yaitu koridor P. Kelod – GIS Bandara . Selain dari itu, koridor – koridor lain yang merupakan bagian dari daerah pegunungan atau daerah perkotaan / permukiman yang lain memiliki level polusi sedang.

Untuk lebih jelasnya, distribusi jumlah insulator dalam bentuk persentase terhadap jenis area dan level polusinya masing – masing dapat dilihat pada grafik *pie* pada Gambar 17 di bawah ini.



Gambar 17. Persebaran Insulator terhadap Jenis Area dan Level Polusi Area Terpasang

Dari Gambar 17 di atas ini, sebesar 49.1% atau 93.132 buah insulator dari keseluruhan insulator terletak di jalur pantai, dan sebanyak 52% atau 98.148 buah insulator terdapat di jalur pantai dan perkotaan dengan level polusi tinggi. Dari data ini saja sudah dapat terlihat bahwa kemungkinan terjadinya kegagalan insulator di wilayah Bali akan cukup besar, dimana setengah dari populasi insulator di Bali berada di jalur berpolusi tinggi.

4.3. Hasil Uji Air Laut dan Payau di wilayah Bali

Berdasarkan CIGRE 158 tentang *Polluted Insulators*, polutan aktif diklasifikasikan berdasarkan pembentukan lapisan konduktifnya menjadi 2 yaitu yang ditunjukkan pada Tabel 15 di bawah ini.

Tabel 15. Kandungan Lapisan Konduktif pada Polutan Aktif berdasarkan CIGRE 158

Polusi Konduktif	Polusi Terlarut
Deposit Logam : <i>magnetite, pyrite</i>	Garam Ionik : NaCl, Na ₂ CO ₃ , MgCl ₂ , <i>gypsum</i> CaSO ₄
Gas dalam larutan : SO ₂ , H ₂ S, NH ₃	Lain ² : abu, semen
<i>Salt Spray</i>	
<i>Bird Streamer</i>	

Oleh karena itu, untuk melihat lebih jauh seberapa konduktif polutan air laut di wilayah Bali ini, maka diambil sampel air dari 2 lokasi yaitu:

- 1) Lokasi 1. Air laut dari pantai Lembeng Ketewel di dekat Sanur
- 2) Lokasi 2. Air payau dari Dam Estuari

Berikut ini adalah hasil uji sampel air dari dua lokasi tersebut yang ditunjukkan pada Tabel 16 di bawah ini.

Tabel 16. Hasil Uji Sampel Air Laut dan Air Payau dari 2 Lokasi di Bali

No	Parameter Analisis	Satuan	Metoda Analisis	Hasil Analisis	
				(A.Laut)	(A.Payau)
1	Daya Hantar Listrik *	uS/cm	APHA 2510	46500	396
2	Salinitas	‰	APHA 2520	33,2	0,2
3	Besi Total (Fe) *	mg/L	APHA 3500-Fe-D	0,473	0,090
4	Kalsium (Ca)	mg/L	APHA 3500-Ca-B	266	248
5	Magnesium (Mg)	mg/L	APHA 3500-Mg-B	625	593
6	Natrium Terlarut (Na)	mg/L	APHA 3500-Na-B	12458	745
7	Kalium Terlarut (K)	mg/L	APHA 3500-K-B	47,0	11,8
8	pH *	mg/L	APHA 4500-H ⁺ -B	7,96	7,48
9	Strontium Terlarut (Sr)	mg/L	APHA 3500-Sr	< 0,001	< 0,001

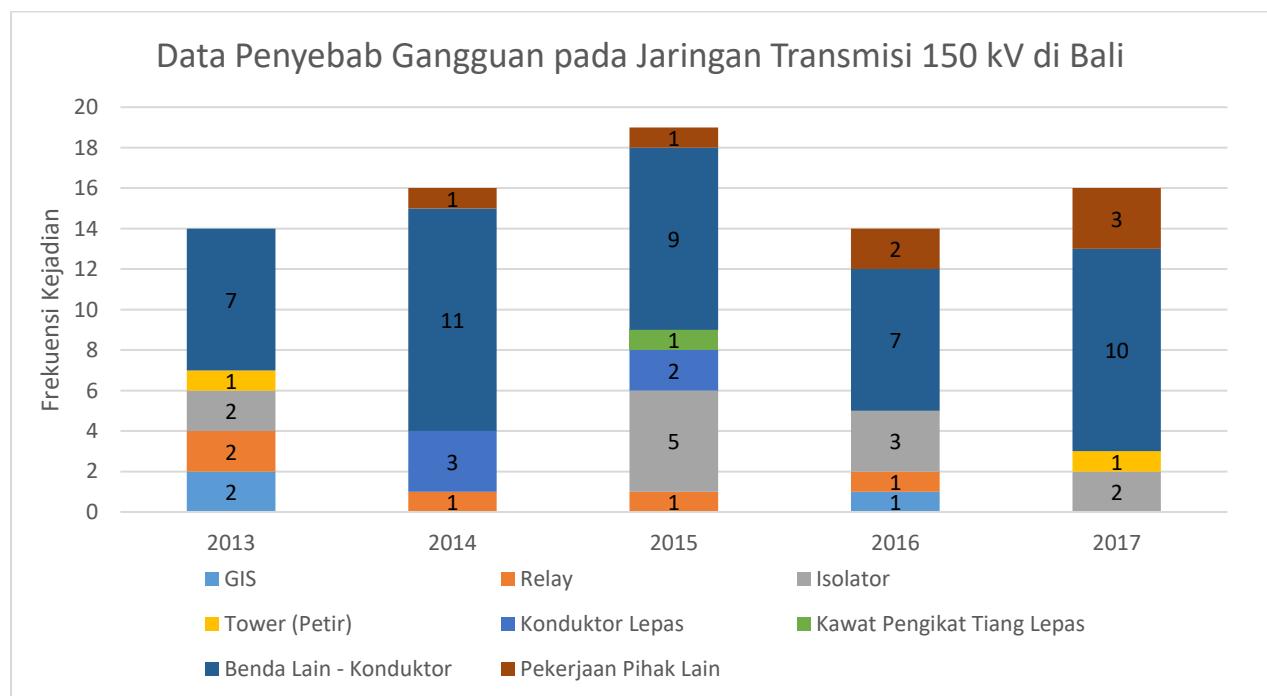
Dari hasil yang ditunjukkan pada Tabel 16 di atas ini, dapat dilihat bahwa nilai konduktivitas air laut jauh lebih tinggi daripada air payau (lebih dari 100x lipat konduktivitas air payau). Tingkat salinitas yang menunjukkan kandungan garam terlarut-nya pun mencapai 166 kali lipat

dari air payau. Dari kandungan air garam yang disebutkan dalam standar CIGRE 158, kandungan Natrium terlarut (Na), Mg, Ca sebagai polusi terlarut dan kandungan Fe sebagai polusi konduktif menjadi unsur yang penting juga dalam menentukan seberapa konduktif air laut ini dibandingkan air payau di wilayah Bali. Jumlah unsur – unsur yang disebutkan tersebut menunjukkan nilai yang lebih besar secara signifikan pada air laut dibandingkan pada air payau. Oleh karena itu, data ini membuktikan bahwa air laut dari pantai di wilayah Bali ini memang sangat konduktif sehingga polutan yang menempel pada permukaan insulator di sekitarnya dapat mengurangi performa insulator.

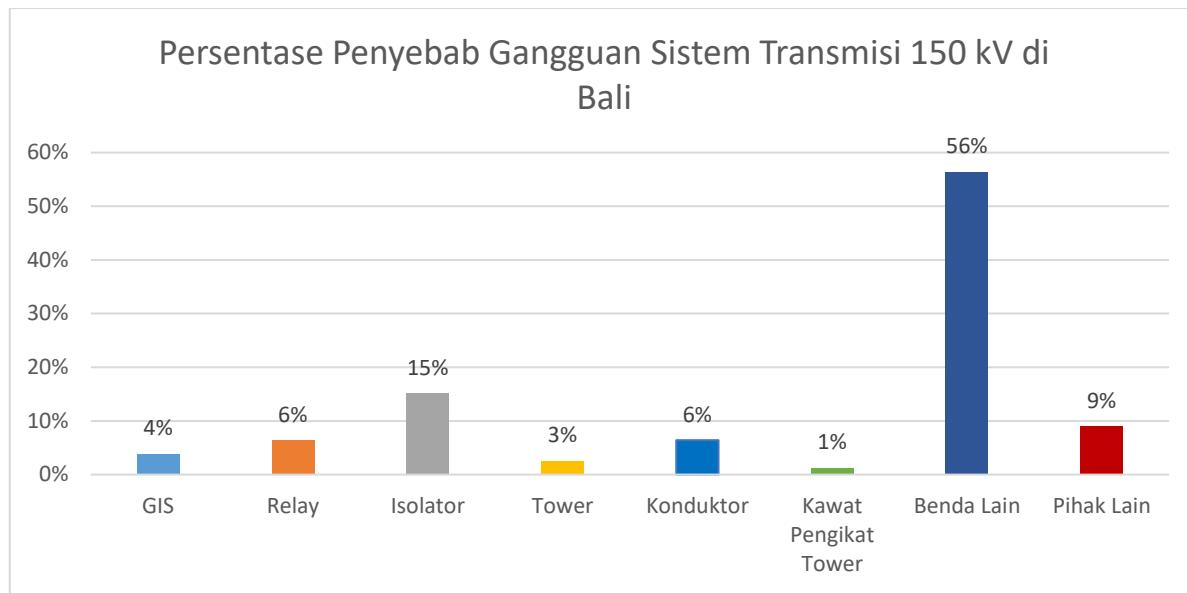
4.4. Data Kegagalan Insulator pada Jaringan Transmisi SUTT 150 kVdi Wilayah Bali

4.4.1. Kegagalan Insulator yang Menyebabkan Gangguan Sistem

Berdasarkan informasi yang didapat dari latar belakang diperlukannya kajian insulator ini, di wilayah Bali, insulator sering kali menjadi penyebab kegagalan suatu sistem transmisi tenaga. Selain itu, penggantian insulator pada tower transmisi sering kali harus dilakukan hingga hampir setiap hari. Berdasarkan informasi tersebut, maka diperlukan data gangguan sistem transmisi 150 kV di Bali yang diambil dari lima tahun terakhir, yaitu tahun 2013 sampai dengan tahun 2017 yang dapat dilihat pada grafik pada Gambar 18 dan Gambar 19.



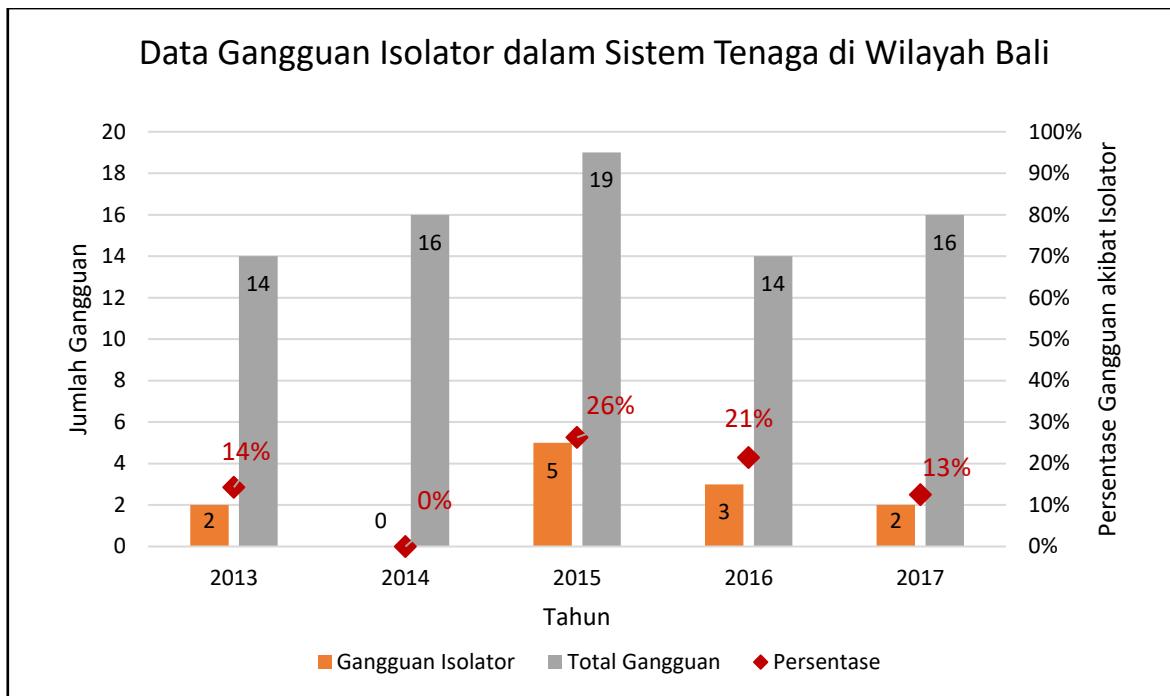
Gambar 18. Frekuensi Gangguan pada Sistem Transmisi 150 kV di Bali beserta Penyebabnya (Tahun 2013 – 2017)



Gambar 19. Persentase Penyebab Gangguan Sistem Transmisi 150 kV di Bali dalam 5 Tahun Terakhir (2013 – 2017)

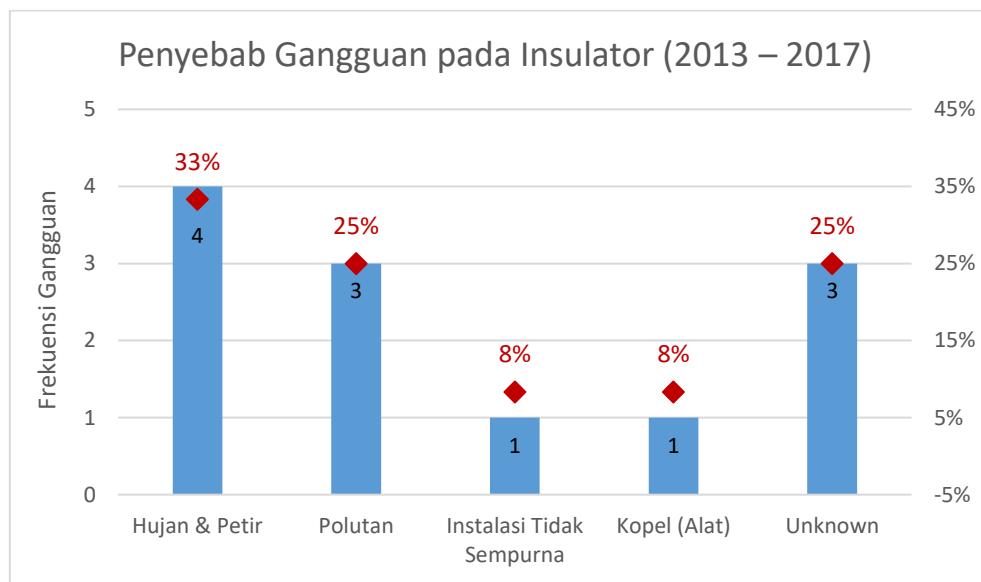
Dari kedua grafik di atas, penyebab yang paling sering menyebabkan gangguan pada sistem transmisi 150 kV di Bali adalah menempelnya benda lain pada konduktor saluran transmisi. Berdasarkan data yang diperoleh, benda lain ini dapat berupa layang – layang, ular, pohon, dan balon gas dengan persentase terhadap total kejadian yaitu masing – masing 84%, 9%, 5%, dan 2%. Namun penyebab utama ini merupakan suatu faktor eksternal yang sulit untuk dapat dikendalikan secara langsung. Hal yang sudah dilakukan hingga saat ini untuk mengurangi efek gangguan sistem berdasarkan layang – layang hanyalah dapat berupa himbauan pada masyarakat untuk tidak bermain layang – layang di sekitar area saluran transmisi.

