



Tesis - TF185471

**EVALUASI KEANDALAN DENGAN SISTEM
EXTENDED MAST TERMINAL (EMT) UNTUK
MELINDUNGI SALURAN TRANSMISI 150 KV PT
VALE INDONESIA TERHADAP BACK FLASH OVER
DAN SHIELDING FAILURE DARI IMPULSE PETIR**

RUSTAM SALEH
NRP. 02311650022006

DOSEN PEMBIMBING :
Dr. Ir. Ali Musyafa, M.Sc.
NIP. 19600901198701 1001

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA INSTRUMENTASI INDUSTRI
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister
Teknik (M.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Rustam Saleh


NRP. 02311650022006

Tanggal Sidang Tesis : 2018


Periode Wisuda: 2019

Disetujui oleh:

1. Dr. Ir. Ali Musyafa, M.Sc.
NIP. 19660116 198903 2001

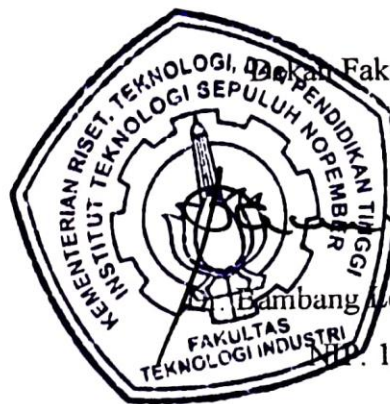
 (Pembimbing)

1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah. MT
NIP. 19660116 198903 2001


 (Penguji)

2. Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph. D
NIP. 19710702 199802 1001

 (Penguji)



Dekan Fakultas Teknologi Industri,


Bambang Melono Widjiantoro, S.T., M.T.

NIP. 19690507 199512 1 001

EVALUASI KEANDALAN DENGAN SISTEM *EXTENDED MAST TERMINAL (EMT)* UNTUK MELINDUNGI SALURAN TRANSMISI 150 KV PT VALE INDONESIA TERHADAP *BACK FLASH OVER* DAN *SHIELDING FAILURE* DARI IMPULSE PETIR

Nama Mahasiswa : Rustam Saleh
NRP : 02311650022006
Pembimbing : Dr. Ir. Ali Musyafa, M.Sc.

ABSTRAK

SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi) 150 kV yang terbentang dari pembangkit listrik tenaga air Balambano, Larona, dan Karebbe menuju ke switchyard pabrik pengolahan bijih nikel, berada pada lokasi dengan kerapatan petir yang tinggi. Sebelum dilakukan pemasangan alat pelindung petir EMT pada tahun 2015, ditemukan banyak keluhan dari pihak operasional dan pemeliharaan bahwa telah terjadi kerusakan insulator pada tower karena sambaran petir yang menyebabkan terjadinya pemadaman total yang tidak diinginkan. Dengan dilakukan pemasangan EMT pada lokasi tower yang dipilih berdasarkan hasil pemetaan lingkungan dengan kerapatan petir yang tinggi dan juga berdasarkan data historis lokasi-lokasi tower yang dilaporkan pernah mengalami kerusakan insulator akibat sambaran petir. Tower yang telah diidentifikasi dilengkapi dengan *isolated lightning rod (early streamer)*, *double shielded down conductor*, *counter* dan *magnetic tape current measurement*. Modifikasi engineering dilakukan untuk menghindari dampak dari *back flash over* dan *shielding failure* sambaran petir dimana berpotensi memecahkan insulator dan memicu terjadinya ground fault (short circuit fasa ke tanah). Observasi dilakukan pada saluran transmisi karena peningkatan kinerja setelah dilakukan pemasangan sistem proteksi petir EMT. Diperoleh informasi bahwa kegagalan pada saluran transmisi berkurang secara signifikan. Keberadaan EMT memberikan perlindungan yang memadai pada insulator tegangan tinggi sebagaimana terindikasi dengan meningkatnya nilai Mean Time To Failure (MTTF). Kemudian *Failure Rate* dihitung untuk menentukan tingkat keandalan saluran transmisi yang menggunakan sistem proteksi petir EMT dan membandingkannya dengan tingkat keandalan saluran transmisi yang tidak menggunakan sistem EMT. Peralatan proteksi petir ini cukup andal untuk membantu menghindari sambaran langsung pada tower dan saluran penghantar serta mencegah *back flash over* dan *shielding failure*. Keandalan setelah pemasangan EMT pada nilai $R_{65\%}$, $R_{70\%}$, $R_{75\%}$ diperoleh pada waktu operasi 173 hari, 143 hari, dan 115 hari lebih tinggi dibanding sebelum pemasangan EMT pada nilai $R_{50\%}$ dengan waktu operasi di bawah 30 hari. Perbaikan sistem pelindung petir ini mengurangi kegagalan atau pemadaman dan meningkatkan keandalan jaringan transmisi 150 kV secara signifikan.

Kata kunci: *EMT, Back Flash Over, Shielding Failure, Reliability.*

**RELIABILITY EVALUATION WITH EXTENDED MAST
TERMINAL (EMT) TO PROTECT PT VALE INDONESIA 150 KV
TRANSMISSION LINE AGAINST BACK FLASH OVER AND
SHIELDING FAILURE OF LIGHTNING IMPULSE**

Student's Name : Rustam Saleh
Student's Number : 02311650022006
Advisor : Dr. Ir. Ali Musyafa, M.Sc.

ABSTRACT

150 kV overhead transmission lines that span from Balambano, Larona and Karebbe Hydro Power Plants to nickel processing plant switchyard are located in a high lightning density area. Before EMTs installed in 2015, there were many complaints of damage to the tower insulators due to lightning strikes that caused total black out. The EMT installation was performed on selected towers at a location based on the mapping in an environment with high lightning density and based on historical location data of reported insulation damage. The selected towers are equipped with isolated lightning rod (early streamer), double shielded down conductor, counter and magnetic tape current measurement system while other towers that have not yet been decided to be installed with EMT will be further evaluated. The engineering modification is to avoid the effect of back flash over and shielding failure of lightning strike that potentially damages the insulator and triggers ground fault. The transmission lines condition was observed due to their good performance after improvement of lightning protection system (LPS). The significant reduction of transmission line outages is reported. Analysis was performed on the existence of EMT that contributed to the failure reduction. Its presence provides protection against damage to high voltage tower insulators as indicated by the increasing value of MTTF. The failure rate is calculated to determine the reliability level of the EMT system which is then compared with the level of reliability without using the EMT system. This lightning protection equipment is reliable enough to avoid direct lightning strikes to the tower and wire lines and to prevent back flash over and shielding failure. Expected reliability after the EMT installation at R_{65%}, R_{70%}, and R_{75%} are achieved at operating time 173 days, 143 days and 115 days respectively far higher than before EMT installation at R_{50%} with operating time below 30 days. The improvement reduces outages and increases the reliability significantly.

Keywords—EMT, Back Flash Over, Shielding Failure, Reliability

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT, yang senantiasa melimpahkan rahmat serta karunia-Nya kepada penulis sehingga dalam menyelesaikan penelitian dan laporan tesis dengan judul “Evaluasi Keandalan Dengan Sistem Extended Mast Terminal (EMT) Dalam Melindungi Saluran Transmisi 150 KV PT. Vale Indonesia Terhadap Back Flash Over dan Shielding Failure dari Impulse Petir”.

Penelitian ini merupakan salah satu penelitian yang mengangkat tema mengenai evaluasi terhadap penerapan teknologi baru sistem proteksi petir EMT terhadap jaringan transmisi 150 kV. Fokus utama adalah pada bagaimana meyakinkan teknologi baru ini membantu mengurangi kegagalan insulator tower akibat pengaruh petir yang menyebabkan terjadinya pemadaman total (blackout) pada jaringan listrik di PT Vale Indonesia.

Penelitian dan laporan tesis ini tidak dapat diselesaikan oleh penulis tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang memberikan bantuan secara moral maupun materi, terutama kepada:

1. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph. D selaku ketua jurusan dan bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T., selaku Sekprodi S2 TF ITS yang senantiasa memberikan arahan dalam menempuh program pasca sarjana S2 hingga dalam menyelesaikan penelitian ini,
2. Bapak Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc. selaku dosen pembimbing I yang senantiasa memberikan bimbingan, motivasi dan saran dalam menyelesaikan penelitian ini,
3. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah. MT; Bapak Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D selaku dosen penguji yang telah memberikan saran-saran yang sangat bermanfaat,
4. Bapak Prof. Dr. Reynaldo Zoro, sebagai sumber inspirasi yang senantiasa memberikan pengetahuan teknis dan inspirasi terkait hal-hal yang berkaitan dengan thesis ini,
5. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat,

6. Ibu Martha Hardiyah, S. Pd, selaku admin Pasca Sarjana Teknik Fisika yang telah membantu semua urusan administrasi dalam penyelesaian tesis ini,
7. Ibu Tonina Paulic dan Busyairi, S.T., MM., selaku rekan kerja yang membantu dalam meninjau kembali tesis ini,
8. Keluarga terutama istri tercinta Darmawati Iskandar yang senantiasa memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis,
9. Teman-teman admin mahasiswa S2 kelas PT. Vale Indonesia: Leo, Erwin dan Musryanto yang ikut dalam membantu, memberi informasi dan mengkoordinasi semua kegiatan administrasi dan proses tesis ini,
10. Teman-teman mahasiswa S2 kelas PT. Vale Indonesia yang senantiasa ada untuk memberikan bantuan dan motivasi.
11. Semua pihak yang telah membantu dalam penelitian dan penyusunan laporan tesis ini.

Apabila terdapat kekurangan dalam penelitian dan laporan tesis ini, penulis memohon kritik dan saran demi penelitian yang lebih baik. Semoga laporan tesis ini dapat memberikan manfaat dan ilmu bagi banyak orang.

Sorowako, 10 Januari 2018

Rustam Saleh

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SINGKATAN DAN NOTASI	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. LATAR BELAKANG	1
1.2. RUMUSAN MASALAH	3
1.3. TUJUAN PENELITIAN	3
1.4. LINGKUP KAJIAN	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 FENOMENA DAN PROSES TERJADINYA PETIR	5
2.2 KARAKTERISTIK SURJA ARUS PETIR	9
2.3 KERAPATAN SAMBARAN PETIR DAN PENGARUHNYA	12
2.4 PELACAKAN DENGAN GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)	14
2.5 TEGANGAN LEBIH PADA MENARA	15
2.6 MENGUKUR KEANDALAN DENGAN FUNGSI KEANDALAN	17
2.7 MODEL KONSTANTA LAJU KEGAGALAN	19
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 DIAGRAM ALUR PENELITIAN	21
3.2 TEMPAT DAN WAKTU PENELITIAN	22
3.3 PENGUMPULAN DATA	22
3.4 DATA TOWER DAN LOKASI GPS	23

3.5 DATA OUTAGE/ BLACKOUT JARINGAN TRANSMISI	23
3.6 ANALISA BIAYA DAN MANFAAT	24
3.6.1 Analisa Biaya dan Manfaat kehilangan Produksi dan Pemeliharaan	24
3.6.2 Kapitalisasi Proyek dan Manfaatnya	27
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 PEMETAAN SALURAN UDARA TEGANGAN DAN KERAPATAN PETIR	29
4.2 DATA HISTORIS KEGAGALAN SALURAN TRANSMISI	35
4.3 EVALUASI KEANDALAN SUTT 150 KV	36
4.4 EVALUASI BIAYA DAN MANFAAT EMT	41
4.4.1 KEHILANGAN PRODUKSI	41
4.4.2 ANALISA BIAYA OBSERVASI	44
4.4.3 ANALISA BIAYA PERBAIKAN SUTT TERHADAP PETIR	44
4.4.4 PROJECT KAPITALISASI DAN MANFAAT ALAT PROTEKSI EMT	45
BAB 5 PENUTUP	51
5.1 KESIMPULAN	51
5.2 SARAN	51
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proses pembentukan muatan dalam awan petir dan komposisi muatan dalam awan petir.....	5
Gambar 2.2	Model step leader [Wagner and Hileman]	7
Gambar 2.3	Titik pertemuan kanal positif dan negatif dengan jarak sambar (r_s) ke struktur.....	8
Gambar 2.4	Proses tahapan sambaran petir ke tanah.....	9
Gambar 2.5	Polaritas petir	9
Gambar 2.6	Bentuk gelombang surja arus dan tegangan sesuai standard IEC62305/2006	10
Gambar 2.7	Impedansi (R dan L) pada struktur tower yang dilewati arus petir .	11
Gambar 2.8	Peta petir dunia 1999	13
Gambar 2.9	Kerapatan sambaran petir suatu tempat (Kota X)	14
Gambar 2.10	GPS dengan sistem informasi geografis.....	15
Gambar 2.11	Gelombang berjalan pada kawat tanah karena sambaran petir	15
Gambar 2.12	Tegangan Back Flash Over dan induksi yang tampak pada SUTT	17
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	21
Gambar 3.2	Kegagalan yang khas terjadi pada pin insulator 150 kV akibat sambaran petir (gambar diambil pada tower KR#7B).....	24
Gambar 3.3	Nickel price from London Metal Exchange (LME).....	26
Gambar 4.1	Saluran Transmisi 150 kV yang diobservasi menggunakan EMT ..	30
Gambar 4.2	Komponen Extended Mast Terminal dengan Early Streamer, Down Conductor, Magnetic Tape Recorder, dan Counter.....	31
Gambar 4.3	Sambaran petir wilayah Sorowako dalam area 50 x 50 km	32
Gambar 4.4	Sambaran petir wilayah Sorowako dalam area 30 x 30 km	32
Gambar 4.5	Rekomendasi penambahan EMT pada area SUTT 150 kV Karebbe	34
Gambar 4.6	Jumlah kegagalan per tahun pada SUTT PT Vale Indonesia.....	35
Gambar 4.7	Fungsi keandalan eksponensial sebelum dan setelah pemasangan EMT.....	39
Gambar 4.8	Fungsi distribusi kumulatif eksponensial sebelum dan setelah pemasangan EMT	40
Gambar 4.9	Fungsi distribusi probabilitas eksponensial sebelum dan setelah pemasangan EMT	41
Gambar 4.10	Kehilangan produksi pertahun karena sambaran petir di tower	43
Gambar 4.11	Biaya perbaikan atau penggantian insulator pada SUTT	45
Gambar 4.12	Perbandingan kehilangan produksi dengan dan tanpa EMT pada SUTT 150 kV.	46

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Jumlah petugas observasi reguler dan tarifnya	26
Tabel 3.2 Biaya setiap perbaikan insulator tower	27
Tabel 4.1 Hasil perhitungan estimasi Ground Flash Density (GFD).....	33
Tabel 4.2 Nilai constant failure rate (CFR) pada dua kondisi yang berbeda.....	37
Tabel 4.3 Hasil perhitungan waktu operasi dengan keandalan yang bervariasi pada dua sistem yang berbeda (dengan dan tanpa EMT)	38
Tabel 4.4 Production loss per year caused by lightning strike.....	42
Tabel 4.5 Biaya observasi SUTT pertahun	44
Tabel 4.6 Pendapatan terkait manfaat EMT untuk Perhitungan Payback Period .	47
Tabel 4.7 Tabel perhitungan ROI	48
Tabel 4.8 Tabel estimasi penghematan biaya peningkatan keandalan SUTT 150 kV	49

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SINGKATAN DAN NOTASI

EMT	:	<i>Extended Mast Terminal</i>
BFO	:	<i>Back Flash Over</i>
SF	:	<i>Shielding Failure</i>
PLTA	:	Pembangki Listrik Tenaga Air
SUTT	:	Saluran Udara Tegangan Tinggi
CB	:	<i>Comulonimbus</i>
CDF	:	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CFR	:	<i>Constant Failure Rate</i>
GPS	:	<i>Global Positining System</i>
PDF	:	<i>Probability Density Function</i>
EngDoc	:	<i>Engineering Document</i>
IEC	:	<i>International Electrotechnical Commission</i>
BIL	:	<i>Basic Insulation Level</i>
GFD	:	<i>Ground Flash Density</i>
MTTF	:	<i>Mean Time to Failure</i>
TBF	:	<i>Time Between Failure</i>
LR	:	Larona
BL	:	Balambano
KB	:	Karebbe
KV	:	Kilo Volt

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

PT. Vale Indonesia adalah salah satu perusahaan tambang dan proses pengolahan bijih nikel terbesar dan berada pada lokasi berdekatan dengan equator sehingga udara yang bergerak ke atas (updraft) sangat tinggi. Keberadaan tiga danau besar dan hutan basah yang mengelilingi seluruh infrastruktur pengolahan bijih nikel menyebabkan kelembaban yang cukup tinggi. Tersedianya aerosol dari polusi industri berkelanjutan disekitar udara lembab dan udara yang bergerak ke atas memudahkan terbentuknya awan petir (R. Zoro, 2018). Dari peta petir dunia diperoleh informasi yang cukup mengejutkan bahwa wilayah operasional PT. Vale Indonesia memiliki kerapatan petir yang masuk dalam kategori tinggi. Pihak operational dan pemeliharaan Departemen Utilities yang mengoperasikan PLTA Larona, PLTA Balambano, PLTA Karebbe dan saluran transmisi /distribusi kerap melaporkan kegagalan pada saluran transmisi 150 kV akibat sambaran petir. Kegagalan yang terjadi berupa pecahnya insulator 150 kV dan putusnya jaringan kawat penghantar. Pada setiap kegagalan tersebut menyebabkan terjadinya pemadaman total seluruh jaringan utilities termasuk pabrik pengolahan bijih nikel.

Pemasangan sistem proteksi petir EMT (*Extended Mast Terminal*) telah dilakukan sejak tahun 2014 hingga tahun 2015. Terdapat 16-unit yang tersedia telah dipasang sepanjang periode waktu tersebut. Pemasangan lebih diprioritaskan pada tower dengan kondisi lingkungan berkerapatan tinggi dan pada tower menurut data pemeliharaan pernah terjadi kerusakan insulatornya akibat sambaran petir. Diharapkan bahwa sistem perlindungan petir EMT ini dapat melindungi insulator tower terhadap back flash over dan shielding failure yang kerap menyebabkan pemadaman total (*blackout*).

Suatu peralatan atau jaringan transmisi 150 kV ini dioperasikan, kemungkinan terjadi kegagalan pada bagian-bagian peralatan atau jaringan yang disebabkan oleh impulse petir dapat dikurangi dengan melakukan tindakan pemeliharaan pencegahan (*preventive maintenance*), kebijakan penggantian

peralatan secara regular, modifikasi engineering, dan perhatian khusus pada kondisi lingkungan dan beban operasi (Ebeling C, 1997). Menurut Ebeling, keandalan di definisikan sebagai probabilitas sistem atau komponen berfungsi selama suatu periode waktu (t). Dalam hal peningkatan keandalan suatu sistem yang sulit dikontrol karena terkait dengan kondisi alam yang penuh tantangan maka modifikasi engineering menjadi solusi terbaik dengan mengadopsi teknologi terbaru proteksi petir EMT. Penurunan tingkat kegagalan jaringan sangat signifikan meningkatkan keandalan jaringan transmisi 150 kV dan bahkan pada tahun 2016 berkontribusi dalam mewujudkan target zero blackout.

