



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



Peranan Pengujian Tegangan Tinggi dalam Manajemen Aset Ketenagalistrikan

Profesor Umar Khayam

**Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
23 Agustus 2025**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**PERANAN PENGUJIAN TEGANGAN
TINGGI DALAM MANAJEMEN ASET
KETENAGALISTRIKAN**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

PERANAN PENGUJIAN TEGANGAN TINGGI DALAM MANAJEMEN ASET KETENAGALISTRIKAN

Prof. Umar Khayam

23 Agustus 2025
Aula Barat ITB

Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

***Peranan Pengujian Tegangan Tinggi dalam Manajemen Aset
Keteanagalistrikan***

Penulis : Prof. Umar Khayam

Reviewer : Prof. Suwarno

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2025

ISBN : 978-623-297-767-9

e-ISBN : 978-623-297-768-6 (PDF)



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

"Seorang manusia tiada akan memperoleh selain apa yang telah diusahakannya,
dan usahanya itu kelak akan diperlihatkan kepadanya,
kemudian akan diberikan balasan kepadanya dengan balasan paling sempurna,
dan sesungguhnya kepada Tuhan kesudahan segala sesuatu"

Q.S. An Najm: 39-42

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga buku orasi ilmiah yang berjudul *Peranan Pengujian Tegangan Tinggi dalam Manajemen Aset Ketenagalistrikan*, dapat disusun dan diselesaikan sebagai bagian dari perjalanan akademik dan kontribusi keilmuan penulis di bidang ketenagalistrikan.

Buku ini lahir dari rangkaian aktivitas pendidikan, penelitian, pengabdian kepada masyarakat, serta keterlibatan langsung dalam berbagai upaya penyelesaian permasalahan di bidang ketenagalistrikan. Melalui pengalaman tersebut, penulis semakin meyakini bahwa peran akademisi tidak hanya berhenti pada ruang kelas dan laboratorium, tetapi juga dapat menjelma menjadi kontribusi nyata bagi masyarakat melalui ilmu pengetahuan yang aplikatif dan berdampak.

Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada rekan-rekan dosen di Kelompok Keilmuan (KK) Ketenagalistrikan, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, (STEI) Institut Teknologi Bandung (ITB), atas kolaborasi, dukungan ilmiah, dan semangat kebersamaan yang terus menginspirasi penulis dalam menjalani peran sebagai bagian dari komunitas akademik. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh sivitas akademika ITB yang telah menjadi bagian penting dalam membentuk ekosistem pembelajaran dan penelitian yang kondusif dan penuh tantangan intelektual.

Semoga buku ini dapat memberikan manfaat, tidak hanya sebagai dokumentasi perjalanan keilmuan, tetapi juga sebagai bahan renungan dan rujukan untuk terus memperkuat sistem ketenagalistrikan Indonesia yang andal, efisien, dan berkelanjutan di tengah dinamika perubahan global.

Bandung, 23 Agustus 2025

Umar Khayam

SINOPSIS

Dalam sistem kehidupan modern, keandalan pasokan listrik telah menjadi kebutuhan dasar yang menopang seluruh aspek aktivitas manusia—dari penerangan rumah tangga, pelayanan kesehatan, pendidikan, hingga sistem transportasi dan industri. Keandalan ini menghadapi tantangan adanya infrastruktur kelistrikan yang kompleks dan berusia semakin tua yang harus dijaga agar tetap berfungsi dengan baik, aman, andal, dan efisien. Tantangan ini semakin besar pada era transisi energi, yaitu pada saat sistem ketenagalistrikan menghadapi tekanan dari perubahan iklim, adopsi energi terbarukan, dan kebutuhan efisiensi sumber daya.

Aset-aset strategis ketenagalistrikan seperti generator, transformator daya, kabel bawah tanah dan bawah laut, *gas-insulated switchgear* (GIS), pemutus arus (*circuit breaker*), serta sistem proteksi dan kontrol merupakan tulang punggung keandalan sistem tenaga listrik. Namun, seiring bertambahnya usia, meningkatnya beban, dan berubahnya pola operasi, aset-aset ini menghadapi tekanan performa yang semakin tinggi. Di sisi lain, keterbatasan anggaran membuat penggantian menyeluruh menjadi tidak selalu memungkinkan. Oleh karena itu, manajemen aset ketenagalistrikan sangat penting untuk diterapkan. Manajemen aset ini mencakup pengelolaan aset selama siklus hidup aset mulai dari pembuatan, instalasi, operasi, pemeliharaan, penggantian, dan pembuangan, dengan mempertimbangkan kondisi aset, risiko, dan ketersediaan biaya.

Salah satu aktivitas penting dalam manajemen aset ketenagalistrikan adalah pengujian tegangan tinggi. Pengujian ini diperlukan pada seluruh tahap dalam siklus peralatan listrik sejak pembuatan, pemasangan, operasi, pemeliharaan, dan penggantian. Pengujian ini tidak hanya berfungsi untuk menilai kondisi teknis peralatan listrik seperti transformator, kabel, dan pemutus arus, tetapi juga menjadi alat diagnostik proaktif untuk mendeteksi potensi kegagalan sejak dini. Dengan demikian, pengujian tegangan tinggi memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam strategi pemeliharaan, peremajaan, maupun penggantian aset. Peranannya semakin penting seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem kelistrikan yang tangguh dalam menghadapi dinamika transisi energi.

Sebagai akademisi, penulis menjadikan penelitian sebagai landasan utama untuk menjawab persoalan nyata tersebut. Melalui pengembangan metode manajemen aset yang presisi, serta inovasi dalam deteksi prakegagalan dan evaluasi umur peralatan, penulis berkontribusi pada upaya menjaga keandalan sistem kelistrikan yang pada akhirnya berdampak langsung pada kualitas hidup masyarakat. Buku ini merekam proses tersebut, mulai dari pembahasan mengenai siklus hidup peralatan tegangan tinggi, pentingnya pengujian tegangan tinggi, pengembangan sensor partial discharge berbasis antena UHF sebagai teknologi pendukung sistem *monitoring* modern, serta implementasi pengujian tinggi dalam manajemen aset ketenagalistrikan.

Lebih dari sekadar penerapan teknis, buku ini menunjukkan bagaimana hasil riset dan inovasi di bidang ketenagalistrikan dapat memberi makna sosial, menjaga keberlanjutan energi, serta memperluas cakrawala pengetahuan di bidang teknik ketenagalistrikan. Inilah bentuk kontribusi ilmiah yang tidak hanya berdiri di atas data dan rumus, tetapi juga berpijak pada kepedulian terhadap masa depan sistem energi dan kehidupan yang bergantung padanya.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	vii
SINOPSIS	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Pentingnya Pengujian Tegangan Tinggi dalam Manajemen Aset Ketenagalistrikan.....	2
1.3 Urgensi Transformasi Manajemen Aset Berbasis Pengujian Tegangan Tinggi	2
1.4 Tujuan Buku	3
1.5 Struktur Buku	4
2 ERA TRANSISI ENERGI	7
2.1 Konsumsi Energi Global	8
2.2 Energi Terbarukan	13
2.3 Kondisi Energi Nasional	14
3 PENTINGNYA MANAJEMEN ASET KETENAGALISTRIKAN	27
4 SIKLUS HIDUP PERALATAN KETENAGALISTRIKAN	31
4.1 Siklus Hidup Peralatan	31
4.2 Sistem Pemeliharaan Aset	34
5 PENTINGNYA PENGUJIAN TEGANGAN TINGGI PADA SETIAP TAHAP MANAJEMEN ASET.....	39
5.1 Pengujian Tegangan Tinggi.....	39
5.2 Fungsi Pengujian Tegangan Tinggi pada setiap Tahap Manajemen Aset	55
6 DETEKSI FENOMENA PRAKEGAGALAN PERALATAN TEGANGAN TINGGI SEBAGAI BAGIAN PENTING MANAJEMEN ASET	59
6.1 Memahami Deteksi Prakegagalan: Lebih dari Sekadar Pengujian	60
6.2 <i>Partial Discharge</i> : Sinyal Paling Dini dan Paling Dalam.....	61
6.3 Sensor dan Teknik Deteksi PD: Mendengar Bisikan Aset.....	61
6.4 Dari Deteksi ke Keputusan: Prioritas, Pemeliharaan, dan Investasi	62

7	PENGEMBANGAN SENSOR DETEKSI FENOMENA PRAKEGAGALAN	63
7.1	Pendahuluan	63
7.2	Tahapan Desain hingga Pengujian Antena untuk Mendeteksi <i>Partial Discharge</i>	64
8	PENERAPAN PENGUJIAN TEGANGAN TINGGI DALAM MANAJEMEN ASET KETENAGALISTRIKAN	99
8.1	Aplikasi Sensor PD Desain Baru untuk Pengujian <i>Partial Discharge</i> di Gardu Induk Tegangan Tinggi 150 kV.....	100
8.2	<i>Monitoring</i> Kondisi Peralatan Ketenagalistrikan (Studi Kasus: <i>Sealing-End</i> Kabel Tegangan Tinggi).....	113
8.3	Perhitungan Indeks Kesehatan Peralatan Berbasis Pengujian Tegangan Tinggi dan Penerapannya dalam Manajemen Aset Ketenagalistrikan	116
8.4	<i>Remaining Life Assessment</i> (Studi Kasus : Kabel Bawah Laut) ..	126
8.5	Strategi <i>Maintenance</i> Berbasis Risiko dan Keandalan (RCM) ..	136
9	PENUTUP	141
10	UCAPAN TERIMA KASIH	143
	DAFTAR PUSTAKA	147
	CURRICULUM VITAE	155

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Riwayat dan prediksi pemanasan global (IPCC 2018)	8
Gambar 2	Emisi CO ₂ dunia berdasarkan sektor tahun 2015 [IEA (2017a)].....	9
Gambar 3	Emisi CO ₂ berdasarkan bahan bakar pada tahun 2015 (IEA 2017a).....	9
Gambar 4	Permintaan energi primer per sektor, wilayah, dan bahan bakar (dalam Milyar TOE) (BP 2019)	11
Gambar 5	Sumber energi untuk sektor industri tahun 2016 [IEA (2018c)].....	12
Gambar 6	Sumber energi untuk sektor transportasi tahun 2016 [IEA (2018c)].....	12
Gambar 7	Tren permintaan listrik global berdasarkan wilayah (dalam TWh) (IEA 2018a)	13
Gambar 8	Tren kebutuhan energi listrik global berdasarkan teknologi sampai dengan tahun 2050 (dalam TWh) (Bloomberg New Energy Finance 2018a).....	13
Gambar 9	Cadangan dan pemanfaatan energi di Indonesia tahun 2021.....	15
Gambar 10	Potensi energi terbarukan di Indonesia tahun 2021	15
Gambar 11	Target <i>Net Zero Emission</i> (NZE) 2025 berdasarkan PP 79 tahun 2014	16
Gambar 12	Target dan capaian bauran Energi Baru dan Terbarukan (EBT) hingga tahun 2023 (dalam MTOE).....	17
Gambar 13	Proyeksi energi final menuju <i>Net Zero Emission</i> (NZE) 2060 (dalam MTOE).....	21
Gambar 14	Proyeksi kebutuhan energi final (Mtoe) menuju <i>Net Zero Emission</i> (NZE) 2060 berdasarkan sektor	22
Gambar 15	Proyeksi konsumsi energi dan bauran energi di pembangkitan listrik	24
Gambar 16	Proyeksi pembangkitan daya (GW) dan energi listrik (TWh).....	26
Gambar 17	Konsep pemeliharaan korektif [4]	35
Gambar 18	Konsep pemeliharaan berbasis periode [4]	36

Gambar 19	Konsep pemeliharaan berbasis kondisi [4].....	37
Gambar 20	<i>Decision model</i> RBM	38
Gambar 21	Konsep pemeliharaan berbasis risiko [4]	38
Gambar 22	Karakteristik koefisien refleksi dari berbagai <i>wings radius</i> antena <i>bowtie</i>	65
Gambar 23	Desain awal dan karakteristik antenna <i>bowtie</i>	66
Gambar 24	Distribusi kerapatan arus dari original antenna <i>bowtie</i>	67
Gambar 25	Variasi dari modifikasi radius <i>rounded edge</i>	67
Gambar 26	Modifikasi <i>rounded edge</i> antenna bowtir dengan variasi r_e	67
Gambar 27	Pola radiasi antenna <i>bowtie</i> modifikasi <i>rounded edge</i> pada frekuensi resonansi 1,59 GHz	68
Gambar 28	Distribusi kerapatan arus antenna <i>bowtie</i> yang dimodifikasi dengan <i>middle-sliced</i>	69
Gambar 29	Hasil fabrikasi dari modifikasi antenna <i>bowtie</i>	70
Gambar 30	Karakteristik koefisien refleksi hasil pengukuran VNA.....	71
Gambar 31	VSWR hasil pengukuran VNA	72
Gambar 32	Smith chart hasil pengukuran VNA	72
Gambar 33	Rangkaian percobaan pengukuran partial discharge.....	73
Gambar 34	Foto peralatan percobaan pengukuran <i>partial discharge</i>	73
Gambar 35	PDIV pada berbagai jarak antara antenna dan sumber PD	74
Gambar 36	t_{rise} dan t_{fall} dari sinyal PD yang dideteksi oleh antenna <i>bowtie</i> yang dimodifikasi pada berbagai level tegangan	74
Gambar 37	Bentuk gelombang sinyal PDIV dan PD	75
Gambar 38	Perbandingan besaran PD yang diukur dengan antenna <i>bowtie rounded edge middle-sliced</i>	76
Gambar 39	Hasil pengukuran pola (ϕ -q-n).....	77
Gambar 40	Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian [20]	80
Gambar 41	Bentuk akhir geometri antenna <i>enhanced bowtie</i> (antena 1) pada penelitian [21].....	81
Gambar 42	Bentuk akhir rancangan antenna penelitian [22, 23].....	81
Gambar 43	Bentuk akhir rancangan antenna penelitian [24, 25].....	82
Gambar 44	Bentuk akhir rancangan antenna penelitian [26]	83
Gambar 45	Bentuk akhir rancangan antenna penelitian antenna dipole (kiri) dan antenna T (kanan) [27, 28]	84
Gambar 46	Model modifikasi ujung antenna <i>bowtie</i> (antena 1) pada penelitian [29, 30].....	84

Gambar 47	Model modifikasi irisan tengah skala 0,8 (antena 2) pada penelitian [29, 30].....	85
Gambar 48	Model Antena Goubau pada penelitian [33, 34].....	86
Gambar 49	Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian Log Periodic Toothed 1 [35, 36]	86
Gambar 50	Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian Antena Spiral 10 Segmen [37].....	87
Gambar 51	Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian [38, 39]	88
Gambar 52	Bentuk geometri modifikasi ujung antenna <i>bowtie</i> pada penelitian[40-42]	89
Gambar 53	Model geometri antenna bowtie panjang pada penelitian [40-42]	89
Gambar 54	Realisasi <i>microstrip</i> dengan modifikasi <i>length of arms after transition antenna</i> panjang 1mm [43-45]	90
Gambar 55	Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian [46]	91
Gambar 56	Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian [49]	92
Gambar 57	Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian [50]	92
Gambar 58	Bentuk akhir rancangan antenna <i>Tie-Square</i> pada penelitian [51, 52].....	93
Gambar 59	Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian [53-57].....	94
Gambar 60	Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian [58, 59]	94
Gambar 61	Realisasi antenna <i>microstrip</i> [60].....	95
Gambar 62	Hasil fabrikasi antenna <i>microstrip</i> modifikasi dan 7 antenna referensi.....	95
Gambar 63	Kerusakan pada CSE.....	100
Gambar 64	Hasil fabrikasi antenna untuk aplikasi sensor PD pada gardu induk	101
Gambar 65	Rangkaian pengujian deteksi PD	102
Gambar 66	Hasil deteksi <i>partial discharge waveform</i> SE1 Fasa A (a) <i>Time-domainsignal</i> , and (b) <i>Frequency spectrum</i>	104
Gambar 67	Hasil deteksi <i>partial discharge waveform</i> SE2 Fasa B (a) <i>Time-domainsignal</i> , and (b) <i>Frequency spectrum</i>	104
Gambar 68	Hasil deteksi <i>partial discharge waveform</i> SE3 Fasa C (a) <i>Time-domainsignal</i> , and (b) <i>Frequency spectrum</i>	105
Gambar 69	Hasil deteksi <i>partial discharge waveform</i> SE4 Fasa A (a) <i>Time-domainsignal</i> , and (b) <i>Frequency spectrum</i>	106

Gambar 70	Hasil deteksi <i>partial discharge waveform</i> SE5 Fasa B (a) <i>Time-domain signal</i> , and (b) <i>Frequency spectrum</i>	107
Gambar 71	Hasil deteksi <i>partial discharge waveform</i> SE6 Fasa C (a) <i>Time-domain signal</i> , and (b) <i>Frequency spectrum</i>	108
Gambar 72	Perbandingan bentuk gelombang PD yang terdeteksi antara HFCT (warna hitam) dan antenna yang diusulkan (warna merah) (a) <i>Time-domain signal</i> , and (b) <i>Frequency spectrum</i>	110
Gambar 73	Perbandingan besaran PD, <i>voltage peak to peak</i> (V_{pp}) yang terdeteksi oleh antenna yang diusulkan dan HFCT dalam kondisi CSE baru.....	111
Gambar 74	Perbandingan besaran PD, <i>voltage peak to peak</i> (V_{pp}) yang dideteksi oleh antenna yang diusulkan dan HFCT dalam kondisi CSE lama	112
Gambar 75	Grafik perbandingan nilai muatan maksimum	129
Gambar 76	Grafik perbandingan nilai muatan rata - rata	129
Gambar 77	Grafik Perbandingan nilai muatan rata - rata di level tegangan 20 - 25 kV	130
Gambar 78	Perbandingan muatan maksimum sampel pada tegangan 10 kV, 15 kV, dan 20 kV.....	130
Gambar 79	Sampel PD pattern kabel lama & kabel baru	132

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Target KEN 2025 hingga 2050 berdasarkan PP 79 2014.....	16
Tabel 2	Perbandingan PP 79 Tahun 2014 dan RPP KEN (baru)	17
Tabel 3	Arah perubahan kebijakan dalam pembaruan KEN	18
Tabel 4	Subkelompok dari manajemen aset.....	28
Tabel 5	Sifat mekanis terpenting bahan isolasi	49
Tabel 6	Gejala prakegagalan berbagai jenis isolasi	60
Tabel 7	Jenis antenna UHF yang dapat dicetak untuk deteksi PD [11], [12], [13], [14], [15]	64
Tabel 8	Perbandingan hasil uji karakteristik antenna menggunakan VNA dan simulasi.....	72
Tabel 9	Perbandingan PDIV(-) antenna <i>bowtie</i> modifikasi pada jarak 100 mm.....	74
Tabel 10	Hasil pengukuran PDIV pada jarak 200 mm	76
Tabel 11	Hasil pengukuran PDIV pada jarak 300 mm	76
Tabel 12	Perbandingan karakteristik antenna antara antenna <i>bowtie</i> baru dan antenna <i>bowtie</i> yang telah dimodifikasi	78
Tabel 13	Pengaruh parameter antenna <i>bowtie</i> terhadap karakteristik respons frekuensi.....	79
Tabel 14	Rangkuman hasil pengukuran VNA pada penelitian [26]	83
Tabel 15	Rangkuman hasil simulasi dan pengukuran pada penelitian [31, 32]	85
Tabel 16	Hasil perangkingan antenna berdasarkan	96
Tabel 17	Jenis <i>Cable Sealing End</i>	103
Tabel 18	Hasil pengujian pada <i>cable sealing end</i>	109
Tabel 19	Hasil prioritisasi overhaul GIS	125
Tabel 20	Ambang batas muatan PD	127
Tabel 21	Estimasi masa sisa pakai kabel dalam kondisi suhu dan pembebanan berbeda.....	134

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dunia tengah mengalami transformasi besar dalam lanskap energinya. Isu krisis iklim, komitmen terhadap dekarbonisasi, dan tekanan geopolitik terhadap keamanan pasokan energi telah mendorong percepatan transisi energi secara global. Perubahan ini ditandai dengan beralihnya fokus dari sistem berbasis energi fosil ke sistem berbasis energi bersih dan terbarukan, serta meningkatnya penetrasi teknologi baru seperti kendaraan listrik, pembangkit energi surya, dan sistem penyimpanan energi. Di tengah arus perubahan tersebut, sistem ketenagalistrikan memainkan peran sentral—sebagai penghubung antara sumber energi, infrastruktur, dan pengguna akhir.

Transisi energi bukan hanya persoalan mengganti sumber energi. Transisi energi menuntut sistem ketenagalistrikan yang adaptif, andal, dan cerdas, untuk menjamin kontinuitas dan kualitas layanan kelistrikan dalam kondisi sistem yang semakin dinamis. Dalam konteks inilah manajemen aset ketenagalistrikan sangat penting untuk dilakukan. Manajemen aset bukan lagi sekadar aktivitas teknis yang berorientasi pada pemeliharaan, melainkan telah menjadi strategi sentral dalam menjaga ketahanan energi nasional.

Salah satu aktivitas penting dalam manajemen aset ketenagalistrikan adalah pengujian tegangan tinggi. Pengujian ini diperlukan pada seluruh tahap dalam siklus peralatan listrik sejak pembuatan, pemasangan, operasi, pemeliharaan, dan penggantian. Pengujian ini tidak hanya berfungsi untuk menilai kondisi teknis peralatan listrik seperti transformator, kabel, dan pemutus arus, tetapi juga menjadi alat diagnostik proaktif untuk mendeteksi potensi kegagalan sejak dini. Dengan demikian, pengujian tegangan tinggi memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam strategi pemeliharaan, peremajaan, maupun penggantian aset. Peranannya semakin krusial seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem kelistrikan yang tangguh dalam menghadapi dinamika transisi energi.

1.2 Pentingnya Pengujian Tegangan Tinggi dalam Manajemen Aset Ketenagalistrikan

Transisi energi membawa perubahan mendasar pada struktur dan cara kerja sistem tenaga listrik. Sistem yang sebelumnya bersifat terpusat kini berkembang menjadi lebih terdistribusi, dengan sumber energi yang semula stabil menjadi lebih fluktuatif, dan profil beban yang dulunya dapat diprediksi kini semakin tidak menentu akibat perkembangan teknologi serta perubahan perilaku konsumen. Perubahan ini menimbulkan tantangan serius bagi pengelolaan infrastruktur ketenagalistrikan yang sebagian besar telah berusia puluhan tahun dan dirancang untuk kondisi sistem yang jauh berbeda dari kondisi saat ini.

Aset-aset strategis seperti transformator daya, kabel bawah tanah dan bawah laut, *gas-insulated switchgear* (GIS), pemutus arus (*circuit breaker*), serta sistem proteksi dan kontrol merupakan tulang punggung keandalan sistem tenaga listrik. Namun, seiring bertambahnya usia, meningkatnya beban, dan berubahnya pola operasi, aset-aset ini menghadapi tekanan performa yang semakin tinggi. Di sisi lain, keterbatasan anggaran membuat penggantian menyeluruh menjadi tidak selalu memungkinkan, sehingga sangat diperlukan manajemen aset berbasis kondisi dan risiko.

Pendekatan ini menggabungkan pemantauan data operasional, pemodelan risiko, serta metode diagnostik untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis prioritas. Dalam konteks ini, pengujian tegangan tinggi berperan sebagai alat diagnostik utama untuk mengevaluasi kondisi aktual peralatan bertegangan tinggi. Teknik seperti pengujian tegangan tembus, pengujian tegangan impuls, dan pengujian parsial discharge memberikan informasi kritis mengenai degradasi internal aset dan memungkinkan penerapan strategi *condition-based maintenance*, *reliability-centered maintenance*, dan *health index calculation* secara lebih efektif dan tepat sasaran.

1.3 Urgensi Transformasi Manajemen Aset Berbasis Pengujian Tegangan Tinggi

Manajemen aset ketenagalistrikan di era transisi energi menuntut pendekatan yang lebih canggih dan dinamis. Pendekatan konvensional yang hanya mengandalkan jadwal pemeliharaan berkala atau penilaian berdasarkan usia

peralatan tidak lagi memadai untuk menghadapi kompleksitas sistem yang terus berkembang. Hal yang dibutuhkan adalah sistem manajemen aset yang:

- adaptif terhadap dinamika sistem dan perkembangan teknologi,
- berbasis data dan prediktif,
- berorientasi pada risiko dan konsekuensi kegagalan,
- memungkinkan pengambilan keputusan yang terarah dan prioritas investasi yang tepat, serta
- mampu menjembatani aspek teknis, manajerial, dan kebijakan energi.

Dalam kerangka ini kemampuan untuk menilai kondisi aktual aset menjadi keunggulan kompetitif dalam menjaga keandalan dan efisiensi sistem tenaga. Untuk mengetahui kondisi aktual aset ketenagalistrikan diperlukan pengujian peralatan tegangan tinggi. Pengujian ini misalnya pengukuran *partial discharge*, *dissolved gas analysis* (DGA), *spectrum frequency response analysis* (SFRA), dan lain-lain. Pengujian ini perlu dilakukan pada setiap siklus hidup peralatan tegangan tinggi. Pengujian tegangan tinggi bisa dilakukan secara *online* maupun secara *offline*. Hasil pengujian tegangan tinggi dapat digunakan untuk mengetahui kondisi aktual aset, memperkirakan umur sisa peralatan (*remaining life assessment*), serta menyusun skala prioritas tindakan pemeliharaan. Integrasi pengujian ini dalam sistem manajemen aset tidak hanya meningkatkan keandalan operasi, tetapi juga memberikan nilai strategis dalam efisiensi pemeliharaan dan perencanaan investasi jangka panjang.

1.4 Tujuan Buku

Buku orasi ilmiah ini ditulis sebagai refleksi penulis atas kajian ilmiah dan pengalaman praktis dalam pengujian tegangan tinggi, pengembangan sensor untuk pengujian tegangan tinggi, dan penerapan pengujian tegangan tinggi dalam menyelesaikan permasalahan manajemen aset ketenagalistrikan selama lebih dari satu dekade. Tidak hanya melalui kajian ilmiah melalui berbagai penelitian yang telah terpublikasi tetapi juga melalui berbagai studi kasus dan pendekatan nyata—seperti penilaian umur sisa kabel laut, evaluasi *health index* transformator dan GIS, asesmen sistem proteksi, hingga prioritas overhaul transformator dan GIS berbasis kondisi—penulis ingin menyampaikan bagaimana pengujian tegangan tinggi berperan dalam manajemen aset ketenagalistrikan dan bagaimana manajemen aset dapat

menjadi alat yang sangat kuat dalam menjawab tantangan teknis dan strategis sistem tenaga di masa depan.

Lebih dari itu, buku ini juga bertujuan untuk:

- Menjelaskan peranan pengujian tegangan tinggi dalam manajemen aset ketenagalistrikan,
- Menjadi kontribusi pemikiran dalam mengembangkan kerangka manajemen aset yang lebih relevan di era transisi energi,
- Mengajak pelaku industri, regulator, dan akademisi untuk memperkuat sinergi antara teknologi, kebijakan, dan data dalam menjaga ketahanan sistem ketenagalistrikan nasional,
- Mendorong pembentukan budaya teknis yang menjunjung keandalan sebagai tanggung jawab kolektif, bukan sekadar fungsi teknis semata.

1.5 Struktur Buku

Buku ini disusun berdasarkan kerangka pengalaman dan pendekatan ilmiah yang telah diterapkan dalam berbagai kegiatan penelitian, asesmen dan kajian teknis. Setiap bab membahas aspek-aspek kunci dari manajemen aset, mulai dari penilaian kondisi peralatan, strategi pemeliharaan berbasis keandalan, kajian umur sisa, hingga prioritasasi dalam manajemen aset. Struktur buku ini disusun sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan

Bab 2 Era Transisi Energi

Bab 3 Pentingnya Manajemen Aset Ketenagalistrikan

Bab 4 Siklus Hidup Peralatan Ketenagalistrikan

Bab 5 Pentingnya Pengujian Tegangan Tinggi dalam Manajemen Aset Ketenagalistrikan

Bab 6 Deteksi Fenomena Prakegagalan Peralatan Tegangan Tinggi sebagai Bagian Penting Manajemen Aset Ketenagalistrikan

Bab 7 Pengembangan Sensor Deteksi Fenomena Prakegagalan Peralatan Tegangan Tinggi

Bab 8 Penerapan Pengujian Tegangan Tinggi dalam Manajemen Aset Ketenagalistrikan

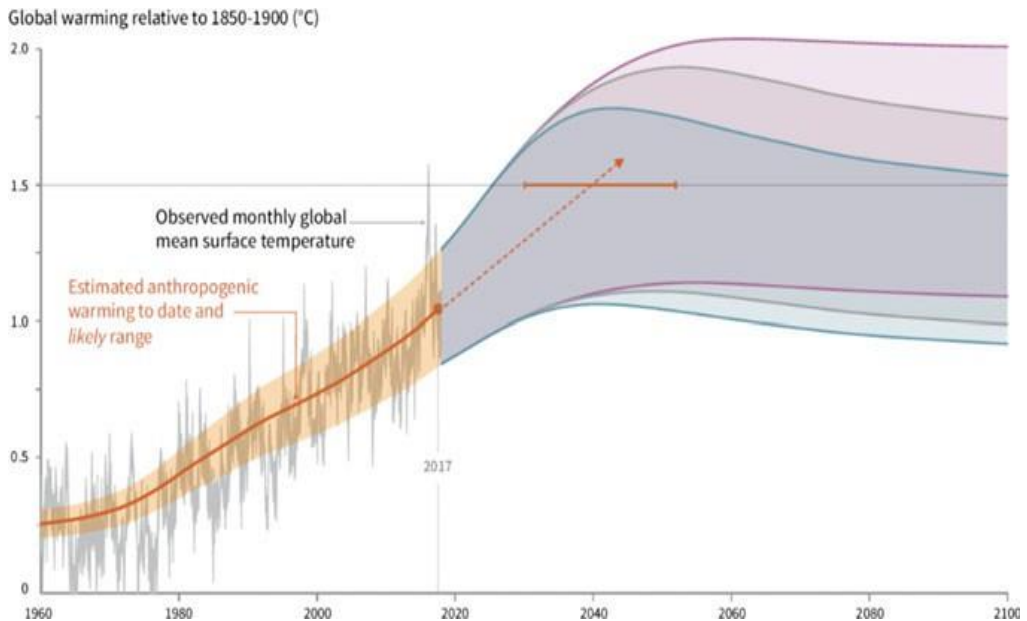
Melalui pendekatan naratif dan ilustratif, pembaca diharapkan tidak hanya memahami metode yang digunakan, tetapi juga menginternalisasi cara berpikir manajerial yang berbasis kajian ilmiah, data, risiko, dan sistem yang merupakan sebuah kompetensi yang sangat dibutuhkan dalam mengelola sistem kelistrikan masa depan yang semakin kompleks dan penuh tantangan.

2 ERA TRANSISI ENERGI

Perubahan kadar *Greenhouse Gases*, partikel aerosol di atmosfer, intensitas radiasi matahari, serta karakteristik permukaan tanah mempengaruhi keseimbangan energi. Salah satu penyebab utama ketidakseimbangan energi ini adalah meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca akibat aktivitas manusia, yaitu karbon dioksida (CO_2). Konsentrasi CO_2 telah meningkat secara signifikan. Pada era pra-industri, konsentrasi CO_2 sekitar 280 bagian per juta (ppm) dan mengalami peningkatan menjadi sekitar 403 ppm pada tahun 2016. Menurut *International Energy Agency* (IEA), selain CO_2 , emisi gas rumah kaca lainnya seperti metana (CH_4) dan dinitrogen oksida (N_2O) juga mengalami peningkatan yang cukup berarti [1].

Menurut laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) tahun 2007, peningkatan CO_2 di atmosfer sebagian besar disebabkan oleh pembakaran bahan bakar fosil. Konsentrasi CO_2 akan mengalami peningkatan jika emisi terus dibiarkan tanpa pengendalian dan upaya untuk mengurangi emisi. Diperkirakan juga pada tahun 2050, konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer akan mencapai 550 ppm jika tidak dilakukan tindakan dengan segera [1].

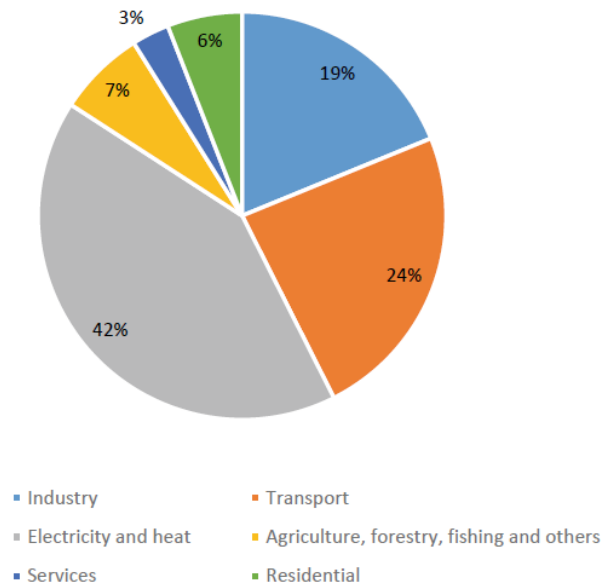
Gambar 1 menunjukkan riwayat dan prediksi pemanasan global. Pada laporan IPCC tahun 2018 disebutkan bahwa aktivitas manusia menyebabkan kenaikan suhu global sekitar $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ dibandingkan masa pra-industri. Suhu global diperkirakan akan mencapai peningkatan sebesar $1,5\text{ }^\circ\text{C}$ dalam rentang waktu antara tahun 2030 hingga 2052 jika tidak dilakukan upaya untuk mengurangi emisi. Hal ini menunjukkan pentingnya tindakan segera untuk mengurangi emisi guna menghindari konsekuensi perubahan iklim yang lebih parah di masa depan [1].



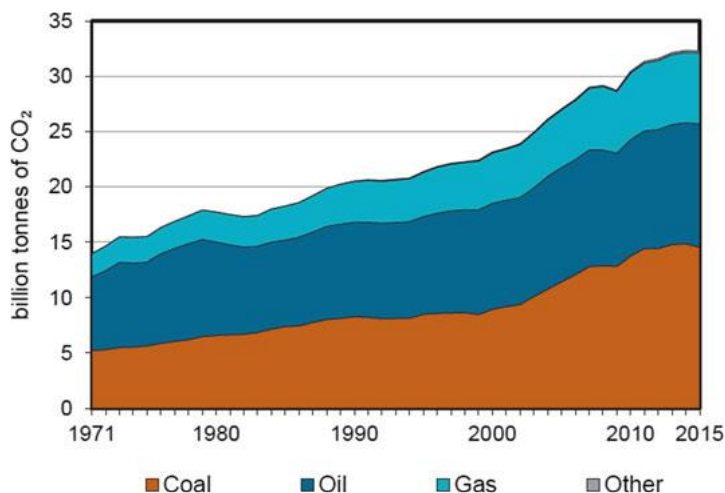
Gambar 1 Riwayat dan prediksi pemanasan global (IPCC 2018)

2.1 Konsumsi Energi Global

Emisi karbon terbagi dalam empat kelompok utama, yaitu pembangkitan listrik dan panas, sektor industri, sektor konsumen seperti bangunan, transportasi, dan limbah, serta penggunaan lahan, termasuk pertanian dan kehutanan. Menurut IEA, sekitar dua pertiga dari emisi CO₂ global pada tahun 2015 berasal dari pembangkit listrik dan transportasi. Pembangkitan dan bahan bakar untuk transportasi ini masih menggunakan bahan bakar fosil, sehingga pembakaran fosil tersebut merupakan salah satu penyebab dari peningkatan emisi CO₂ [1].

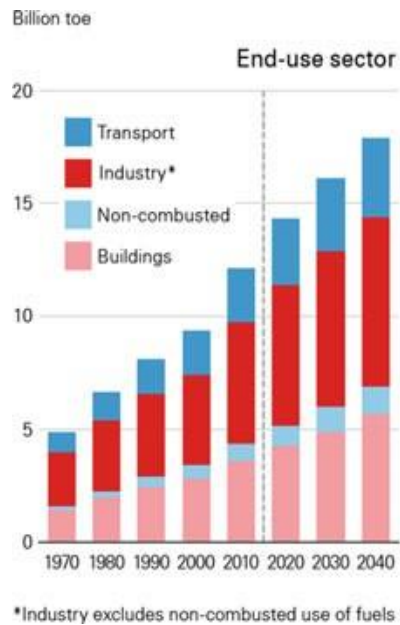


Gambar 2 Emisi CO₂ dunia berdasarkan sektor tahun 2015 [IEA (2017a)]

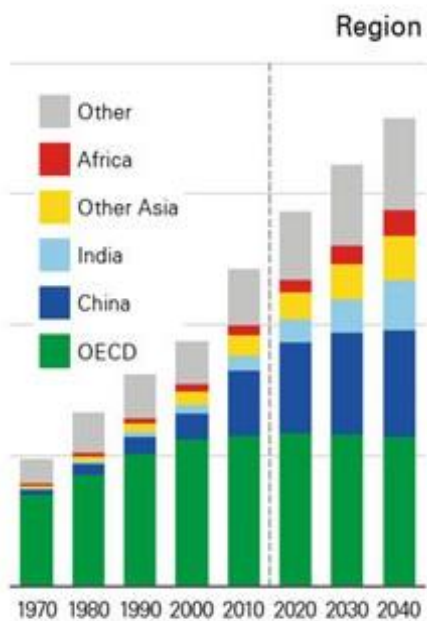


Gambar 3 Emisi CO₂ berdasarkan bahan bakar pada tahun 2015 (IEA 2017a)

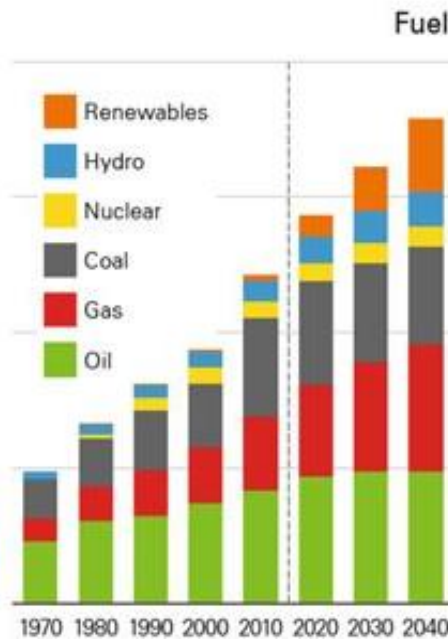
Menurut IEA (2018), pasokan energi primer dunia meningkat 2,5 kali lipat dari tahun 1971 hingga 2016, dengan bahan bakar fosil sebagai sumber utama. Dalam periode yang sama, konsumsi energi final global tumbuh hingga 2,25 kali lipat. Banyak negara di Asia yang mencatat kenaikan permintaan energi hingga tujuh kali lipat [1].



(a) Permintaan energi primer berdasarkan sektor (dalam Milyar TOE)



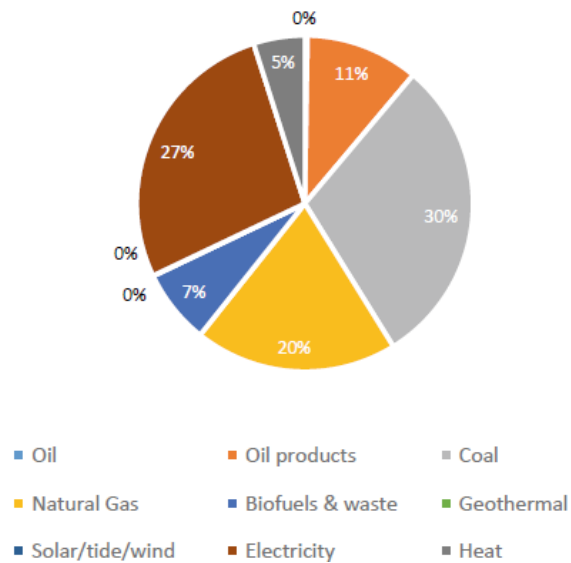
(b) Permintaan energi primer erdasarkan wilayah (dalam Milyar TOE)



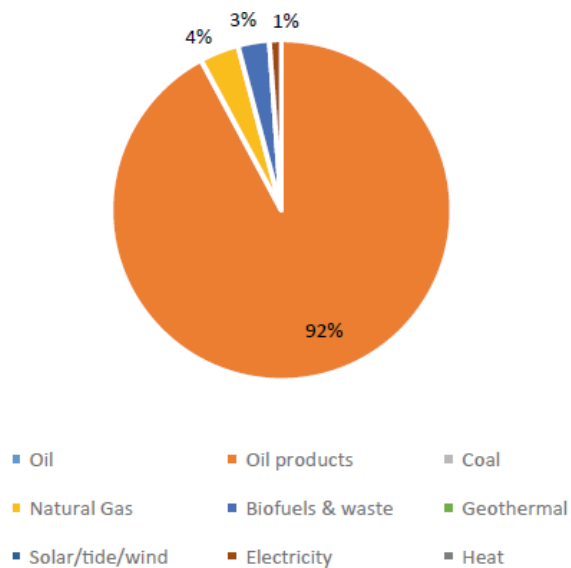
(c) Permintaan energi primer berdasarkan bahan bakar (dalam Milyar TOE)

Gambar 4 Permintaan energi primer per sektor, wilayah, dan bahan bakar (dalam Milyar TOE) (BP 2019)

Selama tahun 1971 hingga 2016, sektor industri merupakan sektor dengan penggunaan energi terbesar yang menyumbangkan hingga 37% dari total konsumsi akhir, diikuti oleh sektor transportasi yang naik dari 23% menjadi 29%. Di sektor industri, transisi energi menjadi elektrifikasi mengalami peningkatan dari 15% menjadi 27%, sedangkan di sektor transportasi masih bergantung pada penggunaan bahan bakar minyak [1].

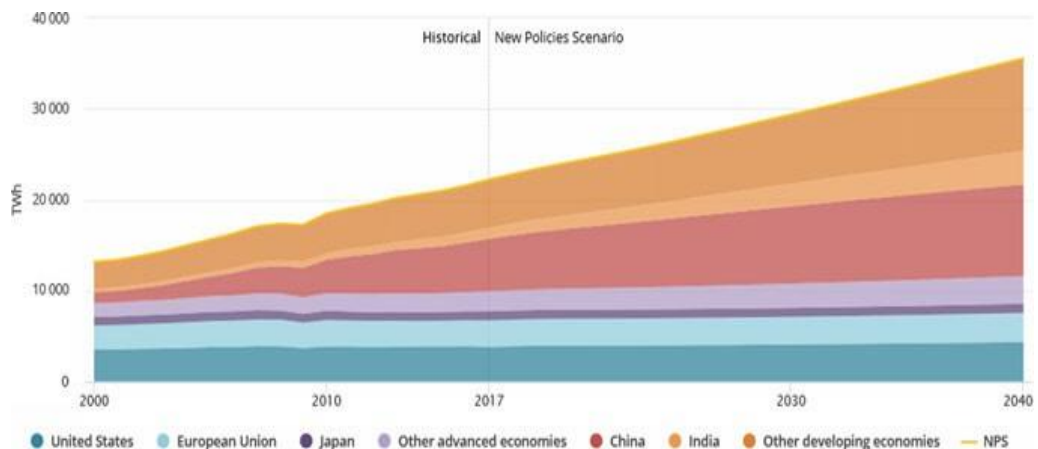


Gambar 5 Sumber energi untuk sektor industri tahun 2016 [IEA (2018c)]



Gambar 6 Sumber energi untuk sektor transportasi tahun 2016 [IEA (2018c)]

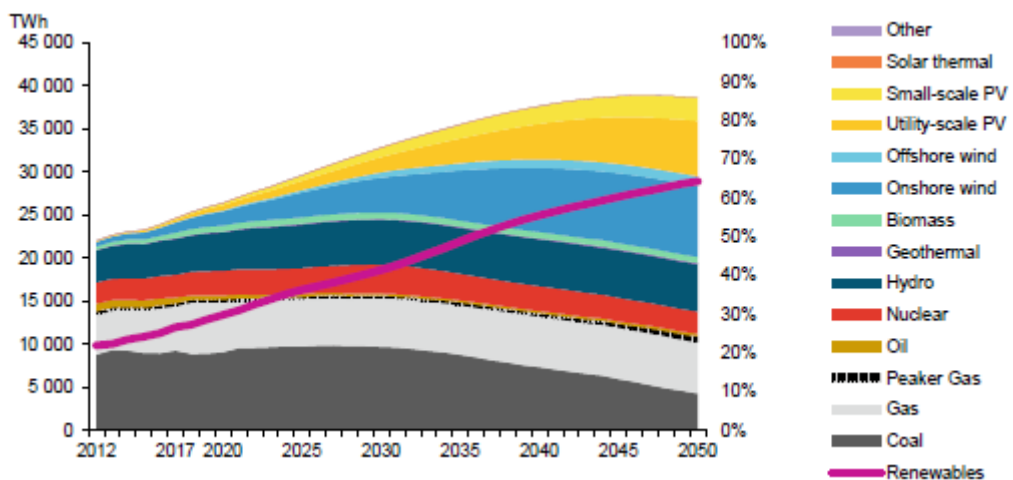
Dalam *New Policies Scenario* dari IEA (2018a), proporsi listrik dalam bauran energi global diperkirakan mencapai 24% pada 2040. Namun, elektrifikasi penuh masih menghadapi kendala teknis dan finansial, terutama di sektor-sektor seperti industri berat, penerbangan, dan pelayaran [1].