Faktor kedua tertinggi penyebab gangguan sistem tenaga adalah insulator. Dilihat dari sisi peralatan yang dapat dikendalikan langsung oleh PLN, insulator memang memiliki kontribusi tertinggi sebesar 15% dalam menyebabkan gangguan sistem transmisi, kemudian diikuti oleh kegagalan pada relay (6%), kawat konduktor (6%), GIS (4%), tower (3%) dan kawat pengikat tower (1%). Kegagalan fungsi insulator sebanyak 15% ini didapat dari 12 kali gangguan dalam 79 kali total gangguan dalam kurun waktu 5 tahun terakhir yang disebabkan oleh kegagalan fungsi kerja insulator. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 20 di bawah ini.



Gambar 20. Kontribusi Insulator terhadap Gangguan Sistem Transmisi 150 kV di wilayah Bali

Adapun kegagalan isolator dapat disebabkan oleh kegagalan fungsi elektriknya (terjadinya flashover) atau fungsi mekanik (isolator putus). Berdasarkan faktor penyebab kegagalan, dari data yang kami dapatkan frekuensi kejadian kegagalan isolator dengan masing – masing penyebabnya dapat dilihat pada Gambar 21 di bawah ini.



Gambar 21. Data Frekuensi Kegagalan Insulator Berdasarkan Penyebabnya.

Berdasarkan grafik pada Gambar 21, dapat dilihat bahwa hujan dan petir merupakan faktor penyebab kegagalan pada insulator yang paling utama, diikuti oleh polutan sebagai faktor kedua tertinggi penyebab kegagalan insulator. Disayangkan masih ada penyebab yang belum diketahui sebanyak 25% (atau tiga kali kejadian) dari data yang diperoleh.

Hujan yang berkepanjangan dan petir dapat mengakibatkan insulator mengalami *flash over*, namun hal ini dapat terjadi karena akar permasalahannya adalah adanya polutan yang menempel pada permukaan insulator. Jika kuantitas polutan yang menempel pada permukaan insulator dapat diminimalisir, maka tentunya frekuensi kejadian *flash over* yang diakibatkan oleh hujan dan petir pun dapat berkurang. Oleh karena itu jika dilihat dari akar penyebab kegagalan insulator, terdapat 58% (7 dari 12 kejadian) yang diakibatkan oleh polutan. Fenomena ini sesuai dengan kesimpulan pada subbab sebelumnya dimana hampir setengah dari populasi insulator di wilayah Bali memang terpasang pada area pantai dan area – area yang memiliki level polusi yang tinggi.

Tabel 17 menunjukkan detail data kegagalan insulator yang menyebabkan gangguan pada sistem transmisi 150 kV dilengkapi dengan jenis area terpasang dan level polusinya.

Dari Tabel tersebut dapat dilihat bahwa baik kegagalan insulator yang diduga akibat cuaca hujan dan petir maupun yang langsung karena ditemukannya polutan pada permukaan insulator, hampir seluruh kegagalan insulator terjadi pada area – area dengan tingkat polusi yang tinggi. Sebanyak 83% kegagalan insulator (10 dari 12 kejadian) terjadi pada area berlevel polusi tinggi, dan 100% kegagalan insulator terjadi pada area GI di dekat pantai. Hal ini menjadi bukti pendukung lain yang memperkuat asumsi bahwa kegagalan insulator yang sering terjadi di Bali adalah diakibatkan oleh polutan daerah pantai (polutan air garam).

Dari hasil data yang didapatkan ini, maka untuk selanjutnya perlu dipikirkan perlakuan apa yang tepat untuk dilakukan terhadap insulator – insulator di Bali dan metoda pencegahan kerusakan yang diakibatkan oleh polutan dan kelembaban maupun petir.

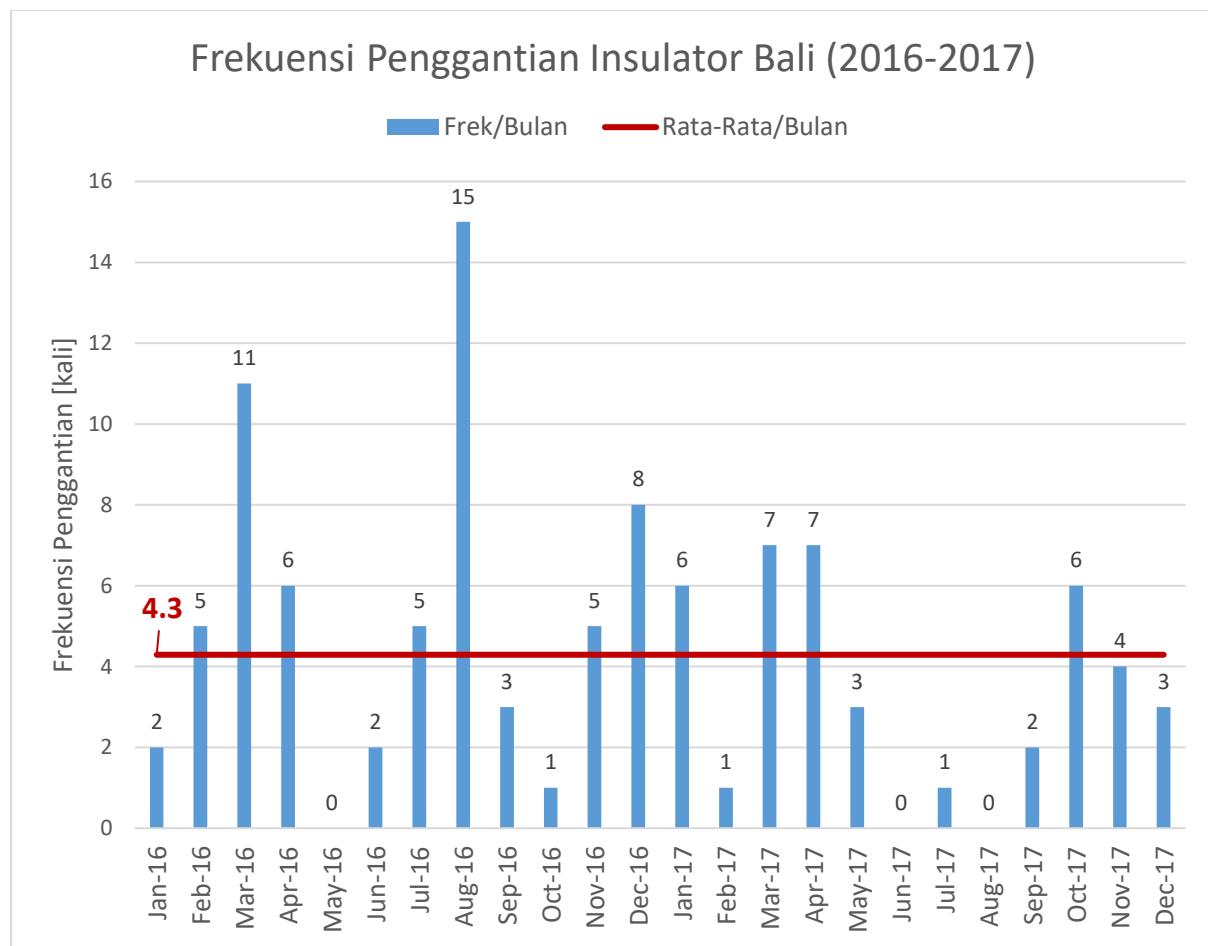
Tabel 17. Data Kegagalan Insulator Penyebab Gangguan pada Sistem Transmisi 150 kV di Wilayah Bali

Tahun	No.	Tgl.	Lokasi Gangguan	Penghantar	Jenis Kegagalan	Penyebab Kegagalan Insulator	Level Polusi
2013	1	5-Apr	GI Pemaron	Pemaron – Baturiti	Isolator Flashover	Hujan & Petir	Tinggi
	2	26-Nov	GI Pesanggaran	Pesanggaran – Busbar	Isolator support breakdown	Kopel (Alat)	Tinggi
2015	1	12-Jan	GI Gianyar	Gianyar – Sanur	Isolator Rusak	Polutan	Tinggi
	2	6-Oct	GI Nusadua	Nusadua – Bandara	Isolator Lepas	<i>Unknown</i>	Tinggi
	3	7-Nov	GI Gianyar	Gianyar – Sanur	Isolator Rusak	<i>Unknown</i>	Tinggi
	4	9-Nov	GI P. Kelod	P. Kelod – Kapal	Isolator Flashover	Polutan	Tinggi
	5	10-Nov	GI Kapal	Kapal – Celukan Bawang	Isolator Flashover	Hujan & Petir	Sedang
2016	1	3-Feb	GI Kapal	Kapal – Celukan Bawang	Isolator Flashover	Instalasi Tidak Sempurna	Sedang
	2	10-Mar	GI Negara	Negara – Antosari	Isolator Flashover	<i>Unknown</i>	Tinggi
	3	7-Apr	GI Negara	Negara – Gilimanuk	Isolator Pecah	Polutan	Tinggi
2017	1	15-Nov	GI Celukan Bawang	Kapal – Celukan Bawang	Isolator Flashover	Hujan & Petir	Tinggi
	2	27-Nov	GI P. Kelod	P. Kelod – Bandara	Isolator Pecah	Hujan & Petir	Tinggi
	Total Kejadian		12 Kali				

4.4.2. Riwayat Penggantian Insulator pada Sistem Transmisi SUTT 150 kV

Berbeda dengan subbab sebelumnya yang membahas kegagalan insulator yang mengakibatkan gangguan pada sistem transmisi SUTT 150 kV di Bali, subbab ini membahas riwayat penggantian insulator yang mengalami kegagalan yang ditemukan pada saat pemeliharaan atau investigasi. Penggantian insulator ini belum tentu mengakibatkan gangguan pada sistem tenaga, namun jika tidak segera dibersihkan atau diganti (jika terlihat sudah korosi / pecah) maka dapat mengakibatkan kegagalan di kemudian hari, sehingga termasuk ke dalam aktivitas pemeliharaan yang bersifat preventif.

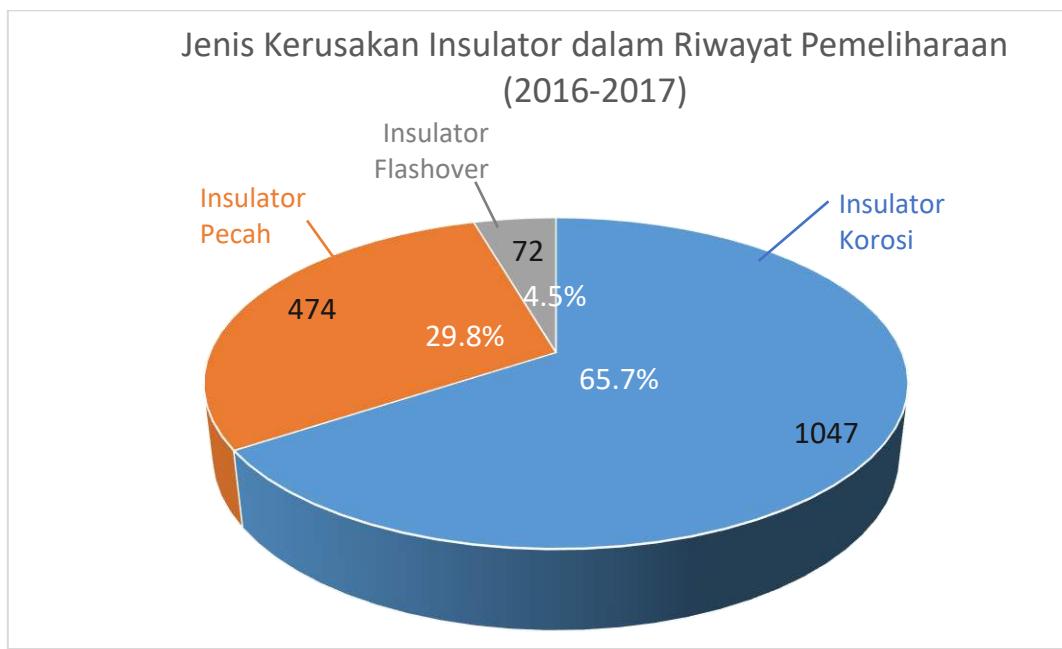
Pengumpulan data ini dapat membantu untuk menganalisis seberapa sering insulator itu mengalami korosi atau pecah sebelum mengalami kegagalan yang diakibatkan oleh *flash over*, dan juga dapat membantu mengidentifikasi jenis – jenis insulator mana yang paling sering mengalami kerusakan sehingga harus diganti. Data yang didapatkan dalam hal ini dari PT. PLN (Persero) APP Bali adalah data selama 2 tahun (2016 – 2017). Rangkuman dari data tersebut dapat dilihat pada Gambar 22 di bawah ini.



Gambar 22. Frekuensi Penggantian Insulator di wilayah APP Bali Tahun 2016.

Dari Gambar 22, dapat diketahui bahwa dalam kurun waktu 2 tahun, terjadi 103 kali penggantian insulator di tower – tower transmisi dengan rata – rata 4.3 kali penggantian insulator per bulannya. Kejadian penggantian insulator yang dimasukkan ke dalam data di atas ini adalah penggantian insulator keping-nya, di luar penggantian aksesoris yang mengalami korosi seperti *shackle*, *ball eye*, dan lain – lain.

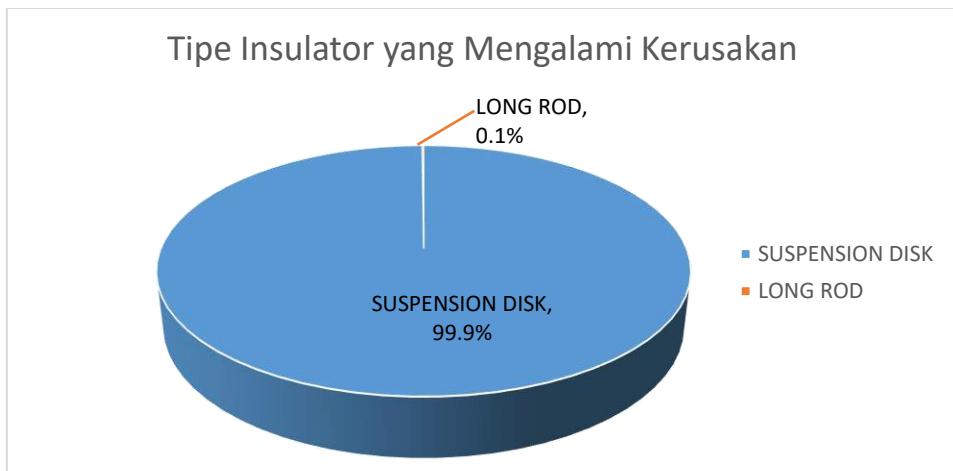
Dalam satu kali penggantian insulator, mayoritas yang diganti adalah sejumlah satu hingga dua string insulator. Jika ada satu atau dua buah insulator suspension disk dalam satu string yang mengalami kerusakan atau pecah, maka yang diganti adalah satu string utuh insulator tersebut. Berdasarkan data riwayat pemeliharaannya, terdapat 3 (tiga) jenis kerusakan insulator yaitu insulator pecah (biasa terjadi pada insulator kaca), insulator korosi, dan insulator yang mengalami *flash over*. Untuk persentase frekuensi kejadian masing – masing jenis kerusakan dapat dilihat pada grafik di Gambar 23 berikut ini.