Penelitian ini melakukan observasi dan mengkaji data kegagalan pada jaringan baik data sebelum pemasangan sistem proteksi EMT maupun setelahnya. Beberapa penelitian sebelumnya lebih fokus pada observasi lapangan perbaikan performa peralatan proteksi petir, studi pengamanan terhadap sambaran petir, kalkulasi dampak back flash over dan shielding failure namun belum pernah dilakukan evaluasi keandalan jaringan transmisi pada sistem dengan alat proteksi petir EMT. Dalam penelitian ini juga akan diuraikan analisa biaya yang diperlukan baik dalam pengadaan peralatan, biaya penghematan, biaya pemeliharaan dan lain-lain serta menunjukkan manfaat dan biaya dari sistem sehingga memudahkan dalam mengambil keputusan kelayakan sistem ini dan solusi alternatif yang perlu diambil. Memahami analisa biaya dan manfaat diharapkan dapat membantu dalam menentukan tujuan yang tepat, perkiraan yang tepat dalam hal kebutuhan sumber daya dan biaya yang terkait dan juga memberikan informasi keberhasilan sistem yang dianalisa.

Analisa terhadap sistem digunakan untuk mengkaji efisiensi dan efektifitas EMT yang terpasang saat ini, analisa keandalan menggunakan metode *Constant Failure Rate Model* untuk jaringan transmisi 150 kV pada saat sebelum dan setelah terpasangnya EMT, serta analisa biaya pengadaan proyek, pengoperasian dan pemeliharaannya.

1.2. RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah yang akan diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana menentukan EMT yang terpasang apakah sudah cukup efektif dan efisien melindungi jaringan transmisi 150 kV pada lingkungan dengan kerapatan petir yang tinggi sepanjang jaringan atau masih diperlukan peninjauan kembali kemungkinan penambahan unit EMT?
- b. Bagaimana EMT meningkatkan keandalan secara signifikan dalam memberikan perlindungan yang optimal sehingga kerusakan insulator dan jumlah pemadaman total (total blackout) menurun?
- c. Bagaimana pengaruh EMT dalam menurunkan biaya pemeliharaan dan biaya operasional akibat kehilangan produksi ketika terjadi total blackout?

1.3. TUJUAN PENELITIAN

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Menganalisa efektifitas dan efisiensi keberadaan EMT terpasang dalam melindungi jaringan transmisi 150 kV yang beroperasi.
- b. Menganalisa peranan EMT dalam meningkatkan keandalan $R(t)$ secara signifikan pada jaringan transmisi 150 kV terhadap back flash over dan shielding failure dari sambaran petir.
- c. Menganalisa dampak ekonomis alat pelindung petir EMT terhadap biaya operasional dan pemeliharaan SUTT 150 kV.

1.4. LINGKUP KAJIAN

Lingkup kajian ini meliputi sebagai berikut:

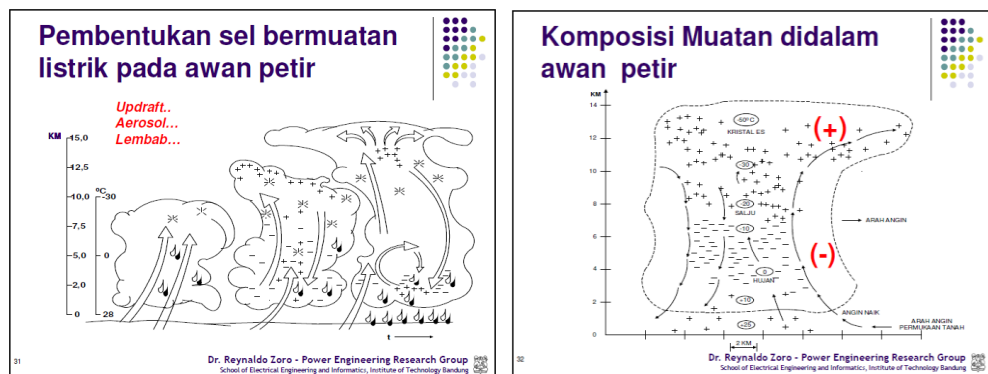
- a. Lokasi penelitian pada jaringan transmisi 150 kV PT. Vale Indonesia.
- b. Pengambilan data historis kegagalan jaringan transmisi akibat petir yang menimbulkan total blackout termasuk lokasi tower yang mengalami gangguan.
- c. Pengambilan data kerapatan petir wilayah operasional PT Vale Indonesia pada kisaran area 50 km x 50 km dan 30 km x 30 km yang menaungi jaringan transmisi 150 kV.
- d. Evaluasi keandalan hanya pada jaringan transmisi 150 kV yang terbentang dari switchyard pabrik pengolahan bijih nikel, PLTA Larona, PLTA Balambano dan PLTA Karebbe.
- e. Analisa biaya operasional dan pemeliharaan serta pengadaan peralatan proteksi petir EMT.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 FENOMENA DAN PROSES TERJADINYA PETIR

Lapisan atmosfer bumi terjadi gerakan udara ke atas (*updraft*) membawa udara lembab. Udara lembab ini banyak ditemukan pada daerah di Indonesia yang memiliki hutan lebat dan sungai atau danau disekitarnya. Udara lembab ini mengandung aerosol yang merupakan partikel ringan dari polusi industri yang mengambang dan menyerap air (hygroskopis). Makin tinggi udara lembab tersebut dari permukaan bumi maka makin rendah tekanan dan suhunya. Uap air terkondensasi menjadi titik-titik air dan kemudian membentuk awan. Jika awan tersebut tertiuap angin menyebabkan posisinya menjauh dari permukaan bumi dan pada ketinggian ± 5 km awan tersebut membeku menjadi kristal es yang turun lagi karena adanya gravitasi bumi. Selama proses pergerakan aliran udara vertikal dan horizontal, titik-titik air akan menangkap muatan negatif yang akan bergerak turun ke bawah oleh titik air yang lebih besar dan melepaskan muatan positif yang terangkut ke atas menuju puncak awan (K.T. Sirait, 1987).



Gambar 2.1 Proses pembentukan muatan dalam awan petir dan komposisi muatan dalam awan petir (R. Zoro, 2015)

Awan yang bermuatan menimbulkan muatan induksi pada permukaan bumi hingga timbul medan listrik. Dimensi bumi yang luas dianggap rata terhadap awan sehingga awan dan bumi dapat dianggap sebagai dua pelat kondensator yang bermuatan. Jika medan listrik awan ke bumi atau sebaliknya melebihi medan

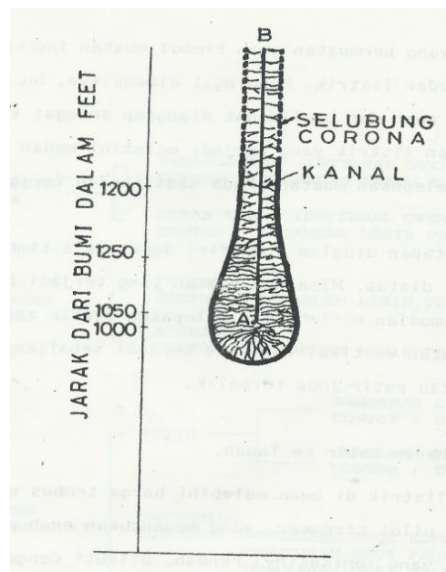
tembus udara, akan terjadi pelepasan muatan (discharge) yang disebut petir (R. Zoro, 2018). Tipe-tipe petir terbagi sebagai berikut:

- a. Petir antar awan (cloud to cloud discharge) dimana petir ini terjadi dari satu awan ke awan lain.
- b. Petir awan ke tanah yang disebut juga cloud to ground flash, terjadi dari suatu awan CB (Cumulonimbus) ke tanah. Untuk tipe petir ini jika diklasifikasikan berdasarkan pelepasan muatannya akan dikelompokkan menjadi pelepasan muatan negatif dari awan ke tanah (downward negative leader), muatan positif dari tanah ke awan (upward positive leader), muatan positif dari awan ke tanah (downward positive leader) dan muatan negatif dari tanah ke awan (upward negative leader).
- c. Petir yang terjadi pada awan yang sama atau dalam awan yang sama (intercloud discharge).
- d. Petir awan ke udara (cloud to air discharge) yang terjadi antar awan CB. Fenomena ini sering terjadi di daerah gurun karena udara yang kurang lembab.

Perbedaan tegangan listrik terjadi di awan melebihi tegangan tembus udara yang terionisasi, dan terjadi aliran penuntun (pilot streamer) yang diiringi oleh titik cahaya kemudian pelepasan awal membentuk saluran antara awan dan bumi menjadi pelepasan muatan utama. Setiap sambaran bermula dari lompatan-lompatan titik cahaya (step leader) yang bergerak turun (down leader) dari awan yang bermuatan. Arah gerakan atau langkah setiap titik cahaya berubah-ubah sehingga secara keseluruhan lintasannya tidak lurus dan patah-patah.

Menurut hipotesa Wagner dan Hileman, step leader terdiri dari dua bagian yaitu suatu inti tipis berdaya hantar tinggi yang disebut kanal dan dikelilingi oleh suatu muatan ruang negative yang disebut korona. Perbedaan tegangan di dalam selubung korona ini mempunyai karakteristik pelepasan muatan korona, rendah temperaturnya dan tertembusi oleh banyak alur (R. Zoro, 2018). Jika ujung kanal yang terbentuk oleh pilot streamer mencapai titik maksimum dalam perambatannya

berupa lompatan selubung korona akan mendahului pembentukannya di depan ujung kanal. Bila pembentukan selubung korona konsentrasi energi pada ujung kanal mencapai harga kritis atau jika arus pada salah satu alur korona mencapai harga kritis (± 1 amp) maka akan terjadi perambatan kanal yang bergerak dengan kecepatan yang tinggi. Kecepatan tinggi dari perambatan kanal dengan terinduksinya muatan dengan cepat pada ujung kanal. Perilaku ini berulang terus pada step leader dari awan ke permukaan bumi.



Gambar 2.2 Model step leader [Wagner and Hileman] (R. Zoro, 2018)

Ketika ujung kanal mendekati ke bumi, dengan proses identik terbentuk pula kanal positif pada permukaan bumi yang menuju ke awan yang bermuatan negatif. Kanal positif ini kemudian akan bertemu ujung aliran penuntun melangkah di atas permukaan bumi dan terjadilah sambaran balik. Kedua lidah petir yang berasal dari awan dan bumi akan bertemu di satu titik yang disebut titik sambar dengan jarak sambar (r_s) dari struktur ke titik sambar diperlihatkan pada gambar 2.2



Gambar 2.3 Titik pertemuan kanal positif dan negatif dengan jarak sambar (r_s) ke struktur (R. Zoro, 2018)

Sambaran balik berupa aliran muatan positif dari bumi menuju ke awan bercahaya sangat terang dengan jalur yang sama yang telah dibentuk oleh step leader namun tidak bercabang dan disebut sebagai lidah panah (dart leader).

Jarak sambar menurut Armstrong dan Whitehead jarak sambar (r_s) adalah:

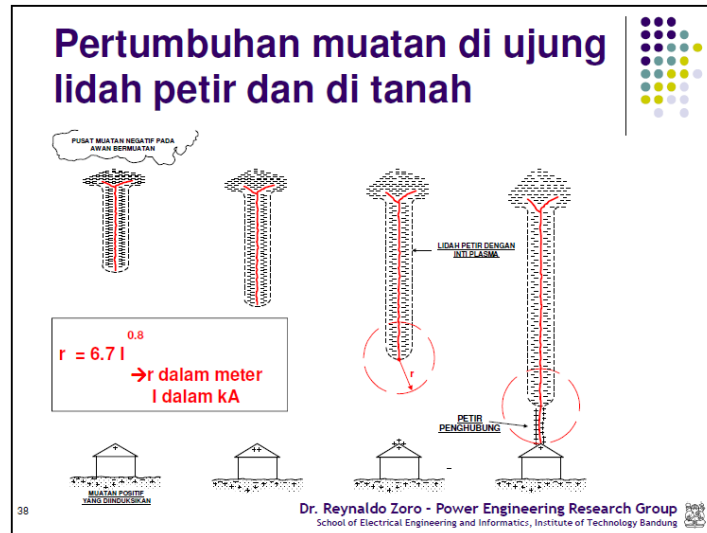
$$r_s = 6.7 I^{0.8} m \quad (2.1)$$

Jarak sambar menurut standar IEC 62305/ 2010 adalah:

$$r_s = 10 I^{0.65} m \quad (2.2)$$

Keduanya merupakan rumus bola gelinding.

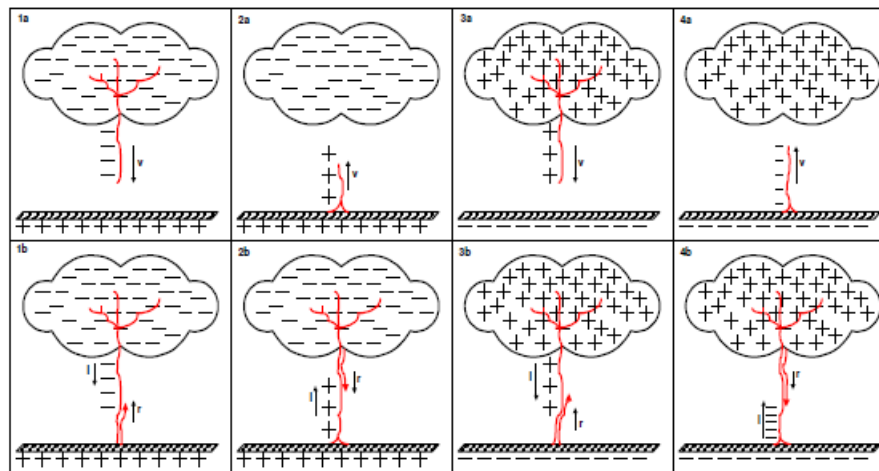
Secara keseluruhan tahapan sambaran petir ke tanah dapat diperlihatkan pada gambar berikut:



Gambar 2.4 Proses tahapan sambaran petir ke tanah (R. Zoro 2015)

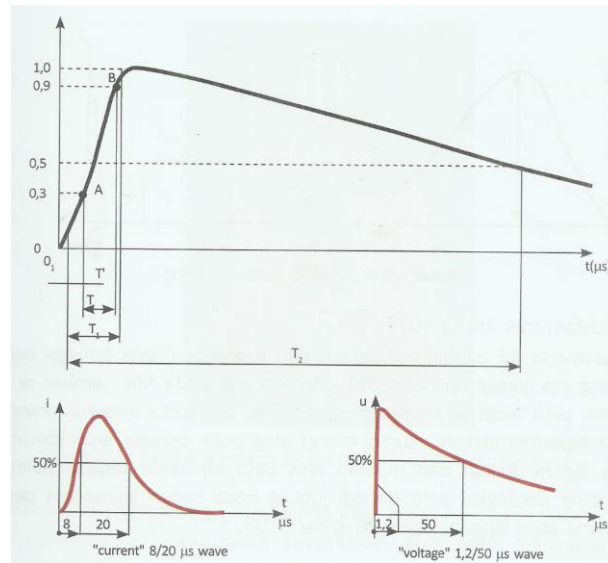
2.2 KARAKTERISTIK SURJA ARUS PETIR

Awan bagian bawah bermuatan negatif namun bisa juga positif. Polaritas petir akan mempengaruhi besar arus dan arah aliran penuntun. Gambar berikut memberikan gambaran polaritas sambaran dan proses terjadinya pertemuan titik sambaran sebagaimana dijelaskan sebelumnya.



Gambar 2.5 Polaritas petir (R. Zoro, 2018)

Menurut K.T. Sirait dan R. Zoro di bawah awan positif arus sambaran perintis berkisar antara 1.000 – 3.000 Amp, di bawah awan negatif berkisar 50 – 300 Amp. Tetapi sambaran balik berkisar 8 -150 kA di bawah awan negatif dan sampai 300 kA di bawah awan positif (K.T. Sirait, R. Zoro, 1987). Pada saat terjadi sambaran petir membawa arus petir yang besar dan tegangan yang tinggi. Bentuk gelombang surja arus dan tegangan berdasarkan standar IEC 62305/2006) diperlihatkan pada gambar berikut:



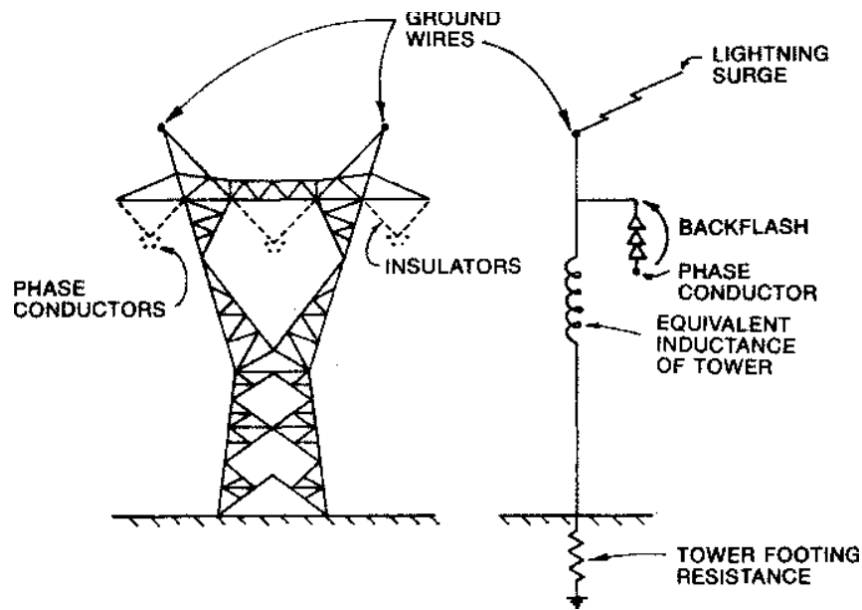
Gambar 2.6 Bentuk gelombang surja arus dan tegangan sesuai standard IEC62305/2006 (R. Zoro, 2018)

Ketika arus petir i melalui struktur akan terjadi *drop tegangan* pada tahanan pentanahan atau impedance R_{imp} dari struktur yang disambar sebesar:

$$U = R_{imp} i \quad (2.3)$$

Akibat kecuraman gelombang arus (di/dt) atau $kA/\mu s$ menyebabkan tegangan yang ekuivalen dengan induktansi pada struktur tower yang menimbulkan tegangan pada struktur tower sebesar:

$$U = L \frac{di}{dt} \quad (2.4)$$



Gambar 2.7 Impedansi (R dan L) pada struktur tower yang dilewati arus petir

Paramater lain yang mempengaruhi obyek yang disambar adalah arus petir ini memiliki muatan arus impulse Q yang besar. Ketika petir menyambar suatu obyek maka arus petir akan nampak terlihat seperti loncatan api pada permukaan obyek sambaran. Akibat muatan arus petir yang besar mampu melelehkan material logam atau batang konduktor penangkal petir, atau melubangi pelat tangki atau lapisan logam lainnya. Besarnya muatan arus impuls Q sebesar:

$$Q = \int i dt \quad (2.5)$$

Arus petir menimbulkan kekuatan impulse (E) yang menyebabkan pemanasan dan gaya elektrodinamis pada struktur ataupun pada material logam dimana arus mengalir. Kerusakan mekanis pada struktur akan terlihat jelas akibat kekuatan impulse yang besarnya dapat dihitung menggunakan formula:

$$E = \int i^2 dt \quad (2.6)$$

Beberapa fakta mengenai petir dikuyhyhyhyhyhytytip dari berbagai sumber bahwa tegangan petir antara awan dan tanah bisa mencapai tegangan 100 MV. Berdasarkan data yang pernah tercatat pada tahun 1995 bahwa arus petir negatif yang tertinggi pernah terjadi di Jakarta sebesar -800 kA. Sambaran petir negatif

dapat terjadi berkali-kali (multiple stroke) sedangkan sambaran positif pada umumnya hanya sekali dan disebut thunder bolt. Temperatur kanal petir yang tinggi mencapai 10.000°C sehingga mampu melelehkan struktur apa saja yang disambarnya. Pergerakan petir secara vertikal dan horisontal, sambaran petir mampu bergerak secara horisontal sejauh 15 km. Fakta yang paling mencengangkan bahwa Indonesia memiliki hari guruh terbanyak sebagaimana diungkap dalam Guinness Book of World Record sebesar 322 hari guruh setahun dan lokasi terjadinya hari guruh terbanyak tersebut berlokasi di Bogor. Bisa kita bayangkan bagaimana jika petir menyambar makhluk hidup. Statistik menunjukkan sambaran petir awan ke awan (intra cloud) lebih banyak daripada sambaran petir ke tanah (cloud to ground), namun itu sudah cukup banyak menyebabkan masalah di permukaan bumi.