Gambar 7 Tren permintaan listrik global berdasarkan wilayah (dalam TWh) (IEA 2018a)

2.2 Energi Terbarukan

Dalam upaya mengurangi emisi CO₂, elektrifikasi semakin ditingkatkan pada sistem tenaga listrik global, mulai dari sektor industri, kebutuhan rumah tangga, hingga mobilitas. Peningkatan kebutuhan listrik ke depan diprediksi akan semakin banyak dipasok oleh teknologi rendah karbon. Energi surya fotovoltaik (PV) dan angin merupakan sumber energi yang digunakan untuk meningkatkan penggunaan energi rendah karbon [1].



Gambar 8 Tren kebutuhan energi listrik global berdasarkan teknologi sampai dengan tahun 2050 (dalam TWh) (Bloomberg New Energy Finance 2018a)

Transisi menuju energi bersih ini juga menimbulkan tantangan operasional. Integrasi besar-besaran sumber energi terbarukan yang bersifat variabel menyebabkan fluktuasi beban, pembalikan aliran daya di gardu induk, dan kemacetan pada jaringan saat permintaan rendah. Studi kasus di Portugal, Spanyol, dan Denmark menunjukkan terjadi lonjakan pembangkitan dari angin dan air yang dapat melebihi kebutuhan domestik, sehingga membutuhkan fleksibilitas sistem berupa penyimpanan energi. Jika penyimpanan energi tidak memadai, maka energi akan diekspor ke negara tetangga. Namun, jika terjadi penurunan mendadak dalam produksi energi terbarukan ini, maka akan mengguncang stabilitas jaringan dan pasar energi. Integrasi jaringan pintar (*smart grid*) menjadi penting untuk mendukung fleksibilitas sistem. Dengan menggunakan fungsi seperti otomatisasi, sensor, pengukuran pintar, dan manajemen permintaan yang lebih dinamis, operasi sistem kelistrikan akan lebih terkendali [1].

2.3 Kondisi Energi Nasional

Ketahanan energi di Indonesia mencerminkan kondisi di mana ketersediaan energi terjamin dan masyarakat memiliki akses terhadap energi dengan harga yang terjangkau dalam jangka panjang, sambil tetap memperhatikan upaya perlindungan terhadap lingkungan hidup. Seiring pertumbuhan ekonomi nasional, konsumsi energi diproyeksikan akan terus meningkat, dengan estimasi mencapai 400 juta ton setara minyak (MTOE) pada tahun 2025 dan melonjak hingga 1.000 MTOE pada tahun 2050. Saat ini, pemenuhan kebutuhan energi di Indonesia masih didominasi oleh sumber energi fosil, khususnya batubara dan minyak bumi. Namun, sebagian kebutuhan minyak bumi masih bergantung pada impor, yaitu sekitar 104 juta barel minyak mentah dan 22 juta kiloliter bahan bakar minyak (BBM). Selain itu, impor batubara pada tahun 2021 tercatat sebesar 14,5 juta ton. Data mengenai cadangan dan pemanfaatan energi di Indonesia memberikan gambaran lebih lanjut mengenai upaya pemenuhan kebutuhan energi nasional [2].

	TOTAL CADANGAN MINYAK, GAS BUMI, dan CBM INDONESIA	TOTAL PEMANFAATAN MIGAS DAN BATUBARA
 *MINYAK BUMI	4.17 Billion BBL	BBM 70.2 Juta KL LPG 8,5 Juta MT
 *GAS BUMI	62,39 TSCF	6.668 BBTUD
 **COAL BED METHANE (CBM)	71,87 TCF	--
 *BATUBARA	38.805,48 Juta Ton	133 Juta Ton

Gambar 9 Cadangan dan pemanfaatan energi di Indonesia tahun 2021

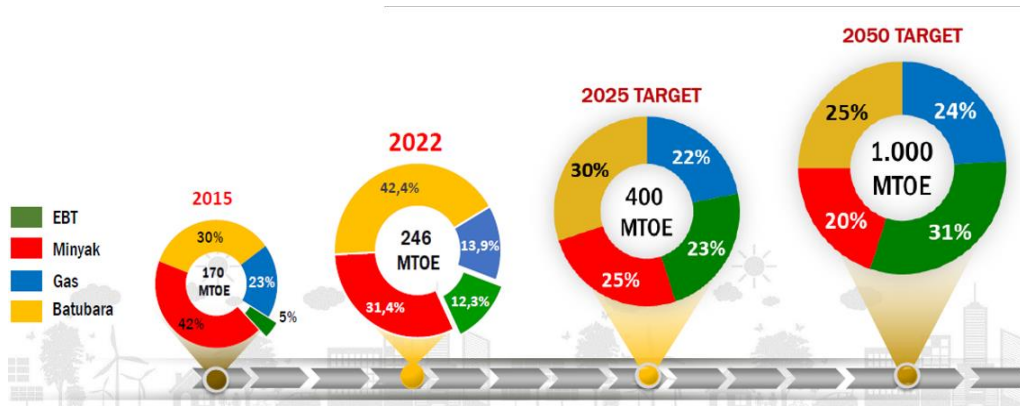
	TOTAL POTENSI ET INDONESIA 417,8 GW	TOTAL PEMANFAATAN 11,6 GW (2,77%)
 OCEAN	17,9 GW	0 MW (0%)
 GEOTHERMAL	23,9 GW	2.286 MW (9,6%)
 BIOENERGY	32,6 GW	2.284,4 MW (7%)
 WIND	60,6 GW	154,3 MW (0,25%)
 HYDRO	75 GW	6.601,7 MW (8,8%)
 SOLAR	207,8 GW	225 MWp (0,1%)

Gambar 10 Potensi energi terbarukan di Indonesia tahun 2021

Kebijakan Energi Nasional (KEN) merupakan landasan strategis yang bertujuan menjamin ketersediaan energi, memastikan akses masyarakat terhadap energi dengan harga yang terjangkau, serta menjaga kelestarian lingkungan dalam jangka panjang. Melalui KEN, pemerintah berupaya mewujudkan kemandirian dan ketahanan energi nasional dengan mengedepankan prinsip keadilan, keberlanjutan, dan kepedulian terhadap lingkungan. Untuk mencapai tujuan tersebut, KEN menetapkan sejumlah target yang telah diproyeksikan untuk tahun 2025 hingga 2050 sebagai arah kebijakan pengelolaan energi nasional ke depan. Tabel 1 merupakan target KEN di tahun 2025 hingga 2050 [2].

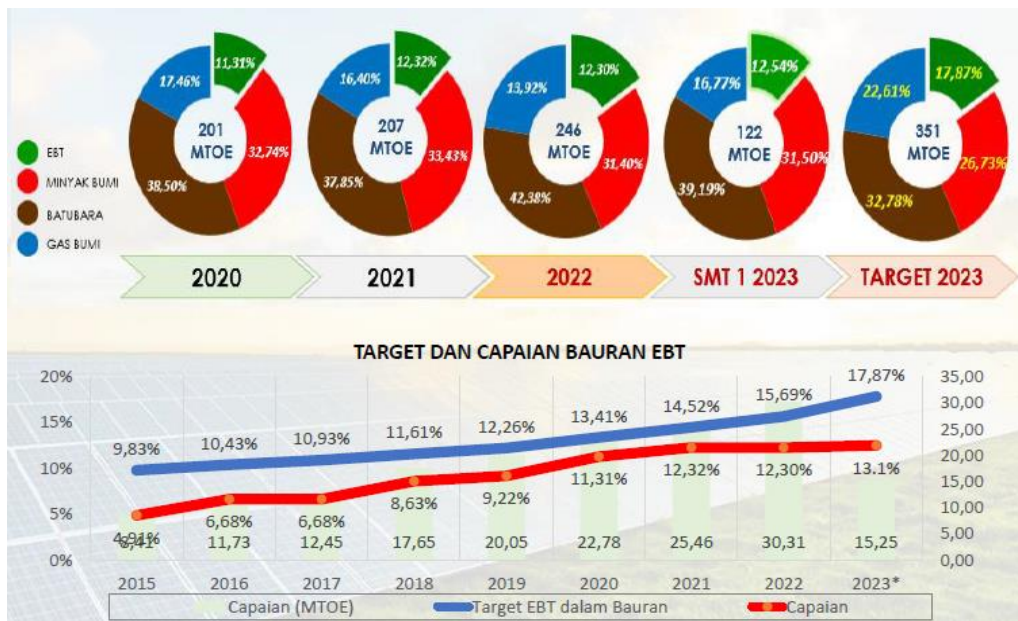
Tabel 1 Target KEN 2025 hingga 2050 berdasarkan PP 79 2014

Target KEN	2025	2050
Peran energi	Sebagai modal pembangunan	
Bauran EBT	23%	31%
Penyediaan energi	> 400 MTOE	> 1.000 MTOE
Pembangkit listrik	> 115 GW	> 430 GW
Elastisitas energi	< 1	<1
Listrik/kapita/tahun	2.500 kWh	7.000 kWh
Rasio elektrifikasi	~100%	~100%



Gambar 11 Target *Net Zero Emission* (NZE) 2025 berdasarkan PP 79 tahun 2014

Target pertumbuhan ekonomi dalam asumsi makro Kebijakan Energi Nasional (KEN) lama diproyeksikan sebesar 7%–8% untuk periode 2017–2022. Namun, realisasi pertumbuhannya tidak sesuai dengan harapan, karena hanya mencapai sekitar 5% hingga tahun 2019, bahkan menurun tajam menjadi -2,07% pada tahun 2020 dan hanya mencapai 3,7% pada 2021 akibat dampak pandemi Covid-19. Selain itu, sektor energi diperkirakan akan menjadi kontributor emisi CO₂ terbesar pada tahun 2030, setelah sektor kehutanan mencapai status *net sink carbon*. Berikut merupakan target dari PP 79 tahun 2014 [3].



Gambar 12 Target dan capaian bauran Energi Baru dan Terbarukan (EBT) hingga tahun 2023 (dalam MTOE)

Ketidaksesuaian antara target dan realisasi tersebut mendorong dilakukannya pembaruan terhadap kebijakan energi nasional, guna memperkuat ketahanan energi yang lebih tangguh dan adaptif terhadap dinamika global dan domestik dengan memproyeksikan perhitungan hingga tahun 2060. Tabel 2 merupakan perbandingan PP 79 tahun 2014 dan RPP KEN baru [3].

Tabel 2 Perbandingan PP 79 Tahun 2014 dan RPP KEN (baru)

No.	PP 79 Tahun 2014	RPP KEN (Baru)
1	Proyeksi perhitungan hanya sampai tahun 2050	Proyeksi perhitungan sampai tahun 2060
2	Tidak mempertimbangkan <i>Net Zero Emission</i> tahun 2060 (bauran energi primer tahun 2050: EBT 31%, Energi Tak Terbarukan 69%)	Mempertimbangkan <i>Net Zero Emission</i> tahun 2060 (bauran energi primer tahun 2060: EBT 70-72% , Energi Tak Terbarukan 28-30%)
3	Kebijakan Pendukung tidak ditujukan per Kebijakan Utama	Kebijakan Pendukung ditujukan per Kebijakan Utama dan untuk mendukung seluruh Kebijakan Utama
4	Kebijakan Pendukung tidak dibuat rinci per pasal	Kebijakan Pendukung dibuat rinci per pasal sehingga menambah jumlah pasal dalam RPP KEN

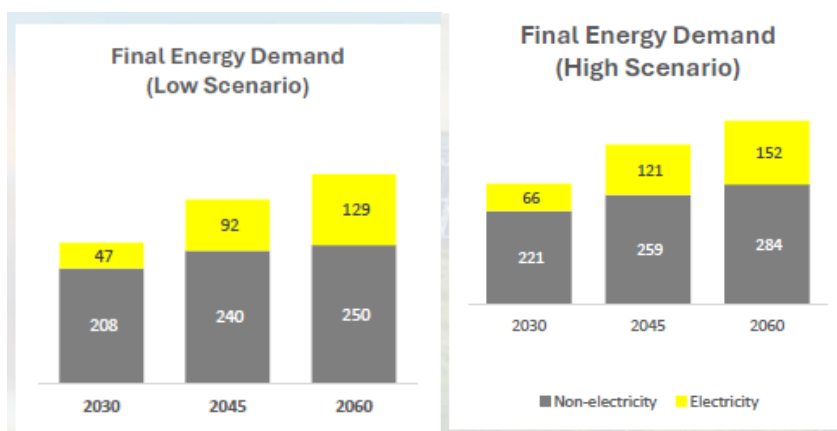
Tabel 3 memuat arah perubahan kebijakan dalam pembaruan KEN:

Tabel 3 Arah perubahan kebijakan dalam pembaruan KEN

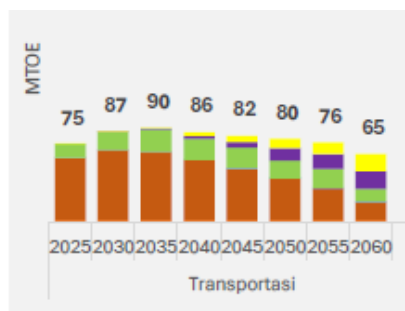
No.	PP 79 / 2014	RPP KEN
1	Grand Strategi dalam meningkatkan Ketahanan dan Kemandirian Energi: • Meningkatkan konservasi energi dan efisiensi energi • Memaksimalkan Energi Terbarukan • Meminimalkan penggunaan Bensin • Mengoptimalkan penggunaan Gas • Mengamankan dan menyeimbangkan pasokan energi dengan Batubara • Nuklir sebagai opsi terakhir	Grand Strategi untuk tetap menjaga Ketahanan Energi dalam Transisi Energi: • Menjaga keamanan pasokan dan keterjangkauan harga selama transisi • Meningkatkan Konservasi Energi dan Efisiensi Energi • Memaksimalkan Energi Baru dan Terbarukan • Meminimalkan penggunaan Fossil [Batubara dan Bensin] • Mengoptimalkan penggunaan Gas, sebagai transisi • Penggunaan Energi Baru [Nuklir] untuk menyeimbangkan dan mencapai Target Dekarbonisasi
2	Target dekarbonisasi adalah untuk mencapai pangsa EBT dalam bauran energi primer sebesar 23% tahun 2025 dan 31% pada 2050	Transisi energi mencapai puncak emisi di 2035 dan net zero emission pada tahun 2060. Target bauran EBT tahun 2060 sebesar 70% - 72%
3	Menetapkan proyeksi energi final dan konsumsi listrik, suplai dan bauran energi primer	Menetapkan proyeksi energi final dan konsumsi listrik, suplai dan bauran energi primer, tingkat emisi GRK sektor energi (CO ₂ e) dan intensitas emisi GRK sektor energi
4	Penguatan pendanaan untuk ketahanan energi melalui APBN dan APBD	Pendanaan untuk dekarbonisasi sektor energi dan ketahanan energi melalui APBN, APBD dan sumber lain nasional maupun internasional
5	Insentif fiskal dan nonfiskal untuk program diversifikasi energi dan pengembangan energi terbarukan	Insentif fiskal dan nonfiskal, disinsentif dan pembiayaan untuk BUMN dan BU serta kompensasi untuk BUMN dalam program transisi energi dan ketahanan energi
6	Peningkatan TKDN dalam Industri Energi nasional	Peningkatan TKDN meliputi teknologi dan rancangan bangunan, bahan material, komponen lain yang terkait, tenaga kerja, sumber pendanaan serta peningkatan nilai tambah
7	Akses untuk masyarakat terhadap energi secara adil dan merata dan penyiapan serta peningkatan kemampuan sumber daya manusia dalam penguasaan dan penerpan teknologi serta keselamatan	Partisipasi masyarakat dalam kegiatan usaha penyediaan dan pemanfaatan energi serta pendanaan dekarbonisasi energi dan ketahanan energi dan penyiapan serta peningkatan kemampuan sumber daya manusia dalam pelaksanaan program transisi energi
8	-	Kerja sama dan diplomasi energi tingkat internasional untuk memperkuat posisi keenergian Indonesia dan mewujudkan transisi energi yang berkeadilan

Sasaran pemanfaatan energi final dan penyediaan energi primer diarahkan pada peningkatan konsumsi energi yang sejalan dengan

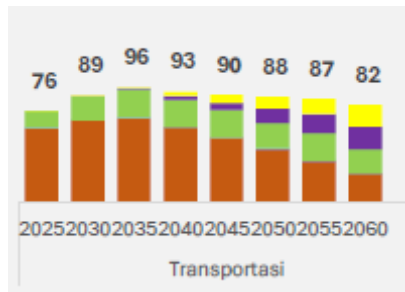
pertumbuhan sektor industri dan elektrifikasi. Konsumsi energi final terus meningkat dan didominasi oleh sektor industri, yang diperkirakan menyumbang sekitar 65% dari total konsumsi. Saat ini, sejumlah industri hulu masih bergantung pada energi fosil, seperti industri semen, pulp dan kertas, besi baja, pupuk, serta petrokimia. Di sisi lain, elektrifikasi mengalami peningkatan di semua sektor, dengan konsumsi listrik per kapita yang diproyeksikan mencapai 5.038 kWh (skenario rendah) hingga 6.526 kWh (skenario tinggi), termasuk penggunaan captive power di sektor industri. Selain itu, muncul pemanfaatan energi final baru seperti amonia dan hidrogen, yang menuntut pengembangan sistem tata kelola yang lebih terintegrasi dan berkelanjutan. Gambar 13-16 merupakan proyeksi energi final menuju *Net Zero Emission* (NZE) 2060 [3].



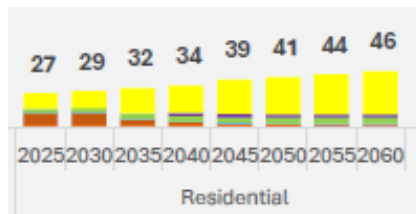
(a) Proyeksi energi final sektor *electricity high and low* skenario (dalam MTOE)



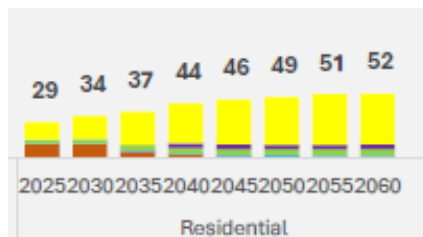
(b) Proyeksi energi final sektor transportasi *low* skenario (dalam MTOE)



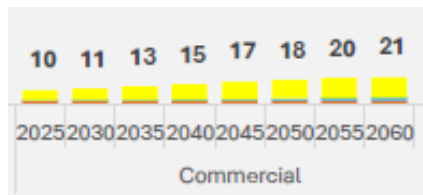
(c) Proyeksi energi final sektor transportasi *high* skenario (dalam MTOE)



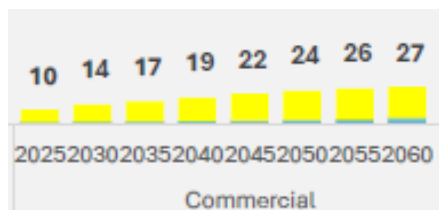
(d) Proyeksi energi final sektor rumah tangga *low* skenario (dalam MTOE)



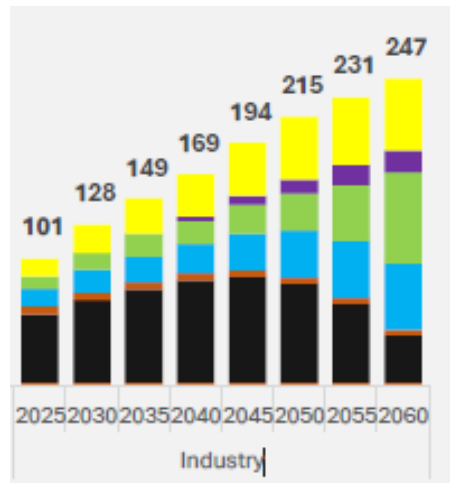
(e) Proyeksi energi final sektor rumah tangga *high* skenario (dalam MTOE)



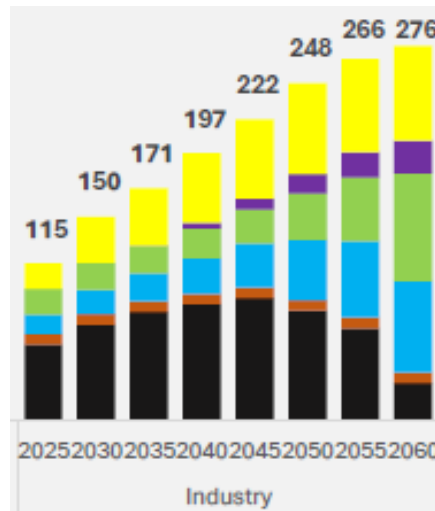
(f) Proyeksi energi final sektor komersial *low* skenario (dalam MTOE)



(g) Proyeksi energi final sektor komersial *high* skenario (dalam MTOE)

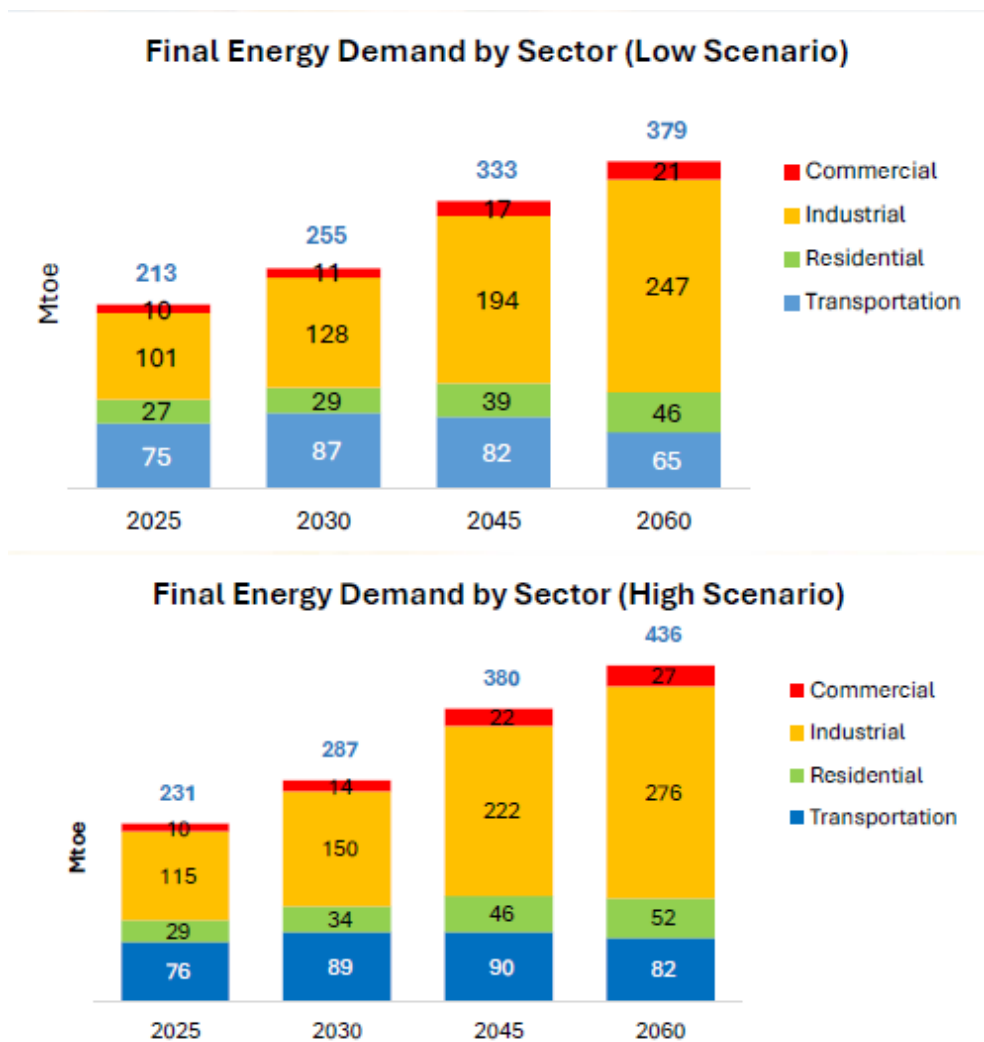


(h) Proyeksi energi final sektor industri *low* skenario (dalam MTOE)



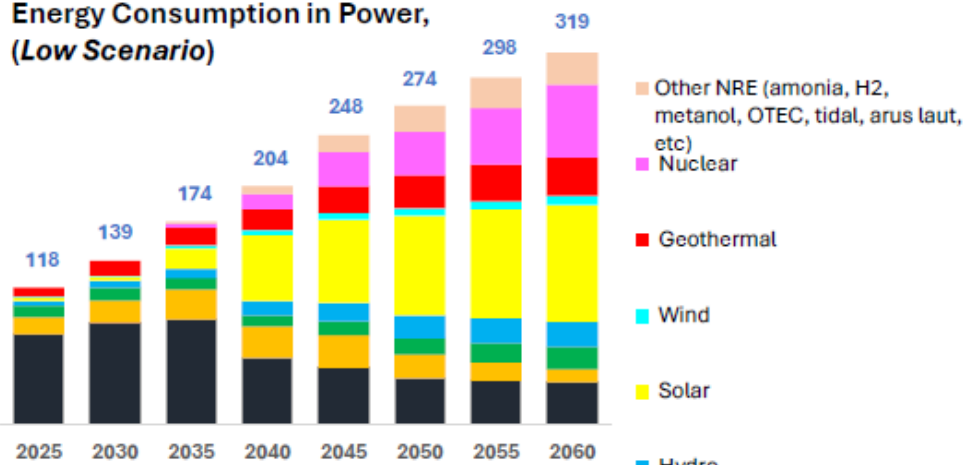
(i) Proyeksi energi final sektor industri *high* skenario (dalam MTOE)

Gambar 13 Proyeksi energi final menuju *Net Zero Emission* (NZE) 2060 (dalam MTOE)

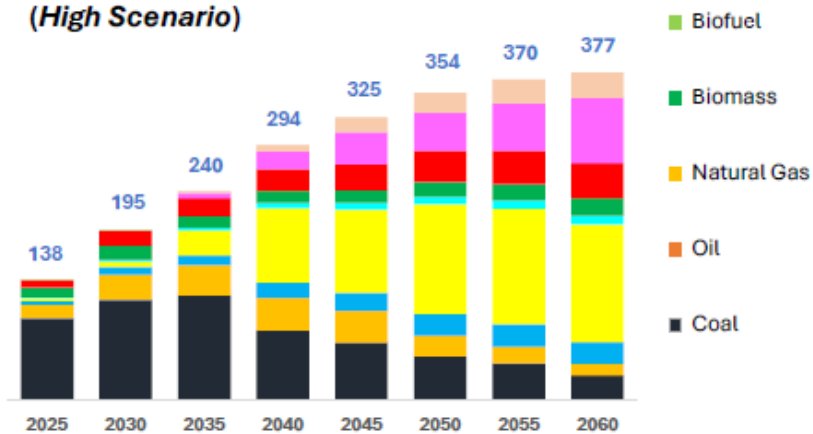


Gambar 14 Proyeksi kebutuhan energi final (Mtoe) menuju *Net Zero Emission* (NZE) 2060 berdasarkan sektor

Energy Consumption in Power, (Low Scenario)

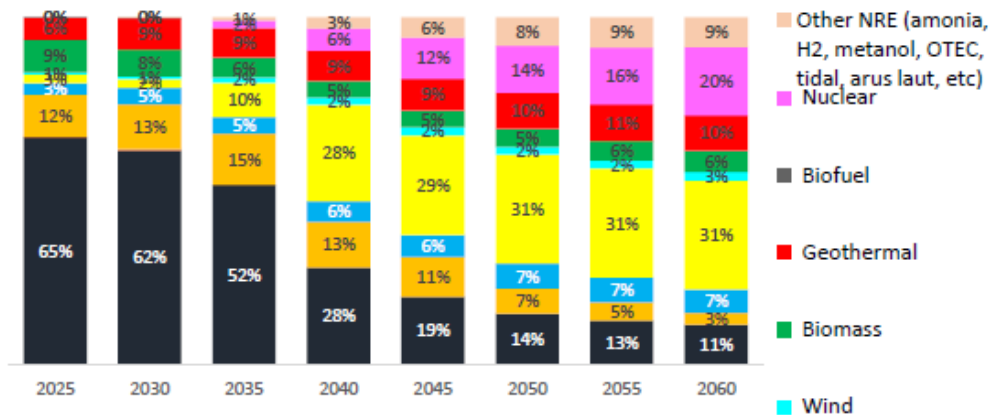


Energy Consumption in Power, (High Scenario)

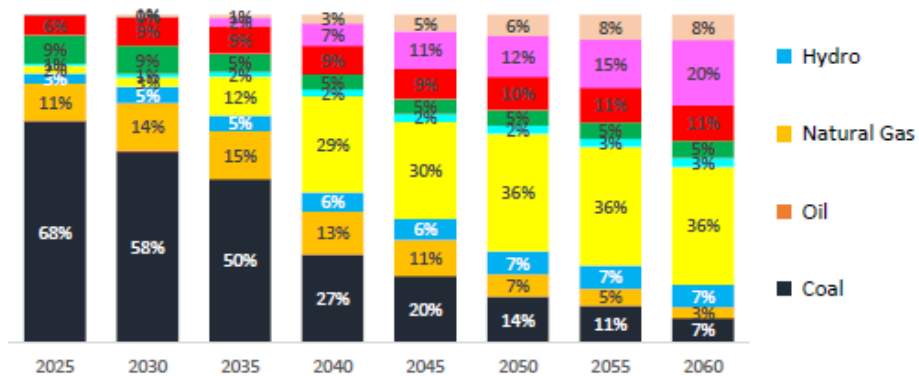


(a) Proyeksi konsumsi energi

Energy Mix in Power Generation (Low Scenario)

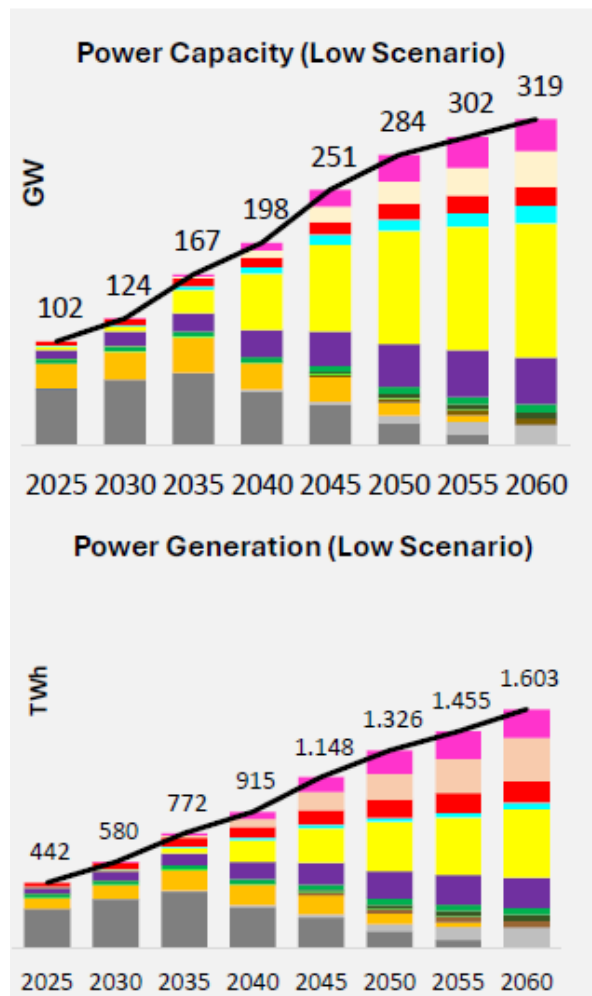


Energy Mix in Power Generation (High Scenario)

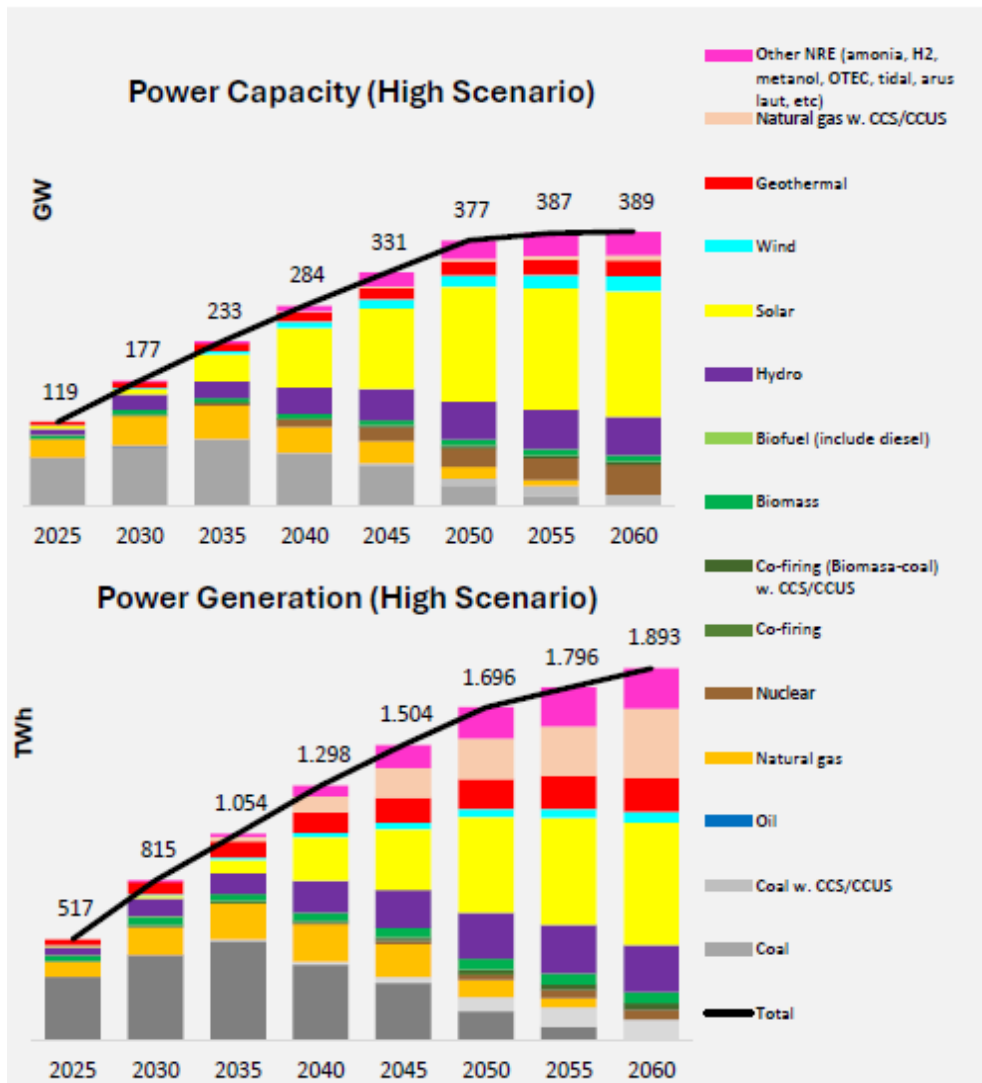


(b) Proyeksi bauran energi pada pembangkitan listrik

Gambar 15 Proyeksi konsumsi energi dan bauran energi di pembangkitan listrik



(a) Proyeksi pembangkitan daya (GW) dan energi listrik (TWh) Skenario rendah



(b) Proyeksi pembangkitan daya (GW) dan energi listrik (TWh) Skenario tinggi

Gambar 16 Proyeksi pembangkitan daya (GW) dan energi listrik (TWh)

3 PENTINGNYA MANAJEMEN ASET KETENAGALISTRIKAN

Energi listrik memegang peran penting yang telah merevolusi kehidupan menjadi lebih modern. Namun, penentuan arah perkembangan sistem kelistrikan menjadi suatu tantangan tersendiri. Tantangan utama dalam perkembangan sistem kelistrikan ini adalah bagaimana mencapai kinerja tinggi dan nilai tambah dengan biaya serendah mungkin. Nilai tambah ini tidak hanya dalam hal finansial, tetapi juga dalam aspek keselamatan, kualitas, dan keandalan pasokan [4].

Dalam konteks ini, manajemen aset / *asset management* (MA) merupakan pendekatan terstruktur yang digunakan untuk mengambil keputusan dan menjalankan rencana secara sistematis guna mencapai keseimbangan optimal antara kinerja, biaya, dan risiko. Manajemen aset mencakup aspek strategis, operasional, finansial, dan teknis yang saling berinteraksi dalam sistem yang terorganisir [4].

Menurut ISO 55000, manajemen aset adalah kegiatan yang terkoordinasi untuk memperoleh nilai dari aset-aset tersebut. Menurut Hastings (2014) manajemen aset mencakup seluruh siklus hidup aset mulai dari perencanaan kebutuhan, pendanaan, pengadaan, pemeliharaan, hingga penghapusan dengan tujuan untuk mendukung pencapaian sasaran organisasi secara efisien dan efektif. Manajemen aset dalam konteks perusahaan listrik adalah memastikan keandalan infrastruktur dan kualitas layanan, serta mengelola risiko terhadap nilai aset. Hal ini dilakukan dengan menjaga integritas, kinerja, dan ketersediaan aset melalui pendekatan siklus hidup dan evaluasi biaya total (TOTEX) [1].

Berikut merupakan daftar prinsip yang mengatur peran manajemen aset menurut ISO 2014 [1]:

- Operasi berkelanjutan: mengembangkan sistem inovatif dengan mengutamakan aspek keselamatan, mutu, kesehatan, dan kebersihan, serta memperhitungkan berbagai isu terkait pembangunan berkelanjutan;
- Perbaikan berkelanjutan: menetapkan proses pemantauan aset;
- Nilai: aset harus memberikan manfaat bagi perusahaan;

- Penyesuaian strategis: manajemen aset harus mencerminkan strategi dan tujuan yang jelas;
- Kepemimpinan dan tenaga kerja: melibatkan sumber daya manusia dengan mendefinisikan peran, tanggung jawab, dan pemberdayaan manajemen aset secara jelas;
- Kendalan: memastikan aset memenuhi tujuan, menjamin integritas siklus hidup aset, mendorong perbaikan berkelanjutan, serta menyediakan sumber daya manusia dan finansial sesuai keperluan untuk mencapai tujuan manajemen aset;
- Manajemen risiko: harus selaras dengan profil risiko perusahaan;
- Kecukupan: harus konsisten dengan strategi perusahaan.

Subkelompok manajemen aset dapat digunakan untuk membagi fokus serta untuk menganalisis skenario yang digunakan untuk perencanaan. Tabel 4 memuat subkelompok manajemen aset [4].

Tabel 4 Subkelompok dari manajemen aset

No	Subkelompok Manajemen Aset	Tugas
1	Strategi dan Perencanaan Manajemen Aset	Proses utama yang dilakukan untuk merumuskan kebijakan Manajemen Aset menjadi rencana konkret yang mencakup berbagai aktivitas yang berpijak pada strategi organisasi, dukungan struktur organisasi dan tenaga kerja, serta proses pengambilan keputusan dalam manajemen aset. Aktivitas-aktivitas ini berfungsi sebagai landasan dan masukan penting bagi tahapan implementasi manajemen siklus hidup aset.
2	Pengambilan Keputusan Manajemen Aset	Kerangka pengambilan keputusan yang dirancang untuk menentukan perpaduan aktivitas terbaik dalam rangka mencapai tujuan yang telah ditetapkan. Kerangka ini memanfaatkan pemahaman tentang aset serta kemampuan organisasi dan tenaga kerja sebagai faktor pendukung. Di dalamnya juga tercakup pertimbangan dalam menyeimbangkan antara pengeluaran dan manfaat, termasuk strategi untuk mengelola aset yang sudah menua.
3	Aktivitas Manajemen Aset selama Siklus Hidup Aset	Siklus hidup aset meliputi seluruh tahapan mulai dari pengadaan, penggunaan, perawatan, hingga penghapusan aset. Proses ini mengacu pada strategi dan rencana manajemen aset yang telah ditetapkan, ditopang oleh informasi aset yang memadai serta analisis risiko dan evaluasi berkala. Penanganan insiden juga menjadi bagian penting dalam cakupan ini.
4	Data dan Informasi Aset	Data menjadi bermakna saat ditempatkan dalam konteks tertentu dan disebut informasi, sedangkan pengetahuan muncul dari penggabungan pengalaman, nilai, wawasan,

No	Subkelompok Manajemen Aset	Tugas
		dan informasi tersebut. Pengetahuan ini termasuk analisis SWOT terhadap aset—menilai kekuatan, kelemahan, peluang, dan risiko yang ada. Selain itu, topik ini juga menyoroti proses pengumpulan dan pemanfaatan informasi dalam organisasi secara efektif.
5	Organisasi dan Sumber Daya Manusia	Mencakup pengelolaan hubungan sumber daya manusia, sekaligus aspek internal organisasi seperti gaya kepemimpinan, struktur organisasi, budaya kerja, kemampuan profesional, dan perilaku karyawan. Semua elemen ini memengaruhi efektivitas operasional dan implementasi manajemen aset secara keseluruhan.
6	Manajemen Risiko	Mencakup hal-hal seperti evaluasi seberapa penting suatu aset atau proses (tingkat kritis), serta penerapan manajemen risiko yang berkaitan dengan pemantauan kinerja dan pelaporan hasil. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa aset dikelola secara efektif dan setiap potensi kegagalan dapat diantisipasi melalui pengukuran dan akuntabilitas yang tepat.

4 SIKLUS HIDUP PERALATAN KETENAGALISTRIKAN

4.1 Siklus Hidup Peralatan

Peralatan ketenagalistrikan seperti transformator daya, pemutus arus (*circuit breaker*), kabel tegangan tinggi, dll. memiliki karakteristik aset jangka panjang dengan nilai strategis tinggi. Peralatan ini tidak hanya mahal dalam investasi awal, tetapi juga sangat menentukan keandalan, efisiensi, dan keamanan sistem tenaga listrik dalam jangka panjang.

Untuk itu, pemahaman mendalam terhadap siklus hidup (*life cycle*) dari peralatan tersebut menjadi pondasi utama dalam merancang strategi manajemen aset yang efektif dan berkelanjutan. Siklus hidup peralatan ketenagalistrikan tidak hanya mencakup fase pemakaian (*useful life*), melainkan mencakup keseluruhan proses dari perencanaan awal hingga akhirnya peralatan tersebut didekomisioning atau diganti.

Secara lengkap, siklus hidup peralatan ketenagalistrikan terdiri atas tahapan berikut:

a. Perencanaan dan Perancangan (*Design Planning & Specification*)

Fase pertama dimulai dari penentuan kebutuhan sistem, spesifikasi teknis, hingga pemilihan konfigurasi desain peralatan. Dalam tahap ini, keandalan, kemampuan beban, lingkungan operasional, dan integrasi dengan sistem eksisting menjadi pertimbangan utama. Kesalahan desain atau spesifikasi yang kurang matang dapat berdampak sistemik sepanjang umur peralatan. Keluaran utama dari tahap ini adalah dokumen teknis, spesifikasi pengadaan, dan requirement untuk manufaktur.

b. Fabrikasi dan Pengujian Pabrik (*Manufacturing & Factory Testing*)

Setelah spesifikasi ditetapkan dan vendor dipilih, proses produksi dilaksanakan oleh manufaktur. Fase ini mencakup pemilihan material, perakitan komponen, hingga pengujian pabrik (*Factory Acceptance Test/FAT*). FAT dilakukan untuk memastikan bahwa peralatan telah memenuhi standar teknis sebelum dikirim ke lokasi. Keluaran utama dari tahap ini adalah laporan FAT, sertifikat kualitas, dan *readiness for shipment*.

c. Transportasi

Transportasi peralatan ke lokasi proyek (*site*) memerlukan perhatian khusus, terutama untuk peralatan besar seperti transformator atau GIS. Getaran, perubahan suhu, dan kelembaban selama perjalanan dapat menyebabkan kerusakan awal (*infant defect*) jika tidak ditangani dengan prosedur yang tepat. Kegiatan pendukung dari tahap ini adalah pengecekan kondisi pascatransportasi, penggunaan sensor guncangan, pengemasan berstandar IEC.

d. Instalasi

Pada fase ini, peralatan dipasang di lokasi operasional dengan mengacu pada pedoman teknis pabrikan. Kualitas instalasi sangat menentukan performa jangka panjang peralatan. Kesalahan seperti penyambungan bushing yang tidak presisi, kesalahan torsi baut, atau kontaminasi saat pemasangan kabel dapat menimbulkan masalah tersembunyi yang muncul bertahun-tahun kemudian. Prosedur penting dari tahap ini adalah validasi posisi, koneksi mekanis dan elektrik, isolasi, serta kontrol lingkungan.

e. Pengujian di Lokasi (*Site Acceptance Testing/SAT*)

Sebelum peralatan dinyalakan, dilakukan serangkaian pengujian di lokasi untuk memastikan peralatan berfungsi normal dalam kondisi operasional aktual. SAT melengkapi FAT dengan verifikasi sistem proteksi, integrasi dengan SCADA, pengujian isolasi, dan pengukuran awal performa. Hasil SAT menjadi dasar *baseline* kondisi awal aset untuk *monitoring* selanjutnya.

f. Operasi (*Operation Phase*)

Setelah dinyalakan, peralatan masuk ke fase operasi aktif. Pada tahap ini, peralatan mengalami tegangan kerja, beban aktual, serta fluktuasi lingkungan. Inilah fase dengan durasi terpanjang dan berisiko tinggi, di mana gangguan listrik, transien, beban berlebih, dan penuaan material terjadi secara bertahap. Indikator penting pada tahap operasi di antaranya suhu kerja, arus beban, tegangan transien, histori gangguan, dll..

g. Pemeliharaan (*Maintenance: Monitoring, Repair, Refurbish, Overhaul*)

Fase pemeliharaan terbagi dalam beberapa strategi:

- *Condition Monitoring*: pemantauan online seperti DGA, PD, atau SFRA.
- *Preventive Maintenance*: pemeriksaan berkala terjadwal.
- *Corrective Repair*: perbaikan setelah terjadi gangguan minor.