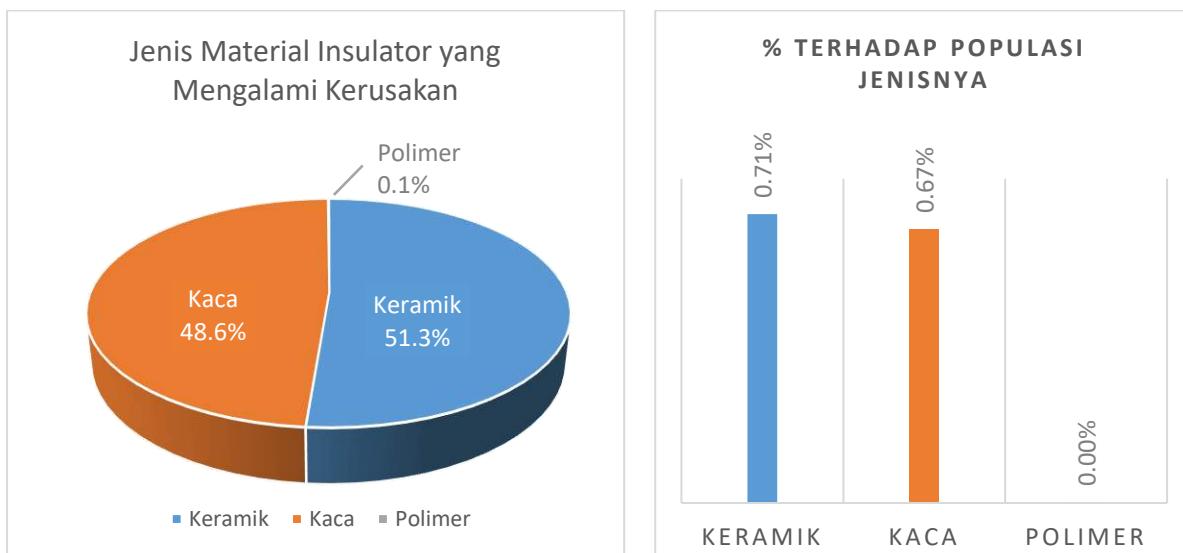
Gambar 23. Jenis Kerusakan Insulator pada Riwayat Pemeliharaan Tahun 2016-2017

Dari Gambar 23 di atas, dapat diketahui bahwa jenis kerusakan pada insulator yang paling dominan adalah insulator korosi (65,7%) diikuti oleh insulator pecah (29,8%), dan terakhir insulator flash over (4,5%).

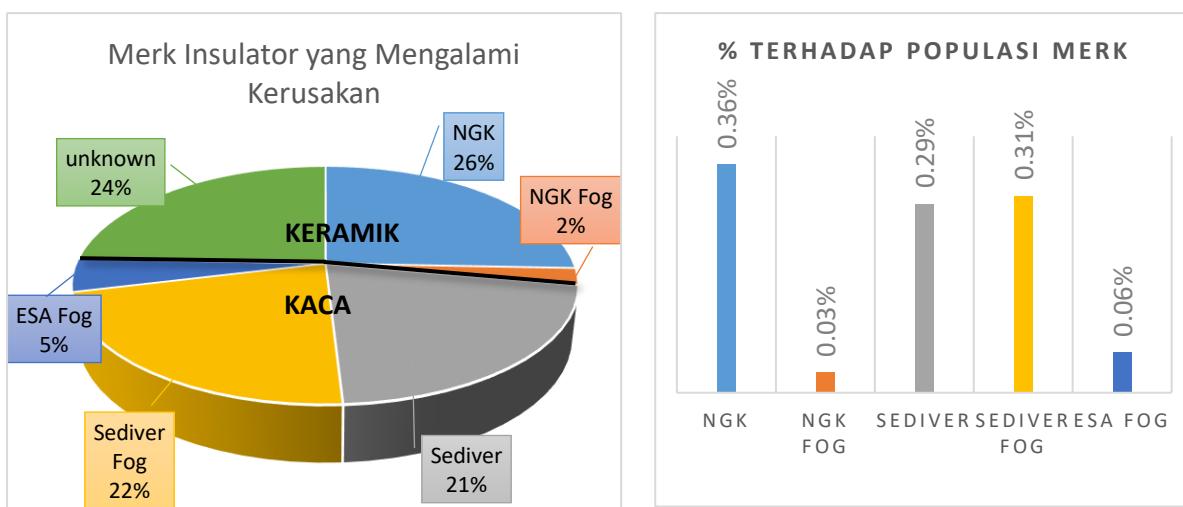
Adapun jenis – jenis insulator yang mengalami kerusakan juga dapat diidentifikasi dari data riwayat pemeliharaan APP Bali dapat ditunjukkan pada Gambar 24 untuk insulator berdasarkan tipe, jenis material, dan merk-nya.



(a)



(b)



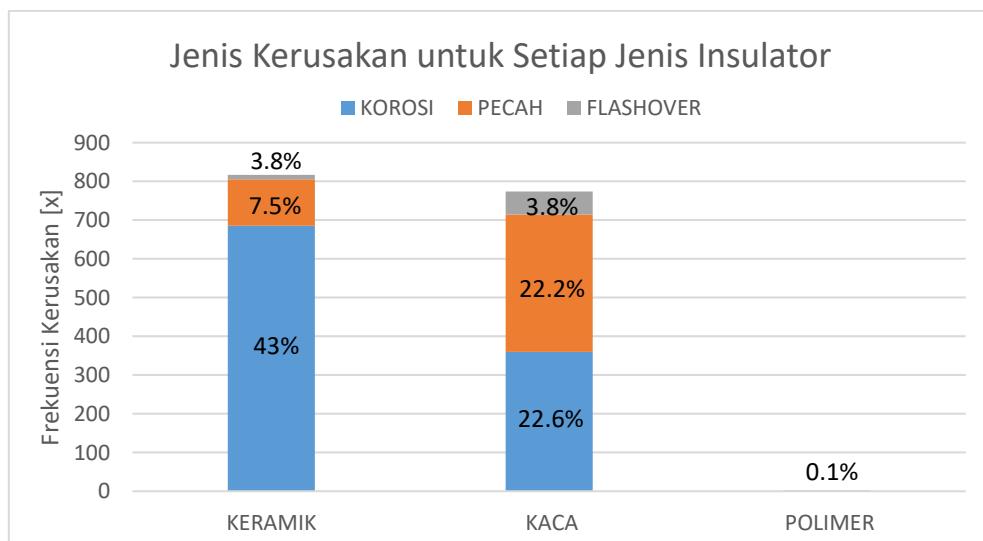
(c)

Gambar 24. Persentase Jenis Insulator yang Mengalami Kerusakan di Tahun 2016-2017 Berdasarkan: (a) Tipe-nya, (b) Jenis Materialnya, dan (c) Merk-nya

Dari Gambar 24, dapat dilihat bahwa 99,9% insulator – insulator yang mengalami penggantian akibat kerusakan adalah tipe *suspension disc*. Insulator tipe *long rod* hanya mengalami 1x penggantian di setiap tahunnya atau sebesar 0,1% terhadap total jumlah gangguan tahun 2016-2017. Informasi secara lisan juga didapat dari pihak PT. PLN (Persero) APP Bali bahwa memang insulator long rod jarang sekali mengalami penggantian karena rusak dibandingkan dengan tipe *suspension disc*.

Dari keseluruhan jumlah kerusakan insulator tipe *suspension disc* tersebut, jenis material yang mengalami kerusakan adalah keramik/porselen sebesar 51,3%, kaca sebesar 48,6%, dan polimer 0,1%. Dilihat dari persentase insulator yang mengalami kerusakan terhadap populasi insulator jenis itu sendiri, insulator keramik (0,71%) mengalami kerusakan sedikit lebih banyak dibandingkan insulator kaca (0,67%). Untuk insulator keramik yang mengalami kerusakan adalah merk NGK (26%), NGK *Fog Type* (2%), dan tidak diketahui merk-nya (24%). Sebanyak 24% ini dapat berupa insulator merk NGK (Fog maupun normal), Zibo, Dulmison, Dalian, Uni Electric dan LAPP. Sedangkan untuk insulator kaca yang mengalami kerusakan adalah merk Sediver *Fog Type* (22%), Sediver tipe normal (21%), dan E.S.A *Fog Type* (5%). Jika dibandingkan dengan populasi insulator pada masing – masing merk, maka untuk jenis keramik, insulator yang paling banyak mengalami kerusakan adalah merk NGK tipe normal (0,36%), namun hal ini juga belum tentu akurat disebabkan adanya data *unknown* sebanyak 24%. Sedangkan untuk insulator jenis kaca, insulator yang paling banyak mengalami kerusakan adalah Sediver *Fog Type* (0,31%).

Untuk masing – masing insulator jenis kaca, keramik dan polimer, jenis kerusakan yang yang dialami dapat dilihat pada Gambar 25 di bawah ini.



Gambar 25. Jenis Kerusakan untuk Insulator Kaca dan Keramik

Dari Gambar 25 di atas, dapat disimpulkan bahwa insulator keramik paling rentan terhadap kerusakan akibat korosi (43%) dan lebih tahan terhadap flashover (0,8%) dibandingkan dengan insulator kaca (3,8%). Sedangkan tingkat kerentanan insulator kaca terhadap kerusakan korosi maupun pecah hampir sebanding yaitu 22,6% dan 22,2%. Untuk insulator polimer hanya mengalami kerusakan berupa korosi dengan porsi yang terkecil yaitu 0,1%.

Berdasarkan analisis data di atas, dapat disimpulkan bahwa dari riwayat pemeliharaan di tahun 2016-2017, diketemukan insulator yang paling sering mengalami kerusakan adalah tipe *suspension disc*, jenis keramik, dan merk NGK tipe normal sebanyak 26%. Namun, jika dilihat dari persentase kerusakannya sesungguhnya jenis keramik dan kaca tidak jauh berbeda, dengan perbandingan 51% (keramik) dan 49% (kaca), yang berarti kedua jenis insulator mempunyai resiko kerusakan dengan frekuensi yang sebanding.

Adapun rute penghantar dimana insulator – insulator mengalami kerusakan dapat juga dianalisis dari data yang didapat yang dapat dilihat pada Tabel 17 berikut ini.

Tabel 17. Frekuensi Penggantian Insulator Berdasarkan Koridor Penghantarnya.

NO.	RUAS PENGHANTAR	TOTAL FREK	%	LEVEL POLUSI
1	ANTOSARI - NEGARA	244	15.3%	TINGGI
2	GIANYAR - AMLAPURA	84	5.3%	SEDANG
3	KAPAL - ANTOSARI	300	18.8%	TINGGI
4	KAPAL - BATURITI	121	7.6%	SEDANG
5	NEGARA - GILIMANUK	228	14.3%	TINGGI
6	P. KELOD - GIS BANDARA	60	3.8%	TINGGI
7	PAYANGAN - BATURITI	12	0.8%	SEDANG
8	SANUR - GIANYAR	242	15.2%	TINGGI
9	KAPAL - GIANYAR	72	4.5%	SEDANG
10	NUSA DUA - PESANGGARAN	38	2.4%	TINGGI
11	SANUR - PESANGGARAN	192	12.1%	TINGGI
Total		1593	100.0%	

Dilihat dari rute penghantarnya pada tabel di atas ini, dapat diketahui bahwa sebanyak 81,9% dari penggantian insulator terjadi di daerah pantai dan perkotaan yang berlevel polusi tinggi. Hal ini semakin menguatkan asumsi bahwa seringnya kegagalan insulator terjadi di wilayah Bali adalah karena polutannya yang menempel pada permukaan insulator yang berasal dari polusi air garam.

BAB V

KAJIAN *POLE TOWER* DI WILAYAH BALI

Seperti yang telah dikemukakan pada Bab II sebelumnya, terdapat dua jenis *tower* transmisi yang digunakan pada sistem transmisi SUTT 150 kV di Bali, yaitu *Lattice tower* dan *Concrete Pole tower*. *Concrete Pole tower* atau *pole tower* masih banyak digunakan di dalam kota Denpasar karena sebelumnya terdapat kebijakan lokal kota Denpasar bahwa tinggi *tower* transmisi tidak boleh melebihi tinggi pohon kelapa. *Pole tower* tersebut memiliki jarak maksimum 100 meter. Kondisi saat ini, di dalam kota masih banyak menggunakan *pole tower* walaupun penggunaan *lattice tower* sudah mulai diizinkan untuk dipasang di dalam kota Denpasar.

Keadaan inilah yang menjadi salah satu permasalahan yang harus dikaji dalam kajian Insulator dan *Pole Tower* ini. *Range* tinggi *pole tower* yang terdapat di wilayah Bali adalah 17 – 27 meter, sedangkan tinggi *lattice tower* memiliki *range* dari 30 – 45 meter. Dengan banyaknya pembangunan di dalam dan sekitar kota Denpasar, tentunya jarak bebas antara saluran SUTT ke tanah atau bangunan sudah berkurang dibandingkan dahulu ketika *tower – tower* tersebut dibangun dan dipasang. Oleh karena itulah, dalam kajian ini, dilakukan survey jarak bebas (ROW) dilengkapi dengan pengukuran medan listrik dan medan magnet di bawah *pole tower* atau andongannya pada daerah – daerah tertentu yang mengalami perkembangan dan pembangunan yang pesat.

4.1 Populasi Tower Transmisi

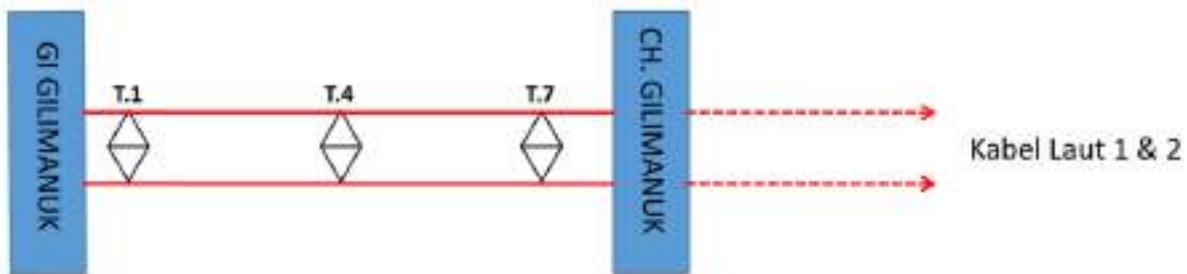
Berikut ini adalah data populasi *tower* transmisi jenis *lattice* dan *concrete pole* yang tersebar di 21 ruas koridor di wilayah Bali, yang ditunjukkan pada Tabel 18. Dari tabel tersebut, dapat diketahui bahwa terdapat total 2.416 *tower* transmisi dengan jenis *lattice tower* sebanyak 1.211 *tower* yang tersebar di sebagian besar area pulau Bali dari bagian utara Gilimanuk hingga ke bagian timur Amlapura. Sementara itu, sebanyak 1.205 *pole tower* tersebar di bagian selatan pulau Bali saja, yaitu di dalam dan sekitar kota Denpasar dimulai dari GI Kapal hingga ke ujung selatan GI Nusa Dua.