2.3 KERAPATAN SAMBARAN PETIR DAN PENGARUHNYA

Dalam perancangan perlindungan terhadap petir baik pada manusia atau bangunan, besarnya kerapatan petir suatu daerah harus ditinjau dengan seksama agar diperoleh kualitas perlindungan peralatan yang terpasang. Hal ini dapat diketahui dengan memanfaatkan data isokeraunic level atau peta hari guruh pertahun kemudian mencari korelasinya dengan kepadatan sambaran petir ke tanah (R. Zoro, 2018).

$$F_t = 0.25 T \quad \text{Sambaran/km}^2/\text{tahun} \quad (2.7)$$

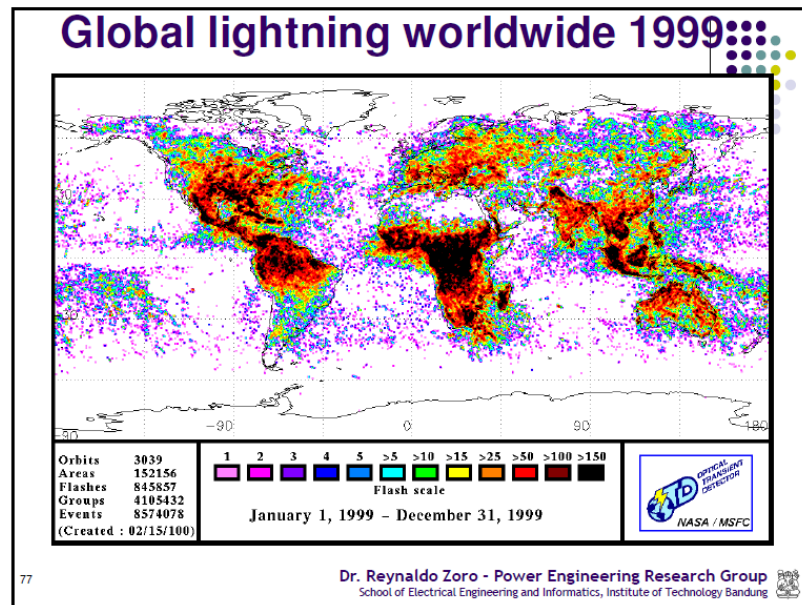
$$F_t = 0.25 T^{0.79} \quad \text{Sambaran/km}^2/\text{tahun (K.T. Sirait, 1982)} \quad (2.8)$$

$$F_t = 0.25 \cdot 10^{-3} T^{0.82} p^{0.52} \quad \text{Sambaran/km}^2/\text{tahun} \quad (2.9)$$

Dimana:

P = jumlah curah hujan/tahun, mm

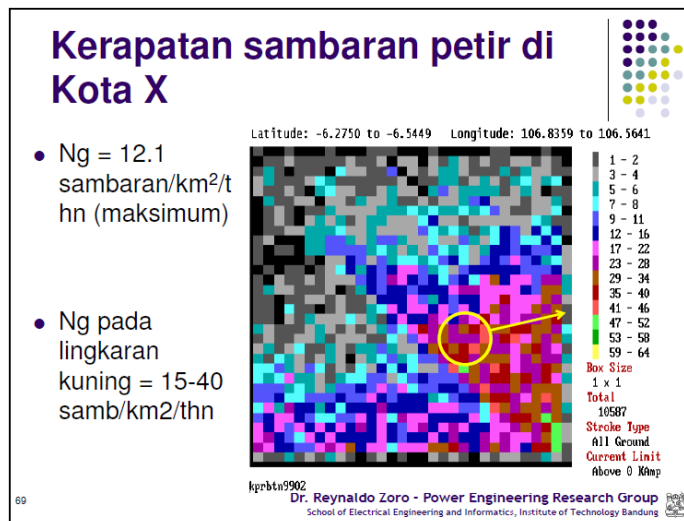
T = jumlah hari guruh/tahun



Gambar 2.8 Peta petir dunia 1999 (R. Zoro, 2015)

Besar jumlah sambaran petir ke tanah hanya $\pm 25\%$ dan selebihnya terjadi pelepasan muatan pada awan ke awan dan muatan dalam suatu awan itu sendiri (intracloud). Kerapatan petir yang besar pada suatu daerah menjadi indikasi bahwa infrastruktur pada daerah tersebut membutuhkan perlindungan yang lebih besar akibat banyaknya kegagalan pada peralatan karena frekuensi sambaran petir yang tinggi. Pemanfaatan teknologi dalam mengukur jumlah sambaran petir kerap digunakan saat ini dengan *lightning location system* yang menggunakan satelit. Di Indonesia hasil pengukuran yang diperoleh sangat baik dan akurat dengan memanfaatkan teknologi Jaringan Deteksi Petir Nasional sejak tahun 1995.

Menurut R. Zoro, petir di daerah tropis di Indonesia berbeda dengan di daerah subtropis dan kemungkinan terjadinya petir tergantung pada keadaan setiap hari dan tahun. Sebagai pembandingan jumlah sambaran petir di Alpen (Eropa) ± 4 sambaran/km²/tahun sedangkan jumlah sambaran petir di Indonesia seperti di Tangkuban Perahu ± 10 sambaran/km²/tahun. Sambaran petir berupa arus petir dengan gelombang impuls, dengan waktu muka gelombang 1-10 μ s dan ekor gelombang 50-100 μ s dengan arus petir hingga ratusan kA (R. Zoro, 2018).



Gambar 2.9 Kerapatan sambaran petir suatu tempat (Kota X) (R. Zoro, 2015)

2.4 PELACAKAN DENGAN *GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)*

Pengertian GPS adalah sistem navigasi yang menggunakan satelit yang didesain agar dapat menyediakan posisi secara instan, kecepatan dan informasi waktu di hampir semua tempat di muka bumi, setiap saat dan dalam kondisi cuaca apapun. Sedangkan alat untuk menerima sinyal satelit yang dapat digunakan oleh pengguna secara umum dinamakan GPS Tracker atau GPS Tracking. Dengan menggunakan alat ini maka dimungkinkan user dapat melacak posisi kendaraan, armada ataupun mobil dalam keadaan Real-Time.

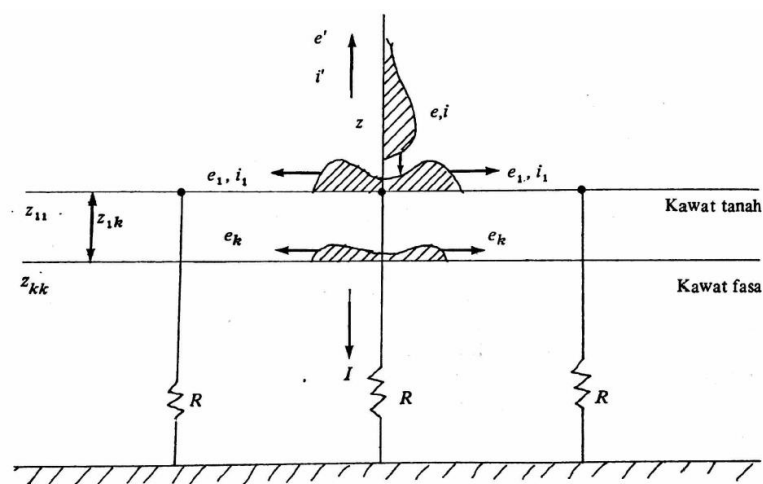
Dalam penelitian ini fungsi **GPS untuk Sistem Informasi Geografis** adalah fitur yang paling penting. GPS ini digunakan untuk keperluan sistem informasi geografis, seperti untuk pembuatan peta, mengukur jarak perbatasan, atau bisa dijadikan sebagai referensi pengukuran suatu wilayah.



Gambar 2.10 GPS dengan sistem informasi geografis

2.5 TEGANGAN LEBIH PADA MENARA

Jika petir menyambar menara transmisi secara langsung akan terjadi aliran arus yang besar ke tanah dan sepasang gelombang berjalan merambat pada kawat tanah (overhead ground wire). Aliran arus pada kawat penghantar, menara dan gardu induk bisa terjadi akibat sambaran tidak langsung. Kedua sambaran petir ini akan berpotensi menyebabkan terjadinya bahaya tegangan lebih (over voltage) pada peralatan sistem tenaga.



Gambar 2.11 Gelombang berjalan pada kawat tanah karena sambaran petir
(T.S. Hutaaruk, 1989)

Dimana:

Z = impedansi surja dari kanal petir (Z_{11} impedansi surja sendiri dari kawat tanah ekivalen, Z_{kk} impedansi surja sendiri kawat fasa k, Z_{1k} impedansi surja sendiri kawat tanah ekivalen dengan kawat fasa k)

e = gelombang datang dari sambaran kilat

e' = gelombang pantulan pada kanal sambaran petir

e_1 = gelombang datang pada kawat tanah

e_k = gelombang datang pada kawat fasa k

R = tahanan kaki menara

I = arus menara

Pada gambar dijelaskan jika semisal kawat fasa terkena sambaran akibat *shielding failure* (kegagalan perisai atau perlindungan) maka arus petir sebesar i (26 kA) maka arus petir akan terbagi menjadi 2 aliran. Airan arus ini mengalir ke masing-masing kawat fasa sebesar Z_L (300 ohm) maka pada kawat fasa muncul tegangan V_L sebesar $= \frac{26}{2} 300 = 3.9 MV$.

Penyebab terbesar sambaran petir di tower akibat berada pada posisi terbuka dan tertinggi menjadikannya sebagai obyek sambaran yang mudah. Menurut peneliti, mereka sepakat bahwa jumlah sambaran pada saluran dekat menara sekitar 60% dari seluruh sambaran yang mengenai saluran transmisi. Sisanya 40 persen dianggap menyambar kawat tanah jauh dari menara sepanjang gawang dengan perbandingan 30% pada seperempat gawang dan 10% dipertengahan gawang (Hutauruk, 1989). Pada saluran udara tegangan tingi hingga 230 kV, kemungkinan lompatan api antar kawat tanah dan kawat fasa pada área seperempat dan setengah gawang dianggap masih tetap ada. Oleh karenanya saluran udara tegangan tinggi hingga 230 kV gangguan kilat seperempat dan setengah gawang masih tetap diperhitungkan. Jika sambaran terjadi pada menara akan menyebabkan terjadinya kenaikan tegangan yang lazim disebut *back flash over (BFO)* atau tegangan tembus balik.

Besarnya BFO dapat dihitung dengan formula sebagai berikut:

$$V_m = \left(i_s \times R_E + L \frac{di}{dt} + V_L \right) \quad (2.10)$$

Dimana:

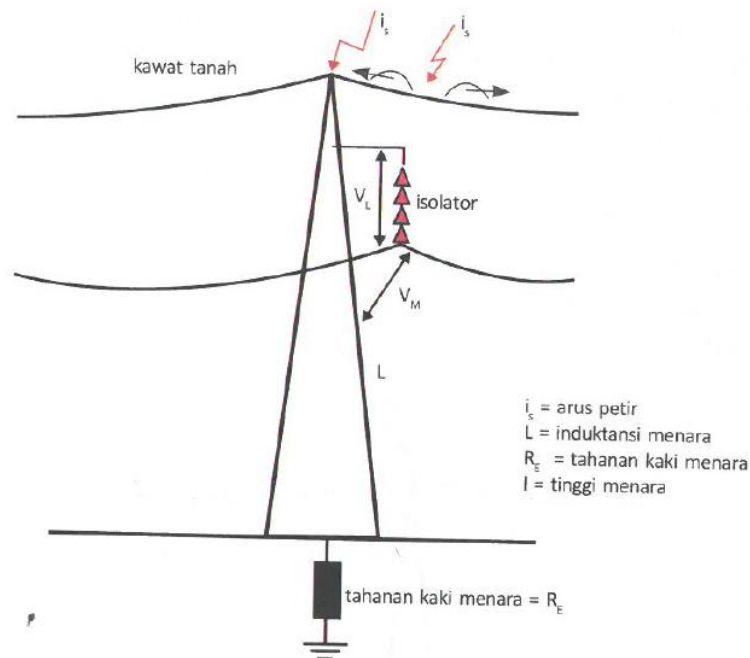
$$V_L = \text{tegangan sistem} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_L$$

V_m = tegangan pada menara

L = induktansi menara

R_s = tahanan kaki menara

I_s = arus petir



Gambar 2.12 Tegangan Back Flash Over dan induksi yang tampak pada SUTT (R. Zoro, 2018)

Besarnya nilai tegangan pada menara ini (V_m) menjadi referensi untuk menentukan BIL (Basic Insulation Level) atau daya tahan insulator terhadap impuls. Jika besar tegangan menara lebih besar dari tegangan BIL insulator maka terjadi tegangan balik atau back flash over (BFO).

2.6 MENGUKUR KEANDALAN DENGAN FUNGSI KEANDALAN

Keandalan (reliability) didefinisikan sebagai probabilitas suatu sistem atau komponen berfungsi selama periode waktu t . Untuk menyatakan secara matematis

kita mendefinisikan variabel acak berkelanjutan T sebagai waktu untuk kegagalan sistem (Ebeling C, 1997); $T \gg 0$. Kemudian reliability dapat dinyatakan sebagai:

$$R(t) = Pr \{T \geq t\} \quad (2.11)$$

Dimana

$R(t) \geq 0$, $R(0) = 1$, dan $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$. Untuk nilai t yang diberikan maka $R(t)$ probabilitas time to failure lebih besar atau sama dengan t.

$$F(t) = 1 - R(t) = Pr \{T < t\} \quad (2.12)$$

Dimana,

$$F(0) = 0 \text{ dan } \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1 \quad (2.13)$$

Lalu F(t) adalah probabilitas bahwa suatu kegagalan yang terjadi sebelum waktu t.

Merujuk ke fungsi R(t) sebagai fungsi reliability dan F(t) sebagai cumulative distribution function (CDF) dari distribusi kegagalan maka fungsi ketiga dapat didefinisikan sebagai berikut

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (2.14)$$

Fungsi ini disebut probability density function (PDF). Fungsi ini menggambarkan bentuk dari distribusi kegagalan yang terjadi pada suatu sistem. Probability density function f(t) memiliki sifat berikut:

$$f(t) \geq 0 \text{ dan } \int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (2.15)$$

Dari PDF dijelaskan sebelumnya atau f(t) ini lalu

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (2.16)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2.17)$$

Dengan kata lain bahwa reliability function dan cumulative distribution function mewakili area di bawah kurva yang didefinisikan oleh $f(t)$. Oleh karena itu, karena area di bawah seluruh kurva sama dengan satu, keandalan dan probabilitas kegagalan akan ditentukan sehingga $0 \leq R(t) \leq 1$, $0 \leq F(t) \leq 1$.

Fungsi $R(t)$ biasanya digunakan ketika reliability dihitung dan fungsi $F(t)$ biasanya digunakan ketika probabilitas kegagalan dihitung. Grafik PDF dan $f(t)$ akan mewakili distribusi kegagalan sistem.

Fungsi yang melengkapi fungsi distribusi kumulatif adalah fungsi keandalan, juga disebut fungsi kelangsungan hidup. Fungsi ini dapat digunakan untuk menentukan kemungkinan bahwa peralatan akan bertahan untuk waktu tertentu t (Bloch H.P., 1990). Menurut Musyafa bahwa nilai fungsi keandalan adalah nilai probabilitas, dan nilai fungsi keandalan (R) adalah $0 \leq R(t) \leq 1$ (Musyafa, 2015). (Beetling, 1997) Fungsi yang dilambangkan sebagai fungsi keandalan $R(t)$ pada sistem m jika digunakan selama periode waktu t sebagai satuan waktu. Konsep waktu di keandalan sistem adalah *time to failure* (TTF) dan dijelaskan sebagai waktu yang berlalu ketika sistem mulai beroperasi hingga mengalami kegagalan.

2.7 MODEL KONSTANTA LAJU KEGAGALAN

Suatu distribusi kegagalan yang memiliki constant failure rate (CFR) disebut sebagai exponential probability distribution. Exponential atau CFR model ini adalah satu dari beberapa distribusi kegagalan dalam dunia reliability engineering. Kegagalan karena kejadian-kejadian acak atau kebetulan akan mengikuti fungsi distribusi ini dan akan mendominasi selama beroperasinya suatu sistem atau komponen (Ebeling C, 1997).