- *Refurbishment*: Pemeliharaan dengan tujuan mengembalikan aset mendekati kondisi awal. *Refurbishment* biasanya dilakukan hanya sekali sepanjang umur aset karena biayanya yang mahal dan pengerjaan yang cukup kompleks. Contohnya, transformator daya yang bisa bertahan hingga 60 tahun umumnya diperemajakan setelah 30 tahun. Selain pertimbangan teknis dan keselamatan, manajer aset juga harus menilai total biaya (TOTEX) dan kebijakan regulasi saat ini [1]. *Refurbishment* bisa juga didefinisikan sebagai peremajaan komponen internal untuk memperpanjang umur (misalnya penggantian minyak, winding cleaning, penggantian *bushing*).
- *Overhaul*: pekerjaan besar menyeluruh, seperti penggantian mekanisme CB atau retuning proteksi GIS.
- Keputusan pemeliharaan harus berbasis data dan *risk-based approach*.

h. Evaluasi Umur Sisa (*Remaining Life Assessment*)

RLA adalah proses penilaian teknis untuk memperkirakan berapa lama lagi peralatan dapat beroperasi dengan aman dan andal. Penilaian ini berbasis kondisi aktual, bukan hanya usia kalender. RLA menjadi dasar untuk menyusun prioritas pemeliharaan lanjutan atau justifikasi penggantian aset. Pendekatan yang bisa digunakan adalah *health index*, *DGA trending*, *PD growth*, atau model statistik kegagalan.

i. Penggantian (*Replacement*)

Jika hasil RLA menunjukkan bahwa peralatan telah melewati ambang batas keamanan atau tidak ekonomis untuk dipertahankan, maka dilakukan proses penggantian. Proses ini mencakup perencanaan *downtime*, pelepasan unit lama, dan commissioning unit baru. *Replacement* (penggantian) merupakan satu-satunya pilihan apabila aset sudah terlalu rusak, teknologinya usang, tidak tersedia lagi keahlian yang diperlukan, atau biaya operasionalnya terlalu tinggi [1]. Tindakan penggantian sering kali menjadi investasi besar, sehingga harus didukung justifikasi teknis dan finansial yang kuat.

j. Dekomisioning dan Disposal

Pada akhir siklusnya, peralatan yang sudah diganti harus dikeluarkan dari sistem (*decommissioned*) dan didisposal dengan aman, sesuai regulasi lingkungan. Peralatan seperti trafo dan kabel minyak perlu ditangani secara khusus karena mengandung bahan berbahaya. Aspek penting pada

tahapan ini adalah dokumentasi riwayat peralatan, daur ulang material, dan pelaporan ke sistem informasi aset.

Memahami setiap tahap siklus hidup peralatan ketenagalistrikan sangat penting untuk memastikan bahwa keputusan yang diambil—baik dalam desain, pemeliharaan, maupun penggantian—berlandaskan pemahaman menyeluruh terhadap aset tersebut. Manajemen aset modern tidak lagi memandang peralatan hanya dari sisi operasional, tetapi dari sudut pandang siklus hidup penuh, dengan tujuan mengoptimalkan nilai sepanjang masa pakainya.

Dalam konteks transisi energi yang penuh tantangan, pendekatan ini menjadi semakin penting. Keandalan sistem tidak bisa lagi dijaga hanya melalui tindakan reaktif; ia membutuhkan perencanaan, pengendalian risiko, dan strategi investasi yang berakar pada pemahaman mendalam terhadap siklus hidup aset.

4.2 Sistem Pemeliharaan Aset

Manajemen aset jaringan listrik memerlukan pengambilan keputusan yang mencakup seluruh siklus hidup aset. Sepanjang siklus ini, kondisi dan kinerja aset dapat berubah seiring berjalannya waktu. Oleh karena itu, diperlukan pemeliharaan untuk memastikan aset tetap berfungsi sesuai tujuan. Pemeliharaan ini diklasifikasikan ke dalam tiga aktivitas utama, yaitu inspeksi, servis, dan *replacement*. Inspeksi dilakukan untuk menilai fungsi dan kondisi aset, misalnya melalui pemeriksaan visual atau pengujian teknis. Servis merupakan tindakan preventif dan korektif seperti pembersihan atau penggantian komponen. *Replacement* dilakukan jika aset perlu dihentikan operasinya dan diganti dengan aset baru untuk melanjutkan fungsi.

Kebijakan pemeliharaan aset merupakan bagian dari sistem Manajemen Aset (MA) dengan mempertimbangkan berbagai aspek, seperti lisensi operasional, ketersediaan sumber daya, dan pembatasan finansial [4]. Kebijakan pemeliharaan aset dibedakan berdasarkan waktu pelaksanaannya, yakni korektif dan preventif. Pemeliharaan korektif merupakan pemeliharaan yang dilakukan setelah peralatan mengalami kegagalan dengan tujuan perbaikan aset agar dapat berfungsi kembali. Pendekatan ini dikenal sebagai "*run-to-failure*" yang dapat diterapkan pada aset yang tidak terlalu

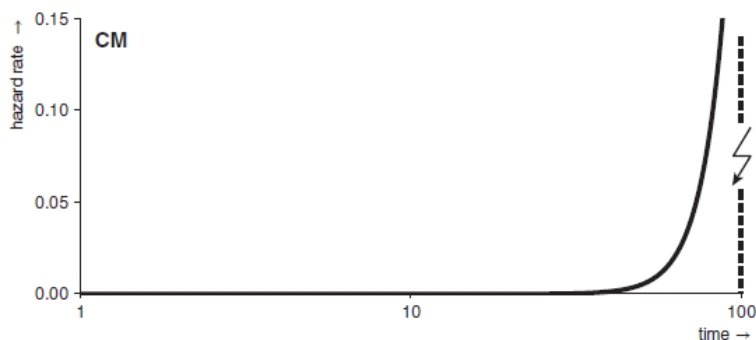
kritis. Namun, strategi ini cenderung menimbulkan biaya tinggi dan kebutuhan suku cadang serta peralatan cadangan yang cukup besar [1].

Sebaliknya, pemeliharaan preventif merupakan pemeliharaan yang bertujuan mencegah kegagalan dan merupakan pemeliharaan yang sistematis atau terjadwal (berbasis waktu) serta pendekatan prediktif. Pendekatan utama dalam strategi preventif ini, yaitu pemeliharaan berbasis periode (PBM), pemeliharaan berbasis kondisi (CBM), berbasis risiko (RBM), dan berorientasi keandalan (RCM). Sementara itu, strategi pemeliharaan ini secara umum dilakukan secara rutin untuk menghambat kerusakan aset dan mencegah kerusakan sebelum terjadi [1].

4.2.1 **Corrective Maintenance (CM)**

Pemeliharaan Korektif (CM) merupakan strategi pemeliharaan yang hanya dilakukan setelah suatu aset mengalami kegagalan, tanpa ada tindakan pencegahan sebelumnya (*run-to-fail*). Pemeliharaan korektif ini cocok untuk aset yang sulit mendapatkan akses karena lokasi terpencil dan sulit dijangkau, di mana pemeliharaan rutin lebih tidak realistis. Sehingga aset dirancang agar lebih tahan lama dan minim perawatan [4].

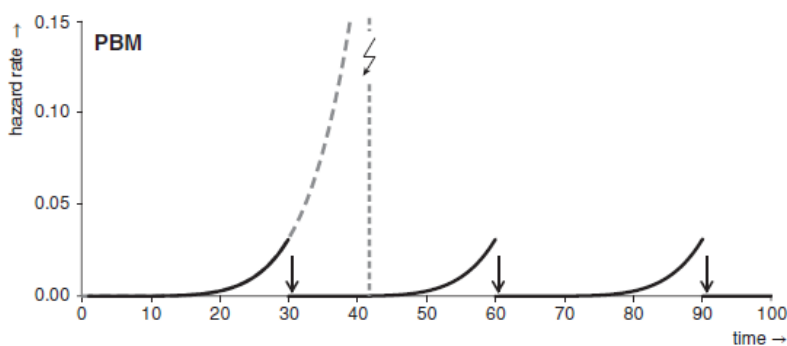
Pemeliharaan korektif cocok jika biaya operasional (OPEX) lebih tinggi daripada biaya investasi (CAPEX), jika pemeliharaan justru memperbesar risiko kegagalan (misalnya pada generator), jika aset memang tidak bisa diperbaiki (seperti lampu), atau jika aset tidak dapat dijangkau (misalnya fasilitas di lokasi ekstrem). Namun, sangat penting untuk memastikan kegagalan aset dapat dideteksi dengan cepat, sehingga solusi seperti redundansi sistem, akses cepat ke suku cadang, dan rencana darurat sangat diperlukan [4]. Gambar 17 merupakan konsep dari pemeliharaan korektif.



Gambar 17 Konsep pemeliharaan korektif [4]

4.2.2 *Period-Based Maintenance (PBM)*

Pemeliharaan berbasis periode (PBM) adalah strategi pemeliharaan preventif yang dilakukan pada interval tetap. Tujuannya untuk mencegah kegagalan aset dengan melakukan inspeksi, servis, atau penggantian sebelum kerusakan terjadi. Inspeksi dilakukan secara rutin tanpa mempertimbangkan kondisi aktual aset. PBM ini memiliki keunggulan sistem dapat berjalan lebih stabil dan dapat diprediksi. Namun, terdapat kerugian meliputi risiko pemeliharaan berlebihan, penggunaan sumber daya yang tidak efisien, dan kemungkinan munculnya *child mortality* (kegagalan awal setelah servis atau penggantian). PBM merupakan strategi yang memerlukan sistem perencanaan dan pemantauan yang kuat, dengan OPEX dan CAPEX yang cenderung tinggi. Namun, PBM sangat cocok untuk aset yang membutuhkan keandalan tinggi dan tidak mentoleransi gangguan [4]. Gambar 18 merupakan konsep dari pemeliharaan berbasis periode.



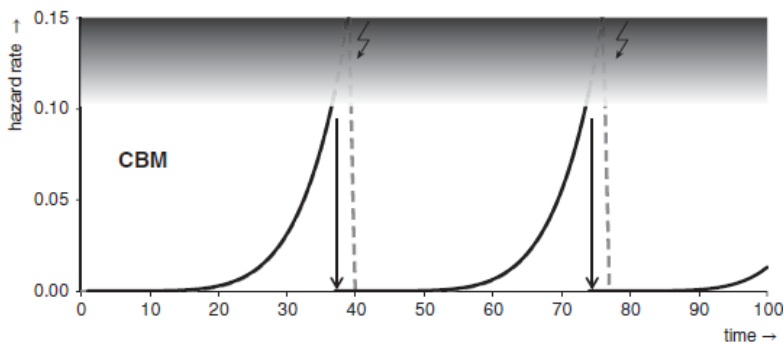
Gambar 18 Konsep pemeliharaan berbasis periode [4]

4.2.3 *Time-Based Maintenance (TBM)*

Pemeliharaan berbasis waktu (TBM) merupakan pemeliharaan yang dilakukan secara rutin berdasarkan jadwal atau jumlah siklus operasi. Pemeliharaan ini biasanya ditetapkan oleh produsen peralatan atau divisi operasi dan *maintenance* perusahaan. Strategi pemeliharaan ini memungkinkan dilakukan penggantian atau perawatan yang tidak diperlukan, karena tidak mempertimbangkan kondisi aktual aset. Hal ini dapat menyebabkan kegiatan pemeliharaan yang berlebihan jika jadwal pemeliharaan tidak diatur secara baik. Namun, TBM tetap relevan dalam situasi tertentu, seperti jika data kondisi aset tidak tersedia atau sistem terlalu kompleks [1].

4.2.4 Condition-Based Maintenance (CBM)

Pemeliharaan berbasis kondisi (CBM) merupakan strategi dengan tindakan pemeliharaan, perbaikan, atau penggantian hanya dilakukan ketika kondisi aset saat ini maupun ketika kondisi bisa diprediksi berpotensi mengganggu keandalan sistem atau membahayakan keselamatan. Tujuan CBM adalah memperpanjang masa pakai aset dengan mengoptimalkan biaya siklus hidup dan TOTEX. Untuk mencapai tujuan tersebut dilakukan dengan meningkatkan ketersediaan dan kinerja aset, sekaligus menekan biaya dengan menghindari tindakan yang tidak perlu. Namun, CBM memerlukan investasi besar dalam teknologi pemantauan dan manajemen data, karena keterbatasan data pemeliharaan [1]. Gambar 19 merupakan konsep dari pemeliharaan berbasis kondisi.



Gambar 19 Konsep pemeliharaan berbasis kondisi [4]

4.2.5 Reliability-centered Maintenance (RCM)

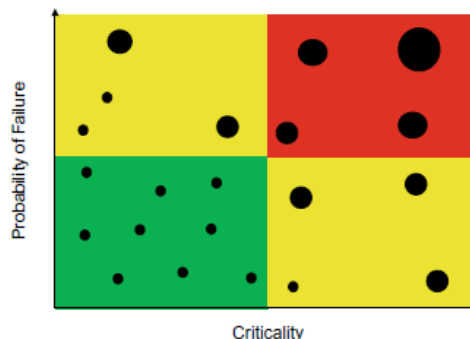
Pemeliharaan Berorientasi Keandalan (RCM) merupakan strategi pemeliharaan dengan menyusun rencana pemeliharaan berdasarkan analisis mendalam terhadap fungsi aset, potensi kegagalan, serta dampaknya. RCM menggabungkan strategi korektif, berbasis waktu, dan berbasis kondisi, serta menggunakan metode FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*). Strategi ini menghubungkan fungsi aset, keandalan, keselamatan, dan strategi pemeliharaan yang disusun melalui proses seperti pemilihan aset, identifikasi potensi kegagalan, analisis konsekuensi, dan perencanaan kegiatan pemeliharaan. RCM sangat berguna untuk fasilitas dengan risiko tinggi seperti kilang minyak. Namun, untuk penerapan pada sektor kelistrikan masih terbatas karena kompleksitas dan keragaman aset [1].

4.2.6 Risk-base Maintenance (RBM)

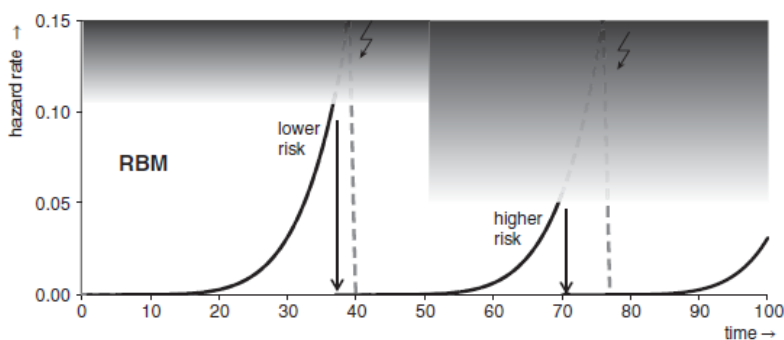
Pemeliharaan Berbasis Risiko (RBM) merupakan strategi pemeliharaan dengan mempertimbangkan dua faktor utama, yaitu kemungkinan kegagalan aset dan tingkat kritikalitasnya. Pendekatan yang digunakan strategi RBM adalah untuk mengevaluasi risiko yang mencakup aspek finansial, lingkungan, keselamatan, reputasi, regulasi, dan pasokan energi. Risiko ini dapat dinilai menggunakan indeks numerik atau satuan teknis seperti energi yang diperkirakan tidak tersuplai (MWh), yang kemudian dapat dimonetisasi [1].

Berdasarkan kombinasi dua faktor tersebut, aset dikategorikan dalam tiga kuadran [1]:

- Zona merah: untuk pemeliharaan mendesak atau penggantian aset;
- Zona kuning: untuk pemantauan kondisi *real-time* dan pemeliharaan rutin (pemeliharaan preventif sesuai rencana);
- Zona hijau: untuk frekuensi pemeliharaan yang lebih rendah dengan mempertimbangkan pendekatan “*run-to-failure*”.



Gambar 20 Decision model RBM



Gambar 21 Konsep pemeliharaan berbasis risiko [4]

5 PENTINGNYA PENGUJIAN TEGANGAN TINGGI PADA SETIAP TAHAP MANAJEMEN ASET

Dalam dunia ketenagalistrikan, tegangan tinggi bukan hanya realitas sistem, tetapi juga sumber utama risiko yang harus dikelola. Sistem tenaga listrik dirancang untuk mentransmisikan energi dalam tegangan yang sangat tinggi (150 kV, 500 kV, bahkan hingga di atas 800 kV) demi efisiensi dan cakupan wilayah. Namun, semakin tinggi tegangan, semakin besar pula potensi terjadinya *dielectric breakdown*, *flashover*, serta kerusakan isolasi yang bersifat destruktif.

Pengujian tegangan tinggi berperan penting untuk mencegah terjadinya kerusakan *dielectric breakdown*, *flashover*, serta kerusakan isolasi. Pengujian tegangan tinggi juga sangat penting dalam manajemen aset ketenagalistrikan. Pengujian ini diperlukan pada seluruh tahap dalam siklus peralatan listrik sejak pembuatan, pemasangan, operasi, pemeliharaan, dan penggantian. Pengujian ini tidak hanya berfungsi untuk menilai kondisi teknis peralatan listrik seperti transformator, kabel, dan pemutus arus, tetapi juga menjadi alat diagnostik proaktif untuk mendeteksi potensi kegagalan sejak dini. Dengan demikian, pengujian tegangan tinggi memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam strategi pemeliharaan, peremajaan, maupun penggantian aset. Peranannya semakin krusial seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem kelistrikan yang tangguh dalam menghadapi dinamika transisi energi. Oleh karena itu, pengujian tegangan tinggi (*high voltage testing*) menjadi komponen krusial dalam seluruh tahapan manajemen aset, mulai dari fase pembuatan, instalasi, operasi, pemeliharaan hingga penggantian peralatan.

Pada bab ini akan dibahas tentang pengujian tegangan tinggi dan peranannya dalam manajemen aset ketenagalistrikan.

5.1 Pengujian Tegangan Tinggi

Pengujian tegangan tinggi adalah prosedur pengujian yang dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dan keamanan peralatan listrik, seperti transformator, generator, dan kabel, ketika beroperasi pada tegangan tinggi. Tujuan pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa peralatan listrik dapat beroperasi dengan aman dan efektif dalam kondisi tegangan tinggi.

Jenis pengujian tegangan tinggi

- Pengujian ketahanan isolasi (insulation withstand test)
- Pengujian ketahanan tegangan tinggi (high voltage withstand test)
- Pengujian partial discharge (PD)

Tujuan pengujian

- Mengevaluasi kinerja isolasi peralatan listrik
- Mengidentifikasi potensi kegagalan peralatan listrik
- Memastikan keamanan dan keandalan peralatan listrik

Pengujian tegangan tinggi sangat penting dalam perusahaan listrik untuk memastikan bahwa peralatan listrik dapat beroperasi dengan aman dan efektif dalam kondisi tegangan tinggi.

5.1.1 Istilah Umum dalam Pengujian Tegangan Tinggi

Beberapa istilah penting yang umum digunakan dalam pengujian tegangan tinggi meliputi [5]:

- *Test object* (objek uji)
- *Discharge* (peluahan)
- *Flashover*
- *Electrical breakdown* (tembus listrik)
- *Spark over*

1. *Test object* (objek uji)

Objek yang diuji dalam pengujian tegangan tinggi dibagi menjadi dua kategori:

- Spesimen bahan isolasi
Spesimen adalah contoh bahan isolasi tunggal. Untuk bahan padat, bentuknya berupa pelat. Untuk bahan gas atau cair, digunakan wadah (bejana) berisi dua elektroda.
- Peralatan listrik
Jika yang diuji adalah peralatan listrik, maka fokusnya adalah pada:
 - a. **Isolasi eksternal:** seperti udara atau bahan padat di luar peralatan (contohnya *bushing transformer*). Sifatnya dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti polusi dan mikroorganisme.

- b. **Isolasi internal:** bahan padat, gas, atau cair yang berada di dalam peralatan (misalnya minyak isolasi dalam transformator). Isolasi ini tidak terpengaruh oleh lingkungan luar.

Dalam pengujian, objek dianggap sebagai sistem isolasi yang berada di antara dua elektroda. Tujuannya adalah menciptakan distribusi medan listrik dan tegangan yang menyerupai kondisi nyata.

2. *Discharge* (Peluhan)

Jika bahan isolasi ditempatkan di antara dua elektroda dengan beda tegangan, medan listrik yang terbentuk dapat menyebabkan pelepasan muatan listrik. Pelepasan ini disebut *discharge*.

Jenis-jenis *discharge*:

- ***Partial discharge*:** Pelepasan muatan listrik yang tidak menjembatani dua elektroda, sehingga tegangan tetap terjaga. *Partial discharge* dapat bertumbuh dalam isolasi membentuk pemohonan elektrik/*electrical treeing*.
- ***Electrical breakdown*:** Pelepasan muatan listrik yang menjembatani dua elektroda.

Pada bahan isolasi gas dan cair, tembus listrik ini disebut *spark over*. Setelah peristiwa ini selesai, bahan gas atau cair bisa kembali berfungsi sebagai isolator (*self-restoring*).

Pada bahan isolasi padat dan udara, ada dua jenis tembus listrik:

- ***Flashover*:** Tembus listrik eksternal melalui permukaan bahan.
- ***Puncture*:** Tembus listrik internal yang merusak bagian dalam bahan.

Setelah *flashover*, sistem isolasi biasanya bisa pulih, tetapi jika berlangsung lama, bisa meninggalkan kerak di permukaan isolator. Sebaliknya, jika terjadi *puncture* pada bahan padat, kerusakannya bersifat permanen dan bahan tersebut tidak bisa digunakan lagi.

Berdasarkan kemampuan untuk pulih, isolasi dibagi menjadi:

- ***Self-restoring insulation*:** Isolasi yang bisa pulih setelah gangguan (misalnya gas atau cairan).
- ***Non-self-restoring insulation*:** Isolasi yang rusak permanen dan tidak bisa digunakan kembali (misalnya bahan padat yang mengalami *puncture*).

5.1.2 Tujuan Pengujian Tegangan Tinggi

Pengujian tegangan tinggi dilakukan dengan beberapa tujuan utama:

- a. Mengukur sifat listrik bahan isolasi
Sistem isolasi peralatan listrik terdiri atas berbagai jenis bahan isolasi—padat, cair, gas, atau kombinasi ketiganya. Karena sulit mengukur sifat listrik bahan yang sudah menyatu dalam sistem, maka pengujian dilakukan sebelum bahan tersebut digunakan dalam peralatan. Pengujian ini juga penting dalam pengembangan bahan isolasi baru.
- b. Menilai kualitas isolasi peralatan
Kualitas isolasi dapat diketahui dari nilai rugi-rugi dielektrik dan tingkat kerusakan akibat *partial discharge*.
- c. Memastikan keandalan peralatan pada tegangan nominal
Peralatan harus mampu beroperasi terus-menerus pada tegangan kerjanya. Oleh karena itu, dilakukan pengujian tegangan tinggi untuk memastikan keandalannya.
- d. Menguji ketahanan terhadap tegangan lebih akibat *ground fault*
Ketika terjadi hubung singkat satu fasa ke tanah, tegangan pada fasa lain dapat meningkat hingga $\sqrt{3}$ kali lipat. Meskipun singkat, peralatan harus mampu menahan tegangan lebih ini.
- e. Menguji ketahanan terhadap tegangan impuls akibat sambaran petir
Sistem transmisi yang terbuka rentan terhadap petir. Sambaran petir dapat menimbulkan *impulse overvoltage* yang merambat ke gardu induk. Oleh karena itu, peralatan harus diuji terhadap tegangan impuls serupa.
- f. Menguji ketahanan terhadap *switching impulse*
Tegangan transien dapat muncul saat pemutusan rangkaian, terutama setelah pemutus daya (*circuit breaker*) membuka. Tegangan ini bisa mencapai dua kali lipat dari tegangan normal dan memiliki frekuensi sekitar 1000 Hz. Oleh karena itu, perlu diuji ketahanan terhadap *switching impulse*.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pengujian tegangan tinggi bertujuan untuk:

- a. Menilai sifat listrik bahan isolasi
- b. Mendeteksi degradasi isolasi peralatan

- c. Menguji ketahanan peralatan terhadap:
- Tegangan kerja (normal)
 - Tegangan lebih pada frekuensi sistem
 - Tegangan impuls petir
 - Tegangan impuls akibat pemutusan (*switching impulse*)

5.1.3 Jenis Pengujian Tegangan Tinggi

Dilihat dari waktunya, pengujian tegangan tinggi dibagi menjadi empat jenis, yaitu:

- a. *Type Test*
Dilakukan pada produk hasil rancangan baru. Tujuannya memastikan bahwa desain baru dapat bekerja dengan baik.
- b. *Sample Test*
Dilakukan pada beberapa sampel acak dari suatu produksi massal, seperti 30 meter dari total 3000 meter kabel. Tujuannya untuk mengevaluasi konsistensi kualitas. Pengujian ini bersifat merusak (*destructive*), sehingga sampel tidak bisa digunakan lagi.
- c. *Routine Test*
Dilakukan pada setiap unit yang diproduksi. Pengujian ini tidak merusak dan mencakup pengukuran seperti *partial discharge*, *dielectric loss factor*, dll..
- d. *Installation Test*
Dilakukan setelah peralatan dipasang di lokasi. Karena beberapa komponen besar seperti *bushing* atau minyak isolasi baru dipasang di lapangan, maka uji instalasi memastikan peralatan bekerja dengan baik setelah perakitan akhir.

5.1.4 Tegangan Uji dan Jenis Pengujian

a. Jenis tegangan uji

Tergantung pada karakteristik peralatan, uji tegangan tinggi dapat dilakukan dengan:

- Tegangan tinggi DC
- Tegangan tinggi AC
- Tegangan tinggi impuls

Umumnya digunakan tegangan tinggi AC dan impuls, sedangkan tegangan tinggi DC digunakan untuk peralatan berkapasitas besar.

b. Kategori dampak pengujian

Berdasarkan dampaknya terhadap objek uji, pengujian dibagi dua, yaitu:

1) *Non-Destructive Test* (tidak merusak)

- Pengukuran resistansi isolasi
- Pengukuran *dielectric loss factor*
- Pengukuran *partial discharge*
- Pengukuran konduktivitas
- Pemetaan medan listrik

2) *Destructive Test* (merusak)

- *Withstand Test*

Tegangan dinaikkan hingga melebihi tegangan kerja dan dipertahankan dalam waktu tertentu. Jika muncul arus bocor signifikan, peralatan dinyatakan gagal.

- *Discharge Test*

Tegangan dinaikkan bertahap hingga terjadi *partial discharge*. Hasil dikoreksi terhadap kondisi udara standar dan dibandingkan dengan spesifikasi.

- *Breakdown Test*

Tegangan dinaikkan terus hingga terjadi *electrical breakdown*. Hasil pengukuran dibandingkan dengan spesifikasi untuk menentukan apakah lulus atau gagal uji.

5.1.5 Kondisi Pengujian Tegangan Tinggi

Isolasi eksternal pada peralatan listrik luar ruangan dapat terkena polusi dari udara dan juga menjadi basah karena hujan atau embun. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan tembus dipengaruhi oleh tingkat polusi dan kondisi permukaan yang basah.

Untuk mencerminkan kondisi nyata di lapangan, isolasi eksternal perlu diuji dalam tiga suasana berbeda:

- Kering
- Basah
- Terkontaminasi

a. Pengujian dalam Kondisi Basah

Pengujian basah meniru kondisi hujan dan membutuhkan alat penyiram air buatan. Alat ini terdiri atas beberapa pipa horizontal dengan *nozzle* (penyemprot) yang merata sepanjang pipa. Air dipompa dan disemprotkan ke objek uji dari atas, dengan arah semprotan diatur membentuk sudut $\pm 45^\circ$ agar komponen vertikal dan horizontal sama besar (1–1,5 mm/menit).

Sebelum pengujian dimulai, objek uji disiram selama 15 menit. Air dalam pengujian harus memiliki resistivitas standar, yaitu 10.000 ohm-cm pada suhu 20 °C. Jika suhu berbeda, maka resistivitas dikoreksi menggunakan faktor suhu yang sesuai.

b. Pengujian Isolasi Terkontaminasi

Pengujian ini dilakukan di ruang tertutup khusus, dan bertujuan menilai:

- Batas tingkat kontaminasi yang dapat ditahan oleh isolasi pada tegangan tertentu.
- Besarnya tegangan yang masih bisa ditahan oleh isolasi jika sudah terkontaminasi.
- Sebelum diuji, permukaan isolasi dibersihkan dari kotoran agar hanya tersisa bahan aslinya. Tegangan pengujian langsung diterapkan tanpa peningkatan bertahap.

Ada dua metode pengujian kontaminasi:

a. *Post-Contamination Method*

Permukaan objek uji dilapisi secara merata dengan campuran air, bahan non-konduktif, dan garam (untuk mengatur resistivitas). Setelah kering, objek dimasukkan ke ruang uji. Kabut air dimasukkan hingga permukaan menjadi sangat konduktif, lalu tegangan uji langsung diberikan.

b. *Salt-Fog Method (Saline Fog Method)*

Objek uji dibersihkan dengan air lalu dimasukkan ke ruang uji dalam kondisi basah. Kabut garam dimasukkan ke dalam ruangan, dan tegangan yang telah ditentukan diterapkan selama 1 jam atau hingga terjadi *flashover*.

5.1.6 Efek Kondisi Udara pada Pengujian Tegangan Tinggi

Udara merupakan salah satu komponen penting dalam sistem isolasi eksternal. Namun, sifat listrik udara dapat dipengaruhi oleh dua faktor utama,

yaitu **kerapatan (densitas)** dan **kelembaban**. Karena itu, hasil pengujian isolasi eksternal sangat tergantung pada kondisi udara saat pengujian dilakukan.

Untuk memperoleh hasil pengujian yang konsisten, diperlukan standar kondisi udara, yaitu:

- Suhu udara: 20 °C
- Tekanan udara: 760 mmHg
- Kelembaban absolut: 11 gram/m³

Jika pengujian dilakukan pada kondisi yang berbeda dari standar tersebut, maka hasilnya harus dikoreksi agar dapat dibandingkan secara adil.

a. Koreksi untuk pengujian AC dan impuls positif

Pada pengujian *High Voltage AC* dan *positive polarity switching impulse*, koreksi dilakukan dengan menggunakan faktor koreksi (nilai *m* dan *n*) yang dapat diperoleh dari kurva standar. Nilai ini membantu menyesuaikan hasil uji dengan kondisi udara standar.

b. Koreksi untuk impuls negatif

Untuk pengujian *switching impulse* dengan polaritas negatif, data nilai koreksi belum tersedia. Oleh karena itu, koreksi terhadap kerapatan udara tidak dilakukan pada pengujian ini.

c. Pengukuran kelembaban

Kelembaban mutlak ditentukan dengan menggunakan higrometer, yaitu alat yang mengukur suhu dalam dua kondisi:

- Suhu kering (*dry bulb*)
- Suhu basah (*wet bulb*)

Dari kedua nilai ini, kelembaban absolut dapat dihitung dan digunakan dalam proses koreksi hasil pengujian.

5.1.7 Penataan Objek Uji dalam Pengujian Tegangan Tinggi

Tembus listrik terjadi jika medan listrik yang mengenai suatu objek melebihi kekuatan dielektrik material objek tersebut. Pola medan listrik di antara dua elektroda tidak hanya dipengaruhi oleh bentuk elektroda, tetapi juga oleh keberadaan objek lain di sekitarnya.

Artinya, kehadiran benda-benda di sekitar objek uji dapat memengaruhi distribusi medan listrik dan berdampak pada hasil pengujian. Untuk memastikan hasil pengujian yang akurat, perlu ditetapkan jarak bebas minimum antara objek uji dan benda lain di sekitarnya.

Secara umum, jarak bebas minimum yang disarankan adalah 1,5 kali panjang lintasan terpendek dari kemungkinan jalur *flashover* pada objek uji. Pada jarak ini, pengaruh benda lain terhadap medan listrik menjadi sangat kecil.

Namun, jika pengujian menggunakan *switching impulse voltage* atau tegangan sangat tinggi, jarak bebas ini perlu diperbesar untuk mencegah terjadinya percikan listrik (*sparkover*) ke objek lain di sekelilingnya.

5.1.8 Evaluasi Hasil Pengujian Isolasi Eksternal

Untuk menentukan apakah suatu peralatan lulus pengujian isolasi eksternal, dilakukan beberapa langkah sebagai berikut:

- a. Ukur suhu basah dan suhu kering menggunakan *hygrometer*.
- b. Ukur tekanan udara menggunakan *barometer*.
- c. Gunakan hasil pengukuran tersebut untuk menghitung faktor koreksi kerapatan udara dan faktor koreksi kelembapan udara.
- d. Hitung hasil pengujian awal (misalnya disebut V_u) sesuai jenis pengujian yang dilakukan.
- e. Koreksi hasil pengujian ke kondisi standar menggunakan rumus:

$$V_{us} = \frac{k_h}{k_d} V_u \quad (1)$$

Di mana k_h dan k_d adalah faktor koreksi kelembapan dan kerapatan udara.

- f. Bandingkan V_{us} (hasil pengujian yang sudah dikoreksi ke kondisi standar) dengan nilai referensi V_{ss} yang diambil dari standar atau spesifikasi teknis.
- g. Jika $V_{us} \geq V_{ss}$, maka peralatan lulus uji.
- h. Jika $V_{us} < V_{ss}$, maka peralatan gagal uji atau tidak memenuhi spesifikasi.

5.1.9 Sifat-Sifat Listrik Bahan Isolasi

Ada tiga bagian utama yang membentuk suatu peralatan listrik, yaitu:

- a. Bagian bertegangan, misalnya kumparan jangkar pada suatu generator.
- b. Bagian yang tidak bertegangan, misalnya stator dan badan generator.

- c. Sistem isolasi, misalnya kertas dan kain katun yang memisahkan kumparan jangkar dengan jangkar dan kumparan stator dengan stator pada generator.

Sistem isolasi adalah kombinasi dari beberapa bahan isolasi yang digunakan bersama-sama untuk memisahkan bagian-bagian dalam peralatan listrik yang memiliki beda tegangan. Contohnya pada setrika listrik, sistem isolasinya terdiri atas:

- PVC: memisahkan kabel fasa dan netral,
- Mika: memisahkan elemen pemanas dari bodi setrika, dan
- Udara: memisahkan bagian listrik dari pengguna.

Agar peralatan listrik berfungsi dengan baik dan aman, sistem isolasi harus dirancang secara tepat. Untuk itu, perancang perlu mempertimbangkan:

- Jenis dan besar medan listrik yang akan dialami setiap bahan,
- Durasi tekanan medan tersebut, dan
- Lingkungan tempat isolasi digunakan (suhu, kelembapan, dll.).

Selain itu, pemilihan bahan isolasi harus mempertimbangkan sifat-sifat elektrik dan mekanik dari setiap material. Data sifat bahan biasanya diperoleh dari pengujian laboratorium menggunakan sampel, baik pada kondisi standar maupun ekstrem. Namun, hasil uji ini bersifat statistik, sehingga perlu adanya margin atau derajat kebebasan dalam menentukan dimensi sistem isolasi.

Tiga stres utama pada sistem isolasi

a. Stres medan listrik

Karena beda tegangan antara dua bagian alat, bahan isolasi di antaranya akan terkena stres medan listrik. Oleh karena itu, bahan isolasi harus mampu menahan stres ini agar tidak terjadi *flashover* atau kerusakan.

b. Stres mekanis

Arus listrik, terutama saat terjadi hubung singkat (*short circuit*), menimbulkan gaya mekanis besar. Sistem isolasi harus kuat secara struktur agar tidak rusak. Misalnya, isolator pada jaringan distribusi harus mampu menahan berat konduktor dan gaya tarik antar konduktor saat dialiri arus.

c. Stres termal (panas)

Arus listrik menghasilkan panas, baik dari arus bocor (karena tahanan bahan tidak benar-benar nol) maupun dari medan listrik bolak-balik yang menimbulkan losses pada bahan. Oleh karena itu, bahan isolasi juga harus tahan terhadap suhu tinggi. Tabel 5 merupakan sifat mekanis terpenting bahan isolasi.

Tabel 5 Sifat mekanis terpenting bahan isolasi

Pemakaian Bahan Isolasi	Sifat Mekanis Terpenting
Isolator hantaran udara	Kekuatan tarik (<i>tensile strength</i>)
Isolator pendukung pada gardu	Kekuatan lentur (<i>bending strength</i>)
Isolator antena	Kekuatan tekan (<i>pressure strength</i>)
Pemutus daya (CB)	Ketahanan tekanan mendadak (<i>bursting pressure withstand</i>)

Dengan kata lain, sistem isolasi tidak hanya berfungsi sebagai pemisah listrik, tetapi juga harus mampu menahan stres listrik, mekanis, dan termal yang timbul selama peralatan beroperasi. Pemilihan bahan yang tepat dan perancangan yang cermat akan menghasilkan sistem isolasi yang andal dan efisien.

Sifat-sifat elektrik bahan isolasi:

- Kekuatan dielektrik
- Konduktansi
- Rugi-rugi dielektrik
- Resistansi isolasi
- *Partial Discharge*

Agar sistem isolasi berfungsi dengan efisien dan ekonomis, bahan-bahan penyusunnya harus memiliki sifat listrik sebagai berikut:

a. Kekuatan dielektrik tinggi

Bahan isolasi harus mampu menahan tegangan listrik yang tinggi tanpa mengalami kerusakan. Kekuatan dielektrik yang tinggi memungkinkan perancang menggunakan dimensi isolasi yang lebih kecil dan bahan yang lebih sedikit, sehingga biaya bisa ditekan.

b. Rugi dielektrik rendah

Bahan harus menghasilkan panas serendah mungkin saat terkena medan listrik. Ini penting agar suhu isolasi tidak melebihi batas aman dan tidak mempercepat penuaan bahan.

- c. Tahan terhadap tegangan permukaan (*tracking resistance*)
Bahan harus memiliki kekuatan permukaan tinggi agar tidak mengalami erosi atau kerusakan akibat tekanan medan listrik di permukaan, yang bisa menyebabkan kegagalan seperti flashover.
- d. Permittivitas yang sesuai
Nilai permitivitas bahan harus sesuai dengan kebutuhan sistem agar arus muatan (*charging current*) yang mengalir tidak melebihi batas yang diperbolehkan, menjaga efisiensi dan keamanan sistem.

5.1.10 Pembangkitan Tegangan Tinggi AC

Tegangan tinggi AC umumnya dihasilkan menggunakan transformator uji (*test transformer*), yaitu transformator satu fasa dengan rasio tegangan jauh lebih tinggi dibandingkan transformator daya biasa. Selain menghasilkan tegangan tinggi AC, peralatan uji juga digunakan untuk menghasilkan tegangan tinggi DC dan tegangan impuls.

Biasanya, beban dari trafo uji adalah bahan isolasi pada peralatan listrik, yang berada di antara konduktor-konduktor dengan tegangan berbeda. Dalam hal ini, bahan isolasi dan konduktor bersama-sama membentuk susunan seperti kapasitor, di mana nilai kapasitansinya bergantung pada ketebalan bahan isolasi—semakin tebal isolasi, semakin kecil kapasitansinya.

Sistem isolasi adalah komponen penting dalam trafo uji, dengan fungsi utama sebagai berikut:

- a. Mengisolasi belitan tegangan tinggi dari inti trafo
- b. Mengisolasi belitan tegangan tinggi dari belitan tegangan rendah
- c. Mengisolasi belitan tegangan tinggi dari tangki trafo uji
- d. Mengisolasi belitan tegangan rendah dari inti

Sistem isolasi ini sangat penting agar trafo uji dapat beroperasi dengan aman saat menghasilkan tegangan tinggi untuk pengujian bahan isolasi atau peralatan listrik.

5.1.11 Pembangkitan Tegangan Tinggi DC

Tegangan tinggi DC digunakan untuk menguji isolasi peralatan dengan kapasitansi besar, seperti kabel dan kapasitor. Jika peralatan ini diuji menggunakan tegangan AC, maka akan dibutuhkan arus kapasitif yang sangat

besar. Padahal, trafo uji hanya mampu menghasilkan arus dalam jumlah kecil (beberapa miliampere). Karena itu, penggunaan tegangan DC menjadi solusi yang lebih efisien.

Selain untuk pengujian, tegangan tinggi DC juga dimanfaatkan dalam berbagai penelitian fisika, seperti studi tentang pergerakan muatan (*charge leakage*) dan karakteristik bahan dielektrik.

Penggunaannya juga meluas ke bidang industri, antara lain:

- Perawatan mesin sinar-X
- Pembersih debu berbasis elektrostatik
- Penyemprot cat elektrik
- Proses pelapisan serbuk (*powder coating*)

Tegangan tinggi DC juga dibutuhkan sebagai sumber awal untuk menghasilkan tegangan impuls tinggi, biasanya dalam rentang 100 hingga 200 kilovolt.

Tegangan tinggi DC ini diperoleh dengan menyearahkan tegangan tinggi AC menggunakan rangkaian yang prinsipnya mirip dengan sistem pada peralatan elektronik, namun semua komponennya dirancang khusus agar mampu menahan tegangan tinggi.

5.1.12 Pembangkitan Tegangan dan Arus Tinggi Impuls

Dalam sistem tenaga listrik, kadang terjadi tegangan lebih (*overvoltage*) yang bersifat impulsif. Hal ini bisa disebabkan oleh dua hal:

- a. Operasi pemutusan atau penyambungan (*switching operation*), yang menghasilkan *switching impulse overvoltage*.
- b. Sambaran petir pada jaringan transmisi, yang menyebabkan *lightning impulse overvoltage*.

Peralatan tegangan tinggi harus dirancang agar mampu menahan kedua jenis tegangan impuls ini. Untuk memastikan ketahanannya, peralatan tersebut perlu diuji menggunakan tegangan impuls tinggi (*high-voltage impulse*), yaitu tegangan dengan bentuk gelombang yang meniru karakteristik dari tegangan akibat sambaran petir atau *switching*.

Selain sebagai metode pengujian, tegangan impuls juga digunakan dalam penelitian ilmiah untuk memahami mekanisme tembus listrik (*electrical breakdown*) pada bahan isolasi.

5.1.13 Pengukuran Tegangan dan Arus Tinggi

Selain digunakan di laboratorium, pengukuran tegangan tinggi juga diperlukan di gardu induk dan instalasi industri. Pengukuran ini berbeda dengan pengukuran tegangan rendah karena voltmeter biasa tidak bisa langsung dihubungkan ke terminal tegangan tinggi. Jika dipaksakan, selain bisa merusak alat, cara tersebut juga sangat berbahaya bagi pengguna.

Ada tiga jenis tegangan tinggi yang umumnya diukur:

- *AC high voltage*
- *DC high voltage*
- *Impulse high voltage*

Beberapa metode pengukuran tegangan tinggi meliputi:

a. Elektroda Bola Standar

Alat ini terdiri atas dua elektroda berbentuk bola yang dapat diatur jaraknya. Udara di antara kedua bola berfungsi sebagai media isolasi, dan jika berada pada kondisi standar (suhu 20 °C, tekanan 760 mmHg, kelembapan absolut 11 g/m³), maka akan terjadi tembus listrik pada tegangan tertentu yang sudah diketahui asalkan medan listriknya merata (*uniform*). Nilai tegangan ini bisa digunakan sebagai acuan pengukuran.

b. Potensial Transformator

Ini adalah trafo *step-down* yang dirancang khusus untuk mengukur tegangan tinggi. Sisi primer trafo dihubungkan ke titik tegangan tinggi yang ingin diukur, sedangkan sisi sekundernya terhubung ke voltmeter atau alat ukur tegangan rendah lainnya. Dengan metode ini, tegangan tinggi dapat diukur secara tidak langsung dan aman.

c. Pembagi Tegangan Kapasitif

Alat ini digunakan untuk mengukur *AC high voltage* dan *impulse high voltage*. Namun, terdapat beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan:

Kelemahan:

- Hasil pengukuran bisa terganggu oleh nilai kapasitansi dan induktansi dari kabel koaksial yang menghubungkan pembagi tegangan ke alat ukur.
- Kapasitansi liar dan induktansi internal pada kapasitor tegangan tinggi juga dapat menyebabkan kesalahan, terutama saat mengukur *impulse voltage*.