Tabel 18. Data Populasi *Tower* Transmisi SUTT 150 kV di Wilayah Bali

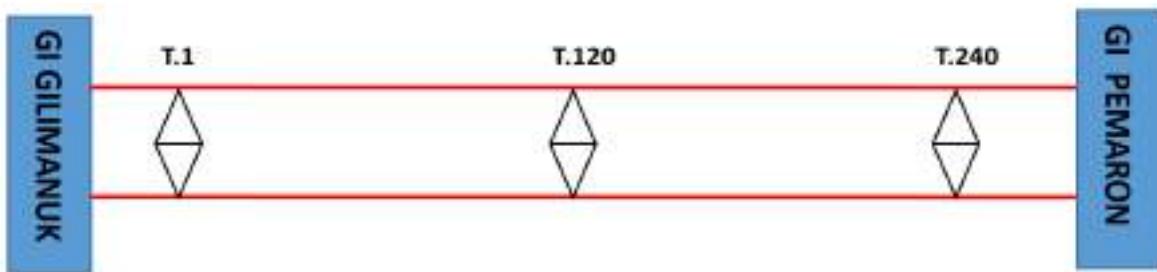
NO	NAMA KORIDOR	JML TOWER	JENIS TOWER
1	CH GILIMANUK - GILIMANUK	7	<i>LATTICE</i>
2	NEGARA - GILIMANUK	114	<i>LATTICE</i>
3	ANTOSARI - NEGARA	145	<i>LATTICE</i>
4	KAPAL - ANTOSARI	78	<i>LATTICE</i>
5	GILIMANUK - PEMARON	240	<i>LATTICE</i>
6	CELUKAN BAWANG - KAPAL	220	<i>LATTICE</i>
7	BATURITI - PEMARON	74	<i>LATTICE</i>
8	KAPAL - BATURITI	131	<i>LATTICE</i>
9	INC PAYANGAN - PAYANGAN	18	<i>LATTICE</i>
10	KAPAL - GIANYAR	71	<i>LATTICE</i>
11	GIANYAR - AMLAPURA	106	<i>LATTICE</i>
12	KAPAL - PEMECUTAN KELOD	2	<i>LATTICE</i>
		140	<i>POLE</i>
13	P. SAMBIAN - PESANGGARAN	2	<i>LATTICE</i>
14	P. KELOD - CH BANDARA	1	<i>LATTICE</i>
		109	<i>POLE</i>
15	CH NUSA DUA - NUSA DUA	2	<i>LATTICE</i>
16	KAPAL - PADANG SAMBIAN	111	<i>POLE</i>
17	P. SAMBIAN - PESANGGARAN	76	<i>POLE</i>
18	PESANGGARAN - SANUR	168	<i>POLE</i>
19	SANUR - GIANYAR	377	<i>POLE</i>
20	PESANGGARAN - NUSA DUA	137	<i>POLE</i>
21	CH BANDARA #2 - NUSA DUA	87	<i>POLE</i>
TOTAL LATTICE TOWER		1.211	50.12%
TOTAL POLE TOWER		1.205	49.88%
TOTAL TOWER TRANSMISI		2.416	

Detail penomoran *tower* transmisi untuk setiap ruas saluran SUTT-nya dapat dilihat pada *Single Line Diagram* pada Gambar 26 berikut ini.

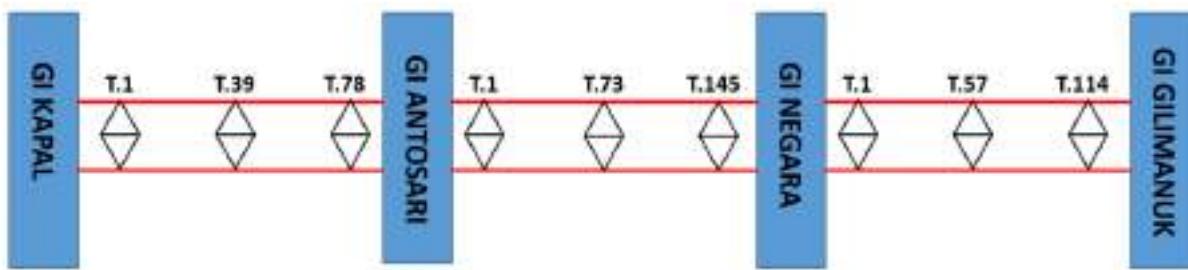
SUTT 150 KV GILIMANUK – CH. GILIMANUK # 1 & 2



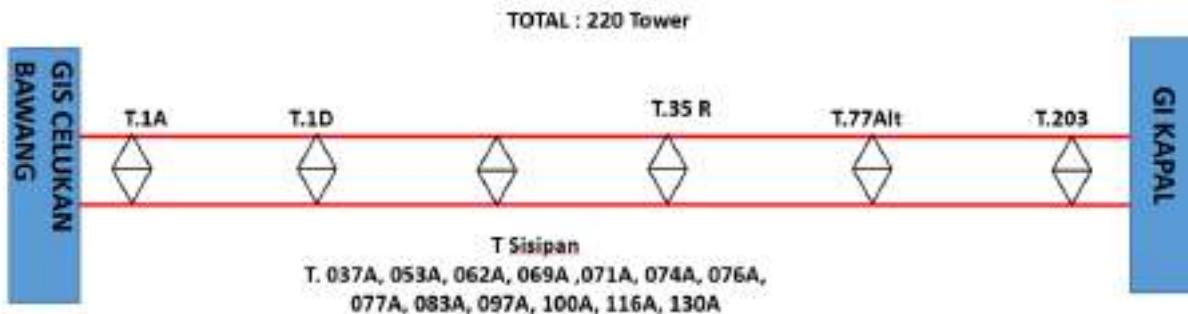
SUTT 150 KV GILIMANUK – PEMARON # 1 & 2



SUTT 150 KV KAPAL – ANTOSARI – NEGARA – GILIMANUK # 1 & 2



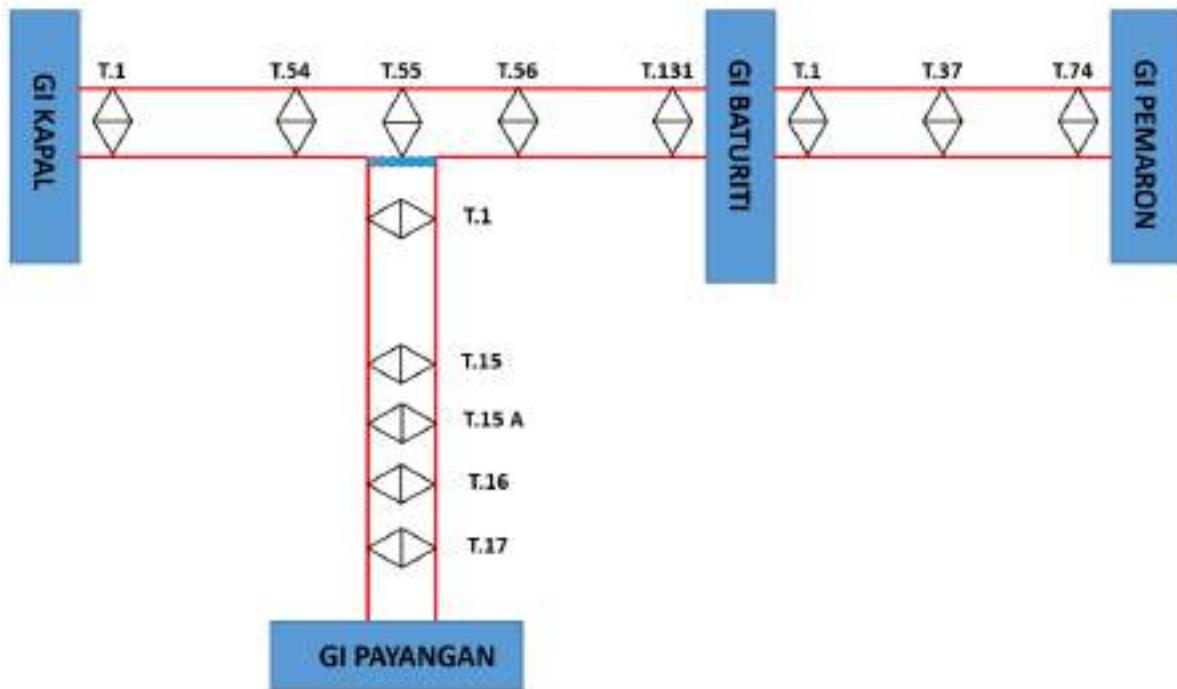
SUTT 150 KV CELUKAN BAWANG – KAPAL # 1 & 2



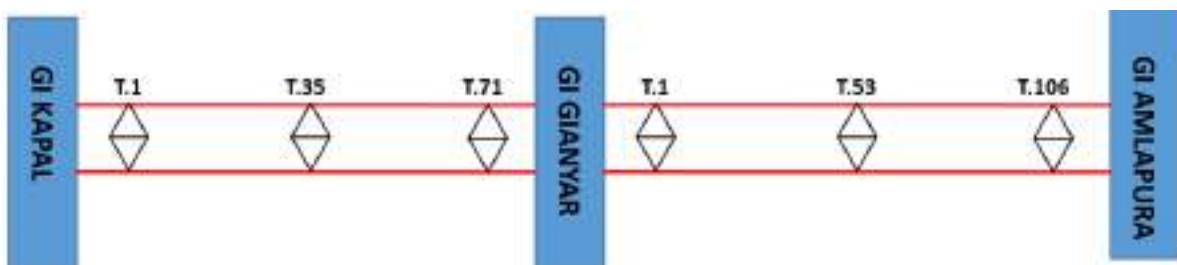
SUTT 150 KV BATURITI – PEMARON # 1 & 2

SUTT 150 KV KAPAL – BATURITI

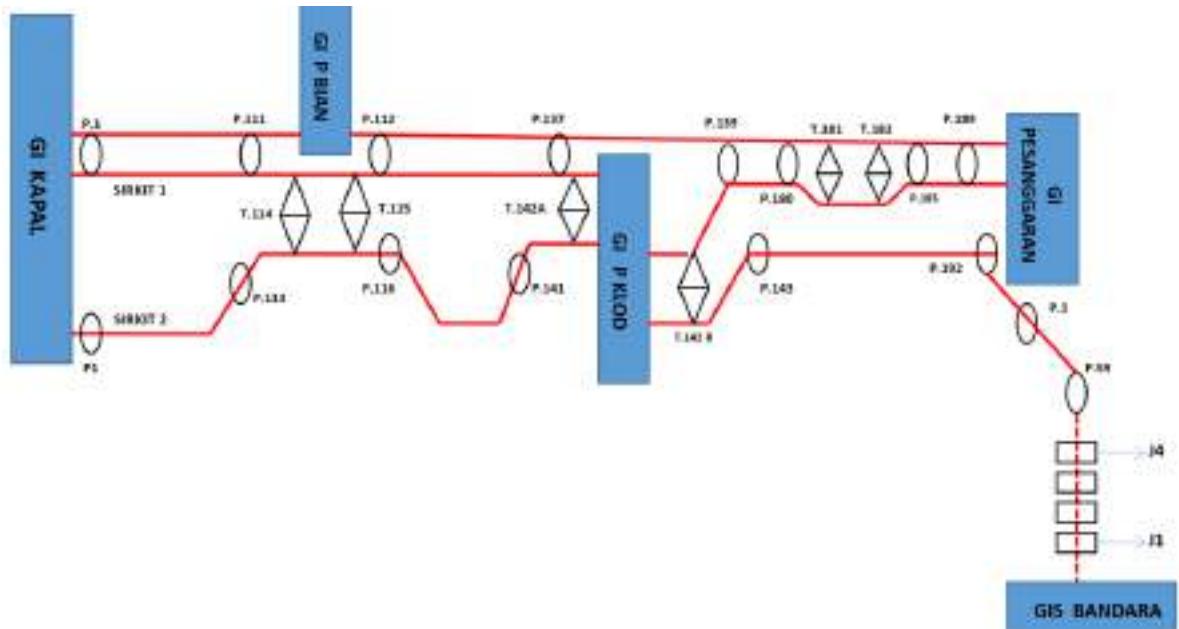
SUTT 150 KV KAPAL – PAYANGAN & BATURITI - PAYANGAN



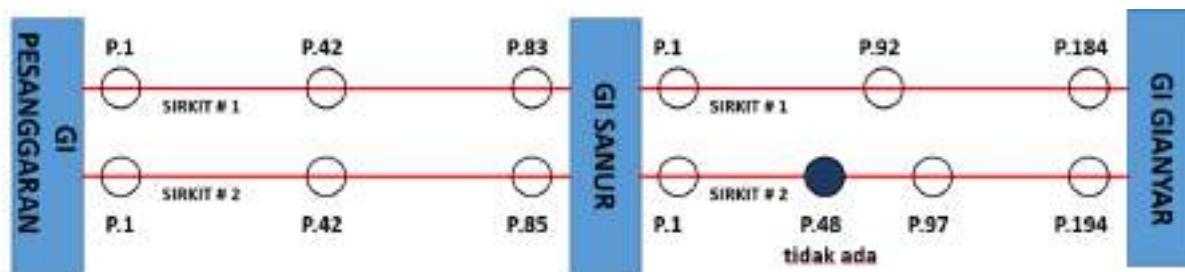
SUTT 150 KV KAPAL – GIANYAR – AMLAPURA # 1 & 2



SUTT 150 KV KAPAL – PADANG SAMBIAN – PESANGGARAN
SUTT 150 KV KAPAL – PEMECUTAN KELOD # 1 & 2
SUTT 150 KV PEMECUTAN KELOD – PESANGGARAN- & PEMECUTAN KELOD –
GIS BANDARA NGURAH RAI

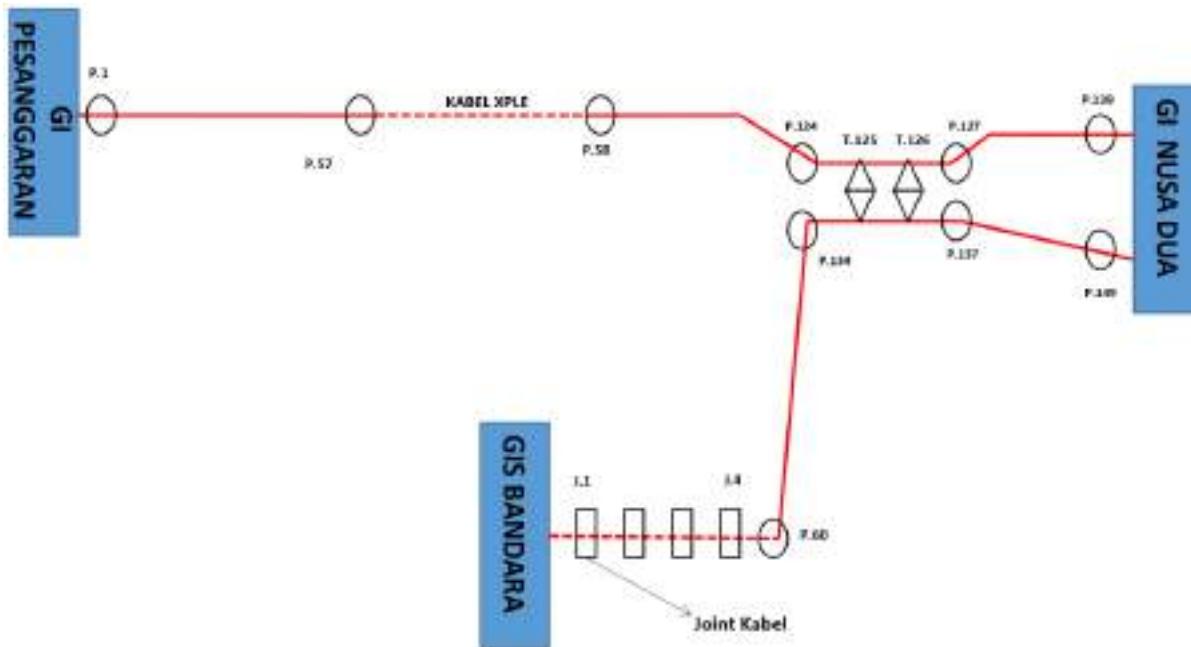


SUTT 150 KV PESANGGARAN – SANUR – GIANYAR # 1 & 2



SUTT 150 KV PESANGGARAN – NUSA DUA

SUTT 150 KV GIS BANDARA – NUSA DUA



Gambar 26. Single Line Diagram Tower Transmisi SUTT 150 kV di Wilayah Bali

4.2 Pengukuran Medan Listrik, Medan Magnet, dan ROW

Sebelumnya, dari pihak PT. PLN (Persero) APP Bali sendiri pengukuran medan listrik, medan magnet dan ROW ini rutin dilakukan setiap satu semester sekali dengan sampling pada beberapa spot tertentu. Pengukuran terakhir yang dilakukan oleh PLN APP Bali yaitu Semester II Tahun 2017, yaitu pada bulan Oktober – Desember 2017. Adapun hasil pengukuran berkala tersebut ditunjukkan pada Tabel 19.