Jika distribusi dari time between failure (TBF) dari sistem mengikuti exponential distribution, (Dhilon B. 2005, Ebeling C, 1997) maka pengembangan model CFR dengan mengansumsikan $\lambda(t) = \lambda$, $t \geq 0$, $\lambda > 0$ adalah:

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda dt\right] = e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (2.18)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.19)$$

Exponential distribution ini adalah fungsi yang paling penting terkait diterima secara luas dalam pekerjaan analisa keandalan pada sistem elektronik (Bloch H.P. 1993, Geitner F.K, 1993), fungsi ini ditetapkan sebagai berikut:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.20)$$

Mean time to failure (MTTF) atau persamaan waktu rata-rata exponential failure distribution didefinisikan sebagai berikut:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.21)$$

Sehingga,

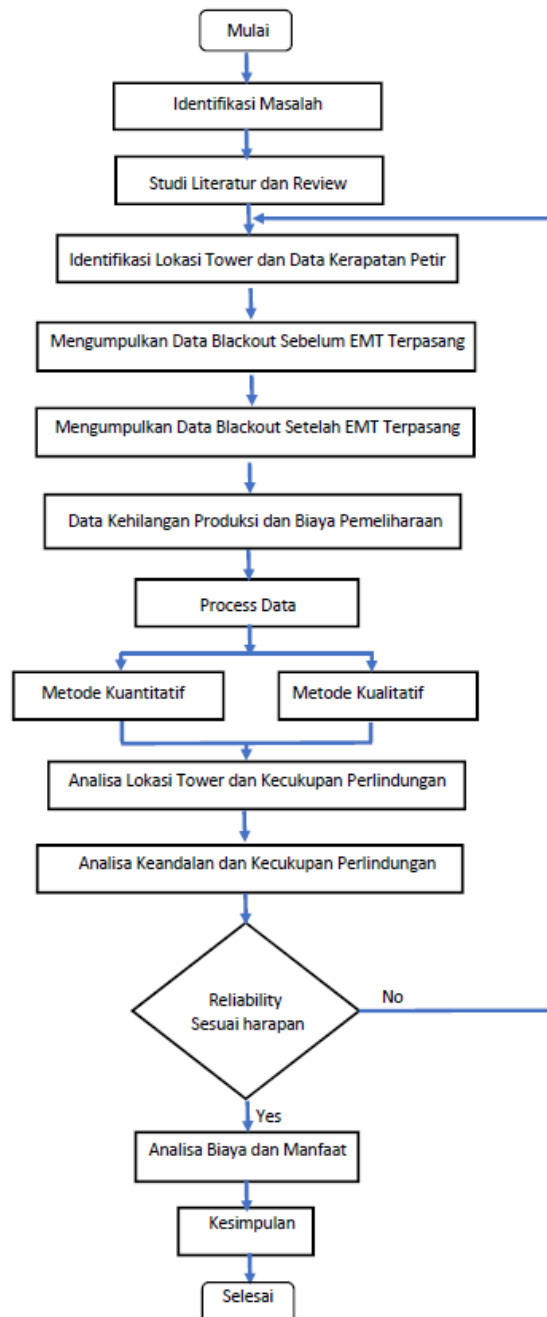
$$MTTF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \left. \frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda} \right|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.22)$$

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 DIAGRAM ALUR PENELITIAN

Prosedur penelitian secara garis besar digambarkan dalam diagram alir di bawah ini sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 TEMPAT DAN WAKTU PENELITIAN

Lokasi penelitian adalah SUTT 150 kV dari PLTA Balambano, Larona, Karebbe dan Thermal Switchyard yang terbentang sepanjang 25 – 35 km dan berada pada batas 50 km x 50 km di sebagian kecil wilayah ijin usaha pertambangan PT. Vale Indonesia. Pengambilan data dilakukan sejak awal Januari 2018 dengan mengambil data historis sejak tahun 2008 hingga pertengahan tahun 2018.

3.3 PENGUMPULAN DATA

Gambar 3.1 dapat dijelaskan tahapan-tahapan yang ada pada diagram alir penelitian yang akan dilakukan yaitu sebagai berikut ini.

- a. Tahap pertama, memulai suatu penelitian dengan mempersiapkan semua yang akan dilakukan.
- b. Tahap ke dua, pengambilan data yang berisi lokasi seluruh tower 150 kV menggunakan teknologi GPS, pengambilan peta data kerapatan petir pada wilayah operasional PT. Vale Indonesia, dan menyesuaikan koordinat bumi antara keduanya.
- c. Tahap ke tiga, mengumpulkan data historis blackout sebelum terpasang EMT.
- d. Tahap ke empat, mengumpulkan data historis blackout setelah terpasang EMT.
- e. Tahap ke lima, mengumpulkan data kehilangan produksi akibat blackout dan biaya pemeliharaan jaringan 150 kV.
- f. Tahap ke enam, Memproses data-data yang ada melalui perhitungan, memisahkan data yang tidak terkait dengan petir dengan data yang utama khususnya mengenai blackout akibat pengaruh *back flash over* dan *shielding failure*.
- g. Tahap ke tujuh, melakukan analisa berkelanjutan yaitu analisa lokasi tower dan ketercukupan perlindungan,
- h. Tahap ke delapan, analisa keandalan dan ketercukupan perlindungan saat sebelum dan sesudah pemasangan EMT.
- i. Tahap ke sembilan, analisa biaya.
- j. Tahap ke sepuluh, pengambilan kesimpulan.

3.4 DATA TOWER DAN LOKASI GPS

Identifikasi nomor tower dilakukan dengan menggunakan beberapa gambar autocad dari **engineering document folder (Eng-Doc)**. Gambar ini akan dipakai untuk menentukan urutan titik lokasi tower berdasarkan penomoran tower dan disesuaikan dengan data GPS (Global Positioning System). Jenis peralatan GPS yang digunakan adalah Garmin Oregon 650 dengan spesifikasi yang sesuai dengan kebutuhan penelitian ini.

GPS dilokasikan pada setiap kaki tower dan diset up sebagai lokasi tower tersebut sehingga membutuhkan akses ke lokasi. Pengambilan data ini membutuhkan survey lapangan yang berat dan membutuhkan banyak tenaga surveyor dan land clearing (pembersihan semak dan pohon yang menghambat jalur akses ke tower).

Akurasi data lokasi tower sangat penting untuk disesuaikan dengan data kerapatan petir, data kerapatan petir diperoleh dari peta petir dunia (Global Lightning Worldwide) yang terupdate. Data kerapatan petir diambil dalam luasan 50 km x 50 km dan dibuat menjadi lebih detail dalam kisaran 30 km x 30 km. Pengambilan data kerapatan berada pada bujur timur antara 121.15 – 121.37⁰ E dan -2.75 - -2.5510⁰ S. Dari sini akan terlihat detail jumlah sambaran/km²/year dan memudahkan dalam estimasi nilai kerapatan petir atau GFD (Ground Flash Density).

3.5 DATA OUTAGE/ BLACKOUT JARINGAN TRANSMISI

Dalam hal data outage/ blackout jaringan transmisi bersumber dari data historis pemeliharaan, data operasi, laporan kegagalan (breakdown report). Data yang berhasil dikumpul dan dirangkum untuk kebutuhan penelitian ini adalah data dari tahun 2008 – 2015 (sebelum terpasang EMT) dan dari 2015 – 2018 (setelah terpasang EMT).

Data ini diproses sedemikian rupa menggunakan metode kualitatif dan kuantitatif sehingga diperoleh data yang akurat dan hanya terkait kegagalan yang menyebabkan blackout akibat sambaran petir pada jaringan transmisi 150 kV. Dari

data ini akan diperlihatkan perbedaan yang signifikan sebelum pemasangan dan setelah pemasangan EMT dalam bentuk tabel.



Gambar 3.2 Kegagalan yang khas terjadi pada pin insulator 150 kV akibat sambaran petir (gambar diambil pada tower KR#7B)

Perhitungan keandalan atau reliability, exponential cumulative distribution function dan exponential probability distribution function dapat dihitung menggunakan formula yang telah diuraikan pada bab 2 (teori dasar) menggunakan data-data akurat yang telah diproses. Akan dibuatkan masing-masing kurva yang memperlihatkan perbandingan antara sebelum dan setelah terpasang EMT. Proses data untuk evaluasi dana analisa menggunakan metode tradisional dengan Excel Software dan melakukan verifikasi menggunakan Reliability Analysis Software (RES) (Ebeling C, 2010).

3.6 ANALISA BIAYA DAN MANFAAT

3.6.1 Analisa Biaya dan Manfaat kehilangan Produksi dan Pemeliharaan

Data terkait pengurangan biaya (cost reduction) akibat perbaikan atau biaya pemeliharaan pertahun diperlihatkan. Demikian pula kehilangan produksi (production loss) akibat kegagalan/ blackout akan dihitung. Tujuan dari analisa biaya ini untuk memperlihatkan korelasi dari manfaat sistem EMT yang

meningkatkan keandalan SUTT 150 kV dalam mengurangi biaya pemeliharaan dan kehilangan produksi akibat pengaruh sambaran petir.

Metode yang sama pada perhitungan keandalan sistem akan ditampilkan pula kurva untuk mengetahui signifikansi manfaat setelah sistem EMT dipasang dengan memperlihatkan kurva biaya pemeliharaan dan biaya kehilangan produksi karena total blackout.

Beberapa asumsi diambil berdasarkan pengalaman seperti jika terjadi blackout misalnya:

- Unit produksi berdasarkan pengalaman akan kembali beroperasi normal 5 jam setelah aliran daya kembali normal.
- Jika terjadi 1 saluran dari 4 saluran yang paralel rusak karena sambaran petir maka ketiga saluran lainnya bisa dikembalikan normal dengan kapasitas aliran daya yang sama tanpa penurunan kapasitas.
- Perubahan tarif pekerja dalam mata uang USD (\$) sepanjang tahun 2008 – 2018 tidak terlalu signifikan.

Adapun beberapa hal dalam pembiayaan yang akan di pakai dalam perhitungan ini dapat diuraikan sebagai berikut,

- Ketika terjadi blackout akibat pengaruh sambaran petir, akan terjadi kehilangan produksi. Metode perhitungan menggunakan formula berikut:

$$\text{Total Ni loss/ hour} = ((\text{CalcT/day}) \times \text{NiG} \times \text{Recov.}) / 24 \quad (3.1)$$

Dimana,

Total Ni loss/ hour = total kehilangan produksi nickel per jam (ton/ jam)

CalcT/day = target produksi calcine perhari (ton calcine/ hari)

NiG = nickel grade (%)

Recov. = *calcine nickel recovery* (%)

Setelah diperoleh berapa ton nickel per jam yang hilang maka bisa dihitung berapa biaya kehilangan dalam produksi jika setiap kejadian blackout membutuhkan 5 jam waktu untuk kembali beroperasi normal. Kerugian yang dialami selama 5 jam akan dikonversi sebagai kehilangan produksi (\$)

berdasarkan harga rata-rata nickel pada waktu itu menggunakan data London Metal Exchange (LME).



Gambar 3.3 Nickel price from London Metal Exchange (LME)

- Biaya observasi adalah biaya reguler yang dilakukan oleh pihak PT. Vale dan kontraktor untuk meyakinkan kondisi di sekitar tower mencakup kondisi jaringan, struktur, tanah, dan akses jalan akibat tanaman liar. Observasi ini dilakukan *dua kali setahun* dan setiap observasi membutuhkan waktu selama dua minggu (10 hari kerja) dan 8 jam kerja per hari dengan menyusuri tower dari Larona ke Thermal Switchyard dan dari Larona ke Karebbe melalui PLTA Balambano.

Adapun personil yang terlibat dalam observasi ini dengan rate manhours yang berlaku sebagai berikut:

Tabel 3.1 Jumlah petugas observasi reguler dan tarifnya

Petugas observasi	Rate (\$)	Deskripsi
Operator dan surveillance	7/ manhours	Terdiri dari 2 operator dan 2 kontraktor surveillance
Maintenance (electrician)	7/ manhours	Terdiri dari 3 orang electrician
Land clearing	6/ manhours	2 orang kontraktor

- Biaya perbaikan pin insulator karena dampak back flash over atau shielding failure menggunakan standar biaya kontraktor yang terikat oleh perjanjian kerja dengan perusahaan.

Tabel 3.2 Biaya setiap perbaikan insulator tower

Unit biaya	Qty (set)	Price/unit (IDR)	Total price (\$)
Project management (25% dari total biaya perbaikan)	1	15,925,000.00	1,098.275862
Penggantian insulator (2 set terdiri 10 pin insulator/set)	2	25,000,000.00	3,448.275862
Sewa alat	1	5,700,000.00	393.103450
Insulator porcelain (biasanya terdapat 4 pin yang rusak)	4	2,000,000.00	551.724138
Budget required per activities		Total	5,491.379310

Sumber: On call contract PT. Celebes Engineering under PT. Vale Indonesia.

3.6.2 Kapitalisasi Proyek dan Manfaatnya

Untuk mengetahui peranan peralatan proteksi EMT pada SUTT terhadap besarnya investasi yang dikeluarkan, dilakukan juga analisa biaya dan manfaat dengan menggunakan metode sebagai berikut:

a. Metode periode pengembalian (*payback period*)

Metode ini menggunakan penilaian pada suatu proyek investasi berdasarkan lamanya investasi tersebut tertutupi dengan besarnya pemasukan atau aliran kas masuk. Dengan kata lain bahwa jangka waktu kembalinya investasi yang telah dikeluarkan melalui keuntungan yang diperoleh dari suatu proyek yang telah dibuat. Perhitungan dengan metode ini menggunakan formula sebagai berikut:

Jika arus kas per tahun jumlahnya berbeda

$$\text{Periode pengembalian} = n + (a-b) / (c-b) \times 1 \text{ tahun} \quad (3.2)$$

Dimana,

n = tahun terakhir jumlah arus kas masih belum menutupi investasi awal

a = jumlah investasi awal

b = jumlah kumulatif arus kas pada tahun ke - n

c = jumlah kumulatif arus kas pada tahun ke n + 1

Jika arus kas per tahun jumlahnya sama maka menggunakan formula:

$$\text{Periode pengembalian} = (\text{investasi awal} / \text{ arus kas}) \times 1 \text{ tahun} \quad (3.3)$$

Hasil perhitungan ini akan menentukan apakah periode pengembalian lebih cepat (layak) atau periode pengembalian lebih lama (tidak layak). Jika dihadapkan pada dua atau lebih pilihan proyek, maka yang akan dianggap layak dan menjadi pilihan untuk dilaksanakan adalah proyek yang lebih cepat.

b. Metode pengembalian investasi (return of investement)

Metode ini digunakan untuk mengevaluasi efisiensi sebuah investasi dibandingkan dengan biaya modal awal yang dikeluarkan. Metode ini dapat dihitung dengan menggunakan formula:

$$\text{ROI} = (\text{total manfaat} - \text{total biaya}) / (\text{total biaya}) \quad (3.4)$$

c. Menghitung besarnya penghematan

Menghitungnya besarnya manfaat dari EMT setelah keandalan SUTT 150 kV mengalami peningkatan keandalan dapat dilihat dari besar penghematan yang dilakukan. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan formula:

$$\text{Penghematan (saving)} = R - CC - MC - LP \quad (3.5)$$

Dimana,

R = pendapatan (revenue) berdasarkan asumsi potensi kehilangan produksi (rata-rata 8 kali blackout dalam setahun).

CC = Capital cost

MC = Maintenance cost

LP = Loss production

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan Pembahasan menjelaskan lebih lanjut mengenai hasil pemetaan antara lokasi masing-masing tower berdasarkan posisi GPS dan kerapatan petir (GFD). Akan dianalisa lebih lanjut mengenai kesesuaian 16 unit EMT yang terpasang pada 16-unit tower dan kondisi kerapatan petir pada masing-masing lokasi EMT yang ada. Hasil perhitungan perkiraan kerapatan petir pada beberapa area yang terbagi atas wilayah saluran Thermal ke percabangan Balambano dan Larona, wilayah saluran transmisi Larona, saluran transmisi Balambano dan Karebbe akan memberikan gambaran bahwa area mana yang masih membutuhkan perhatian lebih dibanding area lainnya.

Hasil perbaikan yang ditimbulkan dengan menampilkan data-data kegagalan yang menyebabkan total blackout sebelum dan setelah pemasangan EMT akan ditampilkan dengan lebih detail untuk melihat perbedaan kedua kondisi tersebut. Melakukan proses data untuk memperoleh MTTF (Mean Time to Failure), Constant Failure Rate (CFR), Reliability, Probability Density Function (PDF), Cumulative Distribution Function (CDF) dari distribusi kegagalan dimana hasilnya akan dianalisa dan dibahas lebih detail.

4.1 PEMETAAN SALURAN UDARA TEGANGAN DAN KERAPATAN PETIR

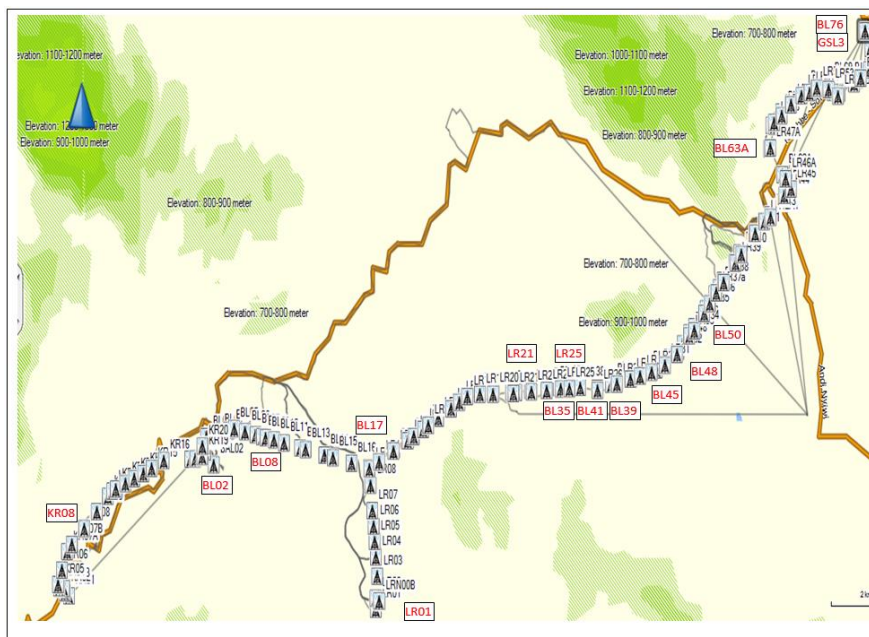
Sebagaimana yang diutarakan di atas bahwa terdapat 16 unit EMT yang terpasang pada tower transmisi 150 kV yang dioperasikan oleh Departemen Utilities di bawah perusahaan PT. Vale Indonesia. Adapun lokasi pemasangan unit EMT sebagai berikut:

- Tower Larona (LR) yang terdiri dari tower LR#01, LR#21, dan LR#25. Karena kedekatan antara saluran transmisi Balambano maka ketiga lokasi peralatan proteksi petir ini memberikan perlindungan kepada tower-tower Balambano yang berdekatan.
- Tower Balambano yang terdiri dari tower BL#02, BL#08, BL#17, BL#35, BL#39, BL#45, BL#48, BL#50, BL#63, BL#75. Terkecuali

BL#02 dan BL#08, seluruh EMT yang terpasang pada tower Balambano ini akan menyediakan perlindungan pada tower larona yang berdekatan.