Hal-hal yang harus diperhatikan:

- Kabel pengukur harus berupa kabel koaksial dengan konduktor luar yang ditanahkan. Ini bertujuan untuk mencegah gangguan induksi dari pembagi tegangan ke inti kabel, serta menghindari pengaruh medan elektromagnetik luar terhadap sinyal.
- Jarak antara osiloskop dan pembagi tegangan sebaiknya cukup jauh agar efek induksi dari pembagi tegangan tidak memengaruhi pembacaan.
- Osiloskop sebaiknya dilindungi dengan *shielding* untuk mencegah gangguan dari induktansi pembagi tegangan yang dapat mengganggu tampilan hasil ukur.

d. Pembagi tegangan resistif

Jenis pembagi tegangan ini digunakan untuk mengukur *DC high voltage*, *impulse high voltage*, dan *AC high voltage*. Alat ini terdiri atas dua resistor yang disusun secara seri: resistor tegangan tinggi dan resistor tegangan rendah. Resistor tegangan tinggi biasanya dibuat dari kawat konduktor yang dililitkan pada bahan isolator, sedangkan alat ukur seperti voltmeter atau osiloskop disambungkan sejajar (paralel) ke resistor tegangan rendah.

Keunggulan alat ini adalah harganya yang relatif murah. Namun, ada beberapa kelemahan penting yang perlu diperhatikan:

Kelemahan:

- Sama seperti pembagi tegangan kapasitif, resistor tegangan tinggi memiliki induktansi sendiri dan kapasitansi liar, yang dapat menyebabkan kesalahan saat mengukur *AC* atau *impulse voltage*.
- Selalu ada *leakage current* (arus bocor) yang mengalir melalui resistor tegangan tinggi, sehingga hasil pengukuran bisa terpengaruh.
- Tegangan tinggi yang bisa diukur terbatas karena arus yang dapat melewati resistor juga terbatas.

- Pengukuran membutuhkan energi karena ada *power loss* (kerugian daya) pada resistor.

5.1.14 Perencanaan Sistem Isolasi Peralatan Listrik

Dalam merancang peralatan listrik, penting untuk mempertimbangkan cara membuat sistem isolasi yang efisien dan ekonomis. Salah satu strategi yang digunakan adalah dengan menggabungkan berbagai jenis bahan isolasi dalam satu sistem. Misalnya, sistem isolasi pada transformator bisa terdiri atas minyak, kertas isolasi, *B-clip*, papan isolasi (*electrofore board*), dan vernis.

Sebelum suatu bahan digunakan dalam sistem isolasi, perlu dilakukan pengujian untuk mengetahui sifat-sifat kelistrikannya. Dikarenakan biaya peralatan tegangan tinggi sangat dipengaruhi oleh jenis bahan isolasinya, maka riset terhadap bahan isolasi baru yang lebih murah sangat dibutuhkan. Salah satu bagian penting dari riset ini adalah melakukan pengujian pada spesimen bahan isolasi baru.

Pengujian terhadap bahan isolasi meliputi:

- Pengukuran *dielectric loss factor*
- Pengukuran resistansi isolasi
- Pengukuran konduktivitas
- Uji *partial discharge*
- Uji kekuatan medan listrik (*electric strength test*)
- Uji tembus listrik (*breakdown test*)

Pengujian seperti *dielectric loss*, resistansi isolasi, konduktivitas, dan *partial discharge* termasuk pengujian **nondestruktif** (tidak merusak). Sementara itu, uji *electric strength* dan *breakdown* termasuk pengujian **destruktif** (merusak).

5.1.15 Pengujian Peralatan Tenaga Listrik

Bagi konsumen, pengujian tegangan tinggi diperlukan untuk memastikan bahwa isolasi peralatan listrik telah memenuhi spesifikasi teknis yang dijanjikan oleh produsen.

Bagi produsen, pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi desain baru dan mengetahui sejauh mana kekuatan isolasi peralatan tersebut. Hasil

pengujian ini digunakan sebagai dasar untuk melakukan perbaikan desain ke depannya.

Kualitas sistem isolasi sangat memengaruhi keandalan dan keamanan operasi sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, pengujian tegangan tinggi menjadi penting untuk memastikan bahwa peralatan telah memenuhi standar yang ditetapkan.

Seiring waktu dan penggunaan, kualitas isolasi dapat menurun akibat beberapa faktor seperti:

- Kenaikan suhu selama operasi
- Kelembapan udara
- Tekanan mekanis pada isolasi
- Korona di bagian tajam peralatan yang dekat dengan bahan isolasi
- Tegangan lebih (*overvoltage*)

Karena itu, sifat-sifat listrik dari sistem isolasi perlu diperiksa secara berkala untuk mendeteksi degradasi sedini mungkin. Dengan begitu, perbaikan atau penggantian bisa dilakukan sebelum terjadi kerusakan besar yang merugikan.

Pengujian tegangan tinggi ini biasanya dilakukan pada peralatan seperti:

- Generator dan motor listrik
- Transformator daya
- Isolator
- Kabel listrik
- Pemutus daya (*circuit breakers*)
- Saklar pemisah (*disconnecting switches*)
- *Bushing*
- *Arrester* (penangkal petir sistem tenaga)

5.2 Fungsi Pengujian Tegangan Tinggi pada setiap Tahap Manajemen Aset

a. Sebagai Instrumen Validasi pada Fase Awal Aset

Pada tahap awal—baik saat peralatan baru diproduksi maupun ketika selesai dipasang di lapangan—pengujian tegangan tinggi berfungsi sebagai bukti kelayakan isolasi. Pengujian ini dilakukan dalam dua fase utama:

- *Factory Acceptance Test (FAT)*
Pengujian dilakukan di pabrik untuk memastikan peralatan seperti transformator, CB, CT/VT, dan GIS memenuhi standar tegangan tembus (*withstand voltage*). Standar IEC, ANSI, atau SPLN menetapkan besaran tegangan uji yang harus dilampaui tanpa menyebabkan *flashover*.
- *Site Acceptance Test (SAT)*
Setelah instalasi, dilakukan uji ulang di lokasi untuk memastikan bahwa pemasangan dan transportasi tidak menurunkan integritas isolasi. SAT juga digunakan untuk pengujian kabel bawah tanah atau bawah laut sebelum diberi tegangan operasional.

Dalam kedua tahap ini, pengujian tegangan tinggi bersifat *non-negotiable*. Kegagalan dalam pengujian dapat mengindikasikan cacat manufaktur, kerusakan tersembunyi, atau kesalahan pemasangan—yang jika tidak ditangani, akan menjadi awal dari kegagalan sistem yang jauh lebih besar.

b. Sebagai Detektor Dini dalam Pemeliharaan dan Diagnostik

Saat aset sudah beroperasi, integritas isolasi cenderung menurun akibat beban termal, stres elektromagnetik, serta kontaminasi lingkungan. Dalam tahap ini, pengujian tegangan tinggi berubah fungsinya menjadi alat diagnostik yang sangat berharga. Berbagai metode digunakan:

- Tegangan tan uji (DC / AC *hi-pot test*) untuk mendeteksi pelemahan isolasi pada kabel dan transformator,
- (PD) tes untuk mendeteksi cacat lokal seperti *void*, *water treeing*, atau *microcracks* dalam sistem isolasi padat (misalnya XLPE atau epoxy),
- $\tan \delta$ (*dissipation factor*) untuk mengevaluasi kualitas isolasi secara umum,
- *Sweep Frequency Response Analysis (SFRA)* pada transformator untuk melihat integritas geometris winding setelah mengalami gangguan.

Pengujian-pengujian ini menjadi bagian inti dari *condition-based maintenance*, di mana keputusan pemeliharaan—baik pembersihan, perbaikan, atau bahkan overhaul—diambil berdasarkan data hasil pengujian, bukan sekadar waktu atau asumsi.

c. Sebagai Dasar *Remaining Life Assessment* dan Perencanaan Investasi

Dalam fase umur lanjut, peralatan perlu dinilai apakah masih layak untuk terus digunakan, diperbaiki, atau diganti. Di sinilah pengujian tegangan tinggi berperan dalam model *Remaining Life Assessment* (RLA). Misalnya:

- Tren muatan dapat menunjukkan kecepatan degradasi isolasi dan memprediksi waktu tersisa sebelum *breakdown*,
- Penurunan nilai *withstand voltage* dari standar awal mengindikasikan pendeknya margin keamanan isolasi,
- Lonjakan $\tan \delta$ atau kapasitansi menandakan peningkatan kehilangan energi akibat penuaan isolasi.

Semua data ini digunakan untuk menyusun prioritas investasi, baik dalam bentuk *refurbishment*, *replacement*, atau pengadaan unit cadang.

d. Sebagai Uji Validasi Pasca-*Refurbishment*

Ketika peralatan mengalami *refurbishment* misalnya transformator dibersihkan, minyak diganti, atau GIS di-*overhaul*, pengujian tegangan tinggi kembali digunakan sebagai verifikasi bahwa tindakan peremajaan berhasil mengembalikan daya tahan peralatan. Pengujian ini menjamin bahwa peralatan layak dikembalikan ke sistem dan mampu bertahan terhadap stres tegangan operasional.

e. Sebagai Aspek Kritis Keamanan Sistem dan SDM

Perlu dipahami bahwa sebagian besar kegagalan dielektrik terjadi secara mendadak dan bersifat destruktif—meledaknya, *flashover* pada *bushing*, atau *breakdown* kabel tanah. Risiko ini bukan hanya merusak aset bernilai tinggi, tetapi juga mengancam keselamatan personel dan kontinuitas suplai listrik. Oleh karena itu, pengujian tegangan tinggi bukan semata kegiatan teknis, tetapi merupakan instrumen pengendalian risiko sistem dan perlindungan personel.

6 DETEKSI FENOMENA PRAKEGAGALAN PERALATAN TEGANGAN TINGGI SEBAGAI BAGIAN PENTING MANAJEMEN ASET

Dalam sistem ketenagalistrikan, kegagalan peralatan jarang terjadi secara mendadak. Umumnya, terdapat tanda-tanda awal berupa fenomena teknis yang halus namun signifikan. Jika dikenali sejak dini dan ditindaklanjuti secara tepat, tanda-tanda tersebut dapat mencegah terjadinya gangguan besar, pemadaman sistem, bahkan kecelakaan kerja. Fenomena-fenomena awal ini dikenal sebagai **prakegagalan** (*incipient failure*).

Prakegagalan bukanlah kerusakan total, melainkan proses degradasi internal yang belum menghasilkan gangguan nyata pada operasi sistem, namun telah menimbulkan sinyal-sinyal teknis tertentu. Deteksi sinyal tersebut hanya dapat dilakukan jika tersedia sistem *monitoring* yang akurat, peralatan pengujian yang tepat, serta pemahaman teknis yang memadai. Dalam konteks ini, **pengujian tegangan tinggi** seperti *partial discharge (PD)*, *tan delta*, atau *time-domain reflectometry* menjadi instrumen penting untuk mengidentifikasi prakegagalan secara nondestruktif.

Seiring bertambahnya usia aset, meningkatnya beban sistem, dan kompleksitas operasional yang makin tinggi, kemampuan mendeteksi prakegagalan menjadi kompetensi strategis dalam manajemen aset ketenagalistrikan modern. Pendekatan ini memungkinkan intervensi teknis dilakukan sebelum kegagalan berkembang lebih lanjut, sekaligus memperpanjang usia pakai aset, mengurangi biaya tak terduga, dan menjaga keandalan pasokan listrik secara keseluruhan.

Hampir semua kasus kerusakan menunjukkan tanda-tanda awal yang bisa dideteksi melalui diagnosis berbasis kondisi (*condition-based diagnosis*). Alasan utama pentingnya deteksi dini antara lain:

- Menghindari kegagalan destruktif dan pemadaman listrik tak terduga.
- Mengetahui akar penyebab kegagalan, baik dari kesalahan desain, kesalahan pemasangan, atau penuaan material.
- Mengoptimalkan perencanaan perawatan, dengan prioritas dan interval yang disesuaikan berdasarkan tingkat degradasi aktual.
- Meningkatkan keselamatan kerja, terutama untuk peralatan bertegangan sangat tinggi.

Kebanyakan kegagalan pada peralatan tegangan tinggi berakar pada kerusakan sistem isolasi—baik isolasi gas, cair, maupun padat. Setiap jenis isolasi memiliki gejala prakegagalan yang khas:

Tabel 6 Gejala prakegagalan berbagai jenis isolasi

Jenis Isolasi	Fenomena Prakegagalan	Parameter Deteksi
Gas (SF ₆ , udara)	Degradasi gas, tekanan abnormal, PD di ruang kecil	PD akustik/UHF, gas <i>decomposition</i>
Cair (minyak trafo)	<i>Water content</i> tinggi, asam tinggi, gas terlarut (DGA)	DGA, BDV, Tan δ
Padat (XLPE, epoxy, porselen)	internal, <i>treeing</i> , void	UHF, HFCT, TEV, PRPD

Fenomena menjadi indikator universal yang sangat penting karena hampir selalu mendahului terjadinya *breakdown* isolasi.

6.1 Memahami Deteksi Prakegagalan: Lebih dari Sekadar Pengujian

Deteksi prakegagalan adalah upaya untuk mengantisipasi kegagalan dengan memahami perilaku peralatan sebelum kerusakan terjadi. Dalam praktiknya, ada berbagai metode dan teknik yang dapat digunakan untuk mendeteksi gejala awal kerusakan, masing-masing memiliki kekuatan dan keterbatasannya. Beberapa di antaranya antara lain:

- Uji DGA (*Dissolved Gas Analysis*) pada transformator, untuk mendeteksi gas-gas hasil degradasi minyak atau kertas isolasi,
- Tan δ (*dissipation factor*) dan kapasitansi untuk mengukur degradasi isolasi,
- Termografi inframerah, untuk mendeteksi titik panas abnormal akibat koneksi longgar atau ketidakseimbangan beban,
- Uji tahanan isolasi dan *winding*, untuk mendeteksi kebocoran arus dan penurunan impedansi,
- *Vibration monitoring* pada peralatan yang memiliki bagian mekanik dinamis.

Namun, dari berbagai teknik tersebut, satu metode telah terbukti paling representatif dan sensitif dalam mendeteksi prakegagalan sistem isolasi, yaitu deteksi *partial discharge* (PD).

6.2 *Partial Discharge*: Sinyal Paling Dini dan Paling Dalam

Partial discharge (PD) adalah pelepasan muatan listrik parsial yang terjadi di dalam atau di sekitar bahan isolasi listrik yang sedang mengalami stres tegangan tinggi. PD terjadi jauh sebelum terjadi *breakdown* total. Ia adalah bisikan kecil yang menandai bahwa isolasi sudah tidak sempurna, bahwa di balik lapisan kabel, *bushing*, atau tangki minyak, sedang berlangsung degradasi tak kasat mata. PD dapat muncul akibat:

- Rongga kecil (*void*) dalam isolasi padat,
- Kelembaban dalam minyak atau gas,
- Ketidaksempurnaan pemasangan,
- Ujung konduktor yang terlalu runcing,
- Retakan mikro akibat tekanan termal dan mekanik.

Keunggulan PD dibanding metode deteksi lain adalah terjadinya secara *real-time* dan langsung di titik paling kritis—yaitu di mana kerusakan sebenarnya dimulai.

6.3 Sensor dan Teknik Deteksi PD: Mendengar Bisikan Aset

Untuk menangkap fenomena PD dalam keadaan peralatan sedang beroperasi, dikembangkan berbagai sensor dan sistem:

- HFCT (*High-Frequency Current Transformer*): mendeteksi pulsa arus PD dari *grounding* kabel,
- TEV (*Transient Earth Voltage*): menangkap tegangan gangguan di permukaan panel logam,
- Antena UHF: mengukur radiasi elektromagnetik akibat PD, dan
- Sensor akustik: mendeteksi gelombang suara yang dipancarkan oleh pelepasan muatan.

Gabungan dari sensor-sensor ini mampu memberikan gambaran utuh dan presisi tinggi tentang lokasi, jenis, dan intensitas fenomena prakegagalan.

Dalam berbagai pengujian lapangan yang pernah dilakukan penulis di fasilitas tegangan tinggi, sensor-sensor ini berhasil mendeteksi PD pada trafo yang secara visual tampak normal, bahkan sebelum muncul gejala fisik atau termal. Pada kasus lain, PD berhasil diidentifikasi pada kabel yang belum pernah terlibat gangguan, namun setelah ditindaklanjuti, ditemukan bahwa

instalasi awalnya tidak sempurna—sebuah *infant defect* yang luput dari pemeriksaan visual.

6.4 Dari Deteksi ke Keputusan: Prioritas, Pemeliharaan, dan Investasi

Deteksi PD bukan sekadar pengukuran. Ia adalah langkah awal dari pengambilan keputusan berbasis kondisi. Dengan mengklasifikasikan tingkat PD dan tren perubahannya, kita bisa menyusun prioritas pemeliharaan, menentukan apakah suatu aset perlu:

- Dipantau lebih intensif,
- Diperbaiki dalam jangka pendek,
- Dimasukkan ke dalam rencana overhaul,
- Atau segera diganti demi keamanan sistem.

Tanpa data PD, keputusan ini menjadi spekulatif. Dengan data PD, keputusan menjadi terarah, akurat, dan efisien—dan yang lebih penting: berbasis bukti teknis.

Deteksi fenomena prakegagalan, khususnya melalui , adalah manifestasi dari transformasi cara kita mengelola aset. Dari sekadar memperbaiki setelah rusak, menjadi mengantisipasi sebelum kerusakan terjadi. Ini adalah lompatan cara berpikir—from *corrective* menjadi *predictive* dan *proactive*.

Dalam era transisi energi, di mana keandalan sistem menjadi tulang punggung transformasi, kemampuan untuk mendeteksi sinyal-sinyal kecil seperti PD bukanlah kelebihan teknis—tetapi kebutuhan strategis. Dan di sinilah manajemen aset menemukan maknanya yang paling dalam: bukan semata menjaga peralatan, tetapi menjaga masa depan sistem tenaga itu sendiri.

7 PENGEMBANGAN SENSOR DETEKSI FENOMENA PRAKEGAGALAN

Dalam membangun sistem ketenagalistrikan yang tangguh, deteksi dini gejala prakegagalan menjadi kunci strategi manajemen aset modern. Salah satu metode paling efektif adalah *partial discharge (PD) detection*, yang sangat bergantung pada sensitivitas sensor. Berdasarkan pengalaman lapangan, sensor konvensional seperti *high-frequency current transformer (HFCT)* dan *transient earth voltage (TEV)* sering kurang efektif, terutama di medan terbuka, ruang sempit, atau konfigurasi peralatan tertentu. Hal ini mendorong pengembangan sensor alternatif berbasis *ultra-high frequency (UHF) antenna*, yang lebih peka terhadap emisi elektromagnetik dari aktivitas PD.

Bab ini membahas pengembangan sensor UHF dari konsep, desain *microstrip antenna*, karakterisasi frekuensi, hingga pengujian sensitivitas di laboratorium dan aplikasi lapangan. Inovasi ini bertujuan menghadirkan solusi sensor yang *low-cost*, fleksibel, dan mudah diterapkan, sekaligus memperkuat sistem monitoring prakegagalan berbasis kondisi. Pengembangan ini menjadi kontribusi nyata dalam mendukung *condition-based asset management*, sejalan dengan arah transformasi digital dan transisi energi sistem tenaga listrik.

7.1 Pendahuluan

Gas Insulated Switchgear (GIS) banyak digunakan dalam sistem transmisi tegangan tinggi karena keunggulannya, seperti ukuran kompak, perawatan mudah, performa dielektrik tinggi, dan keandalan yang baik [1]. Namun, partikel logam di dalam GIS dapat memicu *partial discharge (PD)* yang berpotensi merusak. Untuk mendeteksinya, metode *ultra-high frequency (UHF)* dalam rentang 300 MHz–3 GHz umum digunakan karena sensitif dan tahan terhadap gangguan [6]–[8]. Deteksi langsung PD penting untuk mencegah kegagalan isolasi secara dini.

Metode VHF dan LF kurang cocok dalam GIS karena rentan terhadap gangguan eksternal seperti corona dari saluran udara, yang amplitudonya lebih besar dari PD, sehingga menyulitkan deteksi. Oleh karena itu, UHF lebih sesuai dan telah digunakan dalam pengujian HVAC sesuai IEC 62271-203. Dengan sistem pentanahan multipoint di GIS, UHF dianggap sebagai metode

deteksi PD paling sensitif dibanding metode konvensional seperti IEC 60270 [7], [9], [11], [12].

Sebagian besar antenna UHF berukuran besar untuk meningkatkan gain dan sensitivitas dalam deteksi dini PD [11]. Namun, pada aplikasi seperti sensor internal GIS, diperlukan antenna berukuran kecil (panjang < 200 mm), agar sesuai dengan jendela dielektrik [13]–[17]. GIS tegangan tinggi dengan rating rendah bahkan memiliki jendela berukuran kurang dari 100 mm [18].

Tabel 7 Jenis antenna UHF yang dapat dicetak untuk deteksi PD [11], [12], [13], [14], [15]

Desain	Ukuran (mm ²)	Lokasi	Aplikasi	Rentang Frekuensi (GHz)
<i>Planar monopole</i>	340 x 140	Eksternal	<i>Air Insulated Switchgear</i>	0,34 – 8,0
<i>Co-planar waveguide</i>	282 x 242	-	-	0,4 – 3,0
<i>Spiral</i>	191 x 191	Eksternal	<i>Electrical Equipment</i>	0,3 – 1,5
<i>Log periodic</i>	140 x 110	Eksternal		0,7 – 2,2
<i>Fractal</i>	126 x 108	Internal	<i>Inverter-fed Electrical Machine</i>	0,3 – 1,0
<i>Microstrip</i>	340 x 200	Internal	GIS	0,,34 – 0,44
<i>Vivaldi</i>	100 x 100	Internal	-	1,3 – 3,0
<i>Long Bowtie (LB)</i>	125 x 53	Eksternal	GIS	0,81 – 2,63
<i>Double Layer Bowtie (DLB)</i>	85 x 43	Eksternal	GIS	1,5 – 2,07
<i>Enhanced Bowtie Antena</i>	74 x 36	Eksternal	GIS	1,27 – 2,49
<i>Sliced Edge Bowtie (SEB)</i>	76 x 18	Eksternal	GIS	1,33 – 1,78

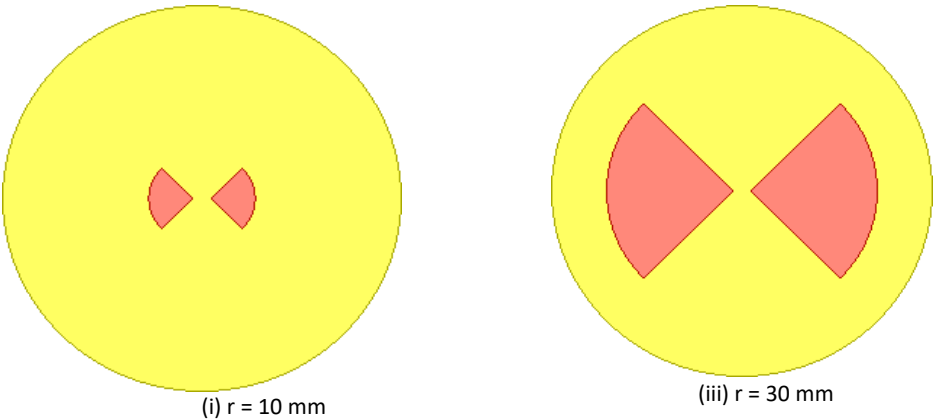
7.2 Tahapan Desain hingga Pengujian Antena untuk Mendeteksi *Partial Discharge*

7.2.1 Desain Awal Antena

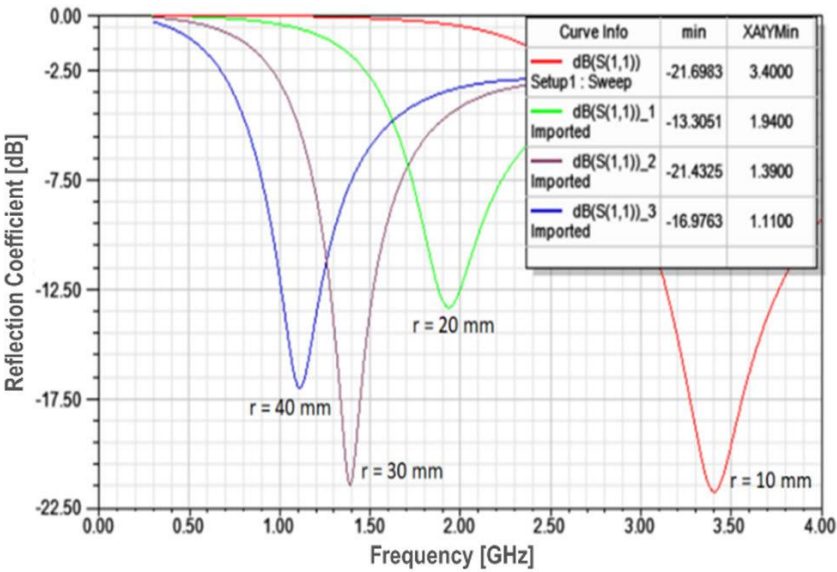
Tahap pertama dari proses ini adalah merancang desain antenna. Sebagai contoh, dalam penelitian yang dilakukan oleh Wahyu Agung [67], digunakan antenna jenis *bowtie* sebagai desain utama untuk mendeteksi PD pada GIS. Antena dirancang dengan menyesuaikan ukurannya agar efektif di rentang 300 MHz–3 GHz. Target desain mencakup koefisien refleksi < -10 dB, bandwidth > 330 MHz, dan VSWR < 2. Optimasi dilakukan pada dimensi seperti radius sayap, sudut flare, dan celah, melalui simulasi FEM 3D. Perubahan geometri diarahkan untuk menghasilkan distribusi arus yang merata guna meningkatkan efisiensi dan performa antenna.

a. Variasi Wing Radius

Berdasarkan hasil simulasi [19] menunjukkan bahwa peningkatan radius sayap antenna menyebabkan penurunan frekuensi resonansi. Hal ini terjadi karena frekuensi yang lebih tinggi memiliki panjang gelombang lebih pendek, sehingga ukuran fisik antenna memengaruhi titik resonansinya. Radius 10 mm dan 30 mm menghasilkan koefisien refleksi lebih rendah ($\sim -21,5$ dB), dengan frekuensi resonansi masing-masing 3,4 GHz dan 1,4 GHz. Karena sinyal PD umumnya berada di bawah 1 GHz, dipilih radius sayap 30 mm yang memiliki resonansi lebih mendekati rentang tersebut.



a) Variasi dari wings radius antenna



(b) Grafik koefisien refleksi dari berbagai wings radius antenna

Gambar 22 Karakteristik koefisien refleksi dari berbagai wings radius antenna bowtie

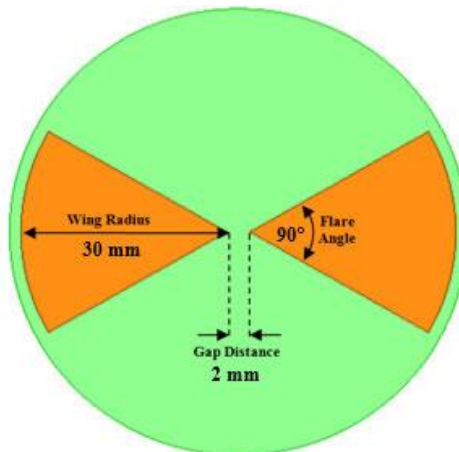
b. Variasi sudut flare

Berdasarkan hasil simulasi [19], koefisien refleksi serta frekuensi resonansi menurun seiring dengan bertambahnya sudut flare. Perubahan sudut flare memengaruhi koefisien refleksi terhadap frekuensi resonansi yang dihasilkan oleh antenna. Oleh karena itu, desain yang dipilih adalah antenna *bowtie* dengan sudut flare 90° , karena memiliki koefisien refleksi terendah sebesar $-40,08$ dB.

c. Variasi Jarak Celah

Jarak celah antar lengan antenna memengaruhi performa antenna. Celah yang lebih kecil menurunkan koefisien refleksi namun meningkatkan frekuensi resonansi. Desain awal dipilih dengan jarak celah 2 mm karena menghasilkan koefisien refleksi terendah, yaitu $-28,96$ dB.

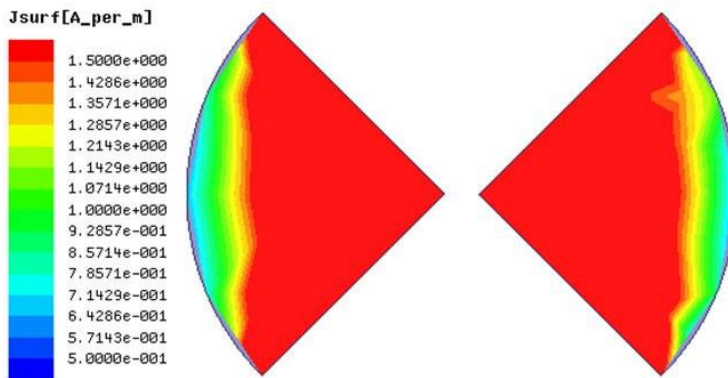
Dimensi awal antenna *bowtie* yang telah ditentukan—yaitu jari-jari sayap 30 mm, sudut flare 90° , dan jarak celah 2 mm—menghasilkan respons frekuensi optimum. Gambar berikut merupakan desain awal dan karakteristik antenna *bowtie* [19].



Gambar 23 Desain awal dan karakteristik antenna *bowtie*

d. Spesifikasi Material

Pemilihan material antenna menggunakan PCB FR4-epoxy ($\epsilon_r = 4,4$) dengan ketebalan 1,6 mm dan diameter 90 mm, karena mampu menurunkan frekuensi respons dan koefisien refleksi, sehingga sesuai untuk deteksi PD. Distribusi arus yang tidak merata akibat variasi impedansi diatasi dengan memodifikasi bentuk antenna, yaitu melengkungkan ujung dan memotong bagian tengah untuk meningkatkan efisiensi.

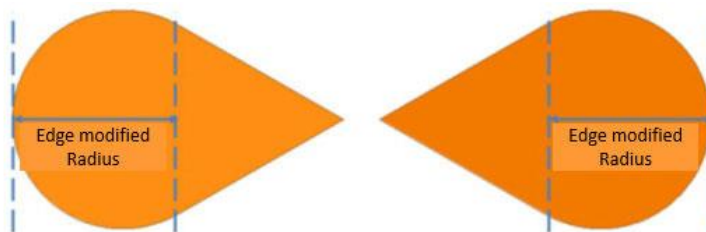


Gambar 24 Distribusi kerapatan arus dari original antenna *bowtie*

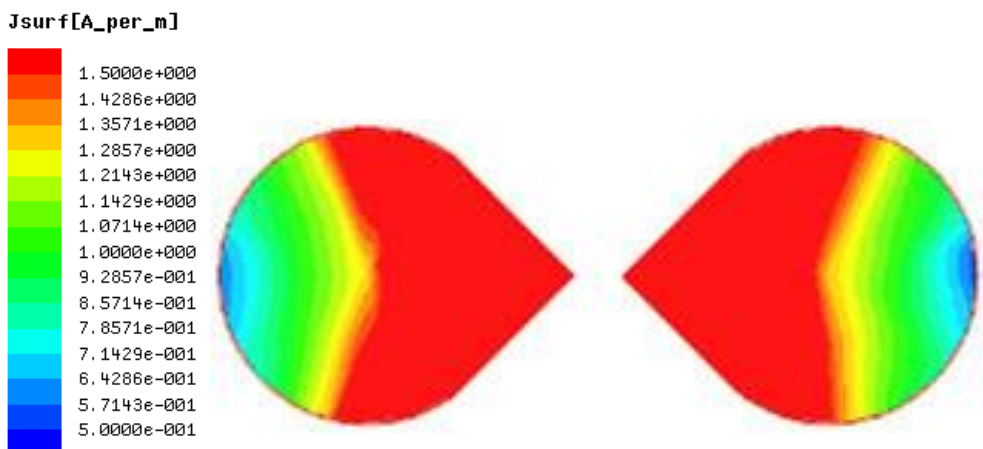
7.2.2 Modifikasi Desain Antena *Bowtie*

a. Modifikasi Tepi Membulat

Pada penelitian [19] dilakukan modifikasi pada antena bowtie dengan membentuk ujung sayap menjadi melengkung menggunakan variasi jari-jari lengkung (r_e).



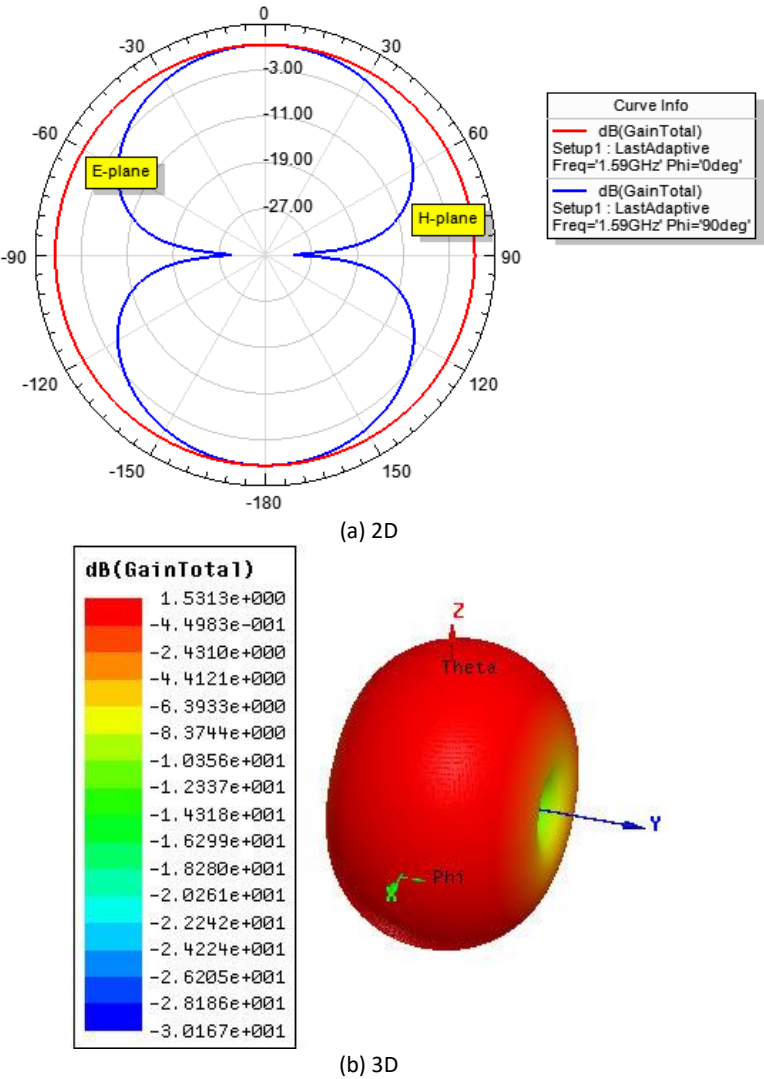
Gambar 25 Variasi dari modifikasi radius *rounded edge*



Gambar 26 Modifikasi *rounded edge* antena bowtir dengan variasi r_e

Simulasi menunjukkan bahwa *rounded edge radius* (r_e) 20 mm menghasilkan *reflection coefficient* terendah -24,49 dB pada 1,59 GHz, sekaligus mengurangi luas antenna dari 1.412 mm² menjadi 1.041 mm². Distribusi arus juga menjadi lebih merata dibanding desain awal, menjadikan r_e 20 mm sebagai pilihan optimal.

Desain akhir antenna menggunakan *gap distance* 2 mm, *flare angle* 90°, *wing radius* 30 mm, dan r_e 20 mm. Antena ini menunjukkan pola radiasi *omnidirectional* di bidang H dan pola *dipole* di bidang E, sehingga cocok untuk deteksi PD karena mampu menangkap sinyal dari berbagai arah, dengan *gain* sebesar 1,53 dB pada 1,59 GHz[19].



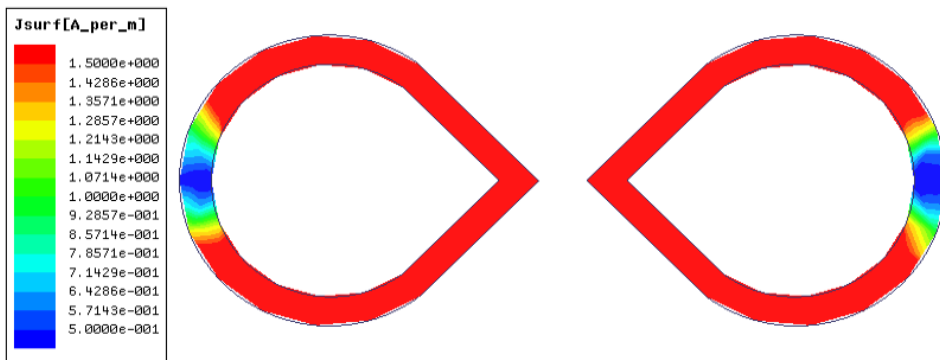
Gambar 27 Pola radiasi antenna bowtie modifikasi rounded edge pada frekuensi resonansi 1,59 GHz

b. Modifikasi Irisan Tengah

Modifikasi lanjutan dilakukan dengan memotong bagian tengah sayap antenna untuk meratakan distribusi arus. Skala irisan divariasikan antara 0.6 hingga 0.9, dengan bentuk sayap tetap mengikuti desain tepi membulat.

Gambar tersebut menunjukkan bahwa modifikasi ini menghasilkan distribusi kerapatan arus yang lebih merata di seluruh permukaan antenna. Parameter yang divariasikan dalam modifikasi middle-sliced ini adalah rasio antara bagian yang dipotong dengan ukuran penuh antenna, yang dinyatakan dalam Persamaan (2) berikut [19].

$$\text{Skala irisan} = \frac{\text{Luas permukaan bagian teriris}}{\text{Luas permukaan awal}} \quad (2)$$



Gambar 28 Distribusi kerapatan arus antenna *bowtie* yang dimodifikasi dengan *middle-sliced*

Hasil simulasi menunjukkan koefisien refleksi terbaik sebesar $-28,57$ dB pada skala irisan 0.8 dan frekuensi 1,53 GHz. Desain akhir antenna ini memiliki jarak celah 2 mm, sudut flare 90° , radius sayap 30 mm, radius tepi 20 mm, dan skala irisan 0.8. Pola radiasinya tetap omnidireksional di bidang H dan seperti dipol di bidang E, cocok untuk deteksi PD dari berbagai arah. Namun, gain antenna ini (1,31 dB) lebih rendah dibanding antenna dengan modifikasi tepi membulat (1,53 dB), sehingga desain tepi membulat dinilai lebih unggul untuk pengukuran PD [19].

7.2.3 Fabrikasi Antena

Desain akhir antenna dibuat pada PCB berbahan FR4-Epoxy ($\epsilon_r = 4,4$, tebal 1,6 mm). Fabrikasi dilakukan dengan metode *photo image transfer* menggunakan *Dry Film Photoresist* dan film negatif sebagai pola, dengan akurasi hingga 0,254

mm. Film negatif dari antenna yang dirancang dan hasil fabrikasi antenna *bowtie* yang dimodifikasi ditampilkan pada gambar berikut [19].



(a) Negatif film dari *rounded edge* antenna *bowtie*



(b) Fabrikasi dari *rounded edge* antenna *bowtie*

Gambar 29 Hasil fabrikasi dari modifikasi antenna *bowtie*

7.2.4 Pengujian Antena

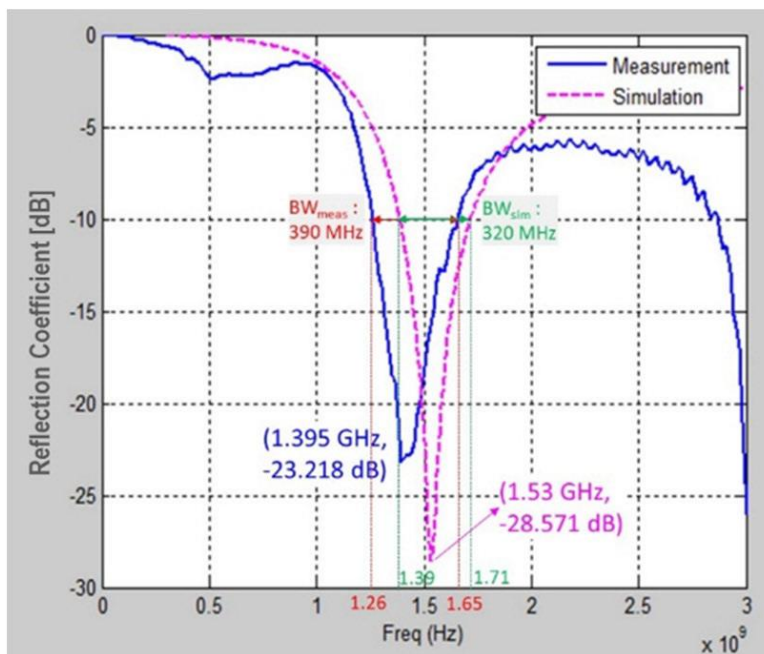
Pada penelitian [19] dua jenis pengujian dilakukan terhadap antenna *bowtie* hasil modifikasi baru yang telah dibuat, yaitu pengukuran karakteristik antenna menggunakan *Visual Network Analyzer* (VNA) dan deteksi PD untuk menguji kemampuan antenna yang dirancang dalam mendeteksi PD di udara dari sumber PD.

7.2.4.1 Pengukuran Karakteristik Antena Menggunakan VNA

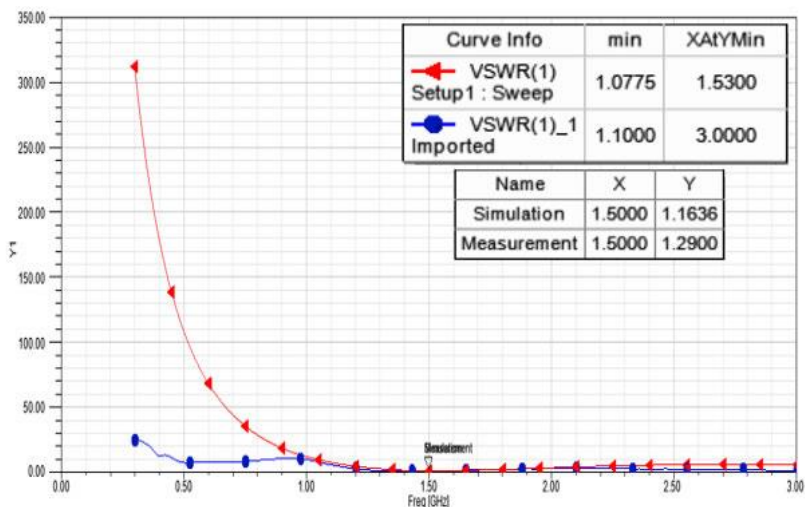
Evaluasi kinerja *modified bowtie antennas* dilakukan menggunakan *Vector Network Analyzer (VNA)* pada rentang 300 MHz–3 GHz dengan 201 titik uji. Parameter yang diukur meliputi *reflection coefficient*, *resonant frequency*, *VSWR*, dan *resistance*.

Antena ujung membulat menunjukkan *reflection coefficient* sebesar –21,795 dB pada 1,56 GHz (simulasi: –24,49 dB pada 1,59 GHz). Antena potongan tengah memiliki selisih lebih besar, yaitu –23,218 dB pada 1,395 GHz (simulasi: –28,571 dB pada 1,53 GHz), kemungkinan akibat faktor lingkungan, fabrikasi, atau keterbatasan perangkat lunak.

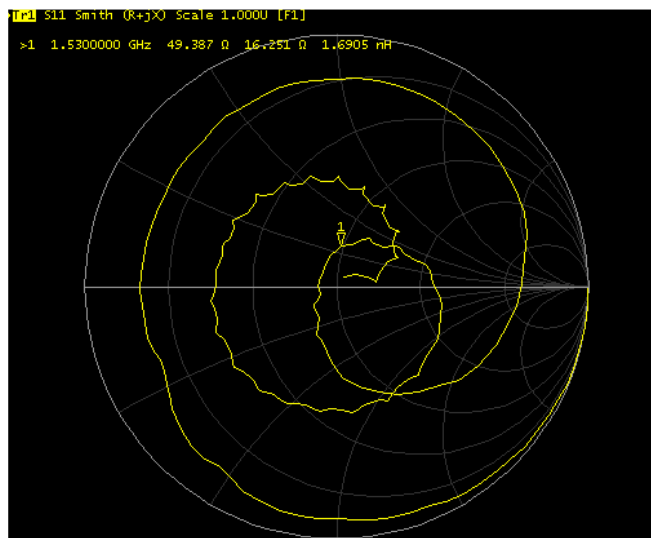
Untuk bandwidth dengan *reflection coefficient* < –10 dB, antena ujung membulat memiliki lebar pita 450 MHz (1,41–1,86 GHz) dan simulasi 376 MHz. Antena potongan tengah menghasilkan bandwidth 390 MHz (simulasi: 320 MHz). Nilai *VSWR* keduanya ≤ 2 di sekitar 1,5 GHz, dan *Smith Chart* menunjukkan impedansi mendekati 50 Ω dengan sedikit reaktansi.