Berdasarkan data yang ditunjukkan pada Tabel 19, seluruh hasil pengukuran menunjukkan nilai medan listrik, medan magnet dan ROW masih di bawah ambang batasnya, atau dapat dikatakan aman.

Tabel 19. Hasil Pengukuran Berkala Medan Listrik, Medan Magnet, dan ROW oleh PLN APP Bali (Sem II- Tahun 2017)

No.	Rute Penghantar	Antara Tower	Lokasi Pengukuran	Tgl & Jam Pengukuran	I [A]	HASIL PENGUKURAN			STANDARD			STATUS		
						E [kV/m]	B [mT]	Jarak Andongan [m]	E [kV/m]	B [mT]	ROW	EF	MF	ROW
1	Gilimanuk - Pemaron, Celukan Bawang	T.239 - T.240	Ds. Tukad Mungga, Kec. Sukasada, Kab. Buleleng	05-12-2017 11.02 WITA	200	0.45	0.0023	18.43	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
2	Gilimanuk - Pemaron, Celukan Bawang	T.118 - T.119	DS. Sanggalangit, Kec. Gerokgak, Kab. Buleleng	05-12-2017 11.20 WITA	200	0.36	0.00015	17.25	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
3	Gilimanuk - CH Gilimanuk	T.6 - T.7	Ds. Gilimanuk, Kec. Melaya, Kab. Jembrana	05-12-2017 11.25 WITA	480	0.5	0.0008	17.3	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
4	Negara - Gilimanuk	T.113 - T.114	Ds. Gilimanuk, Kec. Melaya, Kab. Jembrana	05-12-2017 10.00 WITA	550	0.75	0.00118	17.2	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
5	Kapal - Antosari - Negara	T.2 - T.3	Ds. Kapal, Kec. Mengwi, Kab Badung	04-12-2017 09.40 WITA	260	0.4	0.0019	15.6	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
6	Kapal - Antosari - Negara	T.21 - T.22	Ds. Lalang Linggah, Kec. Selemadeg, Kab. Tabanan	04-12-2017 10.35 WITA	265	0.8	0.0018	15.65	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
7	Kapal - Baturiti - Payangan	T.8 - T.9	Ds. Kapal, Kec. Mengwi, Kab Badung	08-12-2017 09.45 WITA	258	0.75	0.00165	15.65	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
8	Kapal - Baturiti - Payangan	T.58 - T.59	Ds. Perean, Kec. Baturiti, Kab. Tabanan	06-12-2017 14.50 WITA	263	0.8	0.0028	13.4	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
9	Payangan - Baturiti - Pemaron	T.01 - T.02	Ds. Perean Timur, Kec. Baturiti, Kab. Tabanan	05-12-2017 09.45 WITA	200	0.65	0.00043	12.59	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
10	Payangan - Baturiti - Pemaron	T.72 - T.73	Ds. Tukad Mungga, Kec. Sukasada, Kab. Buleleng	05-12-2017 11.40 WITA	200	1.8	0.0037	13.59	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
11	Kapal - Gianyar - Amlapura	T.66 - T.67	Ds. Tedung, Kec. Gianyar, Kab. Gianyar	17-11-2017 10.25 WITA	48	0.65	0.0015	12.3	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
12	Kapal - Gianyar - Amlapura	T.46 - T.47	Ds. Pesinggahan, Kec. Dawam, Kab. Klungkung	17-11-2017 15.50 WITA	40	0.75	0.0046	11.3	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
13	Kapal - Pesanggaran - Sanur - Gianyar (Ring Denpasar) / P. Kelod - GIS	POLE T.146 - T.147	Ds. Pemogan, Kec. Denpasar Selatan, Kodya Denpasar	08-12-2017 10.42 WITA	372	0.4	0.0045	11.23	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
14	Kapal - Pesanggaran - Sanur - Gianyar (Ring Denpasar) / P. Kelod - GIS	POLE T.83 - T.84	Ds. Sanur, Kec. Denpasar Selatan, Kodya Denpasar	08-12-2017 11.23 WITA	48	1.1	0.0017	12.4	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
15	Kapal - Pesanggaran - Sanur - Gianyar (Ring Denpasar) / P. Kelod - GIS	POLE T.55 - T.56	Ds. Ketewel, Kec. Sukawati, Kab. Gianyar	08-12-2017 14.25 WITA	70	0.4	0.00063	11.3	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
16	Pesanggaran - Nusadua	POLE T.111 - T.112	Ds. Bualu, Kec. Kuta Selatan, Kab. Badung	08-12-2017 10.58 WITA	310	0.3	0.0017	11.3	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
17	Celukan Bawang - Kapal	T.1B - T.1C	Ds. Celukan Bawang (tinga - tinga), Kec. Grokgak, Kab. Buleleng	5-Dec-17	450	1.7	0.0028	17.15	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE
18	Celukan Bawang - Kapal	T.202 - T.203	Ds. Braban, Kec. Kediri, Kab. Tabanan	5-Dec-17	450	0.8	0.0025	18.25	5	0.1	9	SAFE	SAFE	SAFE

Sementara itu, pengukuran medan listrik dan medan magnet oleh tim kajian dilakukan secara sampling di beberapa daerah yang direkomendasikan oleh pihak PT. PLN (Persero) TJBTB, yaitu daerah – daerah yang mengalami perkembangan pesat sehingga memungkinkan ketinggian tanah atau bangunannya lebih meningkat dari sejak awal *tower – tower* ditegakkan. Survey pengukuran dilakukan ketika survey kedua yaitu pada tanggal 1 – 2 Maret 2018 didampingi oleh tim dari pihak PT. PLN (Persero) APP Bali.

Adapun daerah – daerah yang diinformasikan mengalami pembangunan yang cukup besar adalah:

- 1) Pesanggaran – Nusa Dua
- 2) GIS Bandara – Nusa Dua
- 3) GIS Bandara – P. Kelod – Kapal
- 4) Sanur – Gianyar

Namun karena keterbatasan waktu ketika survey, hanya tiga dari empat ruas tersebut yang berhasil kami ukur secara sampling medan magnet dan medan listriknya, kecuali rute Sanur – Gianyar.

Pada pengukuran ini , seperti yang telah disebutkan pada Tabel 3, standar nilai ambang batas medan listrik dan medan magnet yang digunakan adalah 5 kV/m dan 100 μ T secara berturut – turut. Status untuk medan listrik (E) dan medan magnet (B) yang dinyatakan dengan “AMAN” atau “TIDAK AMAN” merupakan hasil nilai pengukuran yang dibandingkan dengan nilai ambang batas tersebut.

Gambar 27 sampai dengan Gambar 33 menunjukkan dokumentasi dan hasil survey pengukuran medan listrik dan medan magnet yang diambil di 4 (empat) daerah dengan 8 (delapan) titik pengukuran. Lokasi – lokasi tersebut adalah sebagai berikut.

- 1) Rute Kapal – Pemecutan Kelod #2 (2 titik)
- 2) Rute GIS Bandara – Nusa Dua (3 titik) → sejajar dengan rute Pesanggaran – Nusa Dua
- 3) Rute GIS Bandara – Pemecutan Kelod (1 titik) → sejajar dengan rute Pesanggaran – Nusa Dua
- 4) Rute Celukan Bawang – Kapal (2 titik)

Adapun rangkuman dari hasil pengukuran medan listrik dan medan magnet akan ditunjukkan kembali pada Tabel 20.



Hasil Pengukuran :

Medan Listrik : (R) 0.116 kV/m ; (S) 0.226 kV/m ; (T) 0.014 kV/m

Medan Magnet : (R) 1.646 μ T ; (S) 0.402 μ T ; (T) 1.734 μ T

Jarak Konduktor Fasa ke Atap Rumah : 6.31 m

Status :

AMAN

AMAN

AMAN

Gambar 27. Spot 1 Pengukuran EMF & ROW – Perumahan Graha Permai Indah, Rute Kapal – P. Kelod #2. Di bawah *pole tower* No. 040.



Hasil Pengukuran :

Medan Listrik : (R) 0.475 kV/m ; (S) 0.242 kV/m ; (T) 0.521 kV/m

Medan Magnet : (R) 3.267 μ T ; (S) 1.433 μ T ; (T) 3.016 μ T

Jarak Konduktor Fasa ke Atap Rumah : 5.10 m

Status :

AMAN

AMAN

AMAN

Gambar 28. Spot 2 Pengukuran EMF & ROW – Permukiman warga, Rute Kapal – P. Kelod

#2. Di bawah andongan antara *pole tower* No. 042 dan 043.

<p>Hasil Pengukuran :</p> <p>Medan Listrik : (R) 1.84 kV/m ; (S) 0.808 kV/m ; (T) 1.012 kV/m</p> <p>Medan Magnet : (R) 1.797 μT ; (S) 0.905 μT ; (T) 1.596 μT</p> <p>Jarak Konduktor Fasa ke Atap Parkiran Motor : 5.51 m</p> <p>Jarak Konduktor Fasa ke Atas Pohon : 2.45 m</p>	<p>Status :</p> <p>AMAN</p> <p>AMAN</p> <p>AMAN</p> <p>TIDAK AMAN</p>

Gambar 29. Spot 3 Pengukuran EMF & ROW – Parkiran dan Gedung Sekolah, Rute GIS Bandara – Nusa Dua. Di bawah *pole tower* No. 082.



Hasil Pengukuran :

Medan Listrik : (R) 1.91 kV/m ; (S) 1.34 kV/m ; (T) 1.73 kV/m

Medan Magnet : (R) 1.42 μ T ; (S) 0.754 μ T ; (T) 1.621 μ T

Jarak Konduktor Fasa ke Atap Parkiran Motor : 5.3 m

Status :

AMAN

AMAN

AMAN

Gambar 30. Spot 4 Pengukuran EMF & ROW – Perumahan yang sedang dibangun Harvestland, Rute GIS Bandara – Nusa Dua . Di bawah andongan *pole tower* No. 094 – 095



Hasil Pengukuran :	Status :
Medan Listrik : (R) 0.622 kV/m ; (S) 0.91 kV/m ; (T) 0.92 kV/m	AMAN
Medan Magnet : (R) 1.546 μ T ; (S) 0.804 μ T ; (T) 1.483 μ T	AMAN
Jarak Konduktor Fasa ke Ujung atas tiang telepon : 5 m	AMAN

Gambar 31. Spot 5 Pengukuran EMF & ROW – Area Permukiman, dekat Tempat Pembuangan Sampah, Rute GIS Bandara – Nusa Dua yang berparalel dengan Rute Pesanggaran – Nusa Dua. Di bawah *pole tower* No. 116.



Hasil Pengukuran :

Medan Listrik : (R) **8** kV/m ; (S) 4.06 kV/m ; (T) 4 kV/m

Medan Magnet : (R) 6.057 μ T ; (S) 2.84 μ T ; (T) 5.554 μ T

Jarak Konduktor Fasa ke Atap Rumah : **4** m

Status :

TIDAK AMAN

AMAN

TIDAK AMAN

Gambar 32. Spot 6 Pengukuran EMF & ROW – Tempat Pemancingan, di tepi sungai, Rute GIS Bandara – P. Kelod yang berparalel dengan Rute Pesanggaran – Nusa Dua. Di bawah andongan *pole tower* No. 32 – 33.



Hasil Pengukuran :	Status :
Spot 7.	
Medan Listrik : (Line1) 1.62 kV/m ; (Line2) 1.8 kV/m	AMAN
Medan Magnet : (Line1) 1.005 μT ; (Line2) 0.905 μT	AMAN
Spot 8.	
Medan Listrik : (Line1) 5.42 kV/m ; (Line2) 5.92 kV/m	TIDAK AMAN
Medan Magnet : (Line1) 3.230 μT ; (Line2) 3.443 μT	AMAN
Jarak Konduktor Fasa ke Sawah : 15 m	AMAN

Gambar 33. Spot 7 dan 8 Pengukuran EMF & ROW – Area Persawahan, Rute Celukan Bawang – Kapal (7) dan dekat GI Kapal (8). Di bawah andongan *Lattice Tower* No. 192 – 193 (7) dan No. 11 – 12 (8).