- Tower Karebbe, hanya tersedia satu unit EMT berdekatan dengan switchyard PLTA Karebbe.
- Terdapat juga satu unit pada Thermal Switchyard yang berdekatan dengan pabrik pengolahan nikel.

Hasil observasi menunjukkan bahwa jaringan transmisi 150 kV terbentang pada permukaan yang berbukit dan tanah terbuka dari Thermal Switchyard hingga ke PLTA Balambano, Larona dan Karebbe pada ketinggian ± 600 meter dari permukaan laut. Pemetaan menggunakan GPS menunjukkan lokasi tower seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut:

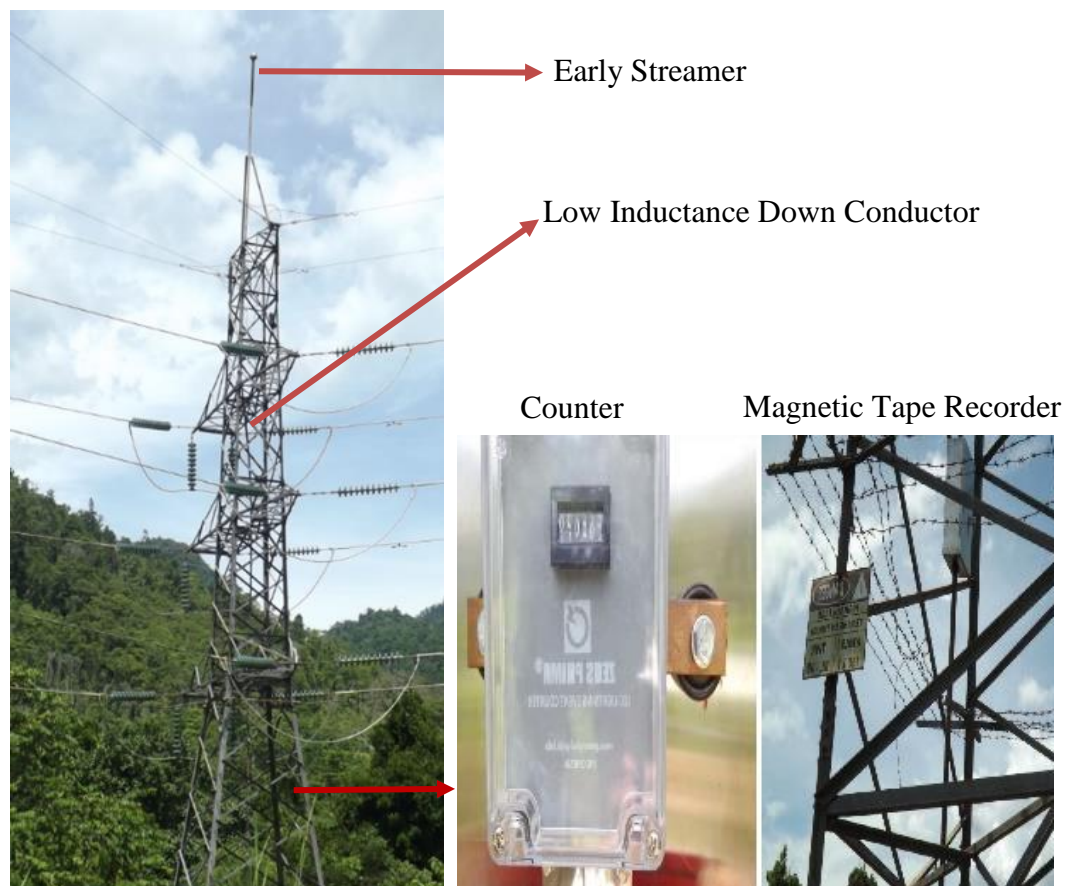


Gambar 4.1 Saluran Transmisi 150 kV yang diobservasi menggunakan EMT

Gambar 4.1 menunjukkan lokasi tower pada Thermal Switchyard sudut kanan atas dimana terdapat EMT pada tower BL#76 dan GS#L3. Dari lokasi ini jalur tower Balambano dan Larona berdekatan dan terbagi menjadi dua pada BL#17. Jalur transmisi Larona berbelok ke arah bawah dan terdapat satu EMT pada tower LR#01. Jalur Larona terus ke arah barat dimana terdapat EMT pada tower BL#08

dan BL#02. Dari switchyard Balambano jaringan transmisi 150 kV ke arah PLTA Karebbe dimana hanya terdapat satu unit EMT pada tower KR#08.

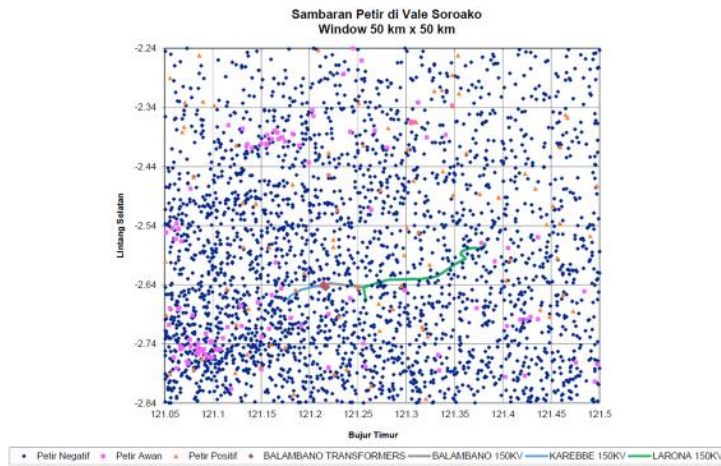
Peralatan EMT sendiri terdiri dari *Early Streamer* pada puncak tower, *Down Conductor* berupa kabel dengan induktansi yang rendah ($< 0.3\mu\text{H/m}$), *Magnetic Tape Recorder* untuk membaca besar arus petir, dan *Counter* untuk menghitung jumlah sambaran ke tower sebelum ditanahkan menggunakan pentahanan tower (*tower grounding*).



Gambar 4.2 Komponen *Extended Mast Terminal* dengan *Early Streamer*, *Down Conductor*, *Magnetic Tape Recorder*, dan *Counter*

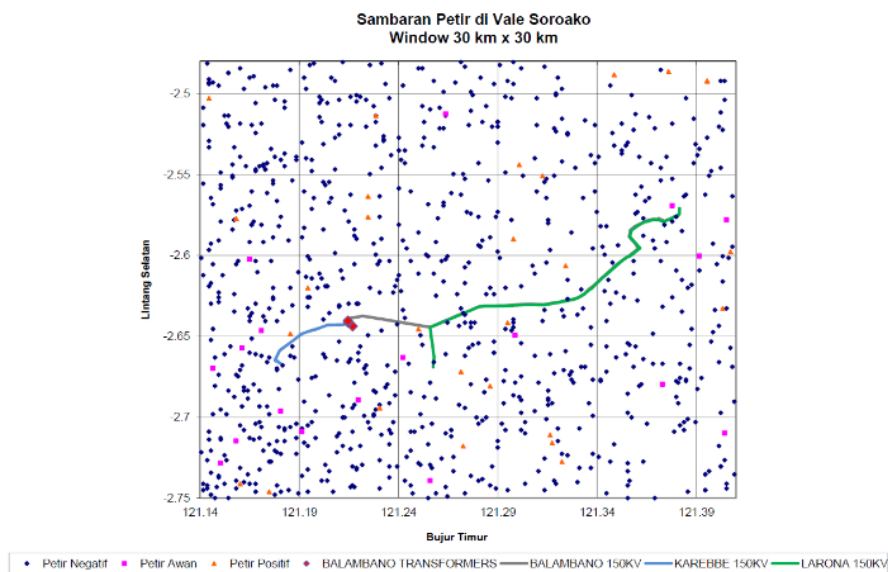
Lebih lanjut dilakukan pengambilan data dari peta kerapatan petir dunia yang menunjukkan jumlah sambaran/ km^2/tahun pada area tertentu. Untuk wilayah dimana terdapat jaringan transmisi 150 kV PT. Vale Indonesia berada pada area dengan posisi bumi $-2.75 - -2.5510^0\text{S}$ (Lintang Selatan) dan $121.15 - 121.37^0\text{E}$ (Bujur Timur). Data petir lokal pada wilayah tersebut di atas dibuat dalam ukuran

50 km x 50 km sehingga diperoleh titik-titik sambaran petir yang terjadi dalam setahun.



Gambar 4.3 Sambaran petir wilayah Sorowako dalam area 50 x 50 km (R. Zoro, 2015)

Kemudian untuk lebih detail dilakukan pembesaraan área (Zoom-In) dalam kisaran 30 x 30 km lalu meletakkan posisi tower berdasarkan GPS location maka diperoleh posisi tower transmisi 150 kV seperti pada gambar berikut,



Gambar 4.4 Sambaran petir wilayah Sorowako dalam area 30 x 30 km (R. Zoro, 2015)

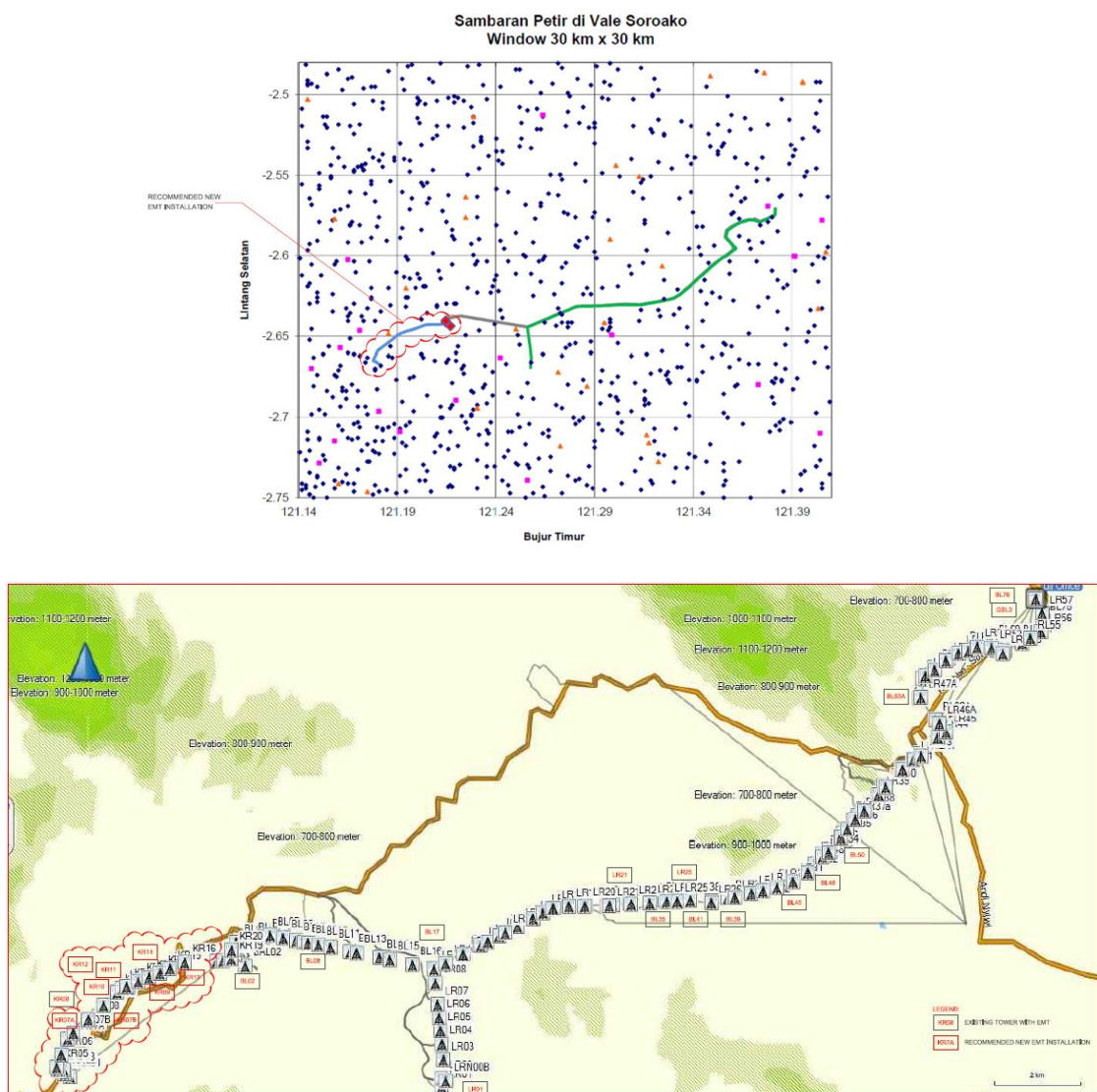
Dari gambar 4.4, dapat dilakukan perhitungan estimasi ground flash density (GFD) dengan membagi dalam beberapa area sepanjang yang dilalui tower dimana hasilnya dapat dilihat pada table berikut:

Tabel 4.1 Hasil perhitungan estimasi Ground Flash Density (GFD)

150 kV transmission line window 30 km x 30 km		
<i>Map</i>	<i>Area (km²)</i>	<i>Ground Flash Density (flash/km²/year)</i>
Larona (LR) – individual line		
Average	4	3.6
Maximum	1	
Minimum	1	
Balambano (BL), Larona (LR) to Thermal		
Average	135	6.3
Maximum	1	
Minimum	1	
Balambano (BL) – individual line		
Average	12	6.6
Maximum	1	
Minimum	1	
Karebbe (KR)		
Average	15	7.16
Maximum	1	
Minimum	1	
Total		
Average	166	5.91
Maximum	1	
Minimum	1	

Dari hasil pemetaan dan perhitungan estimasi kerapatan petir atau ground flash density SUTT 150 kV, *area yang tertinggi sambaran petir ke tanah dalam luasan per km² dalam setahun adalah area Karebbe* dibandingkan dengan area lain berdasarkan urutannya yaitu area Balambano (area yang terdapat 2 saluran Larona dan Balambano yang menuju Thermal Switchyard) dan Larona (saluran tunggal yang ke arah selatan). Area Karebbe yang mendapatkan paparan sambaran petir tertinggi dibanding area lain hanya dilengkapi dengan 1 unit EMT pada KR#08 dan area ini sangat minim terhadap perlindungan petir.

Saluran transmisi Karebbe pertama kali diintegrasikan ke SUTT Balambano tahun 2011. Kerapatan petir yang tinggi pada area Karebbe menyebabkan potensi terjadinya kerusakan SUTT 150 kV yang sangat besar di kemudian hari (R. Zoro, 2015). Berdasarkan analisa di atas maka dapat ditentukan zona yang membutuhkan perlindungan seperti yang diperlihatkan pada gambar 4.5. SUTT yang berada pada kerapatan petir yang tinggi, secara historis pernah mengalami kegagalan dan berada pada tempat yang terbuka menyebabkan tower KR#7A, #7B, #09, #10, #11, #12, #13, dan tower KR#14 memerlukan penambahan EMT.

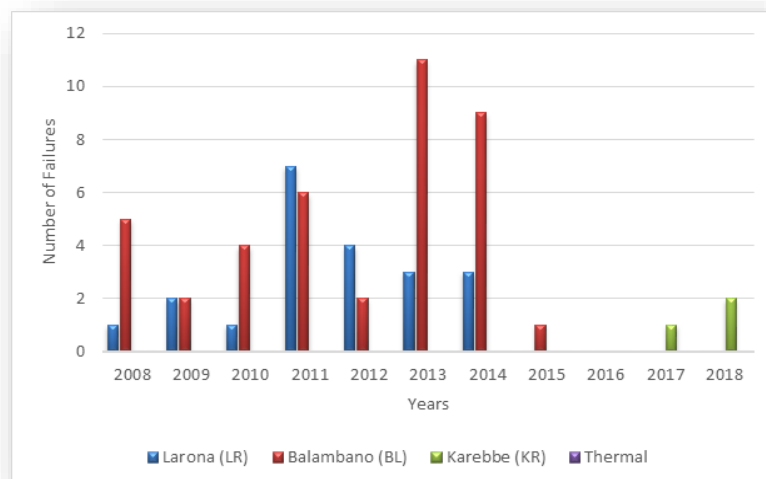


Gambar 4.5 Rekomendasi penambahan EMT pada area SUTT 150 kV Karebbe

4.2 DATA HISTORIS KEGAGALAN SALURAN TRANSMISI

Penempatan 16 unit EMT pada tahun 2014 – 2015 hanya berdasarkan data historis kegagalan akibat sambaran petir pada tower tertentu yang menyebabkan blackout. Keterbatasan anggaran pengadaan EMT juga disatu sisi menjadi kendala disamping penerapan teknologi ini masih baru sehingga hanya 16 unit pada saat itu yang dipasang. Alhasil penetapan dilakukan tanpa mempertimbangkan kondisi lingkungan dalam kaitannya dengan besar kerapatan petir pada suatu area. Ketika terjadi sambaran petir, insulator mengalami tegangan berlebih akibat BFO atau SF yang menyebabkan pin-pin insulator pecah atau karena kawat tanah (ground wire) yang terputus. Akibatnya terjadi hubung singkat fasa ke tanah dan memicu total blackout.

Dari data maintenance dan operation yang tersimpan dalam server [\\netapp8\Utilities Departement folder](#) yang berisi informasi observasi tower, perbaikan, dan laporan kegagalan (breakdown report), telah berhasil terkumpul data dari tahun 2008 – 2015 sebelum EMT terpasang dan data dari tahun 2015 – Juni 2018 setelah EMT terpasang. Setelah mengolah data, dan hanya melibatkan data terkait kegagalan, blackout dan perbaikan akibat kerusakan pin insulator maka diperoleh informasi jumlah kegagalan pada sistem selama periode tersebut terlihat pada gambar berikut,



Gambar 4.6 Jumlah kegagalan per tahun pada SUTT PT Vale Indonesia

Pada gambar 4.5 menunjukkan statistik kegagalan pada SUTT yang menyebabkan pemadaman total (total blackout) akibat pengaruh sambaran petir. *Dari tahun ke tahun sejak tahun 2008, kegagalan didominasi pada SUTT Balambano dan Larona dimana Balambano menjadi yang tertinggi dengan rata-rata kegagalan hingga tahun 2015 sebesar 8 kali total blackout pertahun. SUTT Balambano menjadi yang tertinggi mengalami kegagalan yang menyebabkan kerusakan pada pin insulator yang memicu hubung singkat fasa ke tanah.*

Pada tahun 2011, SUTT Karebbe yang telah dihubungkan ke SUTT Balambano mulai dioperasikan. Pada tahun 2015, setelah 16 unit EMT terpasang terjadi penurunan kegagalan SUTT karena pengaruh petir sangat signifikan. Dari tahun 2015 hingga tahun 2018 mengalami 3 kali blackout akibat sambaran petir pada SUTT namun terjadi pada lokasi dimana EMT tidak terpasang dan di area yang minim perlindungan disekitar area SUTT Karebbe. Dua kejadian beruntun pada tower KR#7B di bulan Desember 2017 dan Januari 2018 lalu disusul tower KR#10 yang mengalami kerusakan beberapa pin insulator akibat sambaran petir dan menyebabkan total blackout. Sejak 2015 – 2018 setelah pemasangan EMT, *rata-rata kegagalan SUTT akibat sambaran petir menurun drastis kurang dari 1 kali total blackout pertahun.*

4.3 EVALUASI KEANDALAN SUTT 150 KV

Sebagaimana yang dijelaskan pada sub bab 2.5 terkait metode perhitungan reliability function, cumulative distribution function dan probability distribution function maka kita akan merujuk ke persamaan 2.18, 2.19 dan 2.20. Gambar 4.5 memberikan informasi jumlah kegagalan dimana pada setiap kegagalan terjadi sejak dari awal peralatan berfungsi hingga mengalami kegagalan dijadikan sebagai konsep waktu dalam reliability yang disebut time to failure (TTF).