Gambar 30 Karakteristik koefisien refleksi hasil pengukuran VNA



Gambar 31 VSWR hasil pengukuran VNA



Gambar 32 Smith chart hasil pengukuran VNA

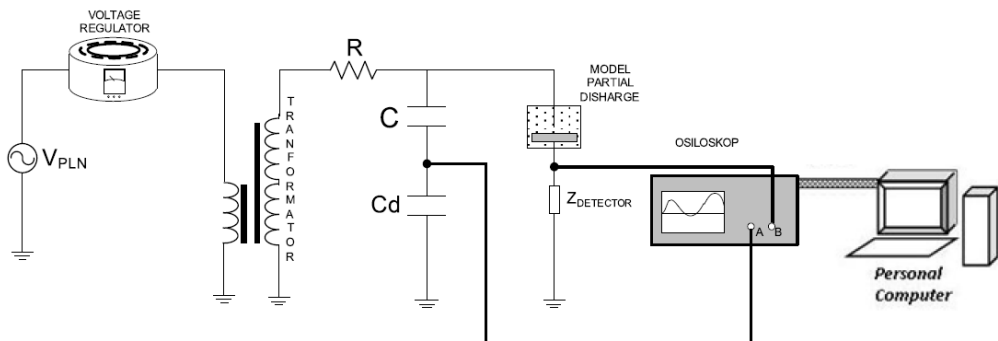
Tabel 8 Perbandingan hasil uji karakteristik antenna menggunakan VNA dan simulasi

Karakteristik Antena	Bentuk Awal	Modifikasi Antena <i>Bowtie Rounded-edge</i>	
		Pengukuran	Simulasi
1. (MHz)	371	450	376
2. Koefisien Refleksi (dB)	-28,96	-21,795	-24,49
3. VSWR	< 2	1,34 (≤ 2)	1,46 (≤ 2)
4. Area (mm ²)	1412	1041	
Modifikasi Antena <i>Bowtie Middle-Sliced</i>			
1. (MHz)		390	320
2. Koefisien Refleksi (dB)		-23,218	-28,571
3. VSWR		1,29 (≤ 2)	1,16 (≤ 2)
4. Area (mm ²)		375.1	

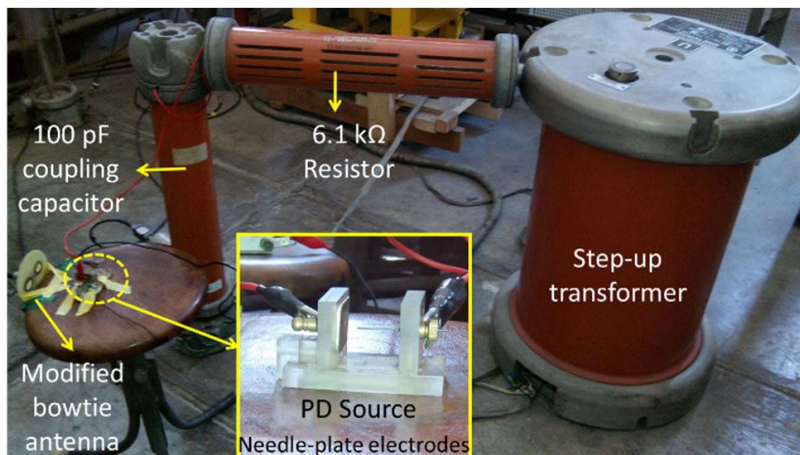
Kesimpulannya, hasil pengujian menunjukkan kesesuaian yang cukup baik dengan simulasi, meskipun terdapat perbedaan kecil yang disebabkan oleh proses fabrikasi dan faktor eksternal lainnya.

7.2.4.2 Uji Deteksi PD

Untuk menyelidiki kemampuan antenna dalam mendeteksi (PD), dilakukan eksperimen pendeteksian PD di udara dengan *set-up* eksperimen dan gambar aktual di laboratorium seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut [19].



Gambar 33 Rangkaian percobaan pengukuran partial discharge



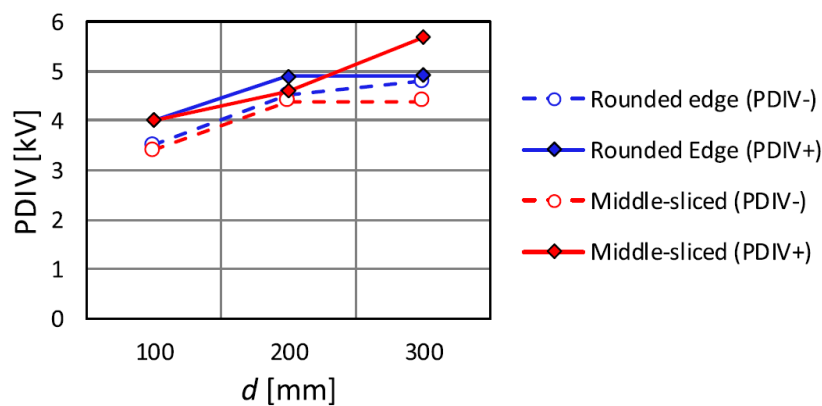
Gambar 34 Foto peralatan percobaan pengukuran *partial discharge*

Pengujian menggunakan sumber PD berupa elektroda jarum-ke-bidang dengan celah 10 mm melibatkan dua sensor: *modified bowtie antenna* dan *RC detector* sebagai pembanding. Jarak antenna divariasikan (100, 200, 300 mm) untuk mengevaluasi performa pada berbagai kondisi. Antena potongan tengah mendeteksi PD lebih awal dan menunjukkan sinyal dengan magnitudo lebih besar pada setiap *PDIV*, menandakan sensitivitas lebih tinggi dibanding

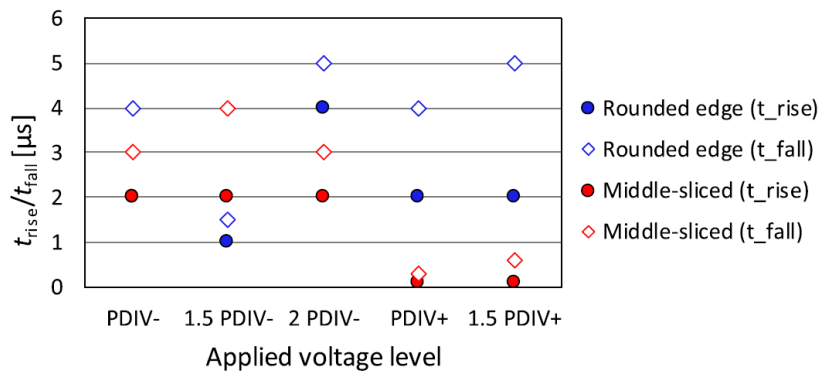
antena ujung membulat. PDIV positif dan negatif umumnya lebih rendah, kecuali pada jarak 300 mm. Nilai t_{rise} dan t_{fall} yang lebih pendek juga menunjukkan respons cepat terhadap sinyal berdurasi singkat.

Tabel 9 Perbandingan PDIV(-) antenna bowtie modifikasi pada jarak 100 mm

Parameter PD	Modifikasi Rounded Edge Antena Bowtie	Modifikasi Middle-Sliced Antena Bowtie
PDIV (Sumber kV)	3,5	3,4
V_{pp} (mV)	29	34
Rise Time (ns)	2	2
Fall Time (ns)	4	3



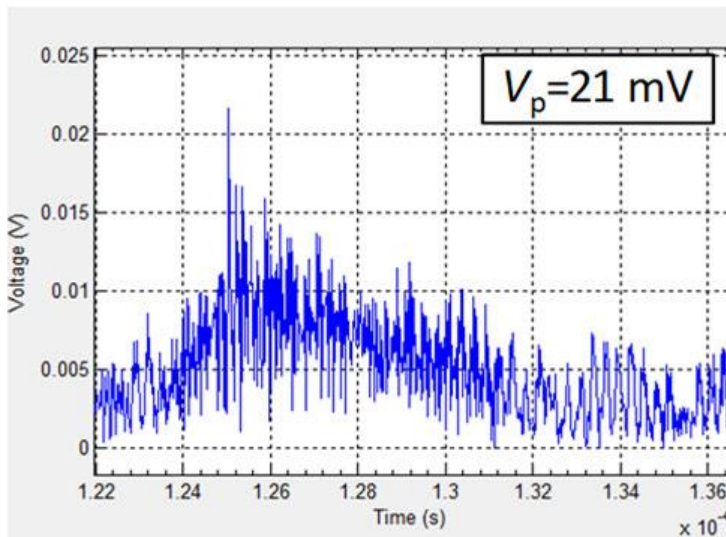
Gambar 35 PDIV pada berbagai jarak antara antenna dan sumber PD



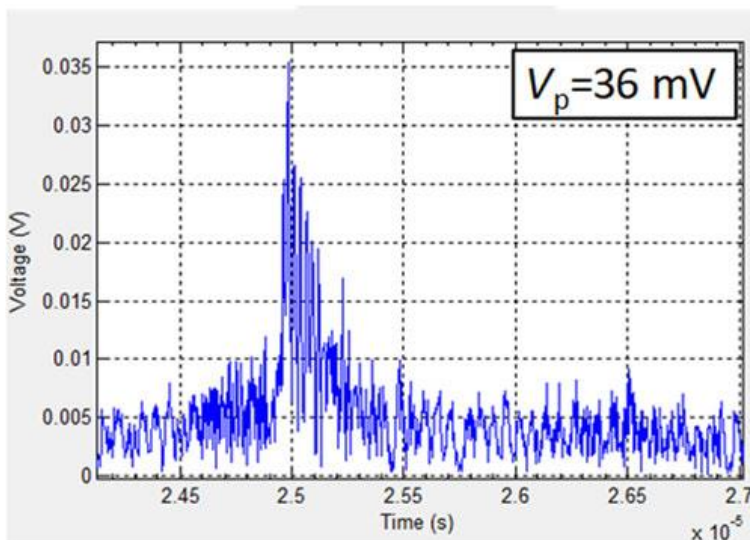
Gambar 36 t_{rise} dan t_{fall} dari sinyal PD yang dideteksi oleh antenna bowtie yang dimodifikasi pada berbagai level tegangan

Pada jarak dekat (100 mm), magnitudo sinyal dari antenna potongan tengah umumnya lebih besar atau sebanding dengan antenna ujung membulat.

Namun, pada jarak lebih jauh, penurunan sinyal PD pada antenna ujung membulat lebih drastis, menegaskan keunggulan antenna potongan tengah dalam mendeteksi PD jarak jauh.

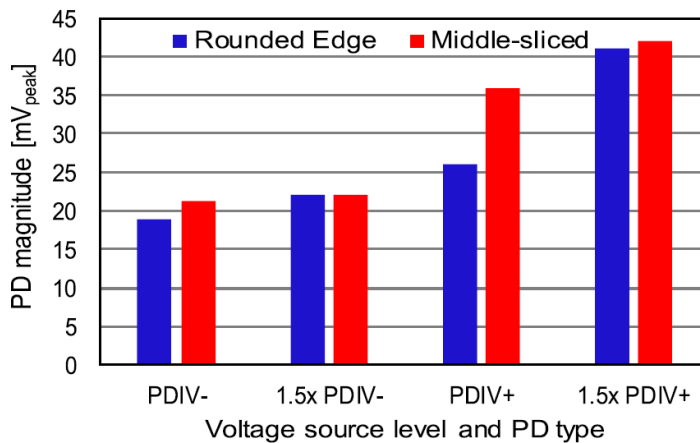


(a) PDIV negatif



(b) PDIV positif

Gambar 37 Bentuk gelombang sinyal PDIV dan PD



Gambar 38 Perbandingan besaran PD yang diukur dengan antenna *bowtie rounded edge middle-sliced*

Persentase pada tabel berikut menunjukkan rasio antara magnitudo PD dari antenna *bowtie* terhadap magnitudo PD dari detektor RC masing-masing [19].

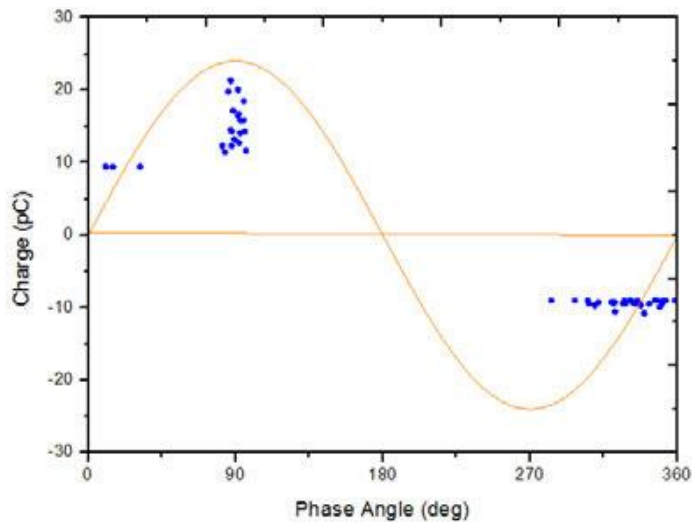
Tabel 10 Hasil pengukuran PDIV pada jarak 200 mm

Tingkat tegangan masukan	<i>Rounded Edge</i>	<i>RC Detector</i>	$\%V_{RE}/V_{RC}$	<i>Middle-Sliced</i>	<i>RC Detector</i>	$\%V_{MS}/V_{RC}$
PDIV Negatif						
PDIV	60	95	63%	20	106	19%
5,2 kV	60	102	59%	18	114	16%
6 kV	-	-	-	21	120	17%
PDIV Positif						
PDIV	-	-	-	25	360	7%
5,2 kV	50	80	63%	36	850	4%
6 kV	100	160	63%	36	900	4%

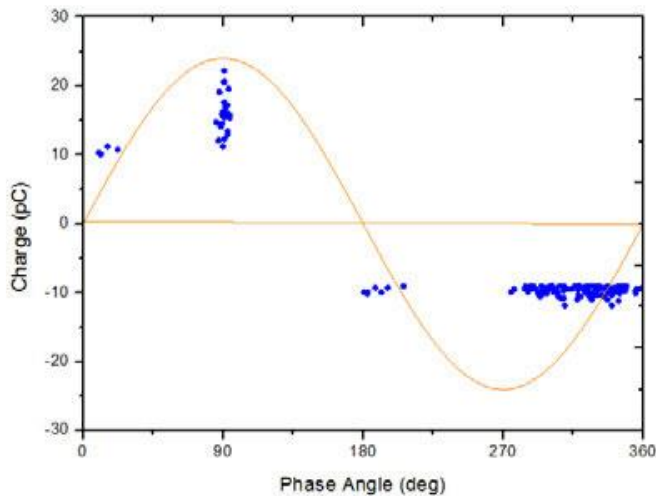
Tabel 11 Hasil pengukuran PDIV pada jarak 300 mm

Tingkat tegangan masukan	<i>Rounded Edge</i>	<i>RC Detector</i>	$\%V_{RE}/V_{RC}$	<i>Middle-Sliced</i>	<i>RC Detector</i>	$\%V_{MS}/V_{RC}$
PDIV Negatif						
PDIV	41	95	43%	21	160	13%
5,2 kV	50	110	45%	24	164	15%
6 kV	45	95	47%	30	204	15%
PDIV Positif						
PDIV	34	500	7%	23	450	5%
5,2 kV	39	600	7%	58	1400	4%
6 kV	45	710	6%	60	3000	2%

Hasil pengukuran pola (ϕ -q-n) ditampilkan dalam gambar berikut.



(a) *Rounded edge*



(b) *Middle-Sliced*

Gambar 39 Hasil pengukuran pola (ϕ -q-n)

Uji pola PD (ϕ -q-n) dilakukan pada tiga tegangan (4 kV, 5,2 kV, 6 kV) selama 125 siklus. PD pertama muncul pada setengah siklus negatif, lalu bertambah saat tegangan dinaikkan, hingga muncul juga di setengah siklus positif. Hal ini disebabkan emisi elektron negatif lebih mudah terjadi. Kedua antenna mampu mendeteksi pola PD dengan baik dari sumber jarum-ke-bidang di udara.

7.2.5 Diskusi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kedua antenna *bowtie* modifikasi ujung membulat dan potongan tengah mampu mendeteksi PD di udara secara efektif. Selanjutnya, performa keduanya dibandingkan dengan antenna dari penelitian sebelumnya untuk menilai keunggulan karakteristiknya. Tabel berikut menyajikan perbandingan karakteristik antenna dari semua jenis antenna *bowtie* [19].

Tabel 12 Perbandingan karakteristik antenna antara antenna *bowtie* baru dan antenna *bowtie* yang telah dimodifikasi

Desain Antena	Koefisien Refleksi (dB)	(MHz)
Penelitian Sebelumnya		
<i>Enhanced Bowtie (EBT)</i>	-16,8	245
<i>Sliced Edge Bowtie (SEB)</i>	-40,27	282
<i>Long Bowtie (LB)</i>	-17,43	202
<i>Double Layer Bowtie (DLB)</i>	-18,92	330
Penelitian Saat ini		
<i>Rounded Edge Bowtie</i>	-21,795	450
<i>Middle Sliced Bowtie</i>	-23,218	390

Kedua *modified bowtie antennas* menunjukkan kinerja lebih baik dibanding penelitian sebelumnya, dengan *lower reflection coefficients* dan *wider UHF bandwidths*. Antena potongan tengah lebih efisien berdasarkan karakteristik antenna dan hasil pengukuran PD. Antena ini mendeteksi PD lebih awal, dengan *shorter rise and fall times*, menandakan sensitivitas tinggi terhadap pulsa pendek. Pada jarak 100–300 mm, antenna ini juga lebih konsisten mendeteksi lebih banyak PD. Namun, pada 200 dan 300 mm, antenna ujung membulat merekam sinyal PD dengan *up to three times higher magnitude*, mencerminkan *higher gain* sesuai simulasi (1,53 dB vs. 1,31 dB).

Dari proses desain, juga dapat dipelajari pengaruh perubahan dimensi antenna terhadap karakteristiknya [19]:

- **Jari-jari sayap (*wing radius*):** semakin besar jari-jari, maka frekuensi resonansi semakin rendah. Hal ini berkaitan dengan panjang gelombang sinyal.
- **Sudut flare (*flare angle*):** semakin besar sudut flare, maka nilai koefisien refleksi dan frekuensi resonansi cenderung menurun.
- **Jarak celah (*gap distance*)** antar-ujung dalam lengan antenna: semakin kecil jaraknya, maka koefisien refleksi menurun tetapi frekuensi resonansi meningkat.

Pengaruh perubahan parameter dimensi antenna terhadap karakteristik respons frekuensi dirangkum dalam tabel berikut [19].

Tabel 13 Pengaruh parameter antenna *bowtie* terhadap karakteristik respons frekuensi

Parameter Antena <i>Bowtie</i>	Efek pada Karakteristik Respons Frekuensi		
	Frekuensi Resonansi	Koefisien Refleksi Minimum	
<i>Wings Radius</i>	Berbanding Terbalik	-	-
<i>Flare Angle</i>	-	Berbanding Terbalik	Berbanding Terbalik
<i>Gap Distance</i>	-	Berbanding Terbalik	Sebanding

7.2.6 Kesimpulan Hasil Desain dan Pengujian Sensor Antena *Bowtie*

Modifikasi antenna *bowtie* dengan ujung membulat dan potongan tengah dirancang berdasarkan analisis distribusi arus permukaan melalui simulasi FEM. Setelah direalisasikan pada substrat FR4-epoksi, keduanya diuji menggunakan VNA. Antena ujung membulat memiliki koefisien refleksi -21,8 dB dan bandwidth 450 MHz, sementara antenna potongan tengah -23,2 dB dan 390 MHz. Keduanya menunjukkan performa yang baik dan meningkat dibanding desain sebelumnya. Dalam pengujian PD, keduanya mampu mendeteksi sinyal dari elektroda jarum-ke-pelat, dengan antenna potongan tengah menunjukkan sensitivitas lebih tinggi. Meski *gain*-nya lebih rendah, hal ini dapat dikompensasi dengan amplifier, yang rencananya akan dievaluasi lebih lanjut dalam pengujian di lingkungan GIS [19].

7.2.7 Reviu Hasil Penelitian Antena

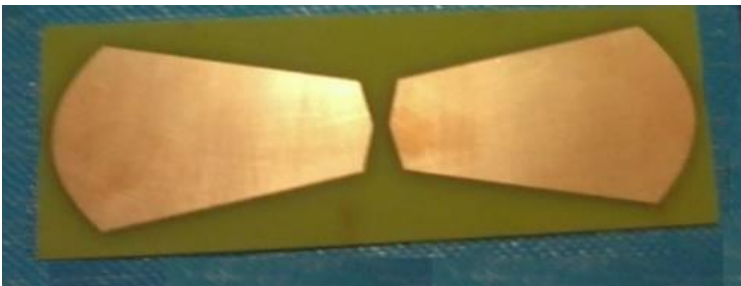
Penelitian pengembangan antenna untuk deteksi PD telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir dan berperan penting dalam meningkatkan keandalan sistem kelistrikan. Seiring kemajuan teknologi, riset di bidang ini diharapkan terus menghasilkan solusi inovatif. Bab ini membahas perkembangan riset antenna dalam satu dekade terakhir, baik di Laboratorium TTAT ITB maupun dari berbagai peneliti global. Setelah proses tinjauan, data dari berbagai studi akan dikumpulkan dan diperingkat untuk menjadi dasar pengembangan penelitian selanjutnya.

a. Hanalde Andre (2013)

Penelitian [20] mengembangkan dua varian *bowtie antenna*: ujung dimodifikasi dan versi panjang. Antena ujung dimodifikasi memiliki *return loss* $-43,48$ dB pada $1,55$ GHz dengan bandwidth 454 MHz. Antena panjang menunjukkan dua resonansi (780 MHz dan $2,19$ GHz), namun bandwidth hasil pengukuran lebih sempit dari simulasi.



(a) Modifikasi antena *bowtie* (Antena 1)

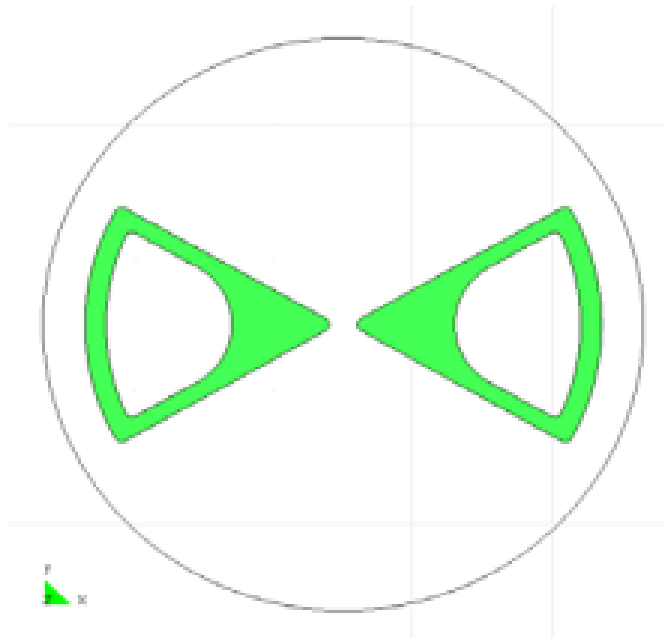


(b) Antena *long bowtie* (Antena 2)

Gambar 40 Bentuk akhir rancangan antena pada penelitian [20]

b. Joko Muslim (2013)

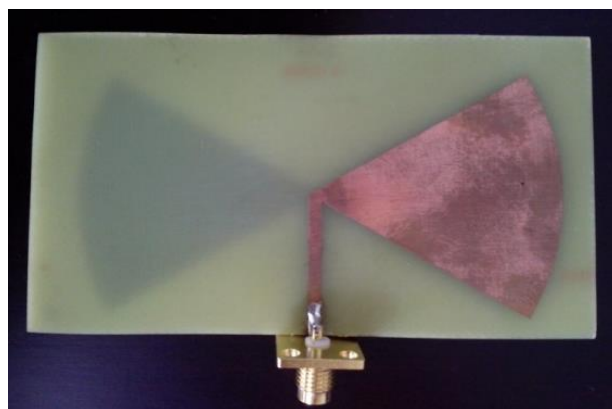
Penelitian [21] merancang antena dipol *bowtie* dengan dua frekuensi resonansi, yaitu $1,06$ GHz dan $3,46$ GHz, masing-masing memiliki bandwidth sekitar 245 MHz dan 320 MHz.



Gambar 41 Bentuk akhir geometri antenna *enhanced bowtie* (antena 1) pada penelitian [21]

c. Farah Vauzia (2014)

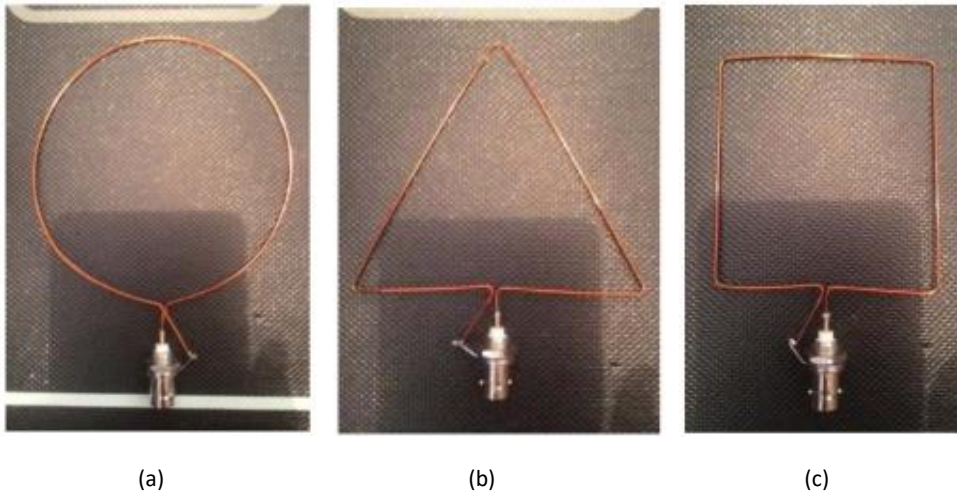
Penelitian [22, 23] memodifikasi *bowtie antenna* dengan geometri *double layer* pada substrat FR4-epoxy untuk memperluas bandwidth. Modifikasi ini meningkatkan bandwidth dari 300 MHz menjadi 330 MHz. Dari empat antenna, antenna dengan *flare angle* 60° dan ketebalan substrat 2,8 mm menunjukkan performa terbaik: resonansi 1,725 GHz, *return loss* $-40,39$ dB, dan bandwidth 570 MHz.



Gambar 42 Bentuk akhir rancangan antenna penelitian [22, 23]

d. Fahru Rozi (2014)

Penelitian [24, 25] merancang dan memodifikasi lima model antenna *loop*, terdiri atas tiga bentuk lingkaran (*big, middle, dan small circle*) serta dua bentuk lainnya, yaitu segitiga dan persegi. Bentuk dari kelima model modifikasi ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

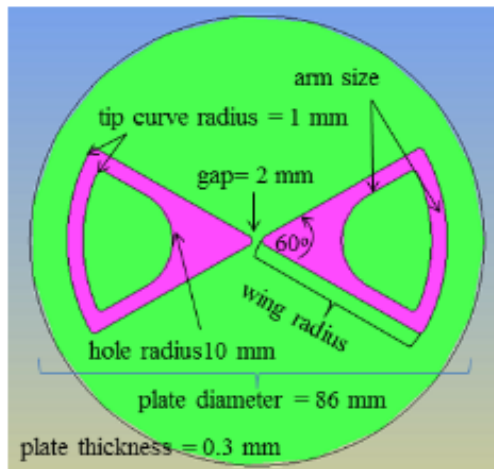


Gambar 43 Bentuk akhir rancangan antenna penelitian [24, 25]

Berdasarkan hasil penelitian, antenna jenis *triangle* memiliki nilai *bandwidth* tertinggi, yaitu 395 MHz.

e. Inu Suprianto (2015)

Penelitian [26] mengoptimasi desain *enhanced bowtie antenna* dari penelitian [21] dengan memvariasikan *wing radius* dan *arm size*, lalu menyimulasikan dan merealisasikan empat antenna, yaitu *small glasses* (SG), *medium glasses* (MG), *big glasses* (BG), dan *enhanced bowtie* (EBT). Berdasarkan hasil penelitian, antenna jenis *medium glasses* dengan nilai *bandwidth* tertinggi.



Gambar 44 Bentuk akhir rancangan antenna penelitian [26]

Tabel 14 Rangkuman hasil pengukuran VNA pada penelitian [26]

Sensor Type	Frequency Band (MHz)	RL Average (dB)	RL<-6 dB (MHz)	RL<-10 dB (MHz)
EBT	900 - 2000	-6.27	285	209
	900 - 3000	-5.80	684	209
SG	900 - 2000	-10.16	703	380
	900 - 3000	-7.47	703	380
MG	900 - 2000	-7.07	323	228
	900 - 3000	-7.59	893	475
BG	900 - 2000	-5.41	209	76
	900 - 3000	-6.69	817	228

f. Khusnul Khatimah (2015)

Penelitian [27, 28] mengoptimasi *dipole antenna* dan *T-antenna* (dipole dengan *stub*) menggunakan perangkat lunak *Magna/TDM*. Ukuran optimal *dipole* adalah panjang 92 mm dan lebar 20 mm, sementara *T-antenna* memiliki *stub* selebar 10 mm. Hasil pengukuran menunjukkan *return loss* -47 dB pada 1,4 GHz (*dipole*) dan -28 dB pada 1,48 GHz (*T-antenna*), dengan bandwidth masing-masing 551 MHz dan 998 MHz.

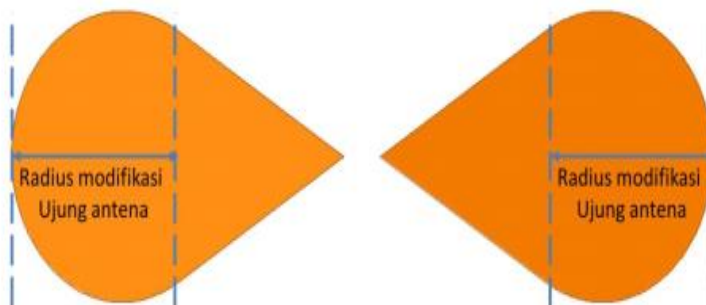


Gambar 45 Bentuk akhir rancangan antenna penelitian antenna dipole (kiri) dan antenna T (kanan) [27, 28]

g. Asep Andi Suriandi (2015)

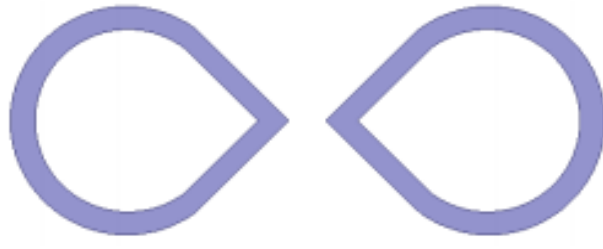
Penelitian [29, 30] memodifikasi *bowtie antenna* pada ujungnya dengan variasi *radius* 10–25 mm. Modifikasi *radius* 20 mm memberi hasil terbaik dengan RL -24,49 dB pada 1,59 GHz dan bandwidth 370 MHz. Hasil pengukuran menunjukkan RL -21,8 dB dan bandwidth 450 MHz pada 1,56 GHz.

Bentuk modifikasi ujung antenna *bowtie* ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 46 Model modifikasi ujung antenna *bowtie* (antenna 1) pada penelitian [29, 30]

Penelitian [29, 30] memodifikasi ujung *bowtie antenna* dengan *radius* 10–25 mm. Modifikasi *radius* 20 mm menghasilkan RL -24,49 dB pada 1,59 GHz dengan bandwidth 370 MHz. Pengukuran menunjukkan RL -21,8 dB dan bandwidth 450 MHz pada 1,56 GHz. Modifikasi antenna *bowtie* dengan irisan skala 0,8 ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 47 Model modifikasi irisan tengah skala 0,8 (antena 2) pada penelitian [29, 30]

h. Fauzi Ashari (2017)

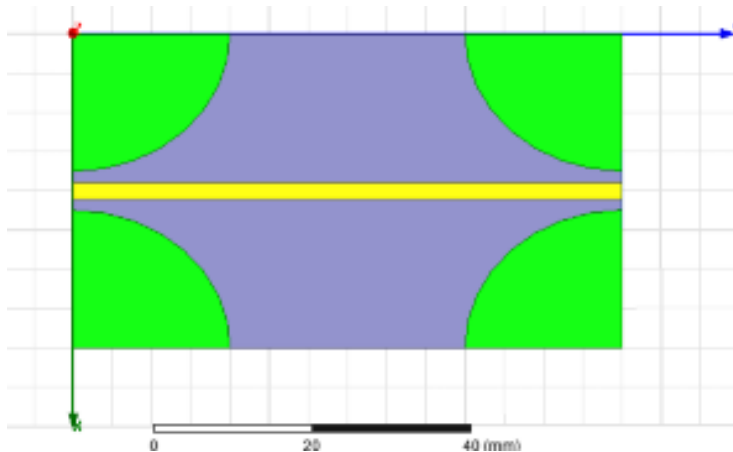
Penelitian [31, 32] membandingkan tiga antenna berbeda: *log-periodic*, *Vivaldi*, dan *bowtie*. Hasil menunjukkan *log-periodic antenna* memiliki bandwidth tertinggi yaitu 190 MHz.

Tabel 15 Rangkuman hasil simulasi dan pengukuran pada penelitian [31, 32]

Antena		Frekuensi Resonansi (GHz)		RL (dB)		Banwidth (MHz)		Total Bandwidth (MHz)	VSWR
		1	2	1	2	1	2		
Log Periodeic Antena	Simulasi								
	Pengukuran	2.3		-17		190		190	1.3
Vivaldi Antena	Simulasi								
	Pengukuran	1.4		-22		120		120	1.1
Bowtie	Simulasi								
	Pengukuran	1.8		-26		130		130	1.0

i. Abrar Hakim (2017)

Penelitian [33, 34] merancang tiga model *goubau antenna*. Desain pertama menunjukkan bandwidth 960 MHz, RL -16,86 dB (2,11 GHz), dan VSWR 1,4. Desain kedua memiliki bandwidth 388 MHz, RL -26,04 dB (1,3 GHz), dan VSWR 1,1. Desain ketiga mencapai bandwidth 386 MHz, RL -38,36 dB (1,3 GHz), dan VSWR 1,02. Gambar berikut adalah bentuk model dari antenna yang dirancang pada penelitian ini.



Gambar 48 Model Antena Goubau pada penelitian [33, 34]

j. Miftahul Husna (2018)

Penelitian [35, 36] merancang tiga *log-periodic antennas*: *toothed I*, *toothed II*, dan *trapezoid*. Simulasi menunjukkan *return loss* (RL) minimum masing-masing $-36,23$ dB (1,02 GHz), $-29,09$ dB (1,55 GHz), dan $-33,35$ dB (1,71 GHz), dengan *VSWR* terbaik 1,22–1,23 (kecuali *trapezoid*: 2,86). Pengukuran menunjukkan *toothed I* memiliki RL $-13,17$ dB, *bandwidth* 50 MHz, *VSWR* 3,29 (kapasitif); *toothed II* RL $-14,67$ dB, *bandwidth* 80 MHz, *VSWR* 1,90 (induktif); dan *trapezoid* RL $-27,96$ dB, *bandwidth* 100 MHz, *VSWR* 1,15 (kapasitif). Gambar berikut adalah bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian ini.



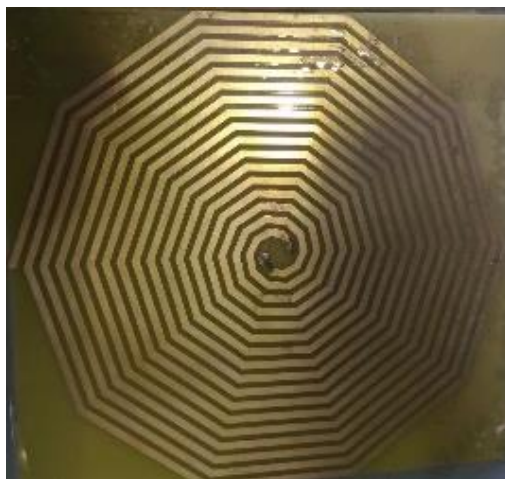
Gambar 49 Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian Log Periodic Toothed 1 [35, 36]

k. Fakih Al-Faruq (2018)

Penelitian ini mengoptimasi antenna *Hilbert* orde ketiga dengan mencoba posisi *feed point* di tiap sudut segmen, dimulai dari titik tengah. Hasilnya, *feed point* 2 memberikan performa terbaik dengan frekuensi kerja optimal dan nilai VSWR mendekati 1 dengan total bandwidth 840 MHz.

l. Deni Trilaksono (2018)

Penelitian [37] menggunakan tiga model *spiral antenna*—*Archimedean*, *rectangular*, dan *10-segment spiral*—dengan dimensi dan jarak antar lilitan yang sama. Hasil terbaik diperoleh pada *spiral 10-segment* dengan *bandwidth* sebesar 192 MHz. Gambar berikut adalah bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian ini.



Gambar 50 Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian Antena Spiral 10 Segmen [37]

m. Akhmad Fauzan (2018)

Penelitian [38, 39] merancang tiga *cube-shaped antennas* dan mengevaluasi kinerjanya untuk frekuensi < 3 GHz. Hasil simulasi menunjukkan *return loss* (RL) terbaik pada antenna 1 sebesar -50,91 dB di 2,26 GHz, antenna 2 sebesar -48,82 dB di 2,82 GHz, dan antenna 3 sebesar -45,68 dB di 1,46 GHz. Hasil pengukuran RL maksimum masing-masing adalah -41,16 dB (1,94 GHz), -39,16 dB (2,63 GHz), dan -36,68 dB (1,37 GHz). Bandwidth (RL < -10 dB) adalah 194 MHz (antena 1), 176 MHz + 300 MHz (antena 2), dan 124 MHz + 130 MHz (antena 3). Gambar berikut adalah bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian ini.

Antenna 1



(a)

Antenna 2



(b)

Antenna 3

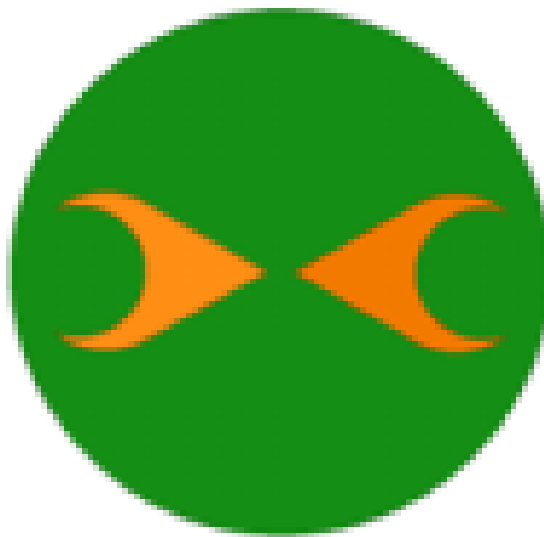


(c)

Gambar 51 Bentuk akhir rancangan antena pada penelitian [38, 39]

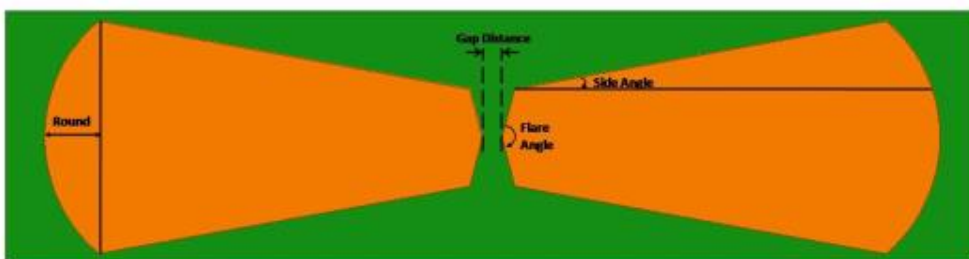
n. Muhammad Syukri Habibi (2019)

Penelitian [40–42] mengembangkan *bowtie antenna* berbahan FR4 epoxy ($\varnothing$ 80 mm, tebal 1,6 mm) dengan *wing radius* 36 mm, *flare angle* 60° , *gap distance* 4 mm, serta modifikasi ujung berbentuk irisan. Hasil pengukuran menunjukkan *return loss* (RL) $-40,27$ dB pada 1,55 GHz dan bandwidth RL < -10 dB sebesar 454 MHz (1,328–1,782 GHz), sedangkan simulasi 282 MHz (1,354–1,637 GHz). Untuk RL < -6 dB, bandwidth-nya 793 MHz (pengukuran) dan 504 MHz (simulasi). VSWR terbaik 1,01 (pengukuran) di 1,56 GHz, dan 1,07 (simulasi) di 1,44 GHz.



Gambar 52 Bentuk geometri modifikasi ujung antenna *bowtie* pada penelitian[40-42]

Modifikasi lain yang telah dirancang adalah antenna *bowtie* panjang seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.

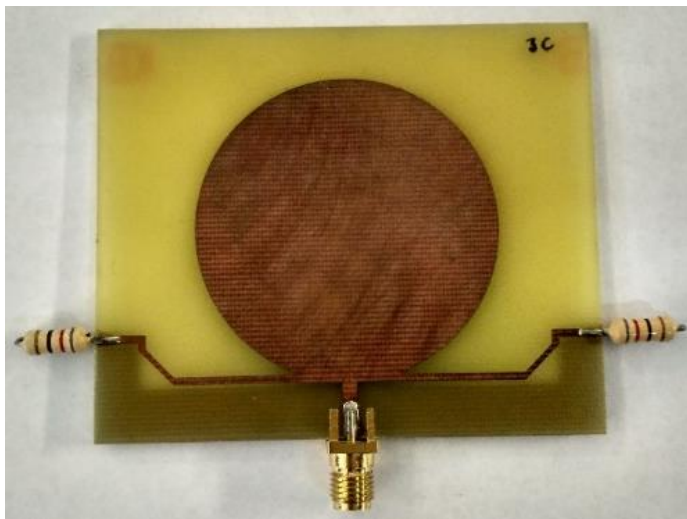


Gambar 53 Model geometri antenna *bowtie* panjang pada penelitian [40-42]

Untuk desain panjang, resonansi pertama terjadi pada 780 MHz (RL -16,61 dB), berbeda 40 MHz dari simulasi di 820 MHz (RL -17,43 dB). *Bandwidth* RL < -10 dB adalah 167 MHz (707–874 MHz), lebih kecil dari simulasi 202 MHz (738–940 MHz). Resonansi kedua muncul di 2,19 GHz (RL -21,02 dB), sedangkan simulasi di 2,53 GHz (RL -22,36 dB), dengan perbedaan 340 MHz. *Bandwidth* RL < -10 dB mencapai 1,87–3 GHz, dan RL < -6 dB seluas 2,31 GHz (659 MHz–3 GHz). VSWR tertinggi 19,26 (pengukuran di 310 MHz), lebih rendah dari simulasi 60,27 di 300 MHz. VSWR < 3 dicapai sepanjang 2,3 GHz (670 MHz–3 GHz) pada pengukuran, lebih lebar dibanding simulasi.

o. Yuda Muhammad Hamdani (2019)

Penelitian [43–45] merancang lima antenna *microstrip* baru berbasis substrat FR4 epoxy ($160 \times 54 \text{ mm}^2$, tebal 1,6 mm) untuk frekuensi 50 MHz–4 GHz menggunakan *CST Studio Suite*. Desain mencakup: referensi, modifikasi panjang *arms* 55 mm, *arms after transition* 1 mm, *feed* 1 mm, dan *groundplane* 50 mm. Hasil simulasi menunjukkan desain referensi memiliki performa terbaik dengan *return loss* (RL) -36,7 dB dan bandwidth 2350 MHz. Desain lain menunjukkan RL -29,5 hingga -30,7 dB dengan bandwidth di atas 2300 MHz.