Tabel 20. Data Hasil Pengukuran Medan Listrik dan Medan Magnet tanggal 1-2 Maret 2018

No.	Rute	Deskripsi Tempat	Tower	Fasa	E [kV/m]	Status E	B [μ T]	Status B	ROW [m] / Objek terdekat	Status ROW
1	Kapal – P. Kelod 2	Di bawah <i>Pole Tower</i>	<i>Pole</i>	R S T	0.116 0.226 0.014	AMAN	1.646 0.402 1.734	AMAN	6.31 (atap rumah)	AMAN
2	Kapal – P. Kelod 2	Di bawah andongan, area permukiman	<i>Pole</i>	R S T	0.475 0.242 0.521	AMAN	3.267 1.433 3.016	AMAN	5.10 (atap rumah)	AMAN
3	GIS Bandara – Nusa Dua	Di bawah <i>Pole Tower</i> , dekat bangunan sekolah	<i>Pole</i>	R S T	1.84 0.808 1.012	AMAN	1.797 0.905 1.596	AMAN	5.51 (atap rumah) 2.45 (pohon)	TIDAK AMAN
4	GIS Bandara – Nusa Dua	Di bawah <i>Pole Tower</i> , perumahan Harvestland	<i>Pole</i>	R S T	1.91 1.34 1.73	AMAN	1.42 0.754 1.621	AMAN	5.30 (atap rumah)	AMAN
5	GIS Bandara – Nusa Dua	Di bawah <i>Pole Tower</i> , area permukiman	<i>Pole</i>	R S T	0.622 0.91 0.92	AMAN	1.546 0.804 1.483	AMAN	5.00 (tiang telepon)	AMAN
6	GIS Bandara – P. Kelod	Di bawah andongan, pinggir sungai	<i>Pole</i>	R S T	8 4.06 4	TIDAK AMAN	6.057 2.84 5.554	AMAN	4.00 (atap bangunan)	TIDAK AMAN
7	Celukan Bawang – Kapal	Di bawah andongan, area persawahan	<i>Lattice</i>	Line1 Line2	1.62 1.8	AMAN	1.005 0.905	AMAN	-	-
8	Dekat GI Kapal	Di bawah andongan, area persawahan	<i>Lattice</i>	Line1 Line2	5.42 5.92	TIDAK AMAN	3.230 3.443	AMAN	15.00 (sawah)	AMAN

Dari hasil pengukuran medan listrik dan medan magnet di atas yang tertera pada Tabel 20, maka dapat disimpulkan bahwa pada beberapa titik memang ditemukan nilai – nilai medan listrik dan medan magnet yang di atas batas eksposur terhadap manusia. Spot – spot tersebut adalah :

- 1) Spot 6. Rute GIS Bandara – P. Kelod, di dekat tempat pemancingan tepi sungai. Di bawah andongan antara *Pole Tower* No. 032 – 033.
Di dekatnya ada saluran yang berparalel dengan rute tersebut, yaitu rute Pesanggaran dan Nusa Dua.
- 2) Spot 8. Di bawah *Lattice Tower* dengan tinggi 25 m, di dekat GI Kapal. Area persawahan.

Untuk Spot 6, kemungkinan nilai medan listrik yang sangat tinggi (mencapai 8 kV/m) di bawah fasa R adalah karena pada titik tersebut dipengaruhi oleh medan listrik dari SUTT jalur sebelahnya yaitu Pesanggaran – Nusa Dua, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 32. Hal ini akan disimulasikan pada sub bab berikutnya.

Sementara untuk Spot 8, kemungkinan nilai medan listrik yang melebihi ambang batas eksposur (5.42 kV/m dan 5.92 kV/m) adalah karena dari atas *tower* ke tanah tidak dihalangi oleh pepohonan atau atap sama sekali. Pepohonan dan atap bangunan biasanya turut mereduksi nilai intensitas medan listrik. Hal ini juga berarti *lattice tower* yang terpasang pada spot tersebut kurang tinggi. Spot ini mungkin merupakan salah satu spot yang mengalami peningkatan ketinggian tanah dari semula ketika saluran baru dibangun di tempat ini.

Untuk pengukuran ROW pada Tabel 20, dapat terlihat bahwa terdapat 2 spot yang melewati standar ROW berdasarkan Permen ESDM No. 18 Tahun 2015, yaitu Spot 3 di area bangunan sekolah Rute GIS Bandara – Nusa Dua, dekat Pole Tower No. 82, dimana jarak antara konduktor ke pohon yang paling dekat di bawahnya adalah 2.45 m, sementara standarnya adalah 5 m. Satu spot lagi yaitu Spot 6 di tempat pemancingan tepi sungai di rute GIS Bandara – P. Kelod di antara pole tower No 32 -33, dimana terdapat atap rumah yang jaraknya dari konduktor hanya 4 m, sementara standarnya adalah 5 m.

4.3 Perhitungan Medan Listrik dan Medan Magnet

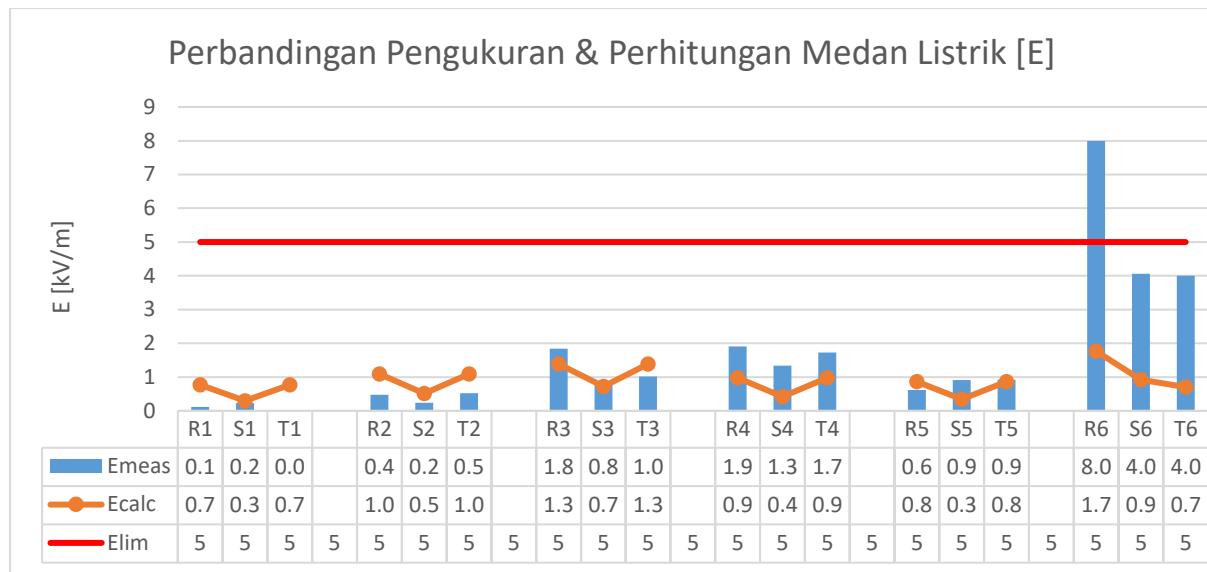
Dalam rangka mempertajam analisis terhadap kondisi medan listrik dan medan magnet pada spot – spot pengukuran di Bali, maka perhitungan dan simulasi medan listrik dan medan magnet pun dilakukan dengan memasukkan parameter – parameter berikut ini yang didapatkan dari kondisi aktual di lapangan.

- 1) Jarak titik pengukuran dari atas tanah
- 2) Jarak titik pengukuran dari saluran fasa
- 3) Jarak fasa – fasa
- 4) Tinggi Menara
- 5) Jarak ground wire – fasa
- 6) Arus aktual setiap fasa
- 7) Tegangan SUTT
- 8) Spesifikasi konduktor SUTT (diameter)

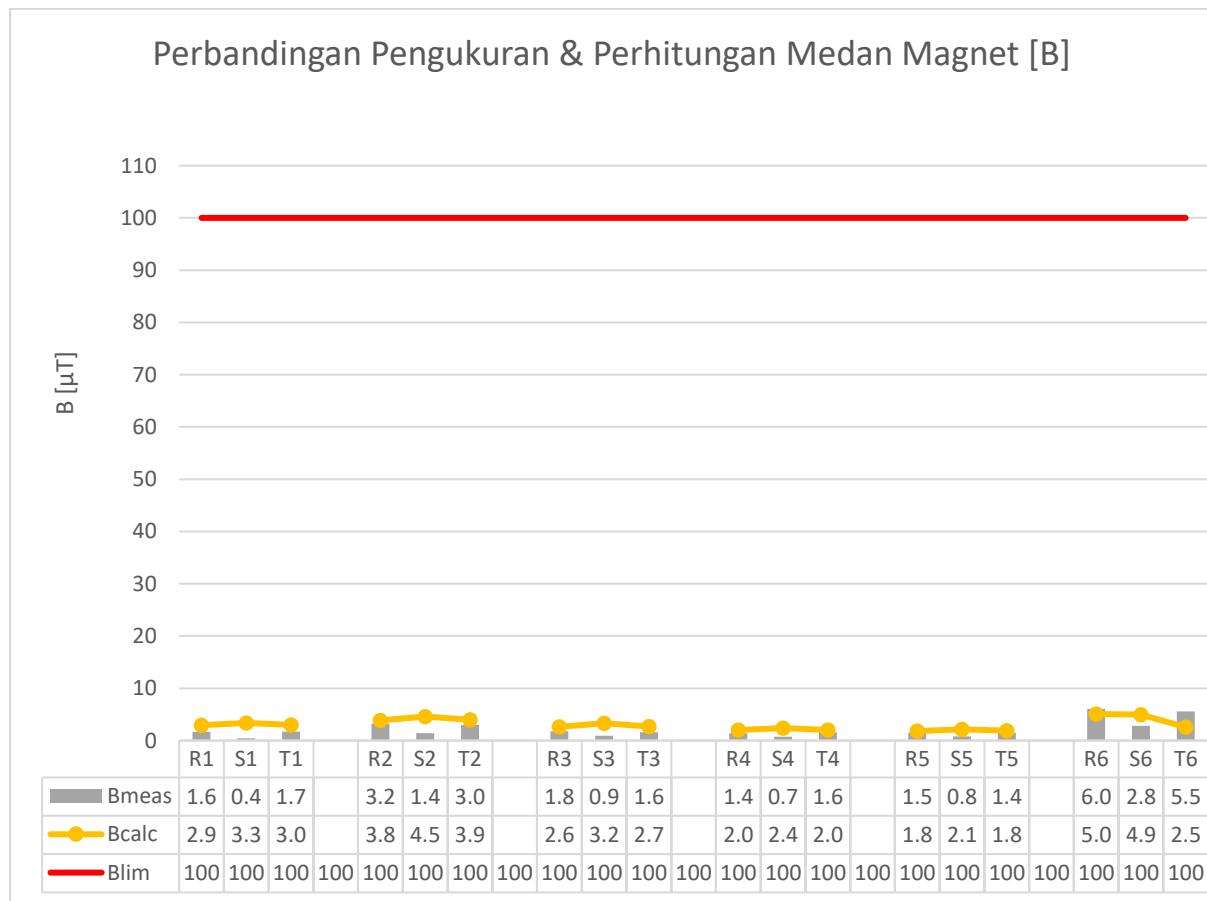
Oleh karena ketika pengukuran di lapangan, titik pengukuran yang diambil adalah titik dengan ketinggian 1 meter dari atas tanah, maka dengan menggunakan metode perhitungan, bukan hanya titik 1 meter dari atas tanah saja yang dilakukan, namun ditambah dengan beberapa titik dengan variasi ketinggian yang lain hingga 3 – 6.3 meter dari atas tanah. Hal ini dilakukan agar dapat merepresentasikan nilai medan listrik dan medan magnet di atas rumah berlantai dua, dimana sangat mungkin akan ada aktivitas manusia di atas atap tersebut dan keamanannya harus tetap terjamin.

Adapun perhitungan dan simulasi medan listrik dan medan magnet ini dilakukan menggunakan *software* Microsoft Excel dengan nama “Calculation of electro magnetic field (EMF) around transmission and distribution overhead lines”, yang sudah dilengkapi dengan fungsi *macro* dan telah di-develop berdasarkan EPRI *Red Book* “Transmission Line Reference Book” [11].

Berikut ini merupakan hasil perbandingan pengukuran dan perhitungan medan listrik dan medan magnet pada 6 spot (Spot 1 s.d. Spot 6) dengan parameter – parameter jarak dan arus yang disesuaikan dengan kondisi aktual di lapangan. Gambar 34 menunjukkan perbandingan nilai medan listrik antara pengukuran dan perhitungan, sedangkan Gambar 35 menunjukkan perbandingan nilai medan magnet antara pengukuran dan perhitungan.



Gambar 34. Perbandingan Hasil Pengukuran dan Perhitungan Medan Listrik pada 6 Spot Survey (Spot 1 s.d. Spot 6)



Gambar 35. Perbandingan Hasil Pengukuran dan Perhitungan Medan Magnet pada 6 Spot Survey (Spot 1 s.d. Spot 6)

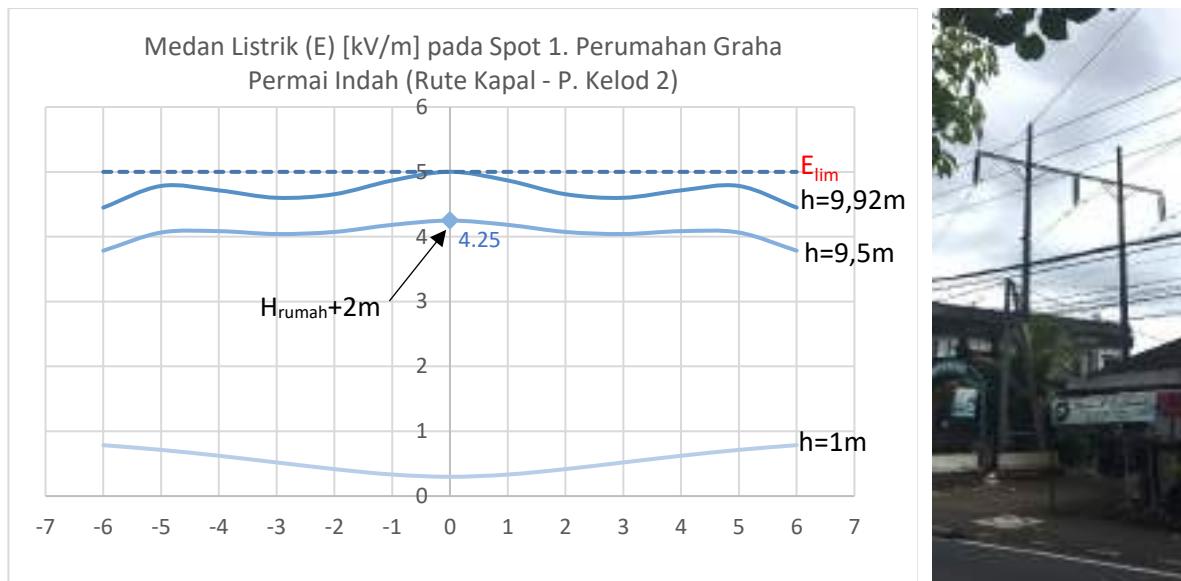
Dari hasil perbandingan pada Gambar 34 dan Gambar 35 di atas dapat dilihat bahwa hasil perhitungan sudah mendekati hasil pengukuran. Untuk medan listrik (Gambar 34), rata – rata hasil pengukuran berbeda $0.1 – 0.5$ kV/m dari hasil perhitungannya, terkecuali Spot 6 dimana perbedaan medan listrik pada fasa R mencapai 6.3 kV/m dan fasa S dan T mencapai 3.3 kV/m. Seperti gambaran situasi pada Spot 6 yang ditunjukkan pada foto – foto di Gambar 32 sebelumnya, terdapat saluran transmisi lain yang berparalel berdekatan yaitu SUTT 150 kV Pesanggaran – Nusa Dua. Hasil superposisi medan listrik yang dihasilkan oleh SUTT lain itulah yang diduga menyebabkan nilai medan listrik di bawah SUTT 150 kV GIS Bandara – P. Kelod (yang diukur) ini jauh lebih tinggi daripada perhitungan. Hanya saja, ketika pengukuran, nilai arus SUTT 150 kV Pesanggaran – Nusa Dua tidak tercatat, sehingga di dalam perhitungan nilai arus SUTT tersebut hanya dapat diasumsikan sama dengan nilai arus aktual SUTT 150 kV GIS Bandara – P. Kelod (yang diukur). Hal inilah yang memungkinkan perbedaan yang cukup jauh antara perhitungan dan pengukuran medan listrik pada Spot 6.