Data TTF yang diberikan pada Lampiran 1, memudahkan perhitungan untuk mencari kurva reliability, CFD dan PDF. Suatu distribusi kegagalan menggunakan constant failure disebut exponential probability distribution. Model Exponential atau CFR ini adalah satu dari beberapa distribusi kegagalan yang dipakai dalam dunia reliability engineering. Kegagalan-kegagalan yang terjadi akibat kejadian yang acak atau kebetulan akan mengikuti distribusi ini dan sangat dominan selama

masa berfungsi suatu sistem atau komponen. Fungsi Exponential distribution ini diterima dengan luas dalam pekerjaan analisa keandalan sistem elektroteknik khususnya komponen elektronik (Bloch H.P.,1993, Geitner F.K., 1993).

Dari data MTTF maka dilakukan perhitungan constant failure rate dengan asumsi bahwa:

$$\lambda_{(t)} = \lambda, t \gg 0, \lambda > 0 \quad 4.1$$

Sesuai dengan persamaan 2.22, maka,

$$\lambda = \frac{\text{failures}}{MTTF} \quad 4.2$$

Berdasarkan persamaan 4.2, maka diperoleh perbedaan nilai CFR (λ) pada periode 2008 – 2015 (sebelum pemasangan EMT) dan periode 2015 – 2018 (setelah pemasangan EMT).

Jumlah kegagalan (failures) = 61 (periode 2008 – 2015)

Jumlah kegagalan (failures) = 3 (periode 2015 – 2018)

Maka besar nilai λ pada kedua kondisi yang berbeda cukup signifikan adalah:

$$\lambda_{2008-2015} = 0.023772408 \text{ (tanpa penggunaan EMT)}$$

$$\lambda_{2015-2018} = 0.002485501 \text{ (menggunakan EMT)}$$

Tabel 4.2 Nilai constant failure rate (CFR) pada dua kondisi yang berbeda

Duration	Maintenance Failure Report		
	Number of Failures	Operating Time (days)	λ
2008 – 2015 (No EMT)	61	2566	0.0238
2015 – Jun 2018 (EMT)	3	1207	0.00249

Nilai λ dimasukkan dalam persamaan berikut,

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{merupakan persamaan reliability} \quad (4.3)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{merupakan persamaan exponential distribution} \quad (4.4)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \text{ merupakan persamaan cumulative distribution} \quad (4.5)$$

Evaluasi keandalan SUTT 150 kV dengan perhitungan menggunakan persamaan di atas dilakukan pada reliability 50%, 60%, 65%, 70% dan 75%. Hasil perhitungan dapat diperlihatkan pada table berikut:

Tabel 4.3 Hasil perhitungan waktu operasi dengan keandalan yang bervariasi pada dua sistem yang berbeda (dengan dan tanpa EMT)

Reliability $R(t)$	Operating Time (days)	
	2008 – 2015 (No EMT)	2015 – Jun 2018 (EMT)
$R_{50\%}$	29	278
$R_{60\%}$	21	205
$R_{65\%}$	18	173
$R_{70\%}$	15	143
$R_{75\%}$	12	115

Merujuk ke persamaan 2.18 dan 4.3, hasil perhitungan keandalan atau reliability yang diperoleh untuk $R_{70\%}$ (tanpa EMT) terjadi pada waktu operasi,

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda dt\right] = e^{-\lambda t}$$

$$0.7 = e^{-0.0238t}$$

Kemudian,

$$0.7 = e^{-0.0238t}$$

$$\ln 0.7 = -0.0238t$$

$$t = \frac{\ln 0.7}{-0.0238}$$

$$t = 15 \text{ (hari)}$$

Sedangkan $R_{70\%}$ (dengan EMT) terjadi pada waktu operasi,

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda dt\right] = e^{-\lambda t}$$

$$0.7 = e^{-0.00249t}$$

Kemudian,

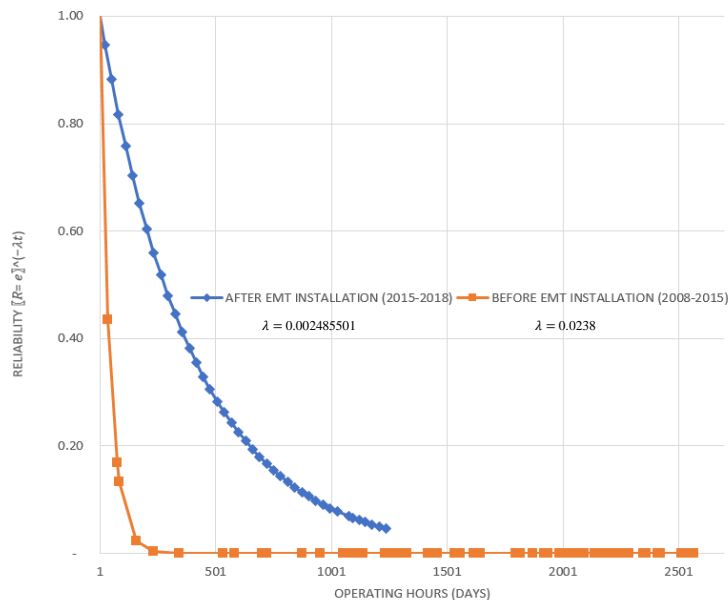
$$0.7 = e^{-0.00249t}$$

$$\ln 0.7 = -0.00249t$$

$$t = \frac{\ln 0.7}{-0.00249}$$

$$t = 143 \text{ (days)}$$

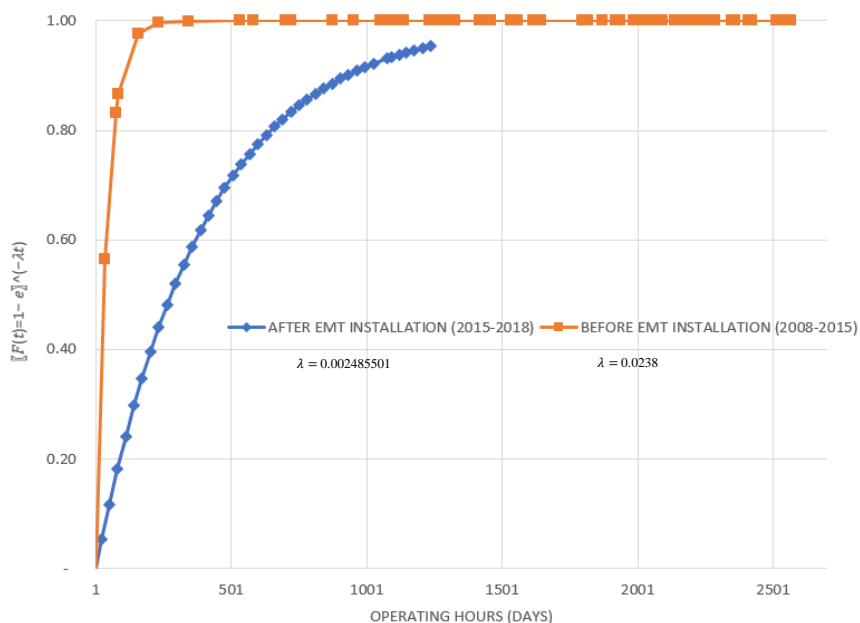
Hasil perhitungan diletakkan dalam kurva reliability vs operating time sebagaimana diperlihatkan pada gambar berikut menunjukkan perbedaan antara kedua kondisi dan pengaruhnya terhadap operasional sistem. Grafik ini memperlihatkan sistem mana yang lebih andal dengan EMT dan tanpa EMT.



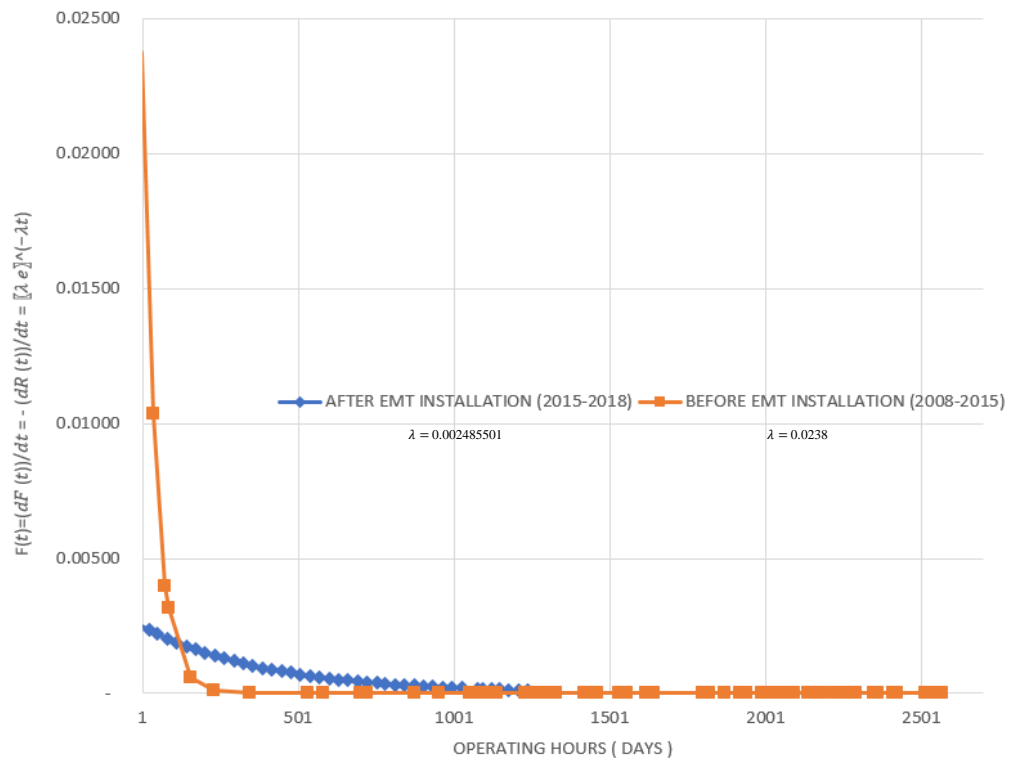
Gambar 4.7 Fungsi keandalan eksponensial sebelum dan setelah pemasangan EMT

Grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.7 menunjukkan bahwa grafik setelah pemasangan EMT lebih di atas daripada sebelum pemasangan EMT. Nilai keandalan pada sistem tanpa EMT yang tertinggi waktu operasionalnya pada $R_{50\%}$ yaitu selama 29 hari atau hanya 696 jam. Sedangkan untuk sistem dengan EMT pada $R_{50\%}$ waktu operasionalnya 278 hari, $R_{60\%}$ waktu operasionalnya 205 hari dan $R_{70\%}$ waktu operasionalnya 143 hari. Dengan keandalan mencapai 70% maka bagian harus mendapatkan notifikasi oleh maintenance system software seperti SAP atau IVARA kepada personil bagian pemeliharaan untuk melakukan pemeriksaan sebelum hari ke 143. Dengan kata lain, peningkatan yang sangat signifikan terlihat bahwa waktu operasional meningkat dan memberikan informasi kepada bagian pemeliharaan menentukan waktu pemeriksaan peralatan sesuai dengan keandalan sistem yang diharapkan.

Kemudian dari dari persamaan 4.4 dan 4.5 berikutnya kita dapat membuat kurva exponential cumulative distribution function dan probability density function berikut,



Gambar 4.8 Fungsi distribusi kumulatif eksponensial sebelum dan setelah pemasangan EMT



Gambar 4.9 Fungsi distribusi probabilitas eksponensial sebelum dan setelah pemasangan EMT

4.4 EVALUASI BIAYA DAN MANFAAT EMT

Sebagaimana yang diuraikan pada sub bab 3.6 bahwa analisa biaya yang dilakukan dengan meninjau pengaruh EMT terhadap kehilangan produksi, biaya observasi dan pemeliharaan serta perbaikan yang akan diuraikan dengan detail.

4.4.1 KEHILANGAN PRODUKSI

Dalam menghitung kehilangan produksi, sebagaimana diuraikan sebelumnya bahwa ketika terjadi blackout maka pabrik pengolahan nickel akan kembali beroperasi normal setelah 5 jam. Dengan menggunakan persamaan 3.1 maka diperoleh:

$$\begin{aligned} \text{Total Ni loss/ hour} &= (13.4 \times 1.92\% \times 89.9\%)/24 \\ &= 9.63728 \text{ tonne nickel/ hour (ton nickel/ jam)} \end{aligned}$$

Data perhitungan (sumber PT. Vale Indonesia):

Total Ni loss/ hour = total kehilangan produksi nickel per jam (ton nickel/ jam)

CalcT/day = target produksi calcine 13.4 kT calcine/hari

NiG = nickel grade (1.92%)

Recov. = calcine nickel recovery (89.9%)

Berdasarkan hasil perhitungan jumlah produksi yang hilang dalam setiap kasus blackout pertahun dan jumlah kehilangan produksi ini dikonversi ke dalam mata uang (\$) merujuk ke harga nickel pertahun maka akan diperoleh,

Tabel 4.4 Production loss per year caused by lightning strike

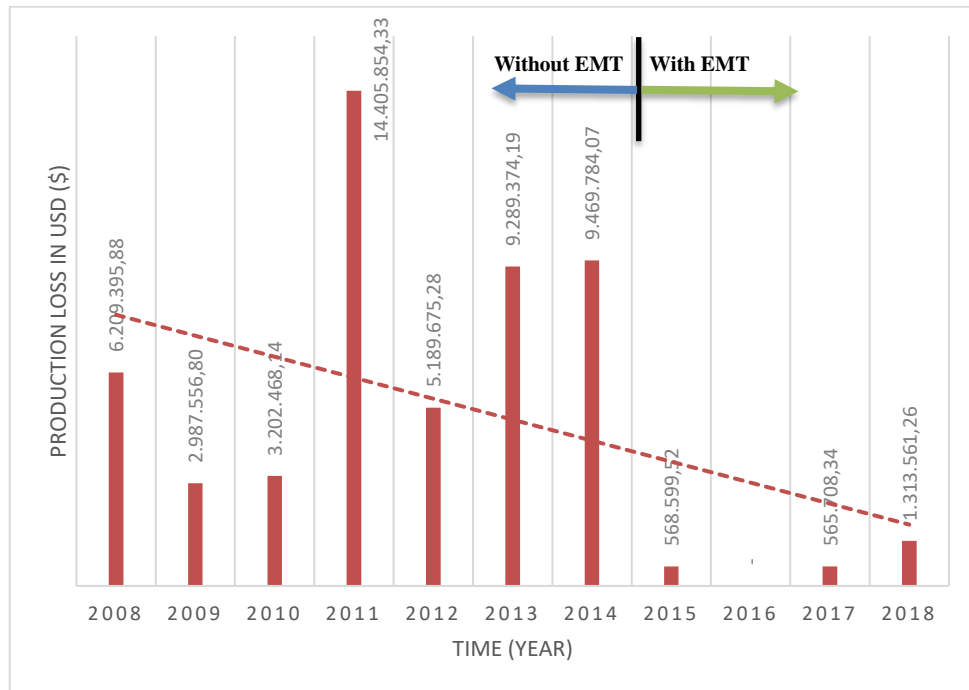
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Recovery period (hrs)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Ni Price (USD)*	21,477.00	15,500.00	13,292.00	22,997.00	17,950.00	13,770.00	16,377.00	11,800.00	10,500.00	11,740.00	13,630.00
Number of total Blackout	6	4	5	13	6	14	12	1	0	1	2
Total Production Lost Yearly (USD)	6,209,395.88	2,987,556.80	3,202,468.14	14,405,854.33	5,189,675.28	9,289,374.19	9,469,784.07	568,599.52	-	565,708.34	1,313,561.26
*Average Ni price based on LME											

Sebagai contoh perhitungan production loss tahun 2008 pada saat harga nickel berkisar USD \$ 21,477 per ton nickel. Pada tahun tersebut terjadi enam kali blackout dimana setiap blackout membutuhkan waktu 5 jam untuk bisa beroperasi normal, maka besar total kehilangan produksi tahun 2008 adalah:

$$\begin{aligned} \text{Total kehilangan produksi (2008)} &= 6 \times 5 \times 9.63728 \times 21,477 \text{ (USD \$)} \\ &= \text{USD \$ } 6,209,395.88 \end{aligned}$$

Angka ini sangat besar nilainya dan merugikan perusahaan karena kehilangan potensial profit akibat kegagalan SUTT.

Jika kehilangan produksi ditampilkan dalam bentuk kurva untuk memperlihatkan pengaruh signifikan EMT terhadap berkurangnya kehilangan produksi sebagai berikut,



Gambar 4.10 Kehilangan produksi pertahun karena sambaran petir di tower

Pada gambar 4.10 memperlihatkan penurunan jumlah blackout dan penurunan kehilangan produksi. Pada tahun 2016 tercatat dalam sejarah PT. Vale Indonesia tidak mengalami blackout sepanjang tahun (zero blackout) dan EMT turut berkontribusi dalam menjaga pengaruh sambaran petir yang akan menyebabkan kegagalan pada SUTT.

4.4.2 ANALISA BIAYA OBSERVASI

Dalam hal observasi, sejauh ini aktifitas tidak mengalami perubahan hingga saat ini baik dalam hal jumlah pekerja dan aktifitas pekerjaan. Oleh karenanya perubahan biaya observasi tidak mengalami perubahan setiap tahun. Sejak tahun 2015 terjadi perubahan signifikan jumlah kegagalan pada SUTT dan menjadi bahan pertimbangan buat Departemen Utilities untuk meninjau kembali frekuensi observasi dan jumlah pekerjanya.