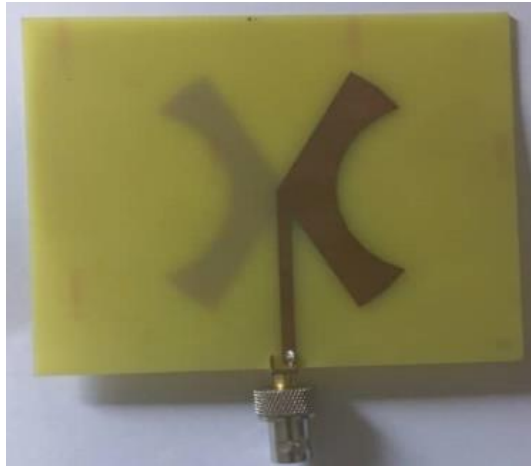


Gambar 54 Realisasi *microstrip* dengan modifikasi *length of arms after transition antenna* panjang 1mm [43-45]

p. Jean Piere (2019)

Penelitian [46] merancang tiga antenna *bowtie*: dua model *double layer* (Antena 1 dan 2) dan satu *single layer* (Antena 3). Antena 1 dan 2 dimodifikasi pada tepi

sayap dengan sudut *flare* masing-masing 60° dan 120° , menghasilkan *bandwidth* 560 MHz dan 602 MHz. Antena 3 tanpa modifikasi bentuk, hanya optimasi parameter—*wing radius* 36 mm dan *flare angle* 60° . Hasil simulasi menunjukkan *bandwidth* 560 MHz (Antena 1), 602 MHz (Antena 2), dan 216 MHz (Antena 3). Pengukuran menghasilkan *bandwidth* 555 MHz, 576 MHz, dan 298 MHz secara berurutan. Nilai *return loss* Antena 1 dan 2 lebih rendah daripada Antena 3.



Gambar 55 Bentuk akhir rancangan antena pada penelitian [46]

q. Faradita Nugraha (2021)

Penelitian [47, 48] mengoptimasi enam antena: tiga *bowtie* (sudut *flare* 150° , *gap distance* 0,6 mm dan 0,8 mm) dan tiga *dipole* (panjang 35 mm, 45 mm, dan lebar 45 mm). Optimasi dilakukan pada sudut, jarak celah, serta dimensi panjang-lebar untuk memperoleh performa terbaik. Ukuran antena memengaruhi frekuensi resonansi—semakin besar dimensi, semakin rendah frekuensinya. Pada antena *bowtie*, pengaturan *flare angle* dan ketebalan substrat meningkatkan lebar *bandwidth*, sedangkan pada *dipole*, hasil lebih fluktuatif meskipun dimensi diperbesar.

r. Asep Wahyu Shopiyuddin (2021)

Penelitian [49] merancang tiga antena *bowtie* baru: B1 (referensi), B2 (dengan RC paralel: $R = 33 \Omega$, $C = 1 \text{ pF}$), dan B3 (dengan RC seri: $R = 33 \Omega$, $C = 4 \text{ pF}$). Ketiganya menggunakan substrat *FR4 epoxy* berukuran $160 \times 54 \text{ mm}$, tebal 1,6 mm, dan bekerja pada rentang 300 MHz–3 GHz. Desain dilakukan dengan *CST Studio Suite*. Antena B2 menunjukkan *bandwidth* tertinggi sebesar 790 MHz.

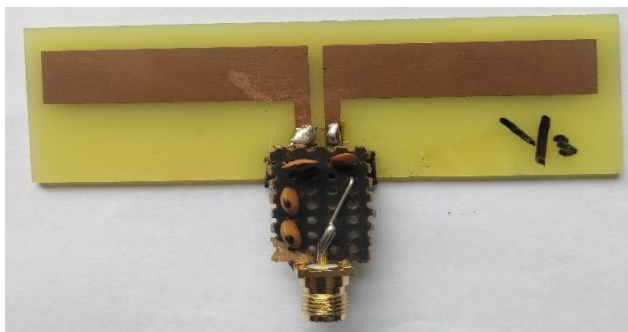
Gambar berikut merupakan bentuk akhir dari rancangan antenna dari penelitian ini.



Gambar 56 Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian [49]

s. Yoka Mostafa (2021)

Penelitian [50] merancang tiga model modifikasi antenna *dipole* yang dioptimalkan menggunakan metode *matching impedance* dengan penambahan rangkaian *LC-network* (kapasitor dan induktor) untuk mencocokkan impedansi antenna dan saluran transmisi. Tiga konfigurasi disimulasikan, dan antenna Y3 menunjukkan hasil paling optimal dengan bandwidth tertinggi berdasarkan pengukuran, yaitu 320 MHz. Gambar berikut merupakan bentuk akhir dari rancangan antenna dari penelitian ini.



Gambar 57 Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian [50]

t. Taufik Ramdhani (2022)

Penelitian [51, 52] merancang tiga desain antenna: modifikasi ujung pada antenna *bowtie* (antena 1), optimasi antenna *dipole* (antena 2), dan gabungan keduanya yang disebut antenna *tie-square* (antena 3). Gabungan ini dibuat karena *dipole* menghasilkan frekuensi berbeda, sedangkan *bowtie* memiliki bandwidth lebar. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa antenna *tie-square* memiliki bandwidth terbesar, yaitu 1880 MHz. Gambar berikut adalah bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian ini.



Gambar 58 Bentuk akhir rancangan antenna *Tie-Square* pada penelitian [51, 52]

u. Jean Piere (2022)

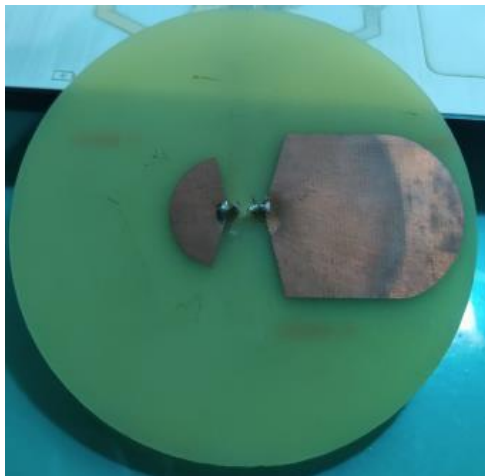
Penelitian [53–57] merancang dua model *antenna microstrip—circular* dan *rectangular*—dengan modifikasi pemotongan bagian atas untuk meningkatkan performa. Tiga antenna dihasilkan (dua *circular*, satu *rectangular*) dan disimulasikan menggunakan *CST Microwave Studio* serta *HFSS*. Antenna dibuat pada PCB dengan substrat FR-4. Desain optimal *circular* dan *rectangular* memiliki frekuensi resonansi 3,3 GHz dan 1,24 GHz, *return loss* < -10 dB, *VSWR* < 2 , dan karakteristik *ultra wideband*. Hasil pengukuran menunjukkan antenna 2 memiliki *bandwidth* terlebar, yaitu 3400 MHz. Gambar berikut merupakan bentuk akhir dari rancangan antenna dari penelitian ini.



Gambar 59 Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian [53-57]

v. Ari Mukti Wibowo (2023)

Penelitian [58, 59] merancang tiga desain antenna: antenna *bowtie*, *long bowtie*, dan antenna kombinasi dari keduanya. Kombinasi ini ditujukan untuk meningkatkan performa antenna, khususnya dalam memperluas cakupan frekuensi PD yang dapat ditangkap, sehingga meningkatkan sensitivitas. Simulasi dilakukan untuk memperoleh desain dengan karakteristik terbaik. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa antenna kombinasi memiliki bandwidth terluas sebesar 441 MHz. Gambar berikut bentuk akhir dari rancangan antenna dari penelitian ini.

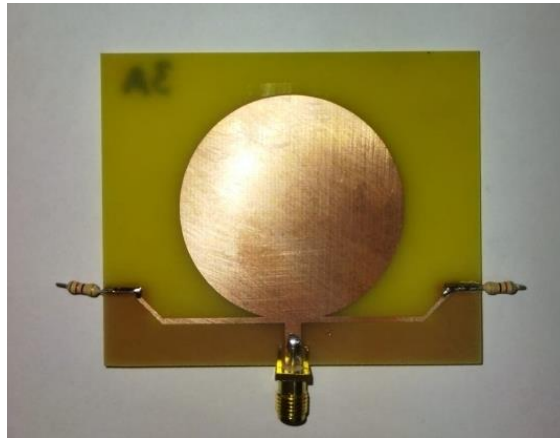


Antena Kombinasi

Gambar 60 Bentuk akhir rancangan antenna pada penelitian [58, 59]

w. Mukhtar Hadi (2023)

Penelitian [60] merancang tiga desain antenna *microstrip* dan melakukan simulasi untuk memperoleh desain kombinasi dengan karakteristik terbaik. Berdasarkan hasil pengukuran, antenna ke-3 memiliki bandwidth terluas sebesar 4,8 GHz. Gambar berikut merupakan bentuk akhir dari rancangan antenna dari penelitian ini.



Gambar 61 Realisasi antenna *microstrip* [60]

x. Wahyu Agung Ramadhan Amiruddin (2024)

Penelitian [61] merancang satu antenna *microstrip* modifikasi dan tujuh antenna referensi. Simulasi dilakukan untuk memperoleh desain kombinasi dengan karakteristik terbaik. Berdasarkan hasil pengukuran, antenna *microstrip* modifikasi menunjukkan bandwidth terluas sebesar 5,37 GHz. Gambar berikut merupakan bentuk akhir dari rancangan antenna dari penelitian ini.



Gambar 62 Hasil fabrikasi antenna *microstrip* modifikasi dan 7 antenna referensi

7.2.8 Rekap Hasil Penelitian Antena

Kesimpulan Berdasarkan Hasil Penelitian

Hasil pengukuran VNA dari berbagai penelitian antena dikumpulkan dan dirangking untuk menentukan model dengan bandwidth terlebar [60].

Tabel berikut menunjukkan hasil perangkingan antena terbaik berdasarkan terlebar dari hasil pengukuran VNA

Tabel 16 Hasil perangkingan antena berdasarkan

Rank	Peneliti	Tahun	Jenis Antenna	Modifikasi Antena	Total (MHZ)
1	Wahyu Agung Ramadhan Amiruddin	2024	Microstrip	Antena 1	5370
2	Mukhtar Hadi	2023	Microstrip	Antena 3	4800
3	Mukhtar Hadi	2023	Microstrip	Antena 2	4600
4	Mukhtar Hadi	2023	Microstrip	Antena 1	3800
5	Jean Pierre U. (Microstrip)	2022	Microstrip	Antena 2	3400
6	Yuda Muhammad Hamdani	2019	Microstrip	Antena 3	3390
7	Yuda Muhammad Hamdani	2019	Microstrip	Antena 5	3170
8	Yuda Muhammad Hamdani	2019	Microstrip	Antena 1	3140
9	Yuda Muhammad Hamdani	2019	Microstrip	Antena 2	3020
10	Jean Pierre U. (Microstrip)	2022	Microstrip	Antena 1	3000
11	Yuda Muhammad Hamdani	2019	Microstrip	Antena 4	2900
12	Taufik Ramdhani	2022	Tie Square	Antena 3	1880
13	Taufik Ramdhani	2022	Bowtie	Antena 1	1820
14	Khusnul Khatimah	2015	Dipol	Antena 2	1625
15	Hanalde Andre	2013	Bowtie	Antena 2	1297
16	Abrar Hakim	2017	Planar	Antena 1	870
17	Muhammad Syukri Habibi	2019	Bowtie	Antena 1	868
18	Asep Wahyu Shopiyuddin	2021	Bowtie	Antena 2	790
19	Inu Suprianto	2015	Bowtie	Antena 1	760
20	Inu Suprianto	2015	Bowtie	Antena 2	703
21	Muhammad Syukri Habibi	2019	Bowtie	Antena 2	592
22	Jean Pierre U. (Bowtie)	2019	Bowtie	Antena 2	576
23	Farah Vauzia	2014	Bowtie	Antena 3	570
24	Jean Pierre U. (Bowtie)	2019	Bowtie	Antena 1	555
25	Khusnul Khatimah	2015	Dipol	Antena 1	551
26	Farah Vauzia	2014	Bowtie	Antena 2	524
27	Taufik Ramdhani	2022	Dipole	Antena 2	500
28	Akmad Fauzan	2018	Kubus	Antena 2	476
29	Hanalde Andre	2013	Bowtie	Antena 1	454
30	Asep Andi Suriandi	2015	Bowtie	Antena 1	450
31	Ari Mukti Wibowo	2023	Bowtie	Antena 3	441
32	Fauzi Ashari	2017	Log Periodic	Antena 1	440
33	Asep Wahyu Shopiyuddin	2021	Bowtie	Antena 1	427
34	Joko Muslim	2013	Bowtie	Antena 1	418
35	Fakhru Rozi	2014	Loop	Antena 4	395

Rank	Peneliti	Tahun	Jenis Antenna	Modifikasi Antena	Total (MHZ)
36	Asep Andi Suriandi	2015	Bowtie	Antena 2	390
37	Fakhru Rozi	2014	Loop	Antena 2	386
38	Fakhru Rozi	2014	Loop	Antena 3	368
39	Fakhru Rozi	2014	Loop	Antena 5	365
40	Yoka Mustopa	2021	Dipole	Antena 3	320
41	Fakhru Rozi	2014	Loop	Antena 1	318.5
42	Farah Vauzia	2014	Bowtie	Antena 1	315
43	Abrar Hakim	2017	Planar	Antena 2	308
44	Inu Suprianto	2015	Bowtie	Antena 3	304
45	Yoka Mustopa	2021	Dipole	Antena 1	300
46	Jean Pierre U. (Bowtie)	2019	Bowtie	Antena 3	298
47	Akmad Fauzan	2018	Kubus	Antena 3	254
48	Muhammad Syukri Habibi	2019	Bowtie	Antena 3	245
49	Asep Wahyu Shopiyuddin	2021	Bowtie	Antena 3	224
50	Akmad Fauzan	2018	Kubus	Antena 1	194
51	D. Trilaksono	2018	Spiral	Antena 3	192
52	Miftahul Husna	2018	Log Periodic	Antena 3	170
53	Yoka Mustopa	2021	Dipole	Antena 2	170
54	Ari Mukti Wibowo	2023	Bowtie	Antena 2	170
55	Miftahul Husna	2018	Log Periodic	Antena 2	140
56	D. Trilaksono	2018	Spiral	Antena 1	132
57	D. Trilaksono	2018	Spiral	Antena 2	106
58	Miftahul Husna	2018	Log Periodic	Antena 1	70

Hasil perangkangan dan reviu dari penelitian terkait pengembangan antena pendeteksi PD yang telah dilakukan di ITB dalam kurun waktu sekitar 10 tahun terakhir menunjukan pengembangan yang progresif. Hal ini dapat dilihat dari penelitian awal di tahun 2013 yang menghasilkan antena dengan bandwidth di kisaran 400 MHz sedangkan di tahun 2024 telah dihasilkan sensor deteksi prakegagalan peralatan tegangan tinggi dengan bandwidth 5370 MHz.

8 PENERAPAN PENGUJIAN TEGANGAN TINGGI DALAM MANAJEMEN ASET KETENAGALISTRIKAN

Transisi energi global menuju sistem kelistrikan yang lebih bersih, andal, dan berkelanjutan menuntut tidak hanya inovasi teknologi tetapi juga transformasi dalam praktik pengelolaan infrastruktur yang telah ada. Di tengah akselerasi penetrasi energi terbarukan, digitalisasi jaringan listrik, dan tekanan terhadap efisiensi operasional, manajemen aset menjadi pilar krusial dalam menjamin keandalan, ketersediaan, dan keselamatan sistem ketenagalistrikan secara menyeluruh.

Aset ketenagalistrikan seperti transformator daya, *circuit breaker* (CB), *gas insulated switchgear* (GIS), kabel, dll. bukan hanya investasi besar dengan umur teknis panjang, tetapi juga komponen krusial yang kegagalannya dapat berdampak luas terhadap kestabilan sistem dan layanan publik. Maka, pengelolaan aset tidak bisa lagi bersifat reaktif; pendekatan berbasis risiko, kondisi aktual peralatan, dan proyeksi umur sisa operasional kini menjadi kebutuhan mendesak. Di sinilah *Asset Management* berkembang menjadi disiplin strategis, bukan sekadar kegiatan teknis.

Manajemen aset modern mengintegrasikan pendekatan rekayasa keandalan, *monitoring* berbasis kondisi (*condition-based monitoring*), dan pengambilan keputusan berbasis data. Melalui pendekatan ini, pelaku industri kelistrikan tidak hanya dapat memperpanjang umur aset, namun juga mengoptimalkan sumber daya, meminimalkan *downtime*, dan mengelola risiko kegagalan secara sistematis. Seluruh proses ini juga menjadi kunci dalam memenuhi tuntutan regulasi ketat, standar keselamatan, dan ekspektasi dari pemangku kepentingan.

Bab ini dihadirkan penulis sebagai upaya reflektif dan berbagi pengetahuan berdasarkan pengalaman nyata dalam praktik manajemen aset ketenagalistrikan. Disajikan dalam konteks Indonesia namun dengan semangat universal, pengalaman-pengalaman ini menunjukkan bagaimana tantangan dapat diubah menjadi peluang untuk peningkatan berkelanjutan. Secara khusus, penulis akan membahas sejumlah studi kasus dan metodologi yang pernah diterapkan, yang dikelompokkan menjadi beberapa tema.

8.1 Aplikasi Sensor PD Desain Baru untuk Pengujian *Partial Discharge* di Gardu Induk Tegangan Tinggi 150 kV

Pada bagian ini akan dijelaskan aplikasi sensor PD desain baru yang telah dikembangkan di ITB yang telah dibahas pada Bab 7 di gardu induk tegangan tinggi 150 kV. Sensor PD desain baru yang digunakan adalah antena *microstrip* desain baru dengan bandwidth 3800 MHz. Sensor ini diaplikasikan untuk mengukur *partial discharge* yang terjadi pada *cable sealing end* (CSE) yang terdapat di gardu induk tegangan tinggi 150 kV.

Cable Sealing End (CSE) adalah komponen penting dalam sistem tenaga listrik yang menghubungkan kabel ke peralatan lain. Banyak kegagalan CSE disebabkan oleh isolasi yang bermasalah, suhu ekstrem, polusi, dan kesalahan pemasangan. Statistik mencatat bahwa 87% kegagalan terminasi kabel berasal dari isu isolasi. Berikut contoh dari kerusakan CSE [62].



Gambar 63 Kerusakan pada CSE

Kerusakan CSE dapat menyebabkan kerugian besar karena bisa merusak peralatan di sekitarnya dan mengganggu layanan ke pelanggan. Salah satu penyebab utama kerusakan adalah *partial discharge* (PD), yang muncul lebih dulu sebelum kegagalan total sistem isolasi. Jika tidak terdeteksi, PD dapat berkembang menjadi *flashover*.

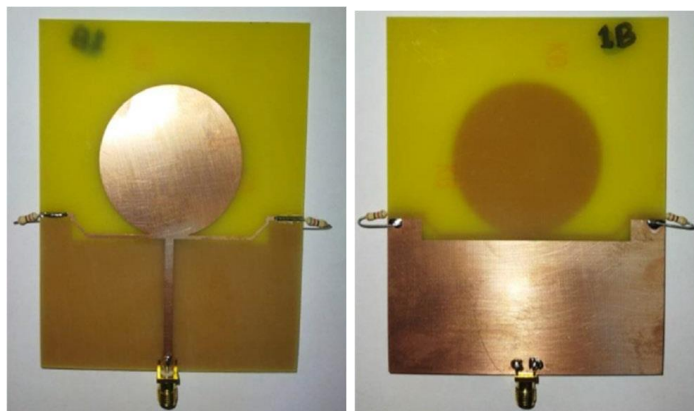
PD menghasilkan sinyal dalam bentuk cahaya, suara, gelombang ultrasonik, dan elektromagnetik. Untuk mendeteksinya, berbagai sensor digunakan:

- **HFCT**: mendeteksi arus gangguan frekuensi tinggi di kabel,
- **TEV**: mendeteksi tegangan gangguan pada permukaan logam, kini juga dimodifikasi untuk material semikonduktif,
- **UHF**: digunakan dalam studi ini karena fleksibel, murah, dan mendukung pemantauan *online* tanpa perlu mematikan sistem.

Namun, deteksi PD pada CSE masih terbatas pada skala laboratorium. Karakteristik frekuensi PD pada CSE juga belum banyak diketahui.

Penelitian [62] mengembangkan sensor UHF baru dan menguji langsung di lapangan. Sensor HFCT digunakan sebagai pembanding. Studi ini memberi wawasan baru tentang spektrum frekuensi PD pada CSE lama dan baru.

Sensor UHF yang dirancang dibuat menggunakan perangkat lunak *Computer Simulation Technology (CST)*. Sebelum diproduksi, desain antenna dioptimalkan untuk memperoleh bandwidth yang lebar dan *Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)* yang rendah, agar mampu mendeteksi sinyal *partial discharge (PD)* dalam rentang frekuensi 300 MHz hingga 3 GHz. Hasil fabrikasi sensor ditampilkan pada gambar berikut dengan bentuk mikrostrip lingkaran berukuran 100×80 mm yang dicetak pada substrat FR-4 setebal 1,6 mm [62].



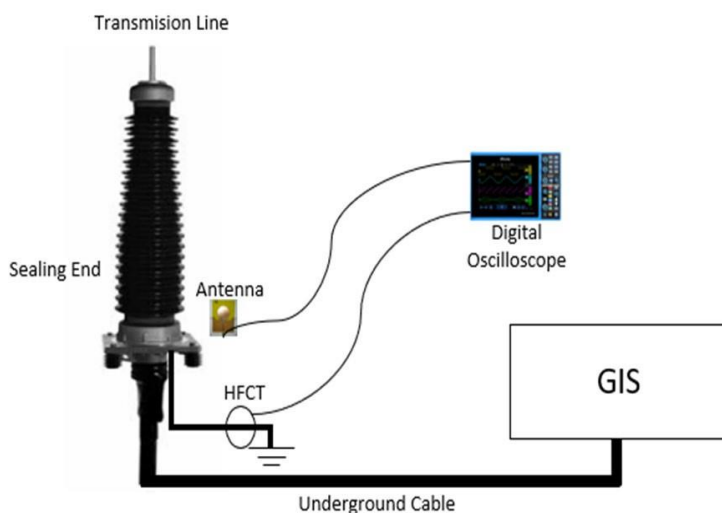
Gambar 64 Hasil fabrikasi antenna untuk aplikasi sensor PD pada gardu induk

Setelah fabrikasi, dipasang konektor SMA dan dilakukan pengujian karakteristik antenna menggunakan *vector network analyzer (VNA)*. Hasil pengujian menunjukkan *bandwidth* sebesar 3800 MHz. Sensor yang efektif

untuk deteksi PD harus bekerja pada frekuensi 300 MHz–3 GHz, memiliki *bandwidth* luas, dan *VSWR* < 2. Sensor mikrostrip lingkaran yang diusulkan menunjukkan keunggulan dari segi cakupan frekuensi, kinerja, dan ukuran yang lebih ringkas.

Beberapa sensor sebelumnya hanya mulai bekerja pada 374 MHz atau 900 MHz, tidak menjangkau frekuensi bawah yang penting untuk PD. Beberapa lainnya memiliki *bandwidth* terbatas atau ukuran fisik terlalu besar. Sensor yang dirancang dalam studi ini mendukung operasi *ultra-wideband*, dengan *gain* dan *VSWR* yang baik serta ukuran kompak, cocok untuk penggunaan di dalam dan luar ruangan.

Selain metode UHF, ada juga metode deteksi menggunakan sensor *Transient Earth Voltage (TEV)* dan *High-Frequency Current Transformer (HFCT)* yang bekerja di frekuensi <100 MHz. Namun, metode ini memiliki keterbatasan dalam hal akurasi dan rentan terhadap gangguan lingkungan. Dua sensor digunakan: sensor UHF rancangan sendiri dan sensor HFCT komersial sebagai pembanding. Keduanya dihubungkan ke *digital oscilloscope* melalui kabel koaksial 50 Ohm sepanjang 5 meter. Sensor UHF ditempatkan sejauh 30 cm dari CSE seperti yang terlihat pada gambar berikut [62].



Gambar 65 Rangkaian pengujian deteksi PD

Studi kasus dilakukan pada *cable sealing-end (CSE)* luar ruangan yang terdiri atas enam unit di dua *bay*, seluruhnya dalam kondisi beroperasi dan terhubung ke sistem transmisi 150 kV yang mengarah ke gardu *gas-insulated*

switchgear (GIS). Deteksi *partial discharge* (PD) dilakukan menggunakan sensor *ultra-high frequency* (UHF) yang diusulkan.

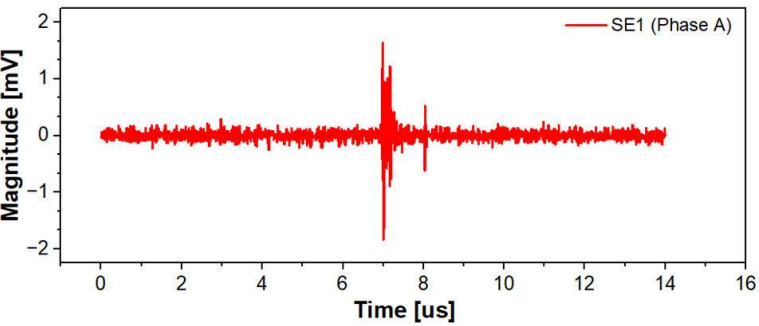
Jenis CSE ini dipilih karena tingginya insiden kerusakan baik pada unit baru maupun lama. Unit pada *Bay #1* merupakan CSE baru dengan usia layanan 0 tahun 4 bulan (SE1 Fasa A, SE2 Fasa B, SE3 Fasa C), sementara *Bay #2* berisi CSE yang telah beroperasi selama 33 tahun (SE4 Fasa A, SE5 Fasa B, SE6 Fasa C). Rincian lengkapnya disajikan dalam tabel berikut [62].

Tabel 17 Jenis Cable Sealing End

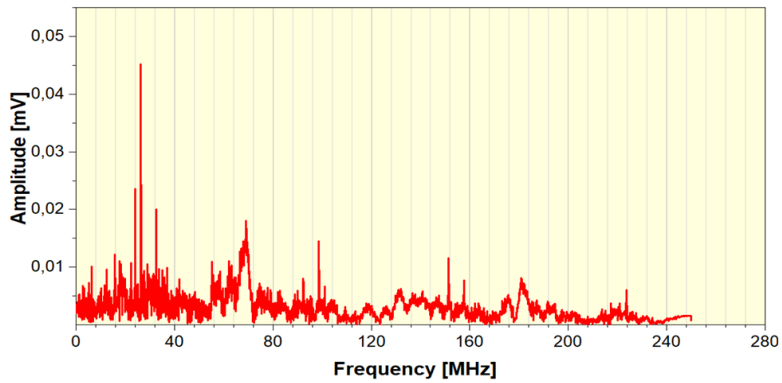
Sealing End	Simbol	Umur
Kasus 1: CSE Baru	SE1 (Fasa A)	4 Bulan
	SE2 (Fasa B)	
	SE3 (Fasa C)	
Kasus 2: CSE Lama	SE4 (Fasa A)	33 Tahun
	SE5 (Fasa B)	
	SE6 (Fasa C)	

8.1.1 Kasus 1: PD dalam Kondisi CSE Baru

Analisis sinyal menunjukkan bahwa SE1 fasa A menghasilkan muatan PD sebesar 2 mV dengan karakteristik impuls dan *rise time* 0,03 μ s. Spektrum frekuensinya berada di kisaran 50–70 MHz. Pengukuran pada SE2 fasa B dan SE3 fasa C di *bay* yang sama menunjukkan besaran PD masing-masing 1,8 mV dan 2 mV, dengan spektrum dominan antara 60–70 MHz. Meskipun tergolong muatan kecil, kejadian PD pada CSE baru tetap terdeteksi, menandakan bahwa sensor UHF yang diusulkan memiliki sensitivitas tinggi terhadap sinyal PD dengan spektrum frekuensi rendah [62].

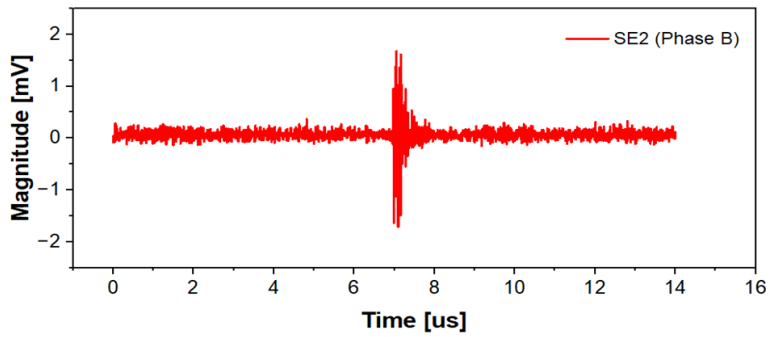


(a)

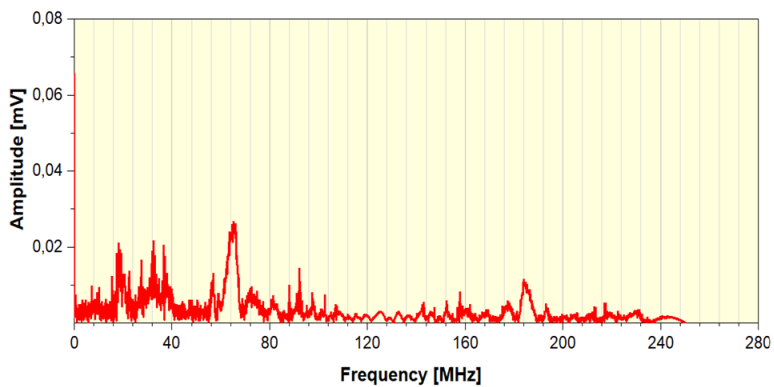


(b)

Gambar 66 Hasil deteksi *partial discharge waveform* SE1 Fasa A (a) *Time-domain signal*, and (b) *Frequency spectrum*

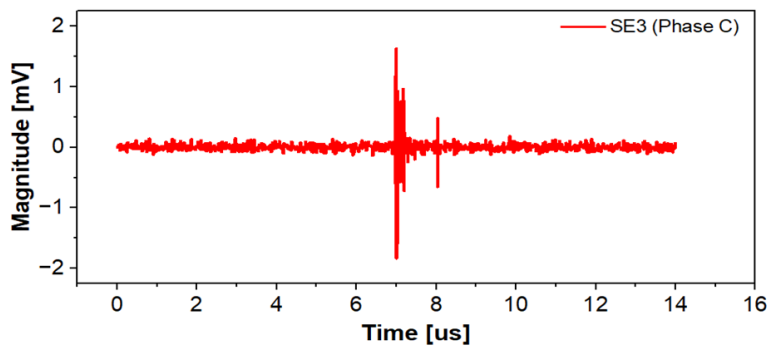


(a)

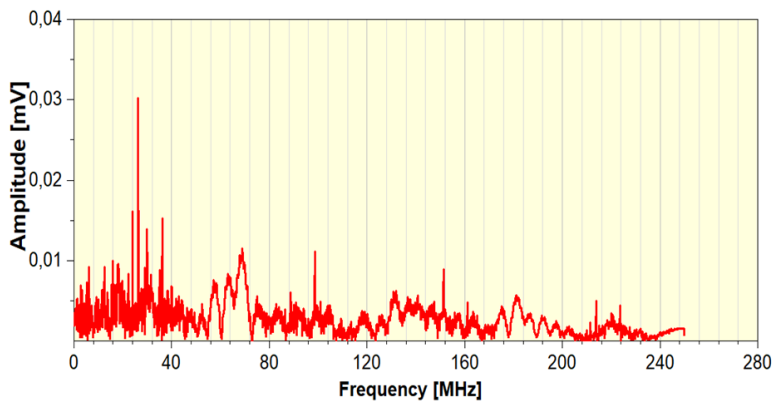


(b)

Gambar 67 Hasil deteksi *partial discharge waveform* SE2 Fasa B (a) *Time-domain signal*, and (b) *Frequency spectrum*



(a)



(b)

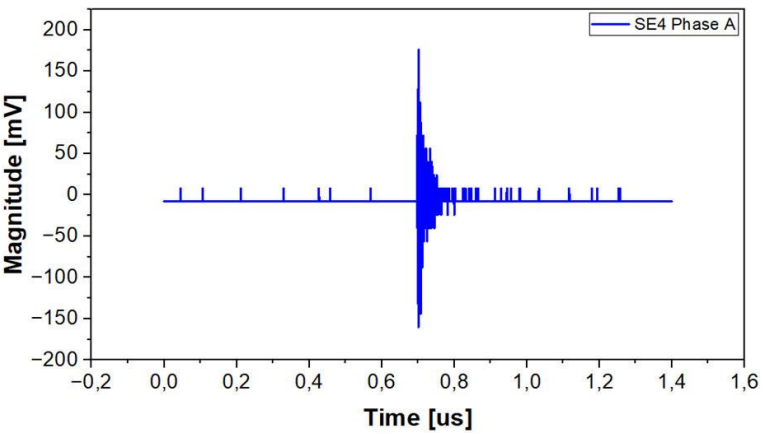
Gambar 68 Hasil deteksi *partial discharge waveform* SE3 Fasa C (a) *Time-domain signal*, and (b) *Frequency spectrum*

8.1.2 Kasus 2: PD dalam Kondisi CSE Lama

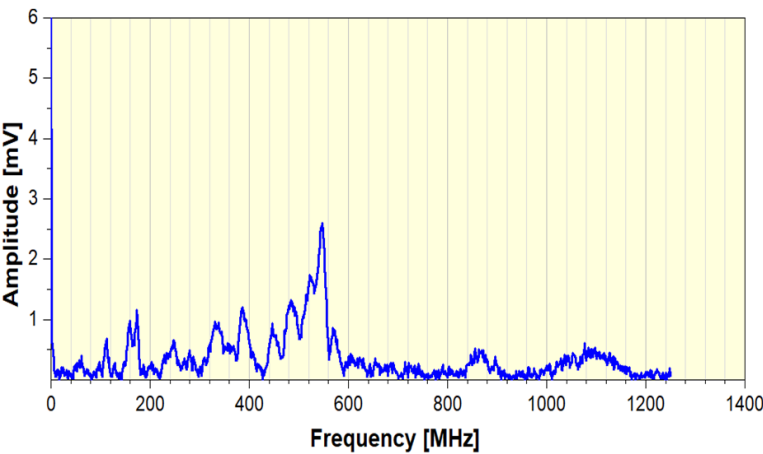
Karakteristik sinyal *partial discharge* (PD) dapat dianalisis melalui parameter seperti *peak amplitude*, *rise time*, *fall time*, dan *frequency spectrum*. Sinyal PD yang terdeteksi pada SE5 fasa B menunjukkan bentuk impuls dengan *rise time* 0,12 μs dan *fall time* 1,39 μs, serta spektrum frekuensi di kisaran 200 MHz hingga 1 GHz. Secara umum, karakteristik sinyal PD mencatat *rise time* 0,14 μs dan *fall time* 1,67 μs [62].

Antena yang diusulkan menunjukkan sensitivitas tinggi dalam mendeteksi sinyal PD. Pada SF6 fasa C, rasio *signal-to-noise* (SNR) yang dihasilkan antenna mencapai 70 (350 mV / 5 mV), dibandingkan dengan sensor HFCT yang menghasilkan SNR sebesar 40 (188,4 mV / 4,7 mV). Perbedaan sensitivitas ini berasal dari metode deteksi yang digunakan: antenna UHF mendeteksi emisi

electromagnetic, sedangkan HFCT mendeteksi arus impuls yang mengalir dari CSE ke tanah [63].

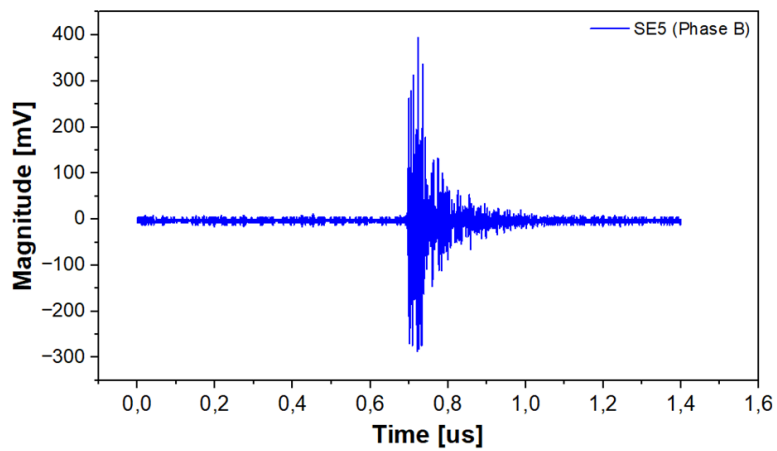


(a)

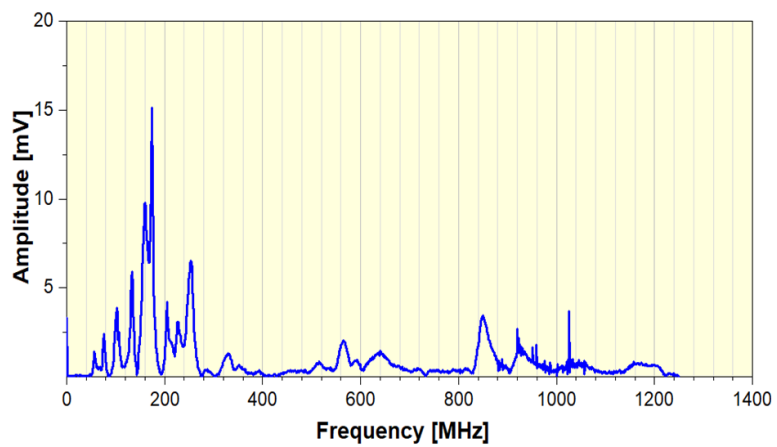


(b)

Gambar 69 Hasil deteksi *partial discharge waveform* SE4 Fasa A (a) *Time-domain signal*, and (b) *Frequency spectrum*

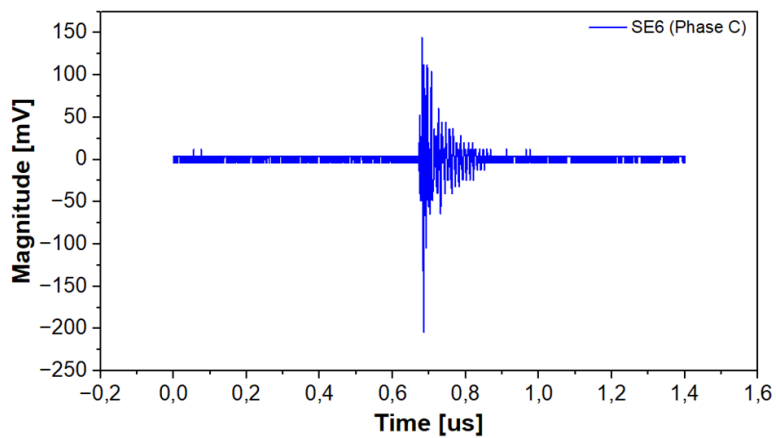


(a)

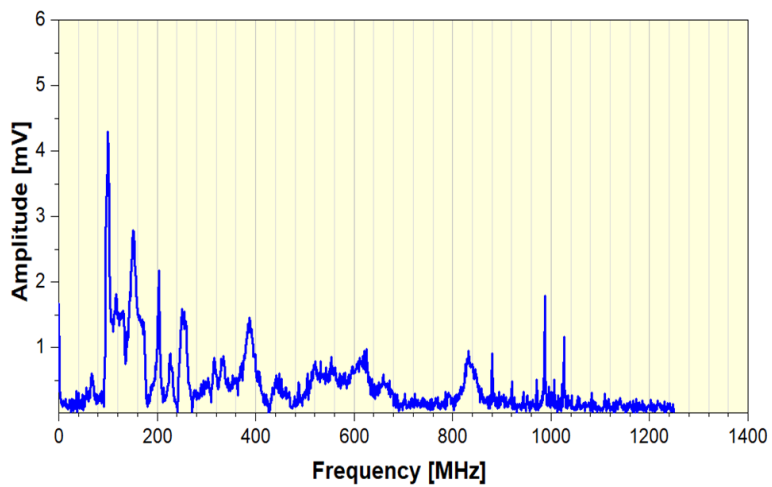


(b)

Gambar 70 Hasil deteksi *partial discharge* waveform SE5 Fasa B (a) *Time-domain* signal, and (b) *Frequency spectrum*



(a)



(b)

Gambar 71 Hasil deteksi *partial discharge waveform* SE6 Fasa C (a) *Time-domain signal*, and (b) *Frequency spectrum*

Tabel 18 Hasil pengujian pada *cable sealing end*

<i>Sealing End</i>	HFCT			Antena UHF		
	Vmin (mV)	Vmax (mV)	Vpp (mV)	Vmin (mV)	Vmax (mV)	Vpp (mV)
SE1 (Fasa A)	5	5	10	1,3	1,7	4
SE2 (Fasa B)	7	5	12	2	2	4
SE3 (Fasa C)	7	8	15	2	1,7	3,7
SE4 (Fasa A)	203,2	165,6	368,8	150	112	262
SE5 (Fasa B)	97	110	207	200	400	600
SE6 (Fasa C)	86,4	102	188,4	200	150	350

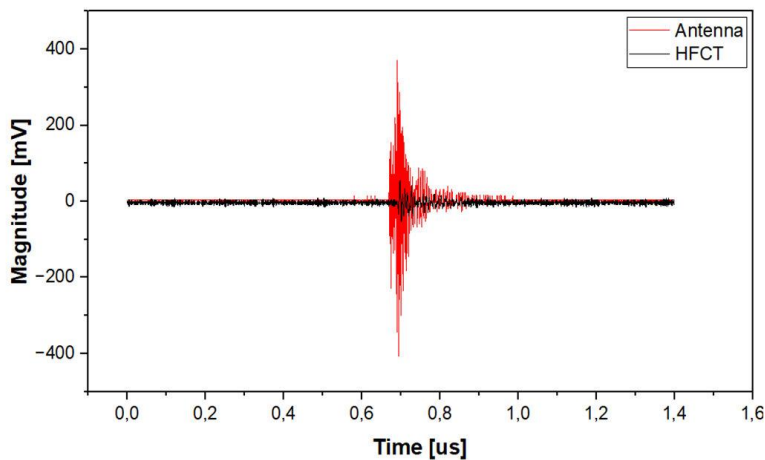
8.1.3 Diskusi

8.1.3.1 Sensitivitas Antena Berdasarkan Spektrum Frekuensi

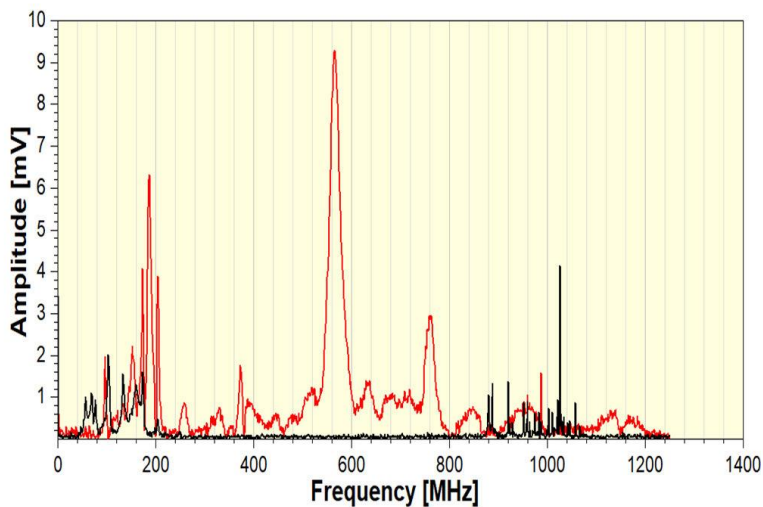
Verifikasi kemampuan sensor antena yang diusulkan dilakukan dengan pengukuran simultan menggunakan sensor HFCT komersial sebagai pembanding. Sensor HFCT dipasang pada kabel pentanahan CSE, sedangkan antena ditempatkan 30 cm dari objek uji [62].

Antena mendeteksi sinyal PD dengan amplitudo 400 mV, sedangkan HFCT 100 mV, dengan *noise* 8 mV pada keduanya [62]. Rasio *signal-to-noise ratio* (SNR) adalah 100 untuk antena dan 25 untuk HFCT, menunjukkan sensitivitas antena UHF yang lebih tinggi [62].

Spektrum frekuensi dianalisis menggunakan *fast Fourier transform* (FFT) dan menunjukkan rentang 420 MHz–800 MHz dengan amplitudo puncak 9,4 mV untuk antena [62]. Rentang ini sesuai dengan tipe *surface discharge* seperti yang dikategorikan oleh penelitian sebelumnya [64]. Sensor HFCT mendeteksi spektrum 50 MHz–180 MHz. Kedua sensor memiliki irisan spektrum yang sama, mengonfirmasi kemampuan antena UHF mendeteksi PD dengan jelas di frekuensi tinggi [62].