Untuk hasil perbandingan nilai pengukuran dan perhitungan medan magnet (Gambar 35) sudah menunjukkan akurasi yang cukup tinggi, dengan perbedaan nilai rata – rata $0.3 – 3.1$ μ T. Baik nilai hasil pengukuran maupun hasil perhitungan, keduanya menunjukkan nilai medan magnet yang jauh masih di bawah ambang batas 100 μ T dengan range nilai $0.4 – 6$ μ T.

Untuk selanjutnya, akan dilakukan simulasi perhitungan nilai medan listrik pada beberapa spot dengan variasi ketinggian yang berbeda dari aktual pengukuran, yaitu pada spot – spot berikut ini :

- 1) Spot 1. Rumah berlantai dua, Perumahan Graha Permai Indah (Rute Kapal – P. Kelod 2)
- 2) Spot 2. Rumah satu lantai (Rute Kapal – P. Kelod 2)
- 3) Spot 3. Bangunan Sekolah berlantai dua (Rute GIS Bandara – Nusa Dua)
- 4) Spot 4. Rumah berlantai dua, Perumahan Harvestland (Rute GIS Bandara – Nusa Dua)

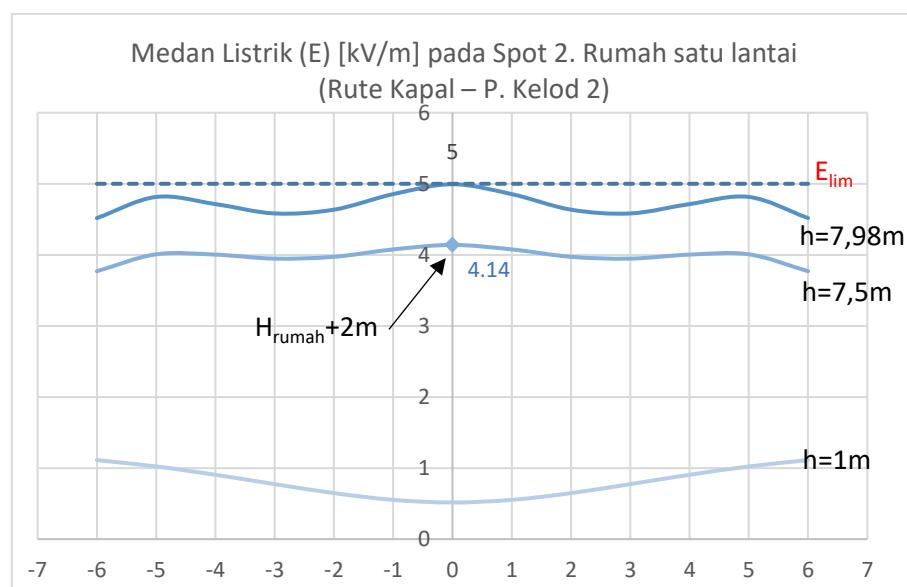
Simulasi berikut akan dilakukan pada titik pengukuran dengan ketinggian atap bangunan aktual sesuai ketika survey dilakukan, ditambah dengan 2 meter dengan asumsi tinggi badan manusia yang sedang membawa payung atau tiang atau alat konduktor lainnya. Hasil perhitungan simulasi untuk masing – masing spot ditunjukkan pada Gambar 36 sampai dengan 39 berikut ini.



Gambar 36. Simulasi Medan Listrik pada Spot 1. Perumahan Graha Permai Indah (Rute Kapal – P. Kelod 2)

Gambar 36 menunjukkan hasil simulasi pada Spot 1, yaitu di atas rumah berlantai dua. Jika ada orang yang naik ke atas atap, sesuai perhitungan masih di bawah standar (5 kV/m). Walaupun begitu besar medan listriknya sudah cukup tinggi, yaitu sebesar 4.25 kV/m. Dalam kurun waktu yang lama, eksposur dengan nilai medan listrik sebesar ini pun akan berbahaya bagi kesehatan manusia.

Adapun nilai batas medan listrik 5 kV/m dicapai pada ketinggian 9.92 m, yaitu tinggi atap rumah ditambah 2.42 meter.



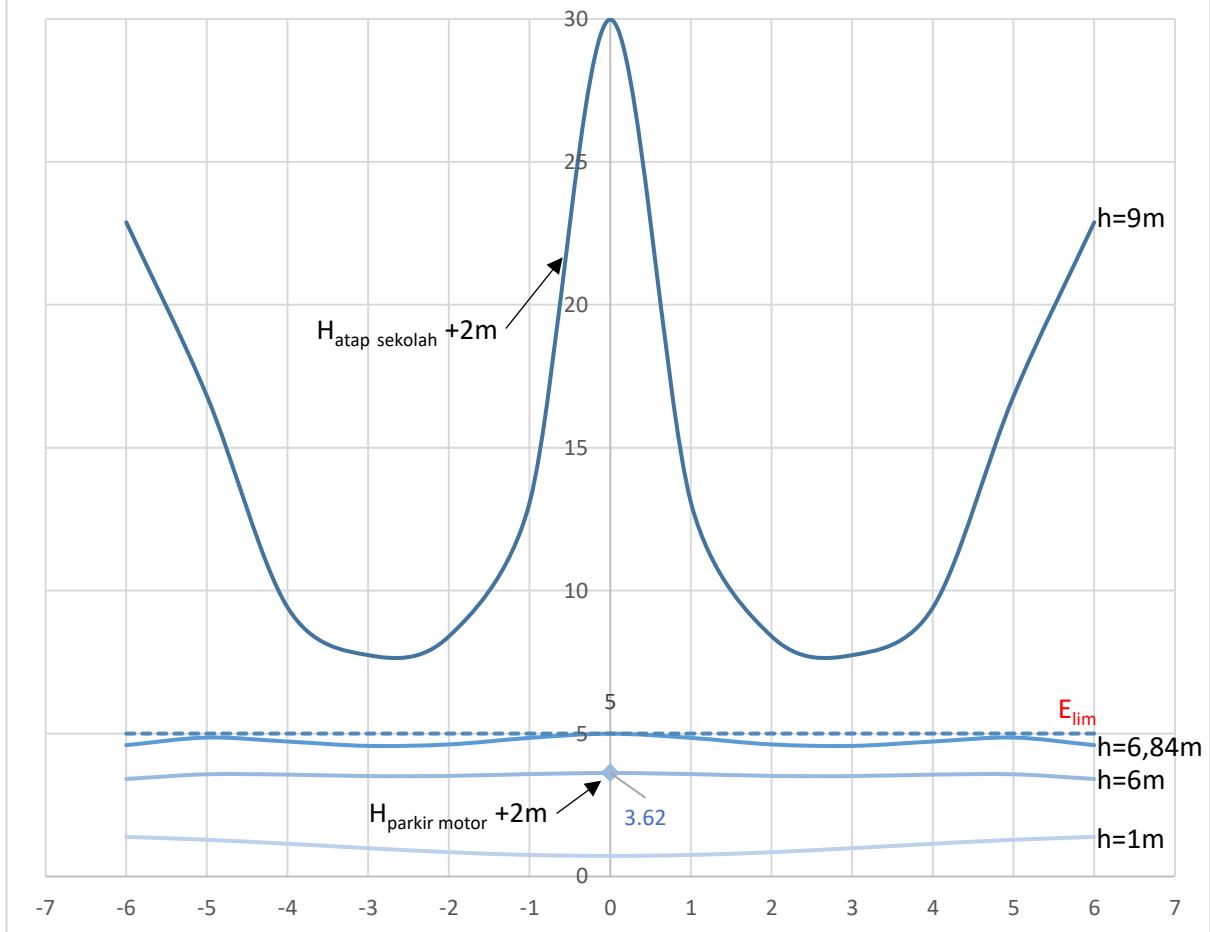
Gambar 37. Simulasi Medan Listrik pada Spot 2. Perumahan Graha Permai Indah (Rute Kapal – P. Kelod 2)

Gambar 37 menunjukkan hasil simulasi pada Spot 2, yaitu di atas rumah berlantai satu di bawah andongan yang dinilai cukup rendah. Jika ada orang yang naik ke atas atap, sesuai perhitungan masih di bawah standar (5 kV/m). Walaupun begitu besar medan listriknya sudah cukup tinggi, yaitu sebesar 4.14 kV/m. Dalam kurun waktu yang lama, eksposur dengan nilai medan listrik sebesar ini pun akan berbahaya bagi kesehatan manusia.

Adapun nilai batas medan listrik 5 kV/m dicapai pada ketinggian 7.98 m, yaitu tinggi atap rumah ditambah 2.48 meter.

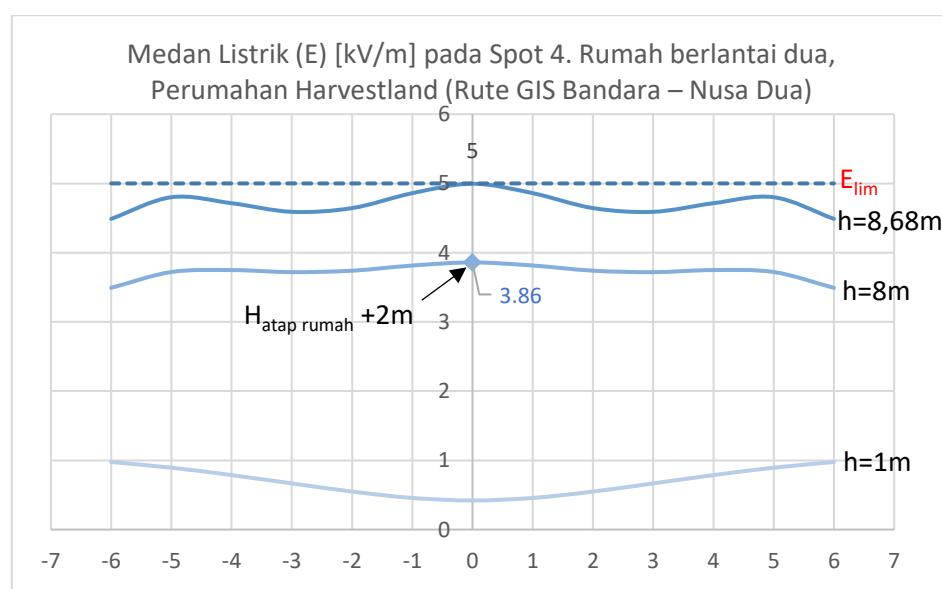


Medan Listrik (E) [kV/m] pada Spot 3. Bangunan Sekolah berlantai dua
(Rute GIS Bandara – Nusa Dua)



Gambar 38. Simulasi Medan Listrik pada Spot 3. Bangunan Sekolah berlantai dua (Rute GIS Bandara – Nusa Dua)

Gambar 38 menunjukkan hasil simulasi pada Spot 3, yaitu di atas parkiran motor sebuah gedung sekolah, dan di atas gedung sekolah di sebelah saluran transmisi. Jika ada orang yang naik ke atas atap parkiran motor, sesuai perhitungan masih di bawah standar (5 kV/m). Namun, jika ada orang yang berdiri di atas atap bangunan sekolah di sebelah saluran transmisi tersebut, nilai medan listriknya melonjak tinggi mencapai lebih dari 20 kV/m. Besar medan listrik ini sudah tentu berbahaya bagi kesehatan manusia, apalagi ini bangunan sekolah dimana banyak manusia yang terdapat di dalamnya sehari – hari.



Gambar 39. Simulasi Medan Listrik pada Spot 4. Rumah berlantai dua, Perumahan Harvestland (Rute GIS Bandara – Nusa Dua)

Gambar 39 menunjukkan hasil simulasi pada Spot 4, yaitu di atas rumah berlantai dua di bawah andongan yang dinilai cukup rendah. Jika ada orang yang naik ke atas atap, sesuai perhitungan masih di bawah standar (5 kV/m). Walaupun begitu besar medan listriknya sudah cukup tinggi, yaitu sebesar 3.86 kV/m. Dalam kurun waktu yang lama, eksposur dengan nilai medan listrik sebesar ini pun akan berbahaya bagi kesehatan manusia.

Adapun nilai batas medan listrik 5 kV/m dicapai pada ketinggian 8.68 m, yaitu tinggi atap rumah ditambah 2.68 meter.

BAB VI

KESIMPULAN

6.1 Kajian Insulator

Dari hasil kajian data dan analisis yang dilakukan terhadap permasalahan insulator di wilayah Bali, dapat diambil kesimpulan – kesimpulan sebagai berikut.

- 1) Populasi insulator pada sistem transmisi SUTT 150 kV di wilayah Bali memiliki total 189.744 buah insulator, yang terdiri dari 158.418 buah (97.72%) insulator tipe suspension disk, 2.433 buah (1.28%) insulator tipe long rod, dan 1.893 buah (1.00%) insulator tipe line post. Dari total jumlah insulator, 60.5% merupakan insulator keramik yang didominasi oleh merk NGK dan 37.4% merupakan insulator kaca yang didominasi oleh merk Sediver.
- 2) Dari populasi insulator yang terpasang pada sistem transmisi SUTT 150 kV di wilayah Bali ini, terdapat 98.148 buah (52%) insulator terpasang di area dekat pantai dan perkotaan yang memiliki level polusi tinggi.
- 3) Penyebab gangguan sistem transmisi paling dominan yang berasal dari peralatan adalah kegagalan fungsi kerja insulator, yaitu sebesar 15% dari total gangguan yang terjadi dalam kurun waktu 5 (lima) tahun terakhir (2013 – 2017). Mayoritas kegagalan insulator yang menyebabkan gangguan sistem adalah pada fungsi elektrik-nya (insulator *flash over*) dimana akar permasalahannya adalah polutan. Sebanyak 83% dari kegagalan insulator terjadi pada area berlevel polusi tinggi, dan keseluruhan (100%) kegagalan insulator terjadi pada area GI di dekat pantai.
- 4) Selain insulator yang menjadi penyebab gangguan pada sistem, di ranah pemeliharaan atau maintenance, terdapat pula data penggantian insulator yang dilakukan secara berkala. Pada kasus ini, penggantian insulator dilakukan ketika pengecekan terdapat insulator yang ditemukan pecah atau korosif tanpa harus mengakibatkan gangguan pada sistem terlebih dahulu. Dari data tahun 2016 – 2017, terjadi 103 kali penggantian insulator, atau rata – rata 4,3 kali per bulannya. Kegagalan insulator ini berupa insulator korosi (66%), insulator pecah (30%), dan insulator *flash over* (4%).

Dari tipenya, 99,9% insulator yang mengalami penggantian adalah insulator tipe *suspension disc*. Dari jenis materialnya, 51% adalah insulator keramik/porselen, dan

49% adalah insulator kaca. Dari lokasinya, 81,9% penggantian insulator terjadi di daerah pantai dan perkotaan yang berlevel polusi tinggi.

- 5) Dari rangkuman data di atas, dapat ditarik kesimpulan bahwa permasalahan utama kegagalan insulator di wilayah Bali ini diakibatkan oleh polutan yang berasal dari polusi pantai (air laut).

6.2 Kajian Pole Tower

Dari hasil kajian data dan analisis yang dilakukan terhadap permasalahan pole tower di sistem transmisi SUTT 150 kV di Bali, maka dapat diambil kesimpulan – kesimpulan sebagai berikut.