Tabel 4.5 Biaya observasi SUTT pertahun

Ops & Maintenance observation (regular schedule)	USD \$										
Observation Cost	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Land Clearing	1,920.00	1,920.00	1,920.00	1,920.00	1,920.00	1,920.00	1,920.00	1,920.00	1,920.00	1,920.00	1,920.00
Tower Surveillance	4,480.00	4,480.00	4,480.00	4,480.00	4,480.00	4,480.00	4,480.00	4,480.00	4,480.00	4,480.00	4,480.00
Maintenance Electrical Tower Observation	3,360.00	3,360.00	3,360.00	3,360.00	3,360.00	3,360.00	3,360.00	3,360.00	3,360.00	3,360.00	3,360.00

4.4.3 ANALISA BIAYA PERBAIKAN SUTT TERHADAP PETIR

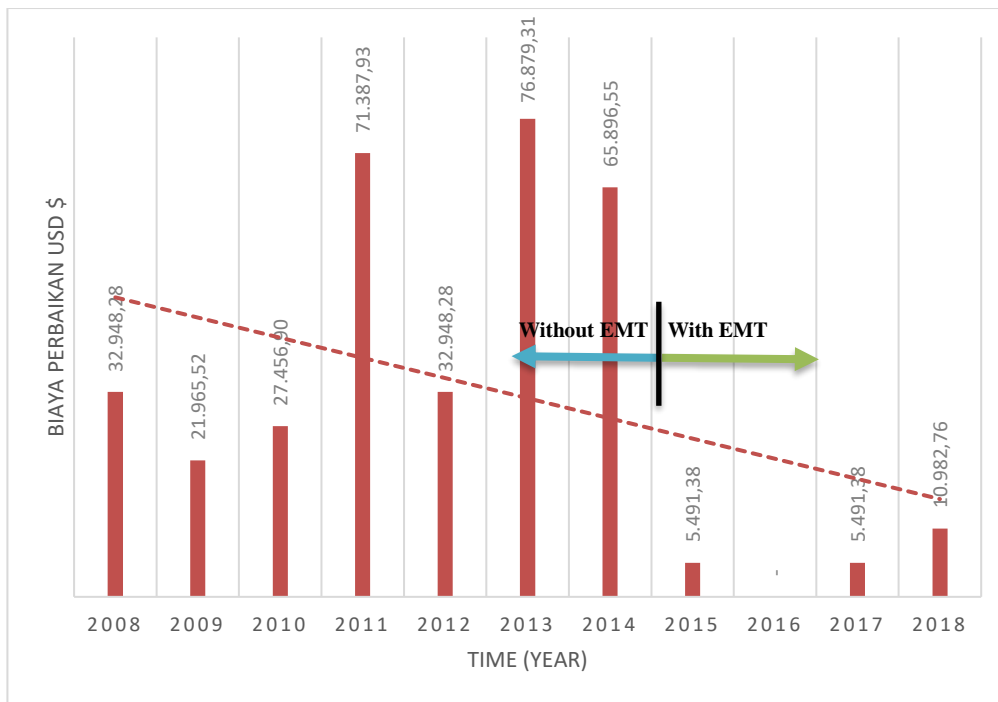
Dalam beberapa kejadian akibat sambaran petir ditemukan 2 set pin insulator yang mengalami kerusakan dimana terdapat sekitar 2 insulator per set yang ditemukan rusak (total 4 insulator pin yang pecah). Ketika penggantian insulator, dilibatkan kontraktor yang terikat kontrak dengan Departemen Utilites sehingga biaya penggantian sudah ditetapkan sebelumnya.

Adapun biaya-biaya yang diterapkan oleh kontraktor ketika melakukan pekerjaan adalah sebagai berikut:

- a. Project management (headcount) berkisar 25% dari total biaya pekerjaan (25% dari total b, c dan d).
- b. Biaya pekerjaan penggantian 2 set insulator berkisar US \$ 3,448.28
- c. Biaya sewa alat sebesar US \$ 393.10
- d. Harga 4-unit pin insulator berkisar US \$ 551.72

Dengan total biaya perbaikan \pm US \$ 5,491.38

Nilai ini kemudian dihitung dari tahun 2008 hingga 2018 berdasarkan aktifitas perbaikan ketika terjadi blackout mengikuti kurva berikut,



Gambar 4.11 Biaya perbaikan atau penggantian insulator pada SUTT

Biaya perbaikan atau penggantian insulator mengalami trend penurunan yang signifikan sejak awal tahun 2015 ketika EMT sudah beroperasi. Kejadian beruntun pada tahun 2017 dan 2018 pada tower Karebbe menyebabkan penambahan biaya perbaikan namun tidak signifikan disbanding tahun sebelum EMT terpasang.

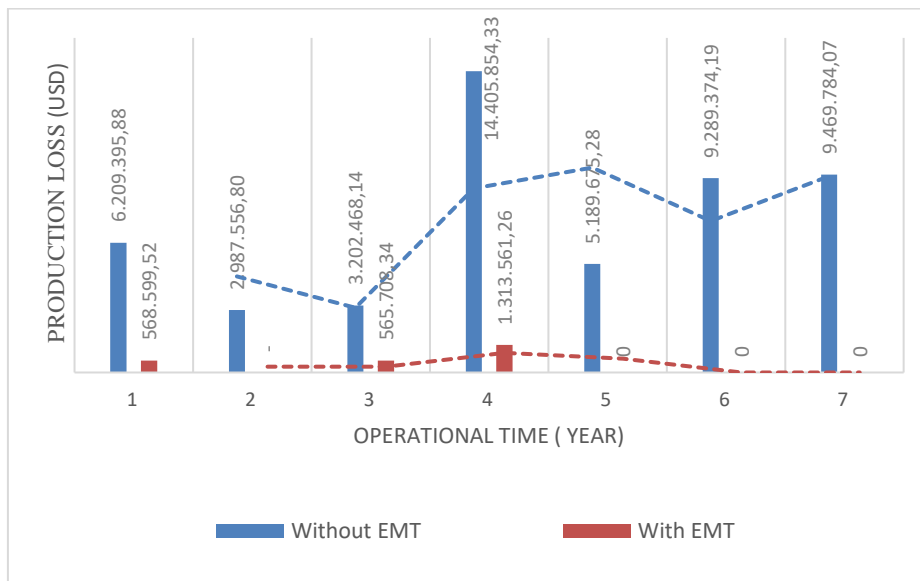
4.4.4 PROJECT KAPITALISASI DAN MANFAAT ALAT PROTEKSI EMT

Pemasangan 16 unit EMT dimulai sejak awal tahun 2014 hingga beroperasi penuh pada awal 2015. Diharapkan peralatan ini beroperasi selama 15 tahun dengan biaya pemeliharaan minimum. Project ini menghabiskan dana proyek kapital sebesar US \$ 199,999.12 (dana awal) dengan rincian sebagai berikut:

- a. Biaya instalasi yang dibayarkan pada tahun 2014 sebesar US \$ 40,000 dan tahun 2015 sebesar US \$ 49,655.12
- b. Biaya Material pada tahun 2014 sebesar US \$ 100,344
- c. Biaya commissioning start-up pada awal tahun 2015 sebesar US \$ 10,000

Jika dibandingkan manfaatnya dalam mengurangi kegagalan pada SUTT akibat sambaran petir, biaya penambahan unit EMT tower transmisi yang

diperkirakan mendapat paparan petir yang tinggi lebih lebih ekonomis dimana mampu mengurangi kehilangan produksi secara signifikan. Jika kita lihat kurva perbandingan kehilangan produksi sebelum dan setelah EMT terpasang, nampak dengan jelas kehilangan produksi yang tinggi sebelum terpasang (blue line) dibandingkan setelah terpasang EMT (brown line). Dana proyek kapital yang dibutuhkan untuk membangun 16 unit EMT tambahan hanya membutuhkan dana $\pm 15\%$ dari kehilangan produksi pada tahun 2018.



Gambar 4.12 Perbandingan kehilangan produksi dengan dan tanpa EMT pada SUTT 150 kV.

Dengan peralatan EMT ini diharapkan beroperasi selama 15 tahun. Biaya perbaikan atau penggantian insulator mengalami trend penurunan yang signifikan sejak awal tahun 2015 ketika EMT sudah beroperasi. Kejadian beruntun pada tahun 2017 dan 2018 pada tower Karebbe menyebabkan penambahan biaya perbaikan namun tidak signifikan dibanding tahun sebelum EMT terpasang.

a. Menghitung periode pengembalian

Untuk memudahkan perhitungan digunakan data potensi penerimaan yang diperoleh akibat berkurangnya jumlah total blackout yang terjadi pada jaringan SUTT 150 kV (reliability improvement) dimana rata-rata kegagalan sebesar 8 kali per tahun dan juga menggunakan harga nickel per ton pada tahun tersebut. Dengan pendekatan ini maka diperoleh table yang menjelaskan tentang pendapatan yang

diperoleh dari tahun sejak EMT diimplementasikan hingga saat penelitian ini dilaksanakan.

Tabel 4.6 Pendapatan terkait manfaat EMT untuk Perhitungan Payback Period

Years	Proceeds (US\$)	Cumulative proceeds (US\$)
2015	413,000	413,000
2016	469,600	882,600
2017	410,900	1,293,500
2018	408,900	1,702,400

Dengan menggunakan formula 3.2, maka diperoleh perhitungan periode pengembalian (payback period) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Periode pengembalian} &= 2 + (199,999.12 - 882,600) / (1,293,500 - 882,600) \\
 &= 2 + (-682,600.88) / (410,900) \times 1 \text{ tahun} \\
 &= 2 - 1.661 \\
 &= \mathbf{0.34 \text{ tahun}} \text{ atau setara dengan } \mathbf{4.08 \text{ bulan}}
 \end{aligned}$$

Dimana

n = asumsi awal arus kas belum kembali di tahun ke 2 (2016)

a = dana awal proyek sebesar US\$ 199,999.12

b = jumlah kumulatif arus kas tahun ke n sebesar US\$ 882,600

c = jumlah kumulatif arus kas tahun ke n+1 sebesar US\$ 1,293,500

b. Menghitung Return of Investment (ROI)

Dengan menggunakan formula 3.4 maka diperoleh perhitungan sebagai berikut:

Tabel 4.7 Tabel perhitungan ROI

Years	Benefit/ Manfaat (US\$)	Observation Cost US\$	Repair Cost
		Keandalan (R _{70%})	US\$
2015	413,000	14,640	5,491.38
2016	469,600	14,640	
2017	410,900	14,640	5491.38
2018	408,900	14,640	10,982.76
Total	1,702,400	58,560	21,965.52

Dengan menggunakan data pada tabel 4.7 maka dapat dilakukan perhitungan ROI dimana biaya observasi disesuaikan dengan keandalan R_{70%} dimana durasi observasi berkisar 143 hari atau 4 bulan (3 kali dalam setahun). Durasi observasi yang dilakukan dua kali setahun dengan biaya sebesar US\$ 9,760 sehingga diperlukan biaya tambahan satu kali observasi dari pengeluaran sebelumnya dengan total sebesar US\$ 14,640. Besar biaya investasi awal juga menjadi komponen dalam total biaya sebesar US\$ 199,999.12

Maka besar nilai ROI adalah:

$$\begin{aligned} \text{ROI} &= ((1,702,400 - (58,560 + 21,965.52 + 199,999.12)) / (58,560 + \\ &\quad 21,965.52 + 199,999.12)) \times 100\% \\ &= (1,702,400 - 280,524.64) / (280,524.64) \times 100\% \\ &= 5.07 \times 100\% \\ &= 507\% \end{aligned}$$

ROI dengan nilai lebih besar daripada 0 maka proyek dikategorikan dapat diterima karena memberikan keuntungan 507 % dari total biaya investasi.

c. Estimasi besarnya penghematan (saving)

Dengan menggunakan formula 3.5 maka diperoleh perhitungan sebagai berikut:

Tabel 4.8 Tabel estimasi penghematan biaya peningkatan keandalan SUTT 150 kV

Years	Pendapatan kotor (US\$)	Observation Cost US\$ Keandalan (R _{70%})	Repair Cost US\$	Capital Cost US\$	Penghematan Total US\$
2015	413,000	14,640	5,491.38	199,999.12	192,870
2016	469,600	14,640			454,960
2017	410,900	14,640	5,491.38		390,769
2018	408,900	14,640	10,982.76		383,277
Total Penghematan (Saving)					1,421,875

Perhitungan ini didasarkan pada estimasi potensi penerimaan pemasukan kotor (belum dikurangi dengan jumlah kehilangan produksi) akibat berkurangnya kegagalan pada tahun setelah pemasangan EMT dengan harga nickel pada waktu tersebut. Besar total estimasi penghematan yang dilakukan pada periode 2015 – 2018 sebesar US\$ 1,607,475 dan besar penghematan ini tergantung harga nickel pada waktu tersebut. Penghematan yang sangat signifikan bisa diperoleh jika harga nickel sangat tinggi seperti pada periode 2008 – 2014.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan maka dapat disimpulkan beberapa hal yaitu:

1. Hasil pemetaan lokasi tower dan kerapatan petir di area operasional SUTT 150 kV PT. Vale Indonesia, area SUTT Karebbe memiliki kerapatan petir tertinggi di banding area lain dan membutuhkan penambahan alat pelindung petir EMT.
2. EMT mampu mengurangi kegagalan pada SUTT 150 kV akibat *back flash over dan shielding failure* dari sambaran petir.
3. Keandalan setelah pemasangan EMT pada nilai $R_{65\%}$, $R_{70\%}$, $R_{75\%}$ diperoleh pada waktu operasi 173 hari, 143 hari, dan 115 hari lebih tinggi dibanding sebelum pemasangan EMT pada nilai keandalan $R_{50\%}$ dengan waktu operasi di bawah 30 hari.
4. Sistem proteksi EMT secara ekonomis dapat membantu meningkatkan keandalan SUTT 150 kV, mengurangi kehilangan produksi dan biaya pemeliharaan yang cukup signifikan.
5. Penambahan 16 unit EMT mampu mengurangi biaya produksi sebesar US \$ 1,421,875.
6. Proyek kapitalisasi 16 unit EMT yang terpasang meningkatkan keandalan SUTT 150 kV dengan periode pengembalian (payback period) selama 0.34 tahun atau setara dengan 4.08 bulan dan ROI sebesar 507% (nilai yang dapat diterima $> 0\%$).

5.2 SARAN

Peneliti menyarankan agar penelitian tentang pemanfaatan EMT dilanjutkan pada jaringan distribusi tegangan menengah dan infrastruktur vital pada pembangkit dan pabrik pengolahan nikel.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Zoro, R. Mefiardhi, S. Hidayat and R. Mardiana, “A field Observation on Lightning Performance Improvement of Overhead Distribution Lines,” ITB J.Eng. Sci. vol. 41 B No.2, 2009, pp. 126 – 140, August, 2009.
- [2] C.E. Ebeling, An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering, The McGraw-Hill Companies, Singapore, 1997.
- [3] Ronny D.N., Silvana R.D., Dian E.P., and A. Musyafa, “Reliability Assessment of Cooling Pump For Parts Inventory Planning in Power Plant System, Paiton-Indonesia,” Advances in Natural and Applied Science, 8(13): pp. 140-146, 2014.
- [4] A. Musyafa, Ronny D.N., Silvana R.D., and S. Komayadi, “ Reliability and Maintainability Assessment of The Steam Turbine Instrumentation System for optimization Operational Availability System at Fertilizer Plant,” Advances in Natural and Applied Science, 8(13): pp. 132-139, 2014.
- [5] A. Musyafa, Sinta K., Ronny D.N., Silvana R.D., and Heri J., “ Evaluation of The Reliability and Prediction Maintenance on The Air Compressor System in Ammonia Plant PT. Pterokimia Gresik ,” Advances in Natural and Applied Science, 9(11):pp. 853-862, 2015.
- [6] R. Zoro, “Improvement of Lightning Protection System on Distribution Lines at PT Vale Indonesia” unpublished.
- [7] Ronny D.N., Totok S., and Andika B.P., “ Study on Instrument Reliability, Safety, and Quality in Waste Heat Boiler (WHB) PT Petrokimia Gresik ,” Jurusan Teknik Fisika ITS, Vol. 6 No. 1, 2011.
- [8] J.D. Campbell, A.K.S Jardine, Maintenance Excellent – Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions. NY: Marcel Dekker Inc, 2001.
- [9] H.P. Bloch, F.K. Geitner, An Introduction to Maichinery Reliability Assessment, NY: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [10] Dhillon, B.S., Reliability, Quality, and Safety for Engineers. London: CRC Press, 2005.

- [11] J. Moubray, Reliability Centered Maintenance, NY: Industrial Press Inc, 1997.
- [12] K.T. Sirait, R. Zoro, Proteksi Sistem Tenaga Bagian I – Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik, Bandung: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik, ITB, 1987
- [13] A. Arismunandar, Teknik Tegangan Tinggi. Jakarta: Ghalia Indonesia, 1983
- [14] R. Zoro, Sistem Proteksi Petir Pada Sistem Tenaga Listrik, Bandung: Remaja Rosdakarya, 2018
- [15] T.S. Hutaeruk, Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja, JKT: Penerbit Erlangga, 1989

LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

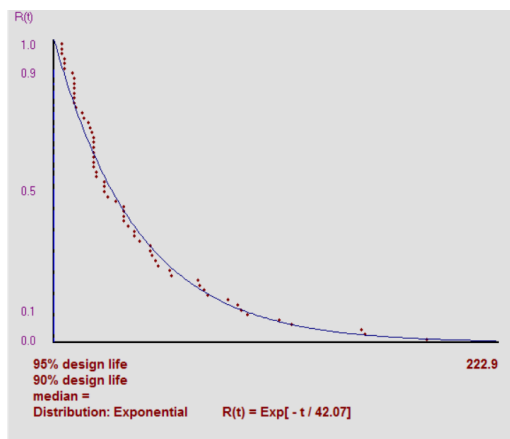
Data kegagalan pada SUTT sebelum dan setelah EMT terpasang dan perhitungan reliability, $F(t)$, $f(t)$

Transformers Failure caused by Lightning Strike from 2008 - 2015							
No.	Tower Name	TTF (Days)	Operating Hours (days)	$\lambda = \text{Failures/MTTF}$	Reliability $R = e^{-\lambda t}$	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}$
			Time (days)				
			0		1.00000000000000000000	-	0.0237724084177709000
1	LR#39	35	35	0.023772408	0.4351607148507920000	0.5648392851492080000	0.0103448182408021000
2	BL#35	40	75		0.1681426504460530000	0.8318573495539470000	0.0039971557588500600
3	BL#44	10	85		0.1325668512026580000	0.8674331487973420000	0.0031514333294474500
4	BL#49	72	157		0.0239378815801933000	0.9760621184198070000	0.0005690610975805900
5	BL#51	75	232		0.0040249788549574700	0.959750211450430000	0.0000956834412129400
6	BL#52	113	345		0.0002742320998708110	0.9997257679001290000	0.0000065191574793918
7	BL#52	187	532		0.0000032171785094378	0.9999967828214910000	0.0000000764800814792
8	BL#51	51	583		0.0000009570532964411	0.9999990429467040000	0.0000000227514618406
9	LR#27	119	702		0.000000565385987311	0.999999434614010000	0.000000013440586604
10	LR#52	20	722		0.000000351446436656	0.999999648553560000	0.000000008354728229
11	LR#39	154	876		0.000000009034783353	0.99999990965220000	0.000000000214778560
12	BL#44	77	953		0.000000001448595202	0.99999998551400000	0.00000000034436597
13	BL#49	97	1050		0.00000000144374484	0.9999999855630000	0.00000000003432129
14	BL#51	10	1060		0.000000000113827579	0.99999999886170000	0.00000000002705956
15	BL#52	20	1080		0.000000000070755728	0.99999999929240000	0.00000000001682034
16	LR#27	18	1098		0.000000000046123717	0.99999999953880000	0.00000000001096472
17	BL#49	20	1118		0.000000000028670707	0.99999999971330000	0.00000000000681572
18	BL#51	14	1132		0.000000000020554091	0.99999999979450000	0.00000000000488620
19	LR#39	5	1137		0.000000000018250585	0.99999999981750000	0.000000000000433860
20	LR#27	94	1231		0.000000000001953409	0.99999999998050000	0.000000000000046437
21	LR#39	17	1248		0.000000000001304007	0.99999999998700000	0.000000000000030999
22	BL#49	35	1283		0.0000000000000567453	0.99999999999430000	0.000000000000013490
23	BL#52	20	1303		0.000000000000352731	0.99999999999650000	0.000000000000008385
24	LR#25	25	1328		0.000000000000194687	0.99999999999810000	0.000000000000004628
25	BL#49	92	1420		0.000000000000021853	0.99999999999980000	0.00000000000000519
26	LR#39	25	1445		0.000000000000012061	0.99999999999990000	0.00000000000000287
27	LR#56	4	1449		0.000000000000010967	0.99999999999990000	0.00000000000000261
28	BL#52	10	1459		0.000000000000008647	0.99999999999990000	0.00000000000000206
29	LR#25	73	1532		0.000000000000001525	1.0000000000000000000	0.000000000000000036
30	LR#39	25	1557		0.000000000000000842	1.0000000000000000000	0.000000000000000020
31	BL#49	59	1616		0.000000000000000207	1.0000000000000000000	0.000000000000000005
32	BL#52	27	1643		0.000000000000000109	1.0000000000000000000	0.000000000000000003
33	LR#25	156	1799		0.000000000000000003	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
34	LR#39	20	1819		0.000000000000000002	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
35	BL#28	52	1871		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
36	LR#25	48	1919		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
37	BL#32	20	1939		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
38	BL#49	49	1988		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
39	BL#52	15	2003		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
40	BL#73	35	2038		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
41	BL#18	37	2075		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
42	LR#39	10	2085		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
43	LR#25	5	2090		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
44	BL#28	4	2094		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
45	BL#38	43	2137		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
46	BL#74	21	2158		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
47	BL#49	9	2167		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
48	BL#52	20	2187		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
49	LR#39	40	2227		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
50	BL#18	31	2258		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
51	BL#28	21	2279		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
52	BL#38	10	2289		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
53	BL#24	58	2347		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
54	BL#49	11	2358		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
55	BL#52	4	2362		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
56	LR#39	48	2410		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
57	BL#49	5	2415		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
58	BL#74	10	2425		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
59	BL#52	87	2512		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
60	LR#39	19	2531		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000
61	BL#28	35	2566		0.000000000000000000	1.0000000000000000000	0.000000000000000000

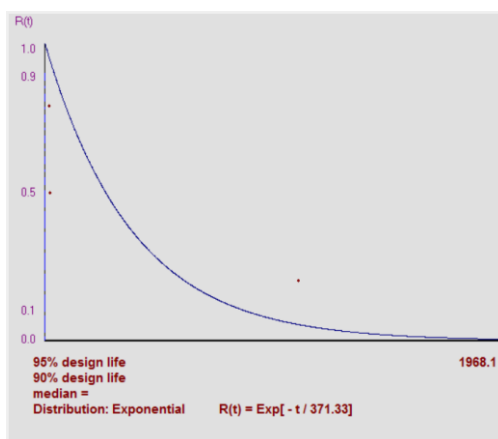
Insulators Failure caused by Lightning Strike from 2015 - 2018							
No.	Tower Name	TTF (Days)	operating hours (days)	$\lambda = \text{Failures/MTTF}$	Reliability $R = e^{-\lambda t}$	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}$
			Time (days)				
1		0	0	0.002485501	1.00	-	0.00249
2		0	22		0.95	0.05	0.00235
3		0	50		0.88	0.12	0.00220
4		0	81		0.82	0.18	0.00203
5		0	111		0.76	0.24	0.00189
6		0	142		0.70	0.30	0.00175
7		0	172		0.65	0.35	0.00162
8		0	203		0.60	0.40	0.00150
9		0	234		0.56	0.44	0.00139
10		0	264		0.52	0.48	0.00129
11		0	295		0.48	0.52	0.00119
12		0	325		0.45	0.55	0.00111
13		0	356		0.41	0.59	0.00103
14		0	387		0.38	0.62	0.00095
15		0	416		0.36	0.64	0.00088
16		0	447		0.33	0.67	0.00082
17		0	477		0.31	0.69	0.00076
18		0	508		0.28	0.72	0.00070
19		0	538		0.26	0.74	0.00065
20		0	569		0.24	0.76	0.00060
21		0	600		0.23	0.77	0.00056
22		0	630		0.21	0.79	0.00052
23		0	661		0.19	0.81	0.00048
24		0	691		0.18	0.82	0.00045
25		0	722		0.17	0.83	0.00041
26		0	753		0.15	0.85	0.00038
27		0	781		0.14	0.86	0.00036
28		0	812		0.13	0.87	0.00033
36	KR#7B	1076	1076		0.07	0.93	0.00017
37	KR#7B	16	1092		0.07	0.93	0.00016
38	KR#10	30	1122		0.06	0.94	0.00015
39		0	1146		0.06	0.94	0.00014
40		0	1177		0.05	0.95	0.00013
41		0	1207		0.05	0.95	0.00012
42		0	1238		0.05	0.95	0.00011

LAMPIRAN 2

Uji perhitungan menggunakan Rel Analysis Software (a) tanpa EMT dan (b) dengan EMT. Hasil ini identik dengan perhitungan menggunakan Excel Software.



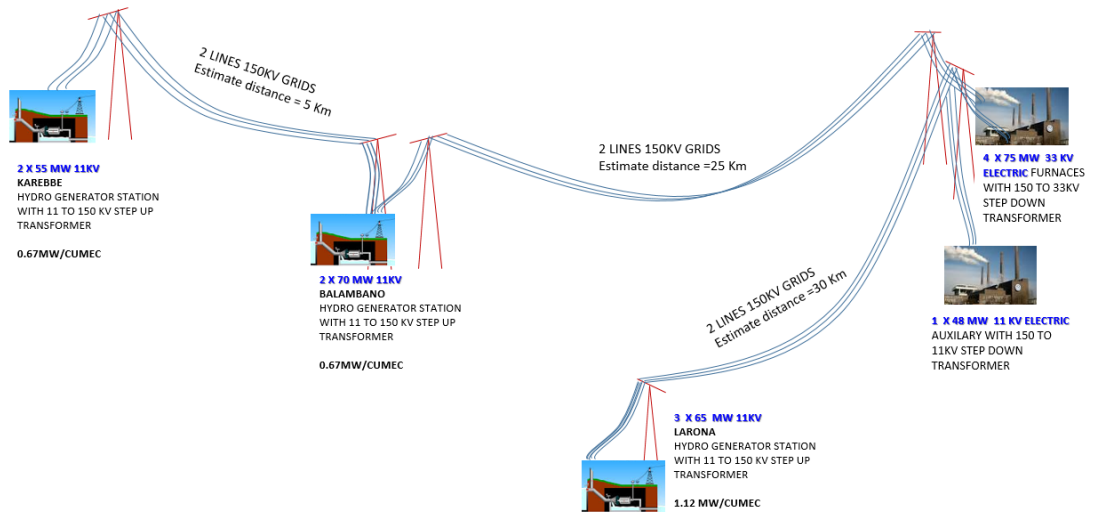
(a)



(b)

LAMPIRAN 3

PTVI UTILITIES SYSTEM – 150KV GRIDS



LAMPIRAN 4

Salah satu breakdown report kegagalan SUTT akibat petir

PROBLEM DEFINITION

Problem Definition

What : Bus Protection A32 150 KV Energize
When : 4 February 2018 at 04:56 am
Where : Balambano switchyard

Significant of Impact

Safety : NA
Environmental : NA
Utilities : BGS#2 outage: 2.56 Hrs.
KGS#1 outage: 5.84 Hrs.
KGS#2 outage: 45.82 Hrs.
Production : 1362.92 MWh
Maintenance : NA
Frequency : Firstly



CHRONOLOGIES

Date	Time	Event
4/2/2018	Pre fault configuration	BGS#1, A3-L6,A3-L3 CONNECT TO BUS A31
		BGS #2, KGS#1, KGS#2, A3L4 CONNECT TO BUS A32
		A3T1 TIE BREAKER CLOSE TO COUPLER BUS A31 AND BUS A32
	04:56	BAL SWY 150kV BKR A3-L4 OPEN
		BAL SWY 150kV BKR A3-G2 OPEN
		B UN2 GS - GENERATOR CIRC BRKR OPEN
		BAL SWY 150kV BKR A3-T1 OPEN
		BAL SWY 150kV BKR A3-G4 OPEN
		BAL SWY 150kV BKR A3-G3 OPEN
		K UN1 GS - GENERATOR CIRC BRKR OPEN
07:07	A3G4 CB was closed but fail, indication a there was problem on LG4 line	
08:09	A3T1, A3G3 & A3L4 CB trip when A3G4 CB was tried to closed	



FIELD AND FACTS FINDINGS

3. Bus A32 protection relay trip
4. 9pcs insulator phase A tower KR 7B broken
5. 1pcs insulator phase B tower KR 7B broken
6. 5pcs insulator phase C tower KR 10 broken



EXPLANATION

1. SHORT CIRCUIT AT BUS A32 DOES NOT CAUSE BUS PROTECTION RELAY ACTIVATED. PHYSICALLY ON BUS BAR NOT FOUND DAMAGED CAUSED BY SHORT CIRCUIT
2. BUS PROTECTION RELAY INTERNAL FAILURE DOES NOT CAUSE BUS PROTECTION RELAY ACTIVATED BECAUSE THIS RELAY IS WORKING PROPERLY AT SHOWN LED INDICATOR IN-SERVICE STILL ON.
3. CT FAULT DOES NOT CAUSE BUS PROTECTION RELAY ACTIVATED BECAUSE THE CT FAULT INDICATION ON RELAY BUS PROTECTION IS NOT ACTIVE, PHYSICAL AND FUNCTIONS STILL IN A GOOD CONDITION
4. BREAKER FAILURE PROTECTION DOES NOT CAUSE BUS PROTECTION RELAY ACTIVATED BECAUSE NO ALARM OR INDICATIONS THAT REPRESENT BREAKER FAILURE PROTECTION ACTIVE.
5. CT FAULT DOES NOT CAUSE BUS PROTECTION RELAY ACTIVATED BECAUSE THE CT FAULT INDICATION ON RELAY BUS PROTECTION IS NOT ACTIVE, PHYSICAL AND FUNCTIONS STILL IN A GOOD CONDITION
6. INTENSE LIGHTNING STRIKE AT KAREBBE AREA AS A MAIN CAUSE, 9PCS ISOLATOR AT TOWER KR 7B PHASE A, 1PCS ISOLATOR AT TOWER KR7B PHASE B AND 5PCS ISOLATOR AT TOWER KR 10 PHASE C WERE BROKEN CAUSED SHORT CIRCUIT AT LG4 TRANSMISSION LINE. AND ALSO RELAY CORDINATION IS NOT WORKING PROPERLY



RECOMMENDATION AND ACTION PLANS

Related with incident

NO.	DESCRIPTION	BY (WHO)	TIME (WHEN)	REMARK
1	REPLACE INSULATOR TOWER KR10 PHASE C , KR7BPHASEA AND B	BUSYAIRI	DONE	
2	INSTALL NEW LIGHTNING PROTECTION SYSTEM EMT AT TOWER KR7B, KR10	BUSYAIRI	WK #20	
3	REVIEW RELAY CORDINATION ON BALAMBANO SWITCHYARD	RUSTAM SALEH	WK #	

Not related with incident

NO.	DESCRIPTION	BY (WHO)	TIME (WHEN)	REMARK
1	REPAIR ROAD ACCESS TO TOWER KR 7B AND 10	IRWAN NUKUHALY	WK #? OR TBA	
2	INSTALL NEW LIGHTNING PROTECTION SYSTEM EMT AT TOWER KR12	BUSYAIRI	WK #21	

ROAD CONDITION



LAMPIRAN 5

Peralatan Global Positioning System (GPS)



Spesifikasi GARMIN OREGON 650

Physical & Performance

Physical dimensions 2.4" x 4.5" x 1.3" (6.1 x 11.4 x 3.3 cm)

Display size, WxH 1.5"W x 2.5"H (3.8 x 6.3 cm); 3" diag (7.6 cm)

Display resolution, WxH 240 x 400 pixels

Display type transfective color TFT touchscreen

Touchscreen

Weight 7.4 oz (209.8 g) with batteries

Battery rechargeable NiMH pack (included) or 2 AA batteries (not included);

NiMH or Lithium recommended

Battery life 16 hours

Water rating IPX7

High-sensitivity receiver

Interface high-speed USB and NMEA 0183 compatible

Camera yes (8 megapixel with autofocus; digital zoom)

Barometric altimeter

Electronic compass Yes (tilt-compensated 3-axis)

Unit-to-unit transfer (shares data wirelessly with similar units) Yes (plus images and custom maps)

Maps & Memory

Basemap

Ability to add maps

Built-in memory 4 GB

Accepts data cards microSD™ card (not included)

Custom POIs (ability to add additional points of interest)

Waypoints/favorites/locations 4000

Routes 200

Track log 10,000 points, 200 saved tracks

Outdoor Features

Automatic routing (turn by turn routing on roads) Yes (with optional mapping for detailed roads)

Geocaching-friendly Yes (Paperless)

Custom maps compatible

Hunt/fish calendar

Sun and moon information

Tide tables

Area calculation

Picture viewer

Garmin Connect®

Garmin Connect™ compatible (online community where you analyze, categorize and share data)

LAMPIRAN 6

Struktur EMT pada tower transmisi tegangan tinggi.

BAB.II MATERIAL YANG DIGUNAKAN

Jenis material yang digunakan :

I.1. Material Struktur

1. Pipa Galvanis Φ 2" – 6,00 m
2. Pipa Galvanis Φ 2,5" – 3,00 m
3. Klem Bintang Pipa Φ 2"
4. Bolt Φ 10 cm
5. Besi Siku 50.50.5
6. Las Sudut

II. 2. Material non Struktur

1. ESE Zeus Air Terminal
2. FRP Fibre
3. Cable Down Conductor 70 mm
4. Klem Cable Stainless
5. Klem U- Bolt Pipa 4" dan 3"

TABEL 2.1 DAFTAR PERLENGKAPAN MATERIAL DAN BERAT TOTAL

No	MATERIAL	SATUAN	Qty	Br/Unit (Kg)	Total Berat (Kg)
1	ESE ZEUS Air Terminal	unit	1	4	4
2	FRP / Fibre - 1,4 m	unit	1	4	4
3	Pipa Galvanis 2" - 6 meter	Kg	1	24	24
4	Pipa Galvanis 2,5" - 3 meter	Kg	1	15	15
5	Besi Siku 50.50.4.5	unit	2	9	18
6	Cable Down Conductor 70 mm	m	50	2,2	110
7	Klem U-Bolt Pipa 4" - 25 cm	unit	3	5	15
8	Klem U-Bolt Pipa 3" - 20 cm	unit	3	1	3
9	Klem Bintang Pipa 2"	pcs	2	0,5	1
10	Kle Kabel Stainless	pcs	26	0,5	13
					207

Berat total material ini, diasumsikan menjadi Beban P total yang akan bekerja pada Struktur Penyangga



Rustam Saleh

Jl. Kenanga no. 1 Salonsa - Sorowako
Luwu Timur – Sulawesi Selatan, Indonesia 92984
Mobile +62 8124107302
E-mail salehr1@gmail.com

Date and place of birth : Makassar, 19 December 1973
Marital status : Married with 3 children
Languages : Bahasa Indonesia
English
Educations : S1-Electrical Engineering (UNHAS)
S2-Physics Engineering (ITS) – In progress
Research Interest : Power system engineering
Electric Arc Furnace
Renewable energy
Professional Certificates : Insinyur Profesional Madya (IPM)
Pengawas Operasional Madya (POM)
Pengawas Operasional Pratama (POP)
AK3 Electrical Specialist

Work Experiences

2012 – Present **Utilities and Process Plant Electrical Engineering Manager and Project Manager**
PT. Vale Indonesia, Tbk a subsidiary of Vale Canada
One of world largest nickel mining & processing

2010 – 2012 **Snr. Electrical Engineer and Project Engineer**
PT. Vale Indonesia, Tbk a subsidiary of Vale Canada
One of world largest nickel mining & processing

2007 – 2010 **Electrical Engineer**
PT. Vale Indonesia, Tbk a subsidiary of Vale Canada
One of world largest nickel mining & processing

June 2003 – 2007 **Electrical Engineer**
PT. International Nickel Indonesia (INCO) - Indonesia
Nickel Mining & Processing under INCO Limited Canada

1997 – 2003 **Operation and Maintenance Engineer**
PT. MKS Power (PLTD Suppa – recently owned by PJB – PLN), an IPPs (Independent Power Producers) located in Suppa, Pinrang, South Sulawesi, Indonesia.

Publication

1. World first power demand stabilization system for a 3-electrode electric arc furnace for shielded arc nickel smelting. (Published)
2. Electric Arc Furnace Insulation Design (ESP 316 - internal PT. Vale Indonesia documentation - unpublished).
3. Electric Arc Furnace #3 Transformer Repair Methodology (Vale Documentation - unpublished)
4. Furnace Insulation Monitoring Design (Internal PT. Vale Indonesia Documentation - unpublished)
5. Benchmarking Trip Report: Electric Arc Furnace Equipment and Operation at Cerro Matoso CSMA in Colombia & Vale Onca Puma in Brazil (Vale Documentation - unpublished)