(a)



(b)

Gambar 72 Perbandingan bentuk gelombang PD yang terdeteksi antara HFCT (warna hitam) dan antena yang diusulkan (warna merah) (a) *Time-domain signal*, and (b) *Frequency spectrum*

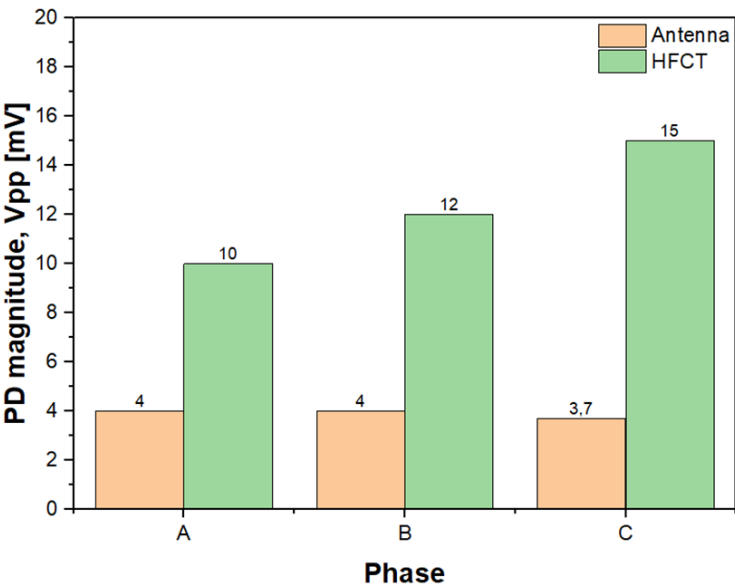
8.1.3.2 Pertumbuhan dan Perkembangan PD

Magnitudo PD dalam tegangan puncak-ke-puncak (V_{pp}) adalah rata-rata dari 20 set data PD saat pengukuran CSE in-service. Sensor HFCT mendeteksi magnitudo tertinggi 15 mV pada fasa C, sedangkan fasa A dan B masing-masing 10 mV dan 12 mV. Antena yang diusulkan mendeteksi rata-rata 4 mV di setiap fasa [62].

Perbandingan di CSE baru menunjukkan sensor HFCT memiliki magnitudo sinyal lebih tinggi, namun antenna tetap mampu mendeteksi sinyal PD meski dengan nilai lebih kecil [62]. *Noise* terukur sekitar 2 mV. Magnitudo PD dipengaruhi oleh frekuensi sinyal; pada CSE baru yang masih memiliki isolasi baik, frekuensi PD di bawah 100 MHz sehingga sensor HFCT, yang optimal untuk frekuensi tinggi (<200 MHz), bekerja lebih baik dibanding antenna [62].

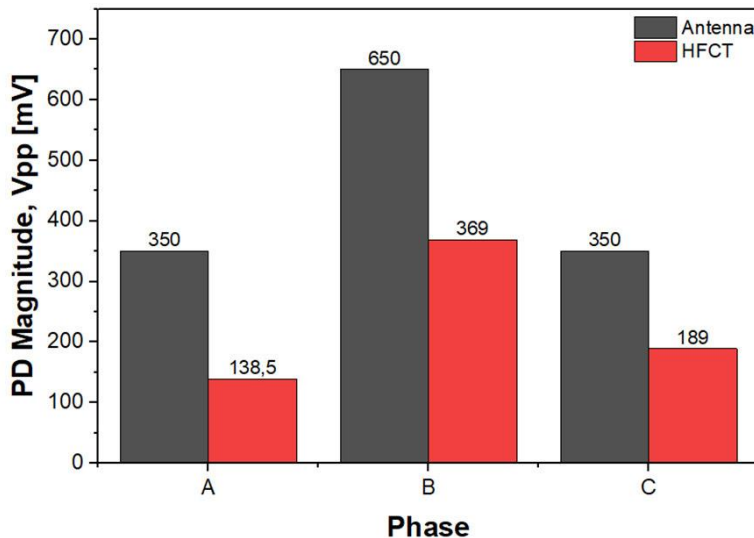
Pengukuran di CSE lama menunjukkan fasa B memiliki magnitudo PD tertinggi, baik pada HFCT maupun antenna. Rata-rata magnitudo PD antenna 650 mV, sementara HFCT 369 mV, menunjukkan *sensitivity* antenna dua kali lebih tinggi. Antena mengukur frekuensi PD antara 400–800 MHz (ultra-tinggi), sehingga antenna dirancang dengan karakteristik *ultrawideband* untuk akurasi deteksi. Koefisien refleksi antenna baru sangat kecil (−29 dB), yang menandakan sensitivitas tinggi dalam mendeteksi PD [62].

PD yang terdeteksi di CSE berumur 33 tahun memiliki magnitudo lebih besar akibat degradasi isolasi. Komponen isolasi seperti kabel XLPE dan *stress cone* polimer berbeda bahan menciptakan ketidakseragaman medan listrik yang memicu PD dan pertumbuhan *treeing*, menandakan degradasi isolasi [72], [76].



Gambar 73 Perbandingan besaran PD, *voltage peak to peak* (Vpp) yang terdeteksi oleh antenna yang diusulkan dan HFCT dalam kondisi CSE baru

Perkembangan PD mengindikasikan penurunan kapabilitas dielektrik isolasi seiring usia, sehingga CSE berumur 33 tahun perlu dipertimbangkan untuk penggantian perawatan (*maintenance replacement*) guna menghindari kegagalan dan gangguan sistem kelistrikan [72].



Gambar 74 Perbandingan besaran PD, *voltage peak to peak* (Vpp) yang dideteksi oleh antenna yang diusulkan dan HFCT dalam kondisi CSE lama

8.1.3.3 Kesimpulan Aplikasi Sensor PD pada Gardu Induk

Dalam makalah ini, kami telah berhasil mengamati karakteristik spektrum frekuensi menggunakan desain antenna UHF baru untuk mendeteksi pelepasan parsial (/PD) pada dengan metode pengukuran dalam kondisi beroperasi (*in-service*). Pengukuran PD dilakukan pada 6 unit CSE luar ruangan dengan kriteria kondisi baru dan telah lama digunakan. Kesimpulan dari studi ini dirangkum sebagai berikut [62]:

- Sensor UHF yang diusulkan untuk mendeteksi PD di luar ruangan efektif dalam mendeteksi sinyal PD dengan jarak pemasangan 30 cm dari CSE. Dari sisi kinerja, sensor UHF dengan kategori masih dapat mendeteksi PD dalam kategori frekuensi tinggi pada CSE baru. Sensor UHF yang diusulkan memiliki sensitivitas dua kali lebih tinggi dibandingkan HFCT dalam pengukuran pada CSE lama karena besarnya PD yang terdeteksi berada dalam rentang frekuensi ultra-tinggi.
- Kemampuan sensor untuk mendeteksi sinyal PD dapat memetakan spektrum frekuensi PD yang ada pada CSE dalam kondisi baru maupun

yang telah lama dioperasikan. Antena yang diusulkan masih dapat mendeteksi PD dalam rentang frekuensi 50 MHz hingga 70 MHz dengan magnitudo yang lebih kecil dibandingkan HFCT. Rentang frekuensi PD yang terdeteksi adalah 400 MHz hingga 1000 MHz. Dengan informasi ini, dapat dikonfirmasi bahwa kemampuan antena yang diusulkan bekerja dalam rentang . Oleh karena itu, antena yang diusulkan dapat dijadikan pilihan untuk mendeteksi PD pada peralatan listrik tegangan tinggi/tegangan menengah.

- c. Berdasarkan investigasi terhadap magnitudo PD yang terdeteksi pada kondisi CSE baru dan lama, magnitudo PD tertinggi pada CSE lama fasa B adalah sebesar 650 mV dan 369 mV masing-masing untuk sensor UHF yang diusulkan dan HFCT. Secara keseluruhan, CSE lama memiliki magnitudo PD yang lebih tinggi dibandingkan CSE baru. Hal ini dipengaruhi oleh kenyataan bahwa masa pakai CSE telah memasuki tahap degradasi. Di masa mendatang, diperlukan tindakan penggantian perawatan terhadap CSE.

Ke depan, evaluasi lebih lanjut terhadap kinerja antena yang diusulkan masih diperlukan. Kami akan melakukan studi lanjutan mengenai kemampuan sensor UHF yang diusulkan untuk membandingkan pengukuran dengan teknik pelokalan sumber PD dalam CSE. Selain itu, studi lanjutan juga akan dilakukan terkait karakteristik pola pelepasan parsial terhubung-fase (*phase-resolved*) pada berbagai jenis CSE [62].

8.2 Monitoring Kondisi Peralatan Ketenagalistrikan (Studi Kasus: Sealing-End Kabel Tegangan Tinggi)

Pemanfaatan teknologi *monitoring* berbasis kondisi (*condition monitoring*) adalah elemen kunci dalam transformasi digital sektor ketenagalistrikan. Dengan memasang sensor pada titik-titik kritis dan menganalisis data secara kontinu, operator dapat mendeteksi gejala awal degradasi yang tidak terdeteksi oleh inspeksi rutin. Salah satu area yang sangat krusial adalah pada kabel tegangan tinggi—komponen yang kerap menjadi titik lemah sistem kabel bawah tanah maupun bawah laut. Kegagalan dapat menimbulkan ledakan dan kerusakan sistemik. Oleh karena itu, pemantauan suhu, kelembapan, dan medan listrik lokal menjadi krusial. Bagian ini membahas pengalaman praktis dalam mengimplementasikan sistem pemantauan

kondisi secara *real-time*, serta bagaimana hasilnya digunakan dalam intervensi preventif dan pembelajaran sistematis untuk aset serupa lainnya.

Sealing-End merupakan komponen krusial dalam sistem kabel tegangan tinggi yang menghubungkan kabel ke peralatan seperti GIS (*Gas Insulated Switchgear*) atau transformator. Keandalannya sangat menentukan integritas sistem transmisi, namun posisinya yang sering kali luput dari perhatian membuatnya rentan terhadap kegagalan yang mendadak dan destruktif. Oleh karena itu, dilakukan sebuah kajian komprehensif terhadap kondisi dan kelayakan yang telah beroperasi pada berbagai gardu induk di kawasan Jawa, Madura, dan Bali, guna mengidentifikasi risiko tersembunyi dan merumuskan strategi pemeliharaan yang lebih proaktif.

Dalam kurun waktu 2017 - 2023, tercatat setidaknya 14 kasus kegagalan terjadi di sistem 150 kV, sebagian besar menimpa unit yang telah beroperasi lebih dari 20 tahun. Namun, juga ditemukan beberapa kasus *infant failure*, bahkan pada yang baru beroperasi 2 bulan. Efek dari kegagalan ini tidak hanya memutus suplai listrik, tetapi juga berpotensi menimbulkan risiko keselamatan akibat pecahan isolator yang dapat terlempar hingga puluhan meter, serta merusak peralatan lain.

Melihat tingginya dampak tersebut, kajian ini bertujuan untuk:

- Mengidentifikasi penyebab utama kegagalan,
- Melakukan asesmen kondisi operasional dengan pengukuran (PD) secara *online*,
- Menyusun rekomendasi strategi pemeliharaan dan penggantian berbasis kondisi.

Salah satu bagian penting dari kajian ini adalah investigasi langsung terhadap kasus kegagalan fasa T pada salah satu GIS 150 kV. Dari hasil pengamatan fisik dan uji laboratorium terhadap komponen yang rusak, ditemukan adanya jejak *electrical treeing* pada permukaan *stress cone* serta lubang pada insulasi XLPE—indikasi kuat terjadinya progresif yang tidak terdeteksi sebelumnya. Kondisi ini menjadi pemicu utama *breakdown*, terutama setelah melewati masa operasi di atas 20 tahun.

Investigasi juga menunjukkan bahwa pada beberapa kasus, kegagalan disebabkan oleh kualitas pemasangan yang kurang optimal, seperti ketidaksempurnaan pelekatan *stress cone*, yang memungkinkan

terbentuknya rongga udara (*void*) dan kontaminan—faktor pemicu terjadinya PD dan *treeing* dini.

Sebagai bagian dari kajian kelayakan, dilakukan pengukuran PD secara *online* pada 42 unit dari 10 merek berbeda, dengan variasi usia operasi antara 1 hingga 33 tahun. Pengukuran dilakukan menggunakan berbagai sensor, seperti:

- HFCT (*High Frequency Current Transformer*) pada *ground* ,
- TEV (*Transient Earth Voltage*) pada permukaan logam,
- Antena UHF untuk deteksi radiasi elektromagnetik PD.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa:

- PD signifikan tidak hanya ditemukan pada dengan usia 24–33 tahun, tetapi juga pada unit berumur 5 tahun.
- Kategori “*some concern*” hingga “*major concern*” muncul pada unit dengan ketidaksempurnaan instalasi, bukan hanya karena *aging*,
- PD bisa muncul sejak awal masa operasi, sehingga sangat penting dilakukan *early monitoring* pasca-instalasi.

Dari hasil kajian, dirumuskan beberapa rekomendasi strategis, antara lain:

- *Monitoring* PD bertahap pasca-instalasi: dilakukan pada usia 2 minggu, 1 bulan, 6 bulan, lalu 1 tahun, dan dilanjutkan setiap 2 tahun.
- Penggantian preventif direkomendasikan pada yang telah beroperasi lebih dari 25 tahun, baik menggunakan bahan porselen maupun polimer,
- Perlunya klarifikasi tanggung jawab pemeliharaan di wilayah perbatasan antara pembangkitan dan transmisi, agar tidak terjadi kekosongan pengawasan,
- Vendor instalasi harus bertanggung jawab jika ditemukan indikasi *electrical treeing* pada usia awal operasi.

Kajian lapangan ini menegaskan pentingnya mengintegrasikan pemantauan kondisi berbasis sinyal gangguan kecil (seperti PD) ke dalam sistem manajemen aset. yang selama ini dianggap pasif, ternyata menyimpan potensi kegagalan laten yang dapat dideteksi sejak dini melalui pendekatan non-intrusif. Selain itu, pengalaman ini juga memperlihatkan perlunya sistem data aset yang selalu terbaru, karena ketidaksesuaian data antara database

dan kondisi aktual di lapangan menjadi tantangan tersendiri dalam proses asesmen.

Melalui pendekatan berbasis kondisi dan pengetahuan mendalam atas failure mode seperti *treeing*, *void*, dan *moisture ingress*, manajemen aset bisa diarahkan tidak hanya untuk mempertahankan operasional, tetapi juga mencegah kegagalan kritikal sebelum terjadi—sebuah langkah nyata menuju sistem tenaga listrik yang lebih andal dan aman.

8.3 Perhitungan Indeks Kesehatan Peralatan Berbasis Pengujian Tegangan Tinggi dan Penerapannya dalam Manajemen Aset Ketenagalistrikan

Seiring bertambahnya jumlah aset di sistem kelistrikan, tantangan utama bukan hanya pada aspek pemeliharaan, tetapi juga pada penyusunan prioritas yang objektif dan transparan. Di sinilah konsep *Health Index* (HI) berperan sebagai metrik kuantitatif yang menggabungkan berbagai data teknis—seperti hasil pengujian, kondisi fisik, riwayat gangguan, dan umur pakai—menjadi satu nilai indeks representatif. HI memungkinkan manajer aset untuk secara konsisten membandingkan kondisi antarperalatan dan menyusun prioritas tindakan berbasis risiko. Di era *data-driven asset management*, pendekatan ini memungkinkan alokasi sumber daya yang lebih efisien dan bertanggung jawab. Subbab ini menyajikan pengalaman penulis dalam membangun dan menerapkan *Health Index* untuk transformator, *circuit breaker*, serta GIS (*Gas Insulated Switchgear*), dan bagaimana hasilnya digunakan untuk perencanaan pemeliharaan, penggantian, maupun penguatan sistem.

8.3.1 Perhitungan Indeks Kesehatan (*Health Index*) Transformator

Health Index (HI) merupakan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi kondisi keseluruhan suatu peralatan berbasis pada parameter-parameter kunci kondisi teknis. HI menyederhanakan berbagai hasil pengujian dan inspeksi menjadi satu nilai tunggal yang dapat digunakan untuk menilai kondisi peralatan dan membantu pengambilan keputusan terkait pemeliharaan, peremajaan, maupun penggantian. Dalam konteks transformator, HI sangat relevan mengingat trafo merupakan peralatan paling bernilai tinggi di gardu induk, mencakup hingga 60% dari total investasi peralatan.

Nilai HI menjadi alat bantu strategis bagi manajer aset untuk menentukan prioritas tindakan, memperkirakan sisa umur peralatan, serta menyusun rencana investasi berbasis kondisi aktual. HI juga dapat memfasilitasi trend analysis dan deteksi dini degradasi performa transformator.

Dalam rangka mendukung strategi manajemen aset berbasis kondisi, studi ini mengimplementasikan metode perhitungan *Health Index* (HI) untuk mengukur tingkat kesehatan operasional peralatan ketenagalistrikan, khususnya transformator (trafo) dan *voltage* regulator (VR). *Health Index* dirancang sebagai indikator kuantitatif dalam bentuk nilai persentase, yang merangkum berbagai parameter teknis kondisi peralatan menjadi satu representasi numerik tunggal. Dengan indikator ini, manajemen aset dapat menilai tingkat degradasi, memprediksi kebutuhan pemeliharaan, serta menetapkan prioritas penggantian atau peremajaan peralatan secara lebih sistematis dan berbasis data.

Tujuan utama dari penghitungan HI adalah menyediakan kerangka evaluasi yang objektif terhadap kondisi aktual peralatan, yang tidak semata-mata bergantung pada usia kronologis. Nilai HI berfungsi sebagai dasar untuk menentukan beberapa aspek penting, antara lain: (1) laju penurunan kondisi peralatan dari waktu ke waktu, (2) penjadwalan ulang pemeliharaan berikutnya secara prediktif, (3) analisis teknis terhadap pola dan potensi kegagalan, serta (4) penyusunan strategi jangka menengah hingga panjang untuk rekrusialisasi aset.

Dalam studi ini, penghitungan HI berhasil diterapkan untuk seluruh populasi data transformator dan VR yang tersedia dari suatu sistem kelistrikan, yakni sebanyak 80 unit trafo dan 41 unit VR. Parameter-parameter yang digunakan dalam perhitungan HI ditentukan melalui kajian literatur internasional dan dikonsultasikan dalam diskusi teknis pekanan bersama para pakar. Tiga parameter utama yang digunakan sebagai dasar perhitungan HI untuk trafo dan VR adalah:

- *Dissolved Gas Analysis* (DGA) – sebagai indikator degradasi termal dan elektrik internal isolasi,
- *Oil Quality Factor* (OQF) – sebagai representasi kualitas media dielektrik cair, dan
- Furan (untuk trafo) – sebagai parameter degradasi selulosa dalam sistem isolasi kertas.

Untuk transformator, dilakukan pula skema alternatif penghitungan HI dengan mengganti parameter furan menggunakan parameter umur, sebagai representasi kondisi penuaan aset. Lebih lanjut, dilakukan penghitungan HI dengan pendekatan enam parameter (HI-6), yakni dengan menambahkan tiga parameter tambahan yaitu:

- Kondisi *bushing*,
- Hasil termografi (*infrared scan*), dan
- Kondisi kebocoran oli.

Analisis hasil menunjukkan bahwa HI-3 memberikan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap degradasi fungsional utama pada peralatan. Dari 80 trafo yang dihitung HI-nya dengan metode tiga parameter, sebanyak 4 unit trafo dikategorikan dalam kondisi *very poor* ($HI < 30\%$), dan 21 unit trafo lainnya menunjukkan kebutuhan pemeliharaan dalam jangka waktu kurang dari 6 tahun ke depan. Untuk kelompok VR, ditemukan 3 unit VR dalam kondisi *very poor* dan 11 unit lainnya berada dalam ambang batas pemeliharaan jangka pendek (<6 tahun).

Sementara itu, hasil penghitungan HI-6 menunjukkan adanya kenaikan nilai HI secara umum. Hal ini disebabkan oleh kontribusi bobot dari parameter-parameter tambahan yang pada sebagian besar peralatan masih berada dalam kondisi baik, seperti *bushing* dan hasil termografi. Akibatnya, HI-6 cenderung memberi kesan kondisi peralatan lebih baik daripada kondisi internal sebenarnya, khususnya pada sistem isolasi.

Untuk mengevaluasi representasi yang paling akurat dari metode perhitungan HI, dilakukan validasi terhadap peralatan-peralatan yang telah mengalami kegagalan sejak tahun 2015. Hasil validasi memperlihatkan bahwa semua peralatan yang mengalami kegagalan tercatat memiliki nilai HI-3 pada kategori *poor* hingga *very poor* sebelum terjadinya kegagalan. Sebaliknya, perhitungan dengan metode HI-6 menunjukkan nilai HI berada pada rentang *fair* (di atas 50%), bahkan untuk peralatan yang mengalami kegagalan besar.

Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan HI-3 lebih mampu menangkap degradasi fungsi kritis dan memberikan sinyal peringatan dini yang lebih representatif. Oleh karena itu, untuk keperluan *early warning system* dan penyusunan skala prioritas pemeliharaan, perhitungan HI berbasis tiga parameter yang fokus pada sistem isolasi (DGA, OQF, dan furan/umur)

direkomendasikan sebagai pendekatan utama dalam praktik manajemen aset transformator dan VR.

Secara keseluruhan, pengalaman ini menunjukkan bahwa penerapan *Health Index* tidak hanya memperkuat sistem pemeliharaan berbasis kondisi, tetapi juga memungkinkan pengelolaan portofolio aset yang lebih proaktif, transparan, dan berbasis risiko. HI menjembatani antara teknis lapangan dan keputusan strategis investasi, yang menjadi semakin penting di tengah tuntutan efisiensi, keandalan, dan transformasi sistem ketenagalistrikan.

8.3.2 Perhitungan Indeks Kesehatan (*Health Index*) GIS

Gas Insulated Switchgear (GIS) merupakan komponen krusial dalam sistem transmisi tenaga listrik, berperan sebagai simpul untuk mendistribusikan dan mengatur aliran daya secara aman, cepat, dan andal. Mengingat pentingnya peran GIS dalam menjaga kontinuitas suplai tenaga listrik, pemeliharaan kondisi operasionalnya menjadi hal yang sangat krusial. Di tengah tantangan sistem tenaga saat ini—baik dari sisi usia infrastruktur, keterbatasan anggaran, maupun peningkatan beban jaringan—pendekatan *Health Index* menjadi salah satu instrumen paling strategis dalam sistem manajemen aset berbasis kondisi dan risiko.

Health Index (HI) pada GIS, atau bisa disebut juga sebagai *Asset Health Indices* (AHI), merupakan representasi kuantitatif terhadap kondisi kesehatan teknis peralatan berdasarkan data inspeksi, pemeliharaan, dan performa aktual. Nilai indeks ini mencerminkan sejauh mana peralatan masih dapat menjalankan fungsinya sesuai kebutuhan sistem, serta sejauh mana peralatan tersebut mendekati ambang kegagalan.

Dalam kajian yang pernah dilakukan penulis, pendekatan yang digunakan untuk penyusunan HI GIS mengacu pada standar internasional CIGRE 858:2021, yang telah diakui luas dalam industri kelistrikan. Standar ini memberikan kerangka kerja 8 langkah sistematis untuk menyusun *Asset Health Indices* pada peralatan tegangan tinggi, termasuk GIS. Langkah-langkah tersebut meliputi:

- Identifikasi aset dan level tinjauan,
- Analisis mode kegagalan (FMEA),
- Penilaian performa individual,
- Penentuan indikator kondisi,

- Pengumpulan data inspeksi,
- Evaluasi kondisi terhadap kegagalan utama,
- Agregasi skor indikator menjadi indeks kesehatan,
- Perencanaan aksi mitigasi.

Salah satu kekuatan dari pendekatan ini adalah kemampuannya untuk memetakan kondisi teknis GIS secara hierarkis—dimulai dari level komponen dan subsistem (seperti pemutus arus, mekanisme penggerak, isolasi, dan struktur pendukung) hingga ke level *bay* atau seluruh instalasi. Penilaian dilakukan berdasarkan kombinasi parameter kuantitatif dan kualitatif, dengan penetapan norm atau batas acuan kondisi berdasarkan data lapangan, literatur teknis, dan penilaian ahli.

Dalam konteks GIS, *Health Index* ditentukan dengan menilai lima subsistem utama:

- *Primary subsystem* (jalur utama arus),
- *Dielectric subsystem* (media isolasi termasuk gas SF₆),
- *Driving mechanism subsystem* (mekanisme penggerak CB dan DS),
- *Secondary subsystem* (sistem kontrol dan proteksi),
- *Construction & support* (struktur fisik dan pendukung mekanik).

Setiap indikator kondisi pada subsistem diberikan bobot dan skor berdasarkan tingkat keparahan kondisi dan relevansinya terhadap mode kegagalan. Misalnya, indikator seperti kebocoran gas SF₆, anomali mekanik penggerak, atau peningkatan resistansi kontak, akan memberikan dampak signifikan terhadap penurunan nilai HI.

Sistem skoring dalam CIGRE 858 didesain logaritmik dengan basis 3 (nilai 1, 3, 10, 30, dan 100), sehingga perbedaan antarkategori kondisi akan meningkat secara eksponensial, memberikan sensitivitas tinggi terhadap penurunan performa. Agregasi skor dilakukan dengan prinsip *worst case propagation*, di mana skor kondisi terburuk dalam satu subsistem menjadi penentu utama HI di level berikutnya, memastikan bahwa risiko kegagalan tidak tereduksi oleh komponen lain yang masih dalam kondisi baik.

Metodologi ini memberikan manfaat yang signifikan dalam manajemen aset, terutama:

- Menjadikan data pemeliharaan lebih bermakna melalui pemodelan indeks,
- Memungkinkan prediksi kebutuhan *overhaul* dan mitigasi, bukan hanya berdasar usia kronologis,
- Meningkatkan efisiensi perencanaan anggaran dengan memprioritaskan peralatan berdasarkan kondisi nyata dan tingkat kekritisannya,
- Mendukung pengambilan keputusan strategis berbasis risiko, terutama saat anggaran terbatas namun jumlah peralatan yang perlu tindakan sangat banyak.

Dengan pendekatan HI berbasis CIGRE 858 ini, tim *maintenance* dapat berpindah dari sistem pemeliharaan reaktif atau berbasis jadwal ke sistem yang prediktif dan prioritatif. Hasil penghitungan HI tidak hanya memberi gambaran status kesehatan teknis peralatan, tetapi juga menjadi dasar dalam penetapan prioritas *overhaul*, desain pekerjaan teknis, hingga skenario pengalihan beban operasional selama pekerjaan dilakukan.

Penerapan *Health Index* pada GIS yang telah berusia lebih dari 25 tahun menjadi refleksi penting dari urgensi transisi pendekatan manajemen aset ke arah yang lebih terukur, objektif, dan efisien. Dalam praktiknya, pengalaman ini membuktikan bahwa keberhasilan manajemen aset tidak hanya ditentukan oleh tindakan pemeliharaan, tetapi juga oleh seberapa cermat dan sistematis kita mengidentifikasi serta memahami kondisi sebenarnya dari aset yang dikelola.

8.3.3 Perhitungan *Health Index* sebagai Landasan Prioritisasi dalam Manajemen Aset

Di tengah meningkatnya kompleksitas sistem tenaga dan keterbatasan sumber daya pemeliharaan, diperlukan suatu pendekatan yang mampu menyederhanakan data teknis menjadi informasi yang bermakna untuk pengambilan keputusan. Dalam konteks ini, perhitungan *Asset Health Index* (AHI) hadir sebagai instrumen strategis yang menjembatani antara kondisi teknis di lapangan dengan kebutuhan manajerial dalam merencanakan pemeliharaan aset secara terukur dan prioritatif. AHI memungkinkan setiap peralatan dinilai secara objektif berdasarkan parameter-parameter kondisi yang relevan terhadap mode kegagalannya, lalu diurutkan berdasarkan tingkat urgensi penanganannya. Melalui pendekatan ini, pemeliharaan tidak

lagi dilakukan secara seragam atau berbasis waktu semata, melainkan diarahkan pada peralatan yang benar-benar membutuhkan intervensi teknis paling awal. Dengan demikian, AHI menjadi alat bantu penting dalam menyusun skala prioritas pemeliharaan, mengoptimalkan alokasi anggaran, serta mengurangi risiko kegagalan mendadak dalam sistem ketenagalistrikan.

8.3.3.1 Prioritisasi *Refurbishment* Trafo

Salah satu implementasi yang pernah dilakukan berkenaan dengan implementasi AHI untuk prioritisasi adalah pada pekerjaan *refurbishment* sejumlah trafo. *Refurbishment* transformator menjadi salah satu strategi kunci dalam manajemen aset ketenagalistrikan untuk menjawab tantangan keterbatasan anggaran, pertumbuhan beban, dan keandalan sistem tenaga listrik. Proyek *refurbishment* juga menawarkan efisiensi investasi dibandingkan pengadaan unit baru, sekaligus memaksimalkan nilai sisa dari peralatan ex-operasi yang masih potensial.

Studi yang dilakukan mengambil fokus pada 45 unit trafo interbus (IBT) 500 kV ex-operasi yang tersebar di wilayah Sumatra, Jawa, Madura, dan Bali. Pendekatan yang dilakukan bersifat holistik dengan memadukan penilaian teknis (*Transformer Assessment Index/Health Index*), analisis finansial (*Life Cycle Cost Analysis*), dan evaluasi risiko (*risk scoring*), untuk menyusun roadmap prioritas tindakan *refurbishment*.

a. Dasar Penyusunan Prioritas

Penyusunan roadmap prioritas *refurbishment* mengacu pada Keputusan Direksi PLN No. 149.K/DIR/2013 yang mengelompokkan prioritas peremajaan berdasarkan tiga aspek utama: kondisi teknis, umur operasi, dan tingkat risiko. Setiap aspek memiliki kriteria masing-masing:

- **Kondisi Teknis:** Berdasarkan parameter degradasi minyak dan isolasi seperti furan content dan tan delta. Trafo dengan nilai furan > 3564 ppb atau tan delta > 1% dikategorikan sebagai sangat buruk.
- **Umur Operasi:** Trafo dengan usia lebih dari 30 tahun diklasifikasikan sebagai sangat tua, dan diprioritaskan lebih tinggi.
- **Risiko:** Semua trafo yang dikaji berada di level risiko sangat tinggi karena merupakan IBT yang krusial dalam sistem transmisi.

Selain ketiga aspek tersebut, dilakukan juga perhitungan *Health Index* yang mengintegrasikan berbagai mode kegagalan (failure modes) seperti degradasi minyak, kelembaban tinggi, ketidaksesuaian tahanan isolasi, dan parameter kelistrikan aktif. Skoring ini diadopsi dari standar CIGRE 761.

$HI < 80\%$ menandakan peralatan dalam kondisi cukup hingga buruk, dan layak dipertimbangkan untuk *refurbishment* atau perbaikan lebih lanjut

b. Perhitungan Finansial dan Kelayakan Ekonomi

Untuk aspek finansial, dilakukan perbandingan antara biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost/LCC*) dari dua opsi: *refurbishment* dan *replacement*. *Refurbishment* menunjukkan efisiensi biaya yang signifikan, meskipun dengan penurunan umur sisa (*residual life*) dibanding trafo baru. Perhitungan LCC mempertimbangkan komponen biaya seperti:

- Biaya engineering & production
- Biaya pengangkutan (dua arah untuk *refurbishment*)
- Biaya dismantling dan erection

Secara umum, nilai LCC *refurbishment* lebih rendah dibanding *replacement*, sehingga secara ekonomi layak dilakukan.

c. Roadmap dan Hasil Prioritasi

Hasil perhitungan menyajikan urutan prioritas *refurbishment* untuk 20 unit trafo ex-operasi berdasarkan skor gabungan (usia, HI, dan finansial). Enam belas dari dua puluh trafo tersebut dinyatakan masih bisa dimanfaatkan kembali. Urutan prioritas ditentukan berdasarkan skor kumulatif terkecil—semakin kecil skor, semakin tinggi prioritasnya

Adapun sebagian trafo yang sebelumnya dikategorikan “tidak dapat dimanfaatkan kembali” tetap direkomendasikan untuk *reassessment* teknis karena hasil HI menunjukkan nilai yang cukup baik, mengindikasikan potensi kesalahan klasifikasi awal.

d. Catatan Implementasi

Pekerjaan ini sebagian besar dilakukan berbasis data sekunder (*desk study*) dan disertai verifikasi lapangan terbatas pada dua lokasi. Dalam proses tersebut ditemukan ketidaksesuaian data, seperti trafo yang sudah menjadi *spare* atau tidak lagi berada di lokasi. Namun, hal ini tidak mempengaruhi

roadmap secara keseluruhan, karena prioritas akan bergeser ke unit berikutnya apabila ada perubahan status aset.

Kajian prioritas *refurbishment* ini menunjukkan bahwa implementasi strategi condition-based *maintenance* dengan penggunaan *Health Index* yang terintegrasi dengan analisis umur, risiko, dan nilai ekonomi mampu menghasilkan rekomendasi investasi yang lebih terarah dan efisien. Pendekatan ini mendemonstrasikan bagaimana manajemen aset berbasis data dapat mendukung pengambilan keputusan teknis dan finansial yang berkelanjutan, sekaligus menjawab kebutuhan sistem tenaga di era transisi energi.

8.3.3.2 Prioritisasi Overhaul GIS

Implementasi lain prioritisasi yang pernah dilakukan adalah pada pelaksanaan *overhaul* GIS. Seiring bertambahnya usia peralatan dan terbatasnya sumber daya untuk pemeliharaan skala besar, kebutuhan untuk melakukan prioritisasi tindakan *overhaul* terhadap *Gas Insulated Switchgear* (GIS) menjadi semakin mendesak. *Overhaul* merupakan langkah penting dalam memperpanjang usia operasional GIS, namun tidak semua unit dapat ditangani secara bersamaan. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan sistematis untuk menyusun urutan pelaksanaan *overhaul* secara objektif, mempertimbangkan berbagai aspek mulai dari kondisi teknis, tingkat risiko operasional, hingga kemudahan pelaksanaan di lapangan (*workability*).

Dalam studi ini, prioritisasi dilakukan terhadap enam unit GIS yang telah beroperasi lebih dari 25 tahun. Masing-masing GIS telah dinilai sebelumnya menggunakan pendekatan *Asset Health Index* untuk memperoleh gambaran kondisi teknisnya. Hasil penilaian menunjukkan bahwa seluruh unit GIS berada dalam kategori “sangat buruk” dari sisi kesehatan teknis, mengindikasikan kebutuhan *overhaul* yang mendesak.

Namun, dalam menentukan urutan prioritas pelaksanaan, tidak hanya kondisi teknis yang dipertimbangkan. Dua aspek tambahan turut diperhitungkan, yaitu:

- Risiko operasional (*criticality*): mencerminkan seberapa besar dampak yang ditimbulkan terhadap sistem tenaga jika GIS mengalami gangguan. Evaluasi ini melibatkan analisis data historis gangguan serta klasifikasi beban dan pelanggan yang dilayani.

- **Workability:** meliputi sejauh mana pelaksanaan overhaul dapat dilakukan secara efisien dan minim risiko terhadap kontinuitas pasokan, termasuk kesiapan teknis, pengadaan suku cadang, dan strategi pengalihan beban selama pekerjaan.

Dari hasil evaluasi gabungan, diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 19 Hasil prioritisasi overhaul GIS

GIS	Rata-rata AHI per Bay	Jumlah Bay Sangat Buruk	Tingkat Risiko Operasional	Skor Total	Urutan Prioritas
GIS A	192	8 dari 8 bay	Tinggi	Tertinggi	1
GIS B	124,2	6 dari 9 bay	Tinggi	Tinggi	2
GIS C	141,9	5 dari 7 bay	Moderat	Sedang	3
GIS D	123,6	4 dari 7 bay	Moderat	Sedang	4
GIS E	116,2	6 dari 9 bay	Rendah	Lebih Rendah	5
GIS F	78,4	4 dari 7 bay	Rendah	Terendah	6

Dari tabel di atas, terlihat bahwa GIS A berada pada peringkat pertama dalam prioritas *overhaul* karena memiliki kombinasi kondisi teknis terburuk dan tingkat risiko sistemik yang paling tinggi. Sementara GIS F menempati posisi terbawah karena kondisi teknis dan risiko operasionalnya relatif lebih rendah dibanding yang lain.

Namun demikian, hasil peringkat tersebut tidak bersifat mutlak dalam pelaksanaannya. Faktor implementasi di lapangan (*workability*) memainkan peran penting dalam menentukan waktu dan urutan aktual overhaul. Misalnya, GIS dengan risiko tinggi namun memiliki waktu pengadaan material lebih dari 12 bulan dapat tertunda pelaksanaannya, sementara unit dengan kesiapan teknis dan logistik lebih baik dapat didahulukan.

Kajian ini juga menunjukkan bahwa untuk GIS yang memiliki banyak bay dalam kondisi buruk, *overhaul* perlu dirancang secara bertahap, dilakukan per-bay dengan mempertimbangkan skenario manuver beban, sehingga sistem tetap dapat beroperasi selama pekerjaan berlangsung.

Penyusunan prioritas *overhaul* berdasarkan kombinasi kondisi teknis, risiko sistem, dan *workability* menghasilkan skenario intervensi yang lebih realistis dan dapat diimplementasikan secara bertahap. Pendekatan ini juga memungkinkan alokasi sumber daya—baik teknis maupun finansial—dilakukan secara lebih efisien dan berbasis risiko.

Lebih dari itu, prioritas ini menjadi wujud nyata dari prinsip manajemen aset modern: tidak hanya memastikan peralatan berfungsi, tetapi juga menjamin bahwa upaya pemeliharaan dilakukan di tempat dan waktu yang paling berdampak. Dalam konteks sistem tenaga listrik yang semakin kompleks dan dinamis, kemampuan untuk menentukan *what to fix first* menjadi kunci utama dalam menjaga keandalan layanan tanpa mengorbankan efisiensi.

8.4 *Remaining Life Assessment* (Studi Kasus : Kabel Bawah Laut)

Peralatan ketenagalistrikan adalah aset berharga dengan siklus hidup panjang, namun tidak abadi. Dalam banyak kasus, kegagalan peralatan bukan disebabkan oleh usia kronologis semata, melainkan oleh kondisi operasional dan faktor lingkungan yang mempercepat degradasi. Oleh karena itu, penilaian umur sisa operasional (*Remaining Life Assessment*/RLA) menjadi langkah esensial dalam menentukan strategi keberlanjutan aset. RLA bukan sekadar proyeksi teknis, tetapi alat bantu strategis untuk pengambilan keputusan: apakah suatu peralatan perlu diganti, diperbaiki, atau dapat terus dioperasikan dengan mitigasi risiko. Proses ini mengintegrasikan inspeksi, pengujian non-destruktif, analisis material, dan simulasi beban. Melalui studi kasus yang pernah dilakukan penulis terhadap kabel bawah laut, akan dibahas bagaimana metode RLA yang tepat dapat mencegah investasi prematur dan menghindari kegagalan katastropik.

Kabel laut merupakan aset kelistrikan strategis yang memiliki tingkat kritikalitas tinggi, terutama dalam sistem distribusi daya yang menghubungkan instalasi lepas pantai dan daratan atau antarpulau. Salah satu tantangan terbesar dalam pengelolaan kabel laut adalah keterbatasan akses fisik untuk inspeksi rutin, sehingga potensi kegagalan sering kali baru teridentifikasi saat terjadi gangguan total. Oleh karena itu, pendekatan diagnostik berbasis kondisi dan proyeksi umur sisa menjadi sangat penting untuk mendukung pengambilan keputusan yang tepat dalam konteks perencanaan pemeliharaan, penggantian, maupun mitigasi risiko.

Kajian yang pernah dilakukan penulis terhadap kabel laut ini bertujuan untuk menilai kondisi aktual dan memperkirakan masa pakai sisa dari suatu sistem kabel bawah laut tegangan menengah (34,5 kV) yang telah beroperasi

lebih dari 30 tahun. Sistem kabel ini menghubungkan instalasi darat dan platform laut (*offshore*), dan telah mengalami beberapa insiden gangguan. Dengan menggunakan pendekatan gabungan antara pengujian laboratorium terhadap sampel kabel dan *monitoring* (PD) secara langsung (*online monitoring*), kajian ini menghasilkan kesimpulan kuantitatif mengenai degradasi isolasi dan tingkat keandalan kabel.

Pendekatan *assessment* dilakukan melalui dua jalur utama: pengujian sampel kabel (*offline*) dan *monitoring* kabel terpasang (*online*). Pada jalur pengujian *offline*, potongan kabel dengan panjang sekitar 2–3 meter diuji di laboratorium untuk memperoleh parameter kelistrikan yang berkaitan dengan kondisi isolasi, meliputi Tahanan isolasi, Arus bocor, Indeks polarisasi, Tegangan awal pelepasan muatan (*Inception Voltage*), Muatan PD maksimum dan rata-rata, serta Pola fasa PD.

Pengujian dilakukan pada beberapa level tegangan (10 kV, 15 kV, dan 20 kV) dan dilengkapi dengan kalibrasi sensor HFCT serta pembacaan pada osiloskop dan 1 alat pembanding lain. Sementara itu, pada jalur pengujian online, dilakukan *monitoring* langsung di dua titik terminasi sistem kabel (darat dan laut) untuk mendeteksi sinyal PD yang aktif saat kabel berada dalam kondisi operasi aktual. Sensor HFCT dan TEV dipasang untuk mengidentifikasi keberadaan lokal PD dan *noise*.

Sebagai dasar perhitungan umur sisa (*Remaining Life Assessment*), digunakan dua pendekatan:

- Metode Analisis Muatan PD: membandingkan nilai muatan aktual dengan ambang batas berdasarkan referensi teknis.
- Metode *Failure Rate*: memanfaatkan data historis gangguan untuk memperkirakan probabilitas kegagalan kabel dalam kurun waktu tertentu.

Ambang batas muatan PD yang digunakan tampak seperti pada tabel berikut.

Tabel 20 Ambang batas muatan PD

Charge (pC)	Criteria
0 – 500	<i>Acceptable level</i>
500 – 1000	<i>Recommended to monitor discharges level</i>
1000 - 2500	<i>Potential risk, periodic monitoring</i>
>2500	<i>Major concern, repair or replace</i>

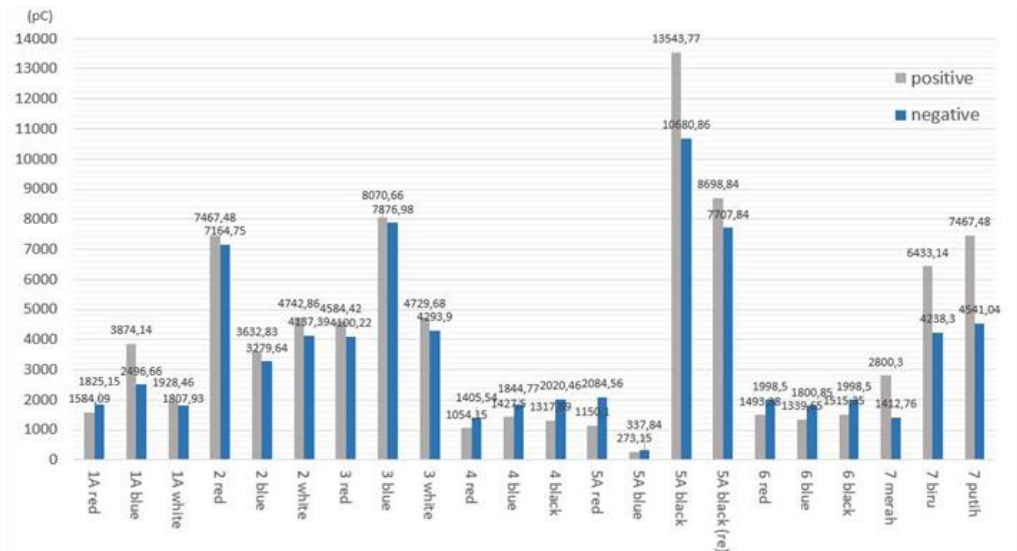
8.4.1 Perbandingan Muatan (PD) antara Kabel Lama dan Kabel Baru

Salah satu indikator utama dari degradasi isolasi kabel adalah nilai muatan (PD) yang muncul saat kabel dikenai tegangan pengujian. Dalam studi ini, pengujian dilakukan terhadap sejumlah potongan kabel lama dan kabel baru, masing-masing diuji pada beberapa level tegangan. Kabel baru ditandai dengan sampel nomor 4, 5A (*red* dan *blue*), serta 6 sedangkan sisanya adalah kabel lama. Hasil pengukuran PD menunjukkan perbedaan yang mencolok antara kedua kategori kabel tersebut.

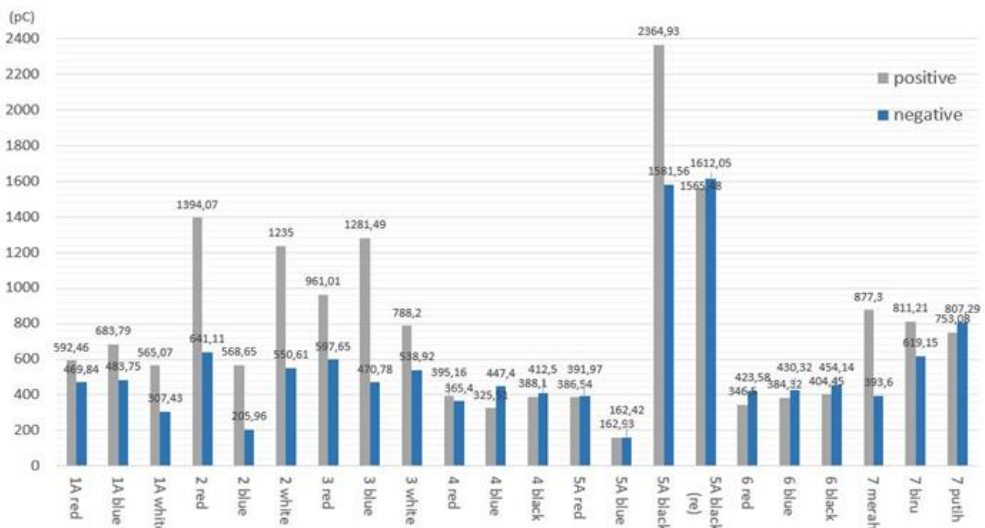
Pada kabel lama, nilai maksimum PD mencapai lebih dari 10.000 picoCoulomb (pC) pada beberapa sampel, dengan rata-rata nilai maksimum di atas 7000 pC. Bahkan, pada salah satu fase kabel, ditemukan nilai muatan PD sebesar 13.543 pC. Nilai ini masuk dalam kategori "*major concern*" sesuai dengan tabel acuan yang digunakan dalam literatur internasional, yang menyatakan bahwa nilai PD di atas 2500 pC menunjukkan kebutuhan mendesak untuk perbaikan atau penggantian kabel.

Sebaliknya, kabel baru menunjukkan performa yang lebih baik secara signifikan. Meskipun terdapat satu outlier pada kabel baru dengan nilai PD tinggi (kemungkinan akibat cacat produksi atau pengujian), sebagian besar sampel kabel baru menunjukkan nilai PD rata-rata di bawah 500 pC. Nilai ini masuk dalam kategori "*acceptable level*", menunjukkan bahwa kabel baru memiliki integritas isolasi yang sangat baik dan tidak mengalami degradasi berarti.

Grafik perbandingan antara kabel lama dan kabel baru secara jelas menunjukkan bahwa tingkat degradasi pada kabel lama telah melampaui batas aman. Kesenjangan ini memperkuat urgensi untuk mempertimbangkan strategi mitigasi atau penggantian.



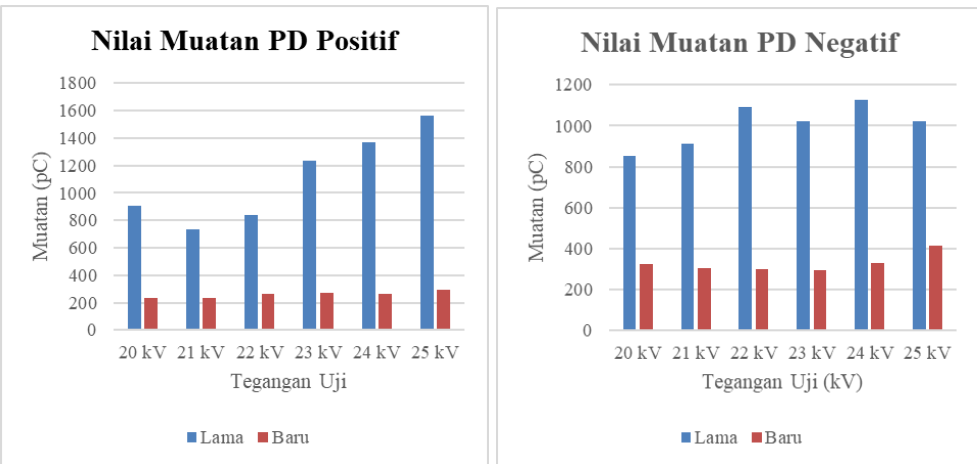
Gambar 75 Grafik perbandingan nilai muatan maksimum



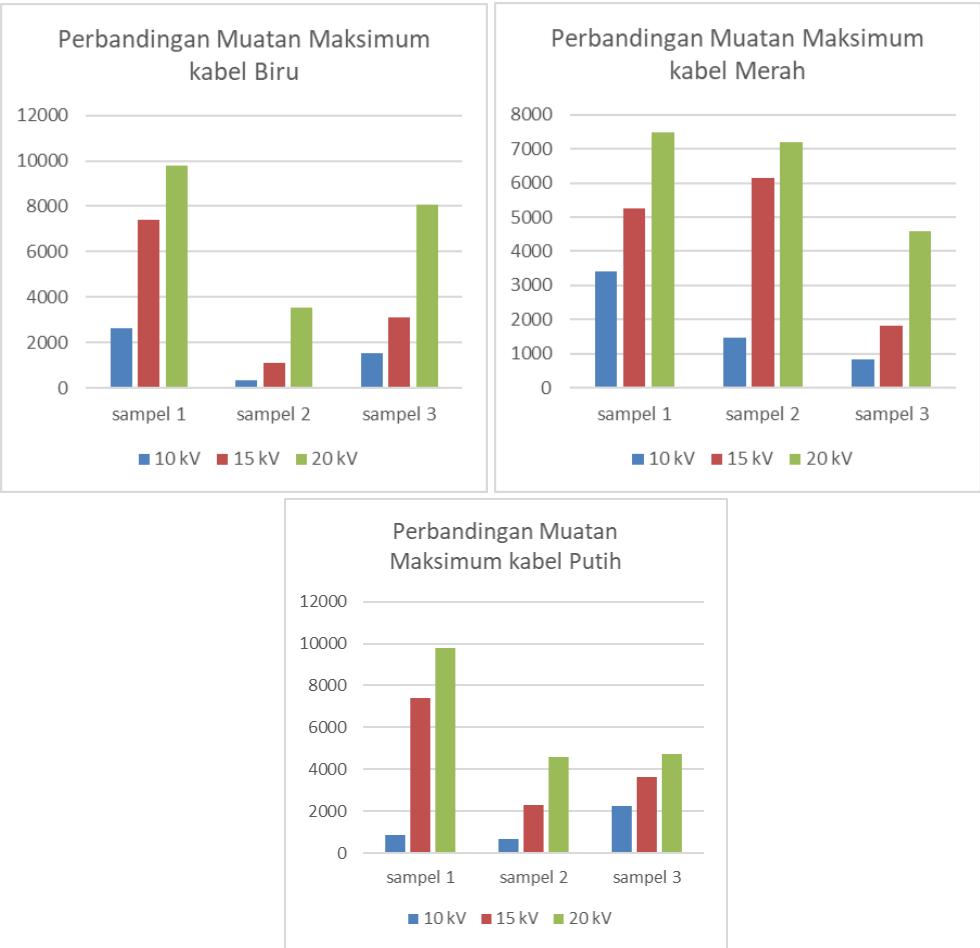
Gambar 76 Grafik perbandingan nilai muatan rata - rata

8.4.2 Respons Nilai PD terhadap Tegangan Uji

Uji PD dilakukan pada tiga level tegangan: 10 kV, 15 kV, dan 20 kV. Gambar berikut menunjukkan hasil pengujian yang dilakukan



Gambar 77 Grafik Perbandingan nilai muatan rata - rata di level tegangan 20 - 25 kV



Gambar 78 Perbandingan muatan maksimum sampel pada tegangan 10 kV, 15 kV, dan 20 kV

Hasil menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya tegangan pengujian, terjadi peningkatan eksponensial pada nilai muatan PD. Peningkatan ini lebih drastis terjadi pada kabel lama dibandingkan kabel baru. Sebagai contoh, pada kabel lama fase merah, nilai PD meningkat dari 3422 pC (10 kV) menjadi 7489 pC (20 kV). Pada fase lainnya, peningkatan bahkan lebih tajam.

Pola ini menunjukkan bahwa struktur isolasi kabel lama mengalami degradasi yang bersifat progresif terhadap medan listrik. Hal ini mengindikasikan bahwa jika kabel terus digunakan dalam sistem dengan tegangan nominal 34,5 kV, besar kemungkinan akan terjadi akumulasi PD yang menyebabkan *electrical treeing*, yang pada akhirnya dapat memicu *breakdown* total.

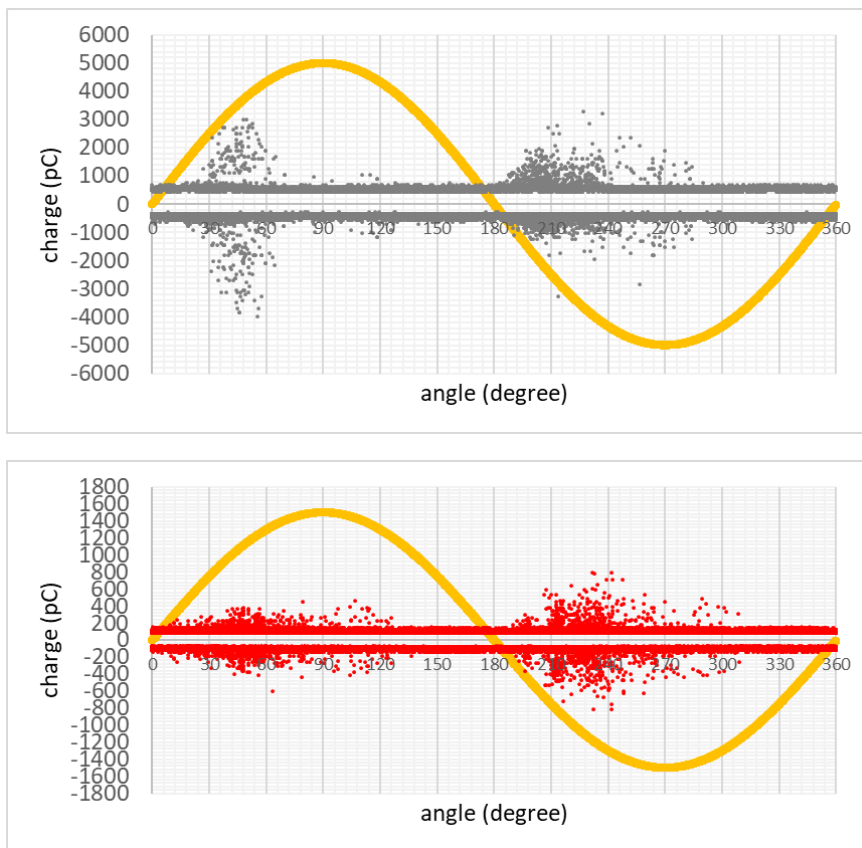
Pada kabel baru, peningkatan nilai PD terhadap tegangan uji lebih stabil dan landai. Hal ini mencerminkan bahwa struktur isolasi masih homogen dan belum menunjukkan tanda-tanda degradasi internal seperti *void* atau retakan mikro. Dengan demikian, kabel baru memiliki margin keselamatan yang lebih besar terhadap lonjakan tegangan dalam kondisi operasi normal maupun transien.

8.4.3 Analisis Pola Fasa

Selain dari besar muatan, karakteristik pola fasa PD juga menjadi indikator penting dalam analisis degradasi isolasi. Pola fasa menunjukkan pada sudut fasa mana dalam siklus AC 50 Hz terjadi pelepasan muatan. Setiap jenis PD memiliki pola khas:

- *Void discharge*: muncul simetris di sekitar 90° dan 270°.
- *Surface discharge*: muncul tidak simetris dan cenderung di satu sisi.
- *Corona discharge*: muncul sporadis di puncak tegangan.

Pada kabel lama, mayoritas sinyal PD muncul di kedua setengah siklus (positif dan negatif) dengan pola yang khas untuk *void discharge*. Ini menunjukkan adanya rongga kecil atau degradasi internal di dalam material XLPE kabel akibat tekanan termal dan elektrik selama bertahun-tahun. Sebaliknya, pada kabel baru, pola fasa cenderung terpusat dan lemah, dengan amplitudo rendah dan sebaran sudut sempit, menandakan tidak adanya degradasi signifikan.



Gambar 79 Sampel PD pattern kabel lama & kabel baru

Analisis pola fasa ini sangat penting untuk membedakan jenis kerusakan dan menentukan strategi tindak lanjut. Misalnya, *void discharge* pada inti isolasi lebih berbahaya daripada *surface discharge* di dekat konduktor, karena lebih sulit dideteksi dan dapat berkembang menjadi kegagalan mendadak.

8.4.4 Estimasi *Remaining Life* Kabel

Estimasi *Remaining Life Assessment* (RLA) merupakan langkah krusial dalam strategi manajemen aset berbasis risiko dan kondisi (*condition-based and risk-informed asset management*). Tujuannya adalah untuk mengetahui berapa lama lagi suatu aset—dalam hal ini kabel laut—dapat beroperasi secara andal sebelum mengalami kegagalan fungsi yang signifikan. Estimasi ini penting untuk menentukan langkah pemeliharaan lanjut, perencanaan investasi penggantian, maupun justifikasi teknis dalam laporan ke regulator dan manajemen.

Dalam studi kabel laut 34,5 kV yang telah beroperasi lebih dari 30 tahun ini, pendekatan RLA dilakukan dengan menggabungkan dua pendekatan utama:

8.4.4.1 Estimasi RLA Berdasarkan Degradasi (PD)

a. Prinsip Umum

Degradasi isolasi pada kabel dapat dipantau melalui aktivitas (PD), yaitu pelepasan muatan listrik mikro akibat cacat internal dalam material isolasi seperti *void*, retak mikro, atau *water treeing*. Aktivitas PD ini cenderung meningkat seiring waktu, dan menjadi indikator utama terhadap penurunan fungsi dielektrik kabel. Oleh karena itu, besaran muatan PD yang terdeteksi dalam satuan picoCoulomb (pC) dapat digunakan untuk memproyeksikan umur sisa kabel.

b. Metodologi Estimasi

RLA dihitung berdasarkan model degradasi linier, menggunakan persamaan berikut:

$$RLA = \left(\frac{D_{\max} - D_{\text{now}}}{D_{\max}} \right) \times (T_{\text{design}} - T_{\text{used}}) \quad (2)$$

Dengan keterangan:

- D_{now} : nilai muatan PD saat ini (pC)
- $D_{\max}$: nilai ambang batas muatan PD kritis (pC)
- T_{design} : usia desai kabel (misalnya 40 tahun)
- T_{use} : usia kabel saat ini (misalnya 36 tahun)

Nilai $D_{\max}$ ditentukan berdasarkan referensi yaitu 2500 pC sebagai ambang "major concern", sesuai tabel awal yang disampaikan. Nilai D_{now} diambil dari rata-rata muatan maksimum yang diperoleh dari hasil uji laboratorium, yaitu 1394,07 pC.

c. Hasil Simulasi Estimasi RLA

Faktor lain yang diperhitungkan saat melakukan analisis RLA dari kabel adalah kondisi pembebanan. Pada saat kabel beroperasi, kenaikan arus pada kabel akan mengakibatkan adanya kenaikan suhu pada kabel yang dapat mempengaruhi percepatan degradasi pada isolasi kabel yang pada akhirnya

berpengaruh pada nilai RLA>. Tabel berikut menunjukkan estimasi masa sisa pakai kabel dalam kondisi suhu dan pembebanan berbeda.

Tabel 21 Estimasi masa sisa pakai kabel dalam kondisi suhu dan pembebanan berbeda

Pembebanan (%)	Suhu (°C)	Muatan PD (pC)	RLA (tahun)	Keterangan
0%	25	1394,07	28,6	Masih dalam rentang aman
40%	42,6	1781,62	14,5	Perlu monitoring berkala
50%	52,5	2195,66	4,9	Sangat mendekati batas kritikal
60%	64,6	2701,71	-2,7	Melebihi ambang → risiko kegagalan

Simulasi ini menunjukkan bahwa pembebanan dan suhu berpengaruh besar terhadap laju degradasi kabel. Dalam kondisi termal tinggi akibat pembebanan berat, umur sisa kabel dapat habis bahkan sebelum tahun berikutnya.

d. Implikasi Teknis

Hasil analisis RLA yang dilakukan menghasilkan implikasi teknis sebagai berikut.

- RLA <5 tahun: kabel perlu masuk daftar prioritas penggantian atau penguatan sistem.
- RLA negatif: kabel secara teknis sudah melewati ambang keandalan dan dapat mengalami kegagalan mendadak.
- Jika pembebanan bisa dikendalikan (misalnya dengan redistribusi beban), maka umur sisa kabel bisa diperpanjang secara signifikan.

8.4.4.2 Estimasi RLA Berdasarkan Analisis *Failure Rate* Historis

a. Pendekatan Statistik

Selain dari analisis PD, umur sisa kabel juga dapat dihitung berdasarkan riwayat kegagalan sistem dan analisis statistik *failure rate*. Ini dilakukan dengan prinsip *Mean Time To Failure* (MTTF) atau Weibull Analysis berdasarkan data gangguan aktual yang pernah terjadi selama masa pakai kabel.

Data dasar yang digunakan:

- Usia kabel : ±36 tahun
- Panjang kabel : ±29 km

- Jumlah gangguan signifikan : 17 gangguan tercatat

Dengan data tersebut, diperoleh *failure rate* per tahun per km sebagai berikut:

$$\text{Failure Rate} = \frac{17}{36 \times 29} = 0,0163 \text{ gangguan/km/tahun} \quad (3)$$

Persamaan dasar yang digunakan untuk mencari nilai RLA adalah persamaan *reliability* umum sebagai berikut.

$$R(t) = e^{-(\lambda \cdot t)} \quad (4)$$

Dengan mengasumsikan bahwa peralatan akan mengalami kerusakan / harus diganti untuk memenuhi nilai reliabilitas tertentu, maka persamaan yang bisa kita gunakan adalah sebagai berikut.

$$t = -\frac{\ln R}{\lambda} \quad (5)$$

Dengan menggunakan kurva reliability function dan asumsi reliabilitas yang diinginkan sebesar 90%, diperoleh hasil:

Remaining Life kabel = ±6,5 tahun pada tingkat reliabilitas 90%

b. Kekuatan dan Kelemahan Pendekatan Ini

Kelebihan:

- Mewakili performa aktual sistem dalam konteks operasional dan lingkungan riil.
- Dapat digunakan sebagai pembandingan untuk validasi pendekatan berbasis PD.

Kelemahan:

- Bergantung pada kualitas pencatatan histori gangguan.
- Tidak bisa menangkap degradasi laten yang belum menimbulkan gangguan.

8.4.4.3 Korelasi dan Validasi Antar-metode

Menariknya, estimasi umur sisa kabel berdasarkan kedua pendekatan—baik PD maupun *failure rate*—menunjukkan konsistensi arah dan nilai, yaitu bahwa kabel telah berada dalam fase akhir siklus pakainya dan perlu tindakan strategis dalam waktu dekat.

- RLA dari PD (dengan beban 50%): $\pm 4,9$ tahun
- RLA dari *failure rate*: $\pm 6,5$ tahun

Konsistensi ini meningkatkan tingkat kepercayaan teknis terhadap hasil estimasi dan memperkuat dasar justifikasi kepada pemangku kepentingan, baik secara teknis, manajerial, maupun finansial.

8.4.4.4 Rekomendasi Strategis Berdasarkan Hasil RLA

- Penggantian atau *re-routing* kabel perlu dimasukkan dalam rencana investasi lima tahun ke depan.
- Pemasangan sistem *monitoring* PD permanen akan membantu pemantauan berkelanjutan dan mendeteksi anomali sejak dini.
- Manajemen beban operasional menjadi salah satu strategi pengendalian agar laju degradasi dapat ditekan.
- Penyusunan risk map untuk seluruh jalur kabel berdasarkan hasil RLA ini akan membantu menentukan titik-titik prioritas.

8.5 Strategi *Maintenance* Berbasis Risiko dan Keandalan (RCM)

Pemeliharaan peralatan kelistrikan tidak lagi dapat dilakukan dengan prinsip "satu ukuran untuk semua". Di tengah tekanan efisiensi dan keterbatasan anggaran, pendekatan *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) menjadi pilihan strategis untuk memastikan bahwa setiap aktivitas pemeliharaan benar-benar diperlukan dan berdampak signifikan terhadap keandalan sistem. RCM menekankan pentingnya memahami fungsi peralatan, mode kegagalan, serta konsekuensi gangguan dalam menentukan kebutuhan pemeliharaan. Dengan pendekatan ini, perusahaan dapat menghindari *over-maintenance* maupun *under-maintenance* yang sama-sama merugikan. Melalui pengalaman dalam menyusun strategi RCM untuk peralatan utama, bagian ini akan menjelaskan bagaimana pendekatan berbasis keandalan tidak hanya meningkatkan

performa sistem tetapi juga memperkuat justifikasi teknis di hadapan auditor dan regulator.

Seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem tenaga listrik yang andal, efisien, dan berkelanjutan, pendekatan pemeliharaan berbasis keandalan atau *Reliability Centered Maintenance* (RCM) menjadi sangat relevan untuk diterapkan secara menyeluruh. Namun, keberhasilan penerapan RCM tidak hanya ditentukan oleh desain awalnya, melainkan juga oleh kemampuannya untuk terus dievaluasi dan disempurnakan berdasarkan dinamika kondisi aktual, data kegagalan, serta praktik di lapangan.

Dalam kajian ini, dilakukan peninjauan menyeluruh terhadap strategi pemeliharaan yang telah diterapkan oleh suatu instansi yang memiliki utilitas kelistrikan yang cukup besar untuk peralatan tegangan tinggi, dengan fokus pada transformator, *voltage regulator* (VR), *circuit breaker* (CB), sistem proteksi dan kontrol, serta sistem pendukung lainnya. Tujuan utama dari kajian ini adalah untuk mengevaluasi sejauh mana strategi RCM eksisting telah mencakup potensi kegagalan kritis (*failure modes*), serta untuk mengidentifikasi area yang memerlukan penyempurnaan melalui pendekatan berbasis FMEA/FMECA.

8.5.1 Transformator dan *Voltage Regulator*

Untuk peralatan transformator dan VR, telah dilakukan pemetaan terhadap komponen utama seperti *winding*, isolasi cair dan padat, sistem pendingin, bushing, serta *load tap changer* (LTC). Mode kegagalan utama yang diidentifikasi meliputi:

- Degradasi termal dan kimia pada isolasi,
- Gangguan mekanik pada *winding* dan LTC, dan
- Kontaminasi atau penurunan kualitas minyak.

Hasil revidu menunjukkan bahwa sebagian besar strategi pemeliharaan yang telah diterapkan sudah selaras dengan referensi standar, namun terdapat peluang untuk ditingkatkan, khususnya pada area pemantauan kondisi secara online. Rekomendasi penyempurnaan antara lain mencakup:

- Penambahan pengujian SFRA (*Sweep Frequency Response Analysis*) untuk deteksi gangguan mekanis *winding*,
- Pemasangan sistem monitoring DGA *online*, dan

- Pengujian *flash point* minyak untuk keselamatan sistem pendingin.

8.5.2 **Circuit Breaker (CB)**

Reviu terhadap strategi pemeliharaan CB mengidentifikasi beberapa *failure mode* penting seperti kegagalan membuka/menutup, peningkatan tahanan kontak, serta gangguan mekanisme penggerak. Secara umum, pemeliharaan yang telah dilakukan mencakup pengujian-pengujian dasar, namun belum seluruh potensi kegagalan ditangani secara spesifik. Rekomendasi tambahan untuk penyempurnaan RCM CB meliputi:

- Pemeriksaan keserempakan kontak saat operasi buka/tutup,
- Pengujian minimum *coil voltage*,
- Pengukuran tahanan kontak dinamis.

Langkah-langkah ini penting untuk menjamin keandalan fungsi pemutusan arus gangguan secara cepat dan selektif.

8.5.3 **Sistem Proteksi dan Kontrol**

Untuk sistem proteksi dan kontrol—yang mencakup CT, VT, *arrester*, pemisah, dan *relay*—strategi RCM telah menasar sebagian besar *failure mode* umum, seperti keterlambatan operasi atau kesalahan area kerja. Namun, ditemukan ketidaksesuaian minor dalam terminologi dokumentasi pemeliharaan dengan standar FMEA, seperti istilah “isolasi” atau “kontaminasi”, meskipun secara substansi tindakan pengujiannya sudah dilaksanakan (misalnya pengukuran tahanan isolasi). Oleh karena itu, penyempurnaan format dan kesesuaian terminologi RCM menjadi salah satu rekomendasi untuk harmonisasi dokumentasi dan praktik lapangan.

Kajian ini menegaskan pentingnya melakukan evaluasi berkala terhadap strategi RCM yang sudah berjalan, untuk memastikan bahwa pendekatan berbasis keandalan tetap relevan terhadap kondisi terkini peralatan dan sistem. Meskipun secara umum strategi pemeliharaan eksisting telah berjalan dengan baik dan mencakup sebagian besar risiko kegagalan, kajian ini berhasil mengidentifikasi beberapa titik kritis yang dapat ditingkatkan guna memperkuat efektivitas dan ketepatan program pemeliharaan.

Rekomendasi hasil kajian bukan hanya bersifat korektif, tetapi juga preventif, dengan mendorong adopsi teknologi *monitoring* berbasis kondisi

(seperti *online* DGA dan SFRA) dan metode pengujian yang lebih akurat. Dengan demikian, penyempurnaan strategi RCM ini menjadi bagian dari komitmen jangka panjang dalam mewujudkan sistem ketenagalistrikan yang andal, efisien, dan adaptif terhadap perkembangan teknologi serta tantangan sistemik ke depan.

9 PENUTUP

Buku ini merupakan refleksi akademik sekaligus rekaman pengalaman praktis penulis dalam pengujian tegangan tinggi, pengembangan sensor untuk pengujian tegangan tinggi dan deteksi fenomena prakegagalan peralatan ketenagalistrikan, dan implementasi pengujian tegangan tinggi dalam manajemen aset ketenagalistrikan.

Pembahasan dalam buku ini diawali dengan landasan filosofis dan teknis mengenai pentingnya manajemen aset dalam konteks perubahan global, lalu dilanjutkan dengan uraian tentang siklus hidup peralatan tegangan tinggi—mulai dari desain, manufaktur, pengujian, instalasi, operasi, hingga pemeliharaan dan penggantian. Setiap tahapan menuntut pendekatan sistematis untuk memastikan bahwa aset tidak hanya berfungsi optimal, tetapi juga memberikan nilai maksimal sepanjang umur pakainya.

Bab-bab berikutnya menjelaskan bagaimana pengujian tegangan tinggi menjadi instrumen krusial dalam menjaga integritas peralatan, khususnya dalam mendeteksi fenomena prakegagalan seperti *partial discharge* (PD) yang menjadi fondasi bagi strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*). Buku ini juga mendokumentasikan proses pengembangan sensor PD berbasis antena UHF, sebagai bentuk inovasi teknologi *monitoring* yang lebih fleksibel dan ekonomis untuk mendukung sistem deteksi dini yang andal.

Bagian implementasi menyajikan sejumlah studi kasus nyata, termasuk penerapan sensor yang telah dirancang untuk pengujian *partial discharge* di Gardu Induk, *monitoring* kondisi peralatan ketenagalistrikan, asesmen *health index* transformator dan GIS, perhitungan umur sisa kabel bawah laut, serta strategi pemeliharaan berbasis keandalan (*reliability-centered maintenance*). Pada bagian ini juga dibahas penerapan hasil perhitungan indeks kesehatan peralatan ketenagalistrikan untuk menentukan prioritas *refurbish* dan *overhaul* aset-aset penting, sebagai dasar pengambilan keputusan yang berdampak langsung terhadap kontinuitas dan kualitas layanan energi.

Pada akhirnya, buku ini menegaskan bahwa manajemen aset bukan sekadar pengelolaan peralatan fisik, melainkan merupakan bagian integral dari strategi ketahanan energi nasional. Dalam konteks transisi energi yang menuntut sistem tenaga lebih fleksibel, tangguh, dan hemat biaya,

kemampuan untuk memantau, menganalisis, dan menindaklanjuti kondisi aset secara tepat waktu menjadi keunggulan kompetitif yang menentukan. Lebih dari itu, inilah bentuk kontribusi ilmu teknik ketenagalistrikan yang tidak hanya berorientasi pada teknologi, tetapi juga pada keberlanjutan peradaban dan peningkatan kualitas hidup manusia.

Semoga buku ini dapat menjadi rujukan, inspirasi, dan bahan diskusi yang memperkuat kolaborasi antara akademisi, praktisi, dan pengambil kebijakan dalam membangun sistem tenaga yang lebih cerdas, tangguh, dan berkelanjutan.

10 UCAPAN TERIMA KASIH

Bismillah. Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang saya mengucapkan Alhamdulillah. Segala puji bagi Allah, yang dengan ilmu dan kekuasaan-Nya Yang Maha Luas, telah membuat dunia berikut isinya ini tercipta. Dialah Allah yang tidak pernah jauh dari siapapun yang Dia ciptakan dan Dia urus. Dialah Allah Yang Hidup dan terus-menerus mengurus makhluk-makhluk-Nya, tidak pernah mengantuk dan tidak pernah tidur. Shalawat dan salam bagi Rasulullah Muhammad Saw..

Segala puji bagi Allah yang memberikan kekuatan dan pertolongan dan menyampaikan saya sebagai Guru Besar di Institut Teknologi Bandung.

Saya menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang membantu saya sampai dengan pencapaian Guru Besar dan juga pada masa-masa yang akan datang.

Saya mengucapkan terima kasih kepada Ketua Majelis Wali Amanat, Ketua dan anggota Forum Guru Besar, Ketua dan Anggota Senat Akademik, Rektor, para Wakil Rektor beserta jajarannya, Para Direktur, Para Ketua UPT, Para Dekanat dan Kaprodi Fakultas/Sekolah, Panitia Orasi Ilmiah, dosen dan tenaga kependidikan di Sekolah Teknik Elektro dan Informatika (STEI) dan Sekolah Pascasarjana Ilmu dan Teknologi Multidisiplin (SPITM), dosen dan tenaga kependidikan di KK Teknik Ketenagalistrikan, dosen dan tenaga kependidikan di Laboratorium Teknik Tegangan dan Arus Tinggi, dosen dan tenaga kependidikan di Gedung Kerjasama PLN ITB, dosen dan tenaga kependidikan di Laboratorium Konversi Energi Elektrik, dan seluruh civitas akademika ITB yang masih aktif maupun purnabakti.

Saya menyampaikan ucapan terima kasih dan bakti kepada kedua orang tua saya, Ibu Siti Ruhani dan Bapak Soekardjo, yang dengan penuh cinta, kasih, dan sayang, mengasuh, mendidik, memberikan teladan dan nasihat dan mendoakan saya sepanjang hidup beliau.

Saya menyampaikan terima kasih kepada mertua saya: Bapak Endang Warsa dan Ibu Yeti Supriati atas dukungan dan doa-doa beliau.

Saya menyampaikan terima kasih kepada istri saya tercinta, drg. Ira Artilia, Ph.D., yang terus-menerus mendukung saya dan mewujudkan cintanya.

Saya menyampaikan terima kasih kepada lima anak saya: Muhammad Ibrahim Rasyid, Salma Hanim Rafifa, Syarifa Rania Maryam, Muhammad Mishbah Raihan, dan Muhammad Rais Hanif Umar.

Saya menyampaikan terima kasih kepada saudara-saudara kandung saya: Ir. Arif Sambodo, Imam Sarjono, Evi Sri Restuwati, S.Psi., M.Psi., beserta keluarganya.

Saya menyampaikan terima kasih kepada saudara-saudara saya: Azwar Apriyadi, S.H., M.Kn, Yanuar Akmal, S.T., dan Asri Halida Hajar, S.S., M.Ph., beserta keluarganya.

Saya menyampaikan terima kasih kepada seluruh guru, pengajar, pendidik, dan dosen saya pada masa pra-sekolah, TK, SD, SMP, SMA, sarjana, magister, doktor, profesi insinyur, dan sepanjang hidup saya.

Saya menyampaikan terima kasih kepada para pemberi rekomendasi guru besar saya: Prof. Suwarno (KK Teknik Ketenagalistrikan ITB), Prof. Masayuki Hikita (Kyushu Institute of Technology, Jepang), Prof. Georges Zissis (Toulouse University, Perancis), Prof. Masahiro Kozako (Kyushu Institute of Technology, Jepang), Prof. Yasunori Mitani (Kyushu Institute of Technology, Jepang), Prof. Bambang Anggoro (KK Teknik Ketenagalistrikan ITB), Prof. Suhono Harso Supangkat (STEI, ITB), Prof. Andriyan Bayu Suksmono (STEI, ITB), Prof. Umar Fauzi (FMIPA ITB), dan Prof. Ikhwana Elfritri (Universitas Andalas).

Saya menyampaikan terima kasih kepada pembimbing tugas akhir saya, Dr. Muhammad Tasrif, M.Eng.; pembimbing tesis saya, Prof. Dr. Ir. Ngapuli Irmea Sinisuka; dan pembimbing disertasi saya, Prof. Dr. Masayuki Hikita.

Saya mengucapkan terima kasih kepada seluruh tim peneliti penulis, khususnya kepada Dr. Rachmawati, Arpan Zaeni, S.T., M.T., Tina Wahyuningsih, S.T., Bp. Sumedi, dan seluruh mitra peneliti di ITB, universitas, pemerintah, dan badan usaha, di Indonesia maupun di luar negeri.

Saya menyampaikan terima kasih kepada seluruh keluarga besar saya dan keluarga besar istri saya atas kasih sayang, dukungan, dan doanya.

Saya mengucapkan terima kasih kepada seluruh pembina, pengurus, tim manajemen, aktivis, kader, dan jamaah di Masjid Salman ITB dan Asosiasi Masjid Kampus Indonesia (AMKI) atas kerja sama, dukungan, doa-doanya.

Saya mengucapkan terima kasih kepada seluruh mitra kerja di Tim Ahli Bangunan Gedung DKI Jakarta dan Tim Profesi Ahli DKI Jakarta.

Saya mengucapkan terima kasih kepada seluruh mitra di PT PLN (Persero), PT PLN Engineering, BUMN, BRIN, pemerintah, swasta, dan lainnya.

Saya mengucapkan terima kasih kepada seluruh teman alumni: SD Muhammadiyah 14 Surakarta, SMP Negeri 6 Surakarta, SMA Negeri 3 Surakarta, ITB, Solidaritas Dekade 9X ITB, Kyushu Institute of Technology, Jepang, PPI Fukuoka, dan Keluarga Alumni Salman ITB (Kalam Salman).

Saya mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang berkontribusi, berjasa, membantu, dan mendoakan dengan tulus ikhlas di mana pun berada.

Saya mengucapkan terima kasih kepada Anda, yang membaca buku orasi ilmiah ini.

Semoga Allah memberi ampunan, bimbingan, petunjuk, rahmat, dan ridanya kepada kita semua.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. M. d. Silva, *Power and Gas Asset Management: Regulation, Planning and Operation of Digital Energy Systems*, Switzerland: Springer, 2020.
- [2] D. Siswanto (2024). Transisi energi berkeadilan di indonesia : “meningkatkan peran pemerintah daerah”. https://smeru.or.id/sites/default/files/events/djoko_siswanto_dewan_energi_nasionall_tata_kelola_energi_untuk_mencapai_transisi_energi_berkeadilan.pdf
- [3] Y. Saefulhak (2024). Pembaruan Kebijakan Energi Nasional. https://caseforsea.org/wp-content/uploads/2024/10/Pembaruan-Kebijakan-Energi-Nasional_Setjen-DEN.pdf
- [4] R. Ross, *Reliability Analysis for Asset Management of Electric Power Grid*, Netherland: Wiley, 2019.
- [5] B. L. Tobing, dalam *Dasar-Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi Edisi Kedua*, Erlangga, 2012.
- [6] M. D. Judd, O. Farish, J. S. Pearson, and B. F. Hampton, “Dielectric windows for UHF detection,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 8, no. 6, pp. 953–958, Dec. 2001.
- [7] M. Hikita, S. Ohtsuka, and S. Matsumoto, “Recent trend of the measurement technique using the UHF electromagnetic wave detection method,” *IEEE Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 2, no. 5, pp. 504–509, Sep. 2007.
- [8] W. A. Putro, Sriyono, K. Nishigouchi, U. Khayam, Suwarno, M. Kozako, M. Hikita, K. Urano, and C. Min, “PD pattern of various defects measured by UHF external sensor on 66 kV GIS model,” in *Proc. CMD*, Bali, Indonesia, 2012, pp. 954–957.
- [9] W. A. Putro, K. Nishigouchi, U. Khayam, M. Kozako, M. Hikita, K. Urano, and C. Min, “Influence of spacer aperture size on PD-induced electromagnetic wave measured with UHF external sensor in 66 kV GIS model,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Condition Monitor. Diagnosis*, Sep. 2012, pp. 387–391.
- [10] S. H. Maruyama, T. Hoshino, T. Sakakibara, T. Mizojiri, and H. Murase, “Sensitivity characteristics of various UHF sensors attached outside a GIS tank,” in *Proc. CMD*, Tokyo, Japan, 2010, pp. 489–492.

- [11] J. S. Pearson, B. F. Hampton, and A. G. Sellars, "A continuous UHF monitoring for gas insulated substations," *IEEE Trans. Elect. Insul.*, vol. 26, no. 3, pp. 169–478, Jun. 1991.
- [12] R. Kurrer and K. Feser, "The application of ultra-high-frequency measurements to gas-insulated substations," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 13, no. 3, pp. 777–782, Jul. 1998.
- [13] S. M. K. Azam, M. Othman, H. A. Illias, T. A. Latef, M. T. Islam, and M. F. Ain, "Ultra-high frequency printable antennas for diagnostics in high voltage equipment," *Alexandria Eng. J.*, vol. 64, pp. 709–729, Feb. 2023.
- [14] H. Andre, P. Emeraldi, A. Hazmi, E. P. Waldi, and U. Khayam, "Long bowtie antenna for sensor in gas-insulated substation," in *Proc. Int. Conf. High Voltage Eng. Power Syst. (ICHVEPS)*, Oct. 2017, pp. 175–178.
- [15] F. Vauzia and U. K. Suwarno, "Design and implementation of double layer printed bowtie antenna as UHF sensor for measurement," in *Proc. ICSSA*, Bandung, Indonesia, 2014, pp. 1–4.
- [16] J. Muslim, A. Susilo, K. Nishigouchi, Y. Z. Arief, U. Khayam, M. Kozako, and M. Hikita, "Improvement of bowtie UHF antenna model for detecting PD in GIS," *Proc. Technol.*, vol. 11, pp. 227–234, Jan. 2013.
- [17] H. Andre and U. Khayam, "Design of new shape printed bowtie antenna for ultra high frequency sensor in gas-insulated substations," in *Proc. Int. Conf. Inf. Technol. Electr. Eng. (ICITEE)*, Oct. 2013, pp. 355–359.
- [18] J. Muslim, A. Susilo, K. Nishigouchi, M. Kozako, M. Hikita, Y. Z. Arief, U. Khayam, and Suwarno, "Enhanced bowtie UHF antenna for detecting in gas insulated substation," in *Proc. 48th Int. Universities' Power Eng. Conf. (UPEC)*, Sep. 2013, pp. 1–5.
- [19] U. Khayam, A. A. Suryandi, Rachmawati, "Design of Bowtie Antenna With Rounded Edge and Middle-Sliced Modifications for UHF Partial Discharge Sensor", *IEEE Access*, 2023.
- [20] H. Andre, "Perancangan dan Implementasi Antena PCB Sebagai Sensor UHF Untuk Pengukuran Partial Discharge (PD) pada Sistem Berisolasi Gas," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2013.
- [21] J. Muslim dkk., "Enhanced bowtie UHF antenna for detecting partial discharge in gas insulated substation," dalam 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), 2013, hlm. 1–5. doi: 10.1109/UPEC.2013.6714890.
- [22] F. Vauzia, "Perancangan Dan Implementasi Antena Bow-Tie Cetak Double Layer Sebagai Sensor UHF Untuk Mengukur Partial Discharge Pada GIS," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2014.

- [23] U. Khayam, F. Vauzia, dan Suwarno, "Design, fabrication, and testing of double layer printed bow-tie antenna as partial discharge sensor in *gas insulated switchgear*," dalam The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE) 2014, 2014, hlm. 158–162. doi: 10.1109/ICPERE.2014.7067199.
- [24] F. Rozi dan U. Khayam, "Design, implementation and testing of triangle, circle, and square shaped loop antennas as partial discharge sensor," dalam The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE) 2014, 2014, hlm. 273–276. doi: 10.1109/ICPERE.2014.7067219.
- [25] F. Rozi dan U. Khayam, "Design of circle shaped loop antenna as partial discharge sensor," dalam 2014 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS), 2014, hlm. 349–352. doi: 10.1109/ICEECS.2014.7045276.
- [26] I. Suprianto dkk., "UHF sensor optimization used for detecting partial discharge emitted electromagnetic wave in *gas insulated switchgear*," dalam Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2014, hlm. 229–232. doi: 10.1109/ISEIM.2014.6870760.
- [27] K. Khotimah, "Dipole Antenna As UHF partial discharge (PD) SENSOR For Gas Insulated Swicthgear (GIS)," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2015.
- [28] K. Khotimah, U. Khayam, Suwarno, Y. Tai, M. Kozako, dan M. Hikita, "Design of dipole antenna model for partial discharge detection in GIS," Proceedings - 5th International Conference on Electrical Engineering and Informatics: Bridging the Knowledge between Academic, Industry, and Community, ICEEI 2015, hlm. 186–191, 2015, doi: 10.1109/ICEEI.2015.7352493.
- [29] A. A. Suryandi, "Perancangan Dan Pembuatan Antena Bow-Tie Dengan Modifikasi Ujung Dan Irisan Tengah Sebagai Sensor PD UHF," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2015.
- [30] A. A. Suryandi dan U. Khayam, "Design of modified bow-tie antennas for partial discharge measurement," dalam 2014 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS), 2014, hlm. 91–96. doi: 10.1109/ICEECS.2014.7045226.
- [31] F. Ashari dan U. Khayam, "Design and fabrication of log periodic antenna as partial discharge sensor," dalam 2017 4th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT), 2017, hlm. 79–81. doi: 10.1109/ICEVT.2017.8323538.

- [32] F. Ashari dan U. Khayam, "Design and fabrication of vivaldi antenna as partial discharge sensor," dalam 2017 4th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT), 2017, hlm. 76–78. doi: 10.1109/ICEVT.2017.8323537.
- [33] A. Hakim dan U. Khayam, "Simulation and testing of Goubau PCB antenna as partial discharge detector," dalam 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), 2017, hlm. 170–174. doi: 10.1109/ICHVEPS.2017.8225936.
- [34] A. Hakim dan U. Khayam, "Design of planar Goubau line antenna for partial discharge measurement," dalam 2016 3rd Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), 2016, hlm. 141–146. doi: 10.1109/ICPERE.2016.7904855.
- [35] M. Husna, "Perancangan, Simulasi, Pembuatan dan Pengujian Antena Log Periodic Sebagai Sensor Partial Discharge ," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2015.
- [36] U. Khayam, M. Husna, dan R. Rachmawati, "Design and Analysis of Toothed Log Periodic Antenna as Partial Discharge Sensor in Power Apparatus," dalam 2019 International Conference on Technologies and Policies in Electric Power & Energy, 2019, hlm. 1–6. doi: 10.1109/IEEECONF48524.2019.9102592.
- [37] D. Trilaksono, "Desain Dan Penerapan Antena Spiral Untuk Pengukuran Partial Discharge Pada Peralatan Tegangan Tinggi Yang Terselubung Logam," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2018.
- [38] A. Fauzan, "Design And Fabrication Of 3-D Cube UHF Antenna For Partial Discharge Detection And Simulation Of Electromagnetic Wave And Surface Current Caused By Partial Discharge ," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2018.
- [39] A. Fauzan, U. Khayam, Suwarno, M. Kozako, dan M. Hikita, "Design and Fabrication of 3-D Cube UHF Antenna for Partial Discharge Detection," dalam 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2018, hlm. 1–6. doi: 10.1109/CMD.2018.8535817.
- [40] M. S. H. Daulay, "Perancangan Dan Implementasi Antena Bowtie Double Layer Dengan Modifikasi Ujung Antena Dan Irisan Tengah Sebagai Sensor UHF Untuk Pengukuran Partial Discharge ," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2019.

- [41] M. S. H. Daulay dan U. Khayam, "Design of Single and Double Layer Bowtie Antenna as Partial Discharge Sensors on Power Apparatus," dalam 2019 6th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA), 2019, hlm. 216–221. doi: 10.1109/ICA.2019.8916704.
- [42] M. S. H. Daulay dan U. Khayam, "New Design of Double Layer Bow-tie Antenna with Edge and Middle Sliced Modification for Partial Discharge Measurement," dalam 2018 Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), 2018, hlm. 1–5. doi: 10.1109/ICPERE.2018.8739723.
- [43] Y. M. Hamdani, "Penerapan Dan Peningkatan Performansi Microstrip Antena PCB Lapisan Ganda UWB Sebagai Detector Partial Discharge," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2019.
- [44] Y. M. Hamdani dan U. Khayam, "Application of Circular Patch Microstrip Antenna (CPMA) for Partial Discharge Detector in oil insulation," dalam 2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), 2019, hlm. 1–6. doi: 10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011052.
- [45] Y. M. Hamdani dan U. Khayam, "Application of Ultra-Wideband Double Layer Printed Antenna for Partial Discharge Detection," dalam 2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI), 2018, hlm. 373–378. doi: 10.1109/EECSI.2018.8752749.
- [46] J. P. Uwiringiyimana, "Design And Implementation Of Double Layer Bowtie Antenna With Wing Edges Modification As UHF Sensor For Partial Discharge