- 1) Dari 8 titik pengukuran yang terletak pada 4 lokasi berbeda yang mengalami perkembangan pembangunan cukup pesat, 75% pengukuran medan listrik masih di bawah standar [5 kV/m], 100% pengukuran medan magnet masih di bawah standar [100 μ T], dan 75% pengukuran ROW masih di bawah standar.
- 2) Temuan berupa 1 lokasi di rute GIS Bandara – P. Kelod memiliki nilai medan listrik mencapai 8 kV/m, dan 1 lokasi lagi di dekat GI Kapal memiliki nilai medan listrik 5,4 – 5.9 kV/m. Untuk ROW, 1 lokasi di dekat bangunan sekolah pada rute GIS Bandara – Nusa Dua memiliki jarak konduktor – pohon sebesar 2.45 m, dan pada 1 lokasi lain di tepi sungai pada rute GIS Bandara – P. Kelod memiliki jarak konduktor – atap rumah sebesar 4 m [standar 5 m].
- 3) Berdasarkan hasil simulasi medan listrik pada 4 lokasi survey yang memiliki bangunan / atap rumah, pada 1 lokasi yang dekat bangunan sekolah bertingkat 2 di rute GIS Bandara – Nusa Dua, nilai medan listrik pada ketinggian 2 m di atas atap sekolah mencapai lebih dari 20 kV/m. Nilai ambang batas 5 kV/m sudah dicapai pada ketinggian 6.84 m dari tanah, yang kemungkinan berada pada bagian atap sekolah. Pada 3 lokasi lainnya, nilai ambang batas 5 kV/m sudah dapat dicapai pada jarak 2.4 – 2.6 m dari atas atap rumah / bangunan.

6.3 Rekomendasi

Berdasarkan hasil analisis dan kesimpulan – kesimpulan di atas, maka rekomendasi atas kajian insulator dan pole tower pada sistem transmisi SUTT 150 kV di wilayah Bali ini adalah sebagai berikut.

- 1) Pada ruas koridor di dekat pantai atau area berlevel polusi tinggi, direkomendasikan untuk memperbanyak penggunaan insulator yang terbuat dari bahan polimer atau komposit dan/atau bertipe *long rod*, karena berdasarkan hasil asesmen dari data penggantian insulator 2016-2017, insulator tipe long rod hanya mengalami penggantian sebesar 0,1%, sedangkan insulator jenis polimer/komposit hanya mengalami penggantian sebesar 0,1% dari total kejadian penggantian insulator. Selain memiliki sifat resistansi yang lebih baik terhadap lingkungan yang berpolusi, insulator jenis polimer/komposit tidak memerlukan perlakuan khusus (*treatment*) dalam pemeliharaannya.
- 2) Jika tetap akan menggunakan insulator tipe suspension disk, maka pada jalur – jalur rawan polusi air laut ini sebaiknya memperbanyak insulator jenis kaca dibandingkan keramik, untuk mengurangi resiko insulator korosi pada jenis material keramik yang sedikit lebih besar daripada insulator kaca.
- 3) Untuk penggunaan insulator keramik/porselen pada rute – rute di dekat pantai yang sering mengalami *flash over*, dapat dicoba untuk melapisi insulator dengan RTV *silicon rubber coating*. Metode ini telah diujicobakan pada GI distribusi di pantai Pangandaran, Jawa Barat dan pantai Ketewel, Bali, dimana insulator *coating* memiliki arus bocor yang lebih kecil dibandingkan insulator yang tidak di-*coating*, disertai tegangan *flash over* yang lebih tinggi dibandingkan insulator *non coating*.
- 4) *Pole tower* di dalam dan sekitar kota Denpasar pada rute – rute yang mengalami perkembangan pembangunan direkomendasikan untuk dapat diganti dengan *pole tower* dengan tinggi *body* di atas 20 m atau *lattice tower*.

6.4 Coated Insulator

Subbab ini akan membahas sedikit rangkuman hasil uji coba *coated insulator* yang dilakukan di Pantai Ketewel, Bali (Gambar 41). Pada dasarnya, untuk memperbaiki kinerja rangkaian insulator di lingkungan berpolusi dapat dilakukan dengan beberapa hal sebagai berikut.

- 1) Mengubah (menambah) jumlah insulator
- 2) Mengubah desain bentuk insulator
- 3) Melakukan pencucian / pembersihan secara berkala
- 4) Mengganti jenis insulator dengan insulator polimer : EPDM, Epoxy resin, Silicone Rubber
- 5) Melapisi permukaan insulator dengan lapisan silikon, yang bisa berupa *grease* atau *Room Temperature Vulcanized (RTV) silicone rubber*.

Pelapisan permukaan insulator dengan RTV *silicone rubber* ini memiliki keunggulan sebagai berikut.

- 1) Meningkatkan *flash over voltage*
- 2) Menekan arus bocor dan harmonisa
- 3) Meningkatkan hidrophobisitas
- 4) Meredam korona – *dry band arc*
- 5) Menurunkan temperatur insulator

Berikut ini contoh insulator tipe post-pin dan *suspension disc* yang di-*coating* dengan yang tidak di-*coating*, ditunjukkan pada Gambar 40.



(a) *Non coated insulator (post pin type)*



(b) *Coated insulator (post pin type)*

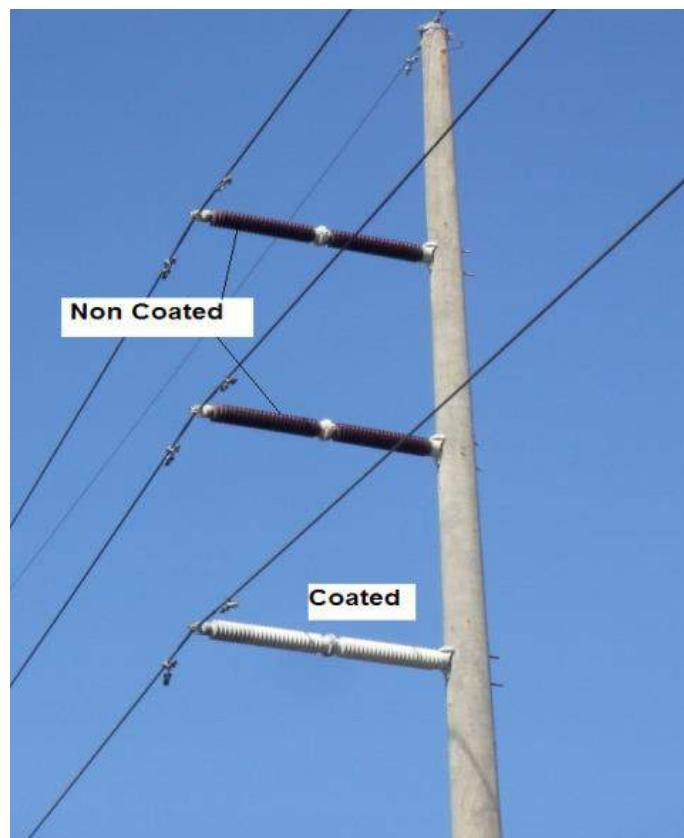


(c) *Non coated insulator (suspension type)*



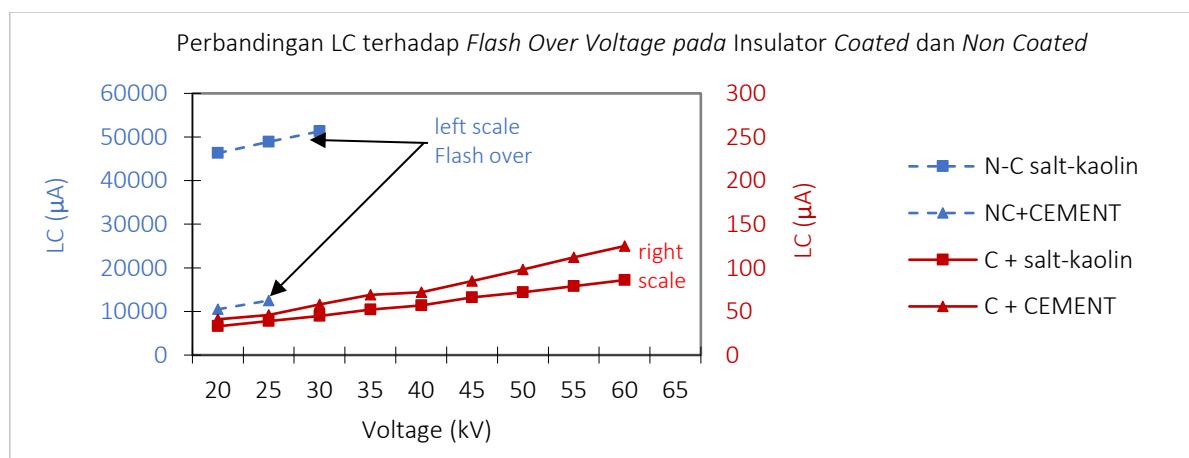
(d) *Coated insulator (suspension type)*

Gambar 40. *Coated dan Noncoated Insulator*



Gambar 41. Sampel *Coated* dan *Noncoated Insulator* tipe *Rod* di Pantai Ketewel, Bali

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, salah satu keunggulan yang bisa didapatkan dari melapisi permukaan dengan RTV silicone rubber coating adalah meningkatkan *flash over voltage*. Berikut ini ditunjukkan pada grafik di bawah ini (Gambar 42) perbandingan *flash over voltage* antara *coated* dan *non coated* insulator.



Gambar 42. Perbandingan LC pada *Flashover Voltage* pada Insulator *Coated* dan *Non Coated*

Selain itu, keunggulan lainnya adalah mengurangi intensitas korona yang terjadi pada insulator yang ditunjukkan pada Tabel 21. Hasil ini diamati menggunakan UV *camera data* terhadap insulator di pantai Ketewel Bali pada bulan Juli 2010 dan Juni 2011. Dari tabel di bawah ini, dapat terlihat jelas bahwa intensitas korona berkurang secara drastic dengan dilapisinya permukaan insulator menggunakan RTV silicone rubber.

Tabel 21. Hasil Pengamatan Korona pada Insulator *Coated* dan *Non Coated* di Pantai Ketewel, Bali

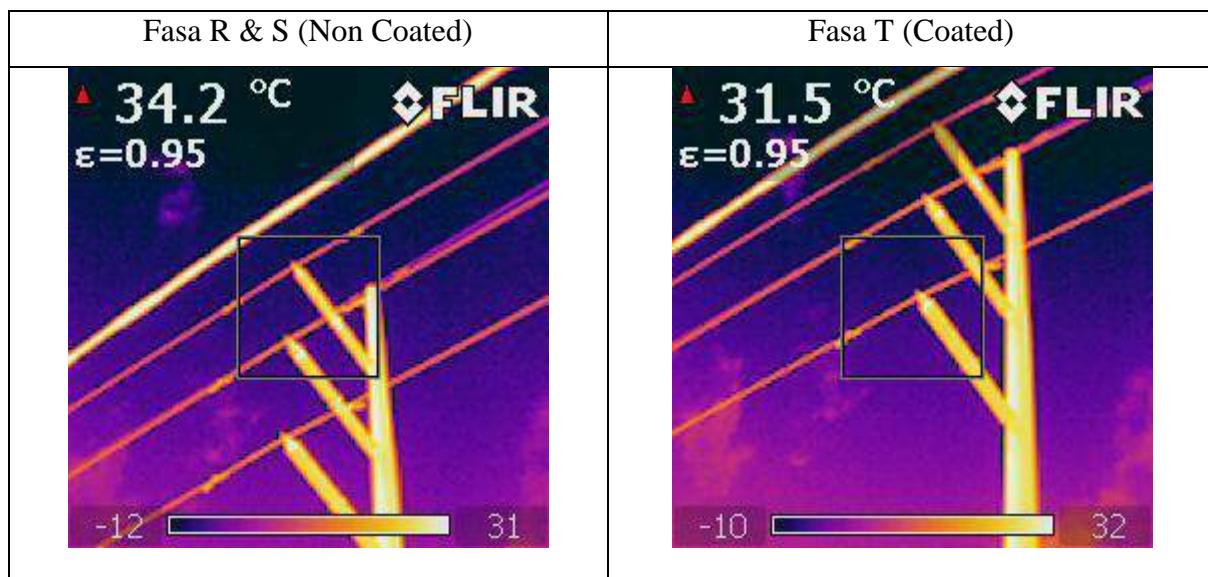
Waktu	Fasa R (Non Coated)	Fasa S (Non Coated)	Fasa T (Coated)
Juli 2010			
Juni 2011			

Parameter lain yang diamat yaitu temperature permukaan insulator yang menurun dengan dilapisinya insulator dengan RTV silicone rubber, yang dapat ditunjukkan pada Tabel 22 (Pengukuran Juli 2010) dan Tabel 23 (Pengukuran Juni 2011).

Tabel 22. Hasil Pengukuran Temperatur Permukaan Insulator di Pantai Ketewel, Bali, bulan Juli 2010.

Fasa R (Non Coated)	35,7° C
Fasa S (Non Coated)	35,8° C
Fasa T (Coated)	31,0° C

Tabel 23. Hasil Pengukuran Temperatur Permukaan Insulator di Pantai Ketewel, Bali, bulan Juni 2011.



Dari Tabel 22 dan 23 di atas dapat dilihat bahwa dengan menggunakan coating pada permukaan insulator, temperature di permukaan *coated insulator* lebih rendah $2,7 - 4,7$ °C dibandingkan dengan *non coated insulator*.

REFERENSI

- [1] Suwarno, Diagnosis of High Voltage Equipments. ITB Press, 2010
- [2] R. Batnikas, R.M. Eichorn, Electrical Properties of Solid Insulating Materials, ASTM Technical Publication 783, 1982
- [3] E. O. Fosterm Partial Discharge and Steamer in Liquid Dielectrics : The Significance of Inception Voltage, IEEE Trans. on Electr. Insul., Vol. 28, pp. 941-956, 1993
- [4] A. Vlastos, T. Orbeck, Outdoor Leakage Current Monitoring of Silicone Composite Insulators in Coastal Service Conditions, IEEE. Trans., Power Delivery, Vol. 11, No. 2 pp. 1066-1070, Apr. 1996
- [5] Suwarno, Study on the waveform of Leakage Current on Outdoor Polymeric Insulators, Proc. 2002 Joint Conf. ACED & K-J Symp. On HV, Seoul, Korea, pp. 398-401, Nov. 2002
- [6] D.A. Genutis, NETAWORLD, 2006
- [7] G. Stone, E.A., Boulter, I. Culbert, H. Dhirani, Electrical Insulation for Rotating Machines, IEEE Press, 2004.
- [8] Pedoman SUTT-SUTET, PT. PLN (Persero).
- [9] Peraturan Menteri Energi an Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor : 18 Tahun 2015 Tentang Ruang Bebas dan Jarak Bebas Minimum pada Saluran Udara Tegangan Tinggi, Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi, dan Saluran Udara Tegangan Tinggi Arus Searah untuk Penyaluran Tenaga Listrik.
- [10] ICNIRP (1998), Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz).
- [11] <http://electrical-engineering-portal.com/download-center/electrical-ms-excel-spreadsheets/emf-td-overhead-lines>

LAPORAN AKHIR
Final Report

LAPITB

MORE THAN 50 YEARS OF EXPERTISE AND EXPERIENCE IN SERVING YOU AND THE NATION

Jl. Dayang Sumbi 7
Bandung 40132
Indonesia

Phone:
62-22-2502533

Facsimile:
62-22-2504177

E-mail:
lapitb@lapit.itb.ac.id
lapitb@melsa.net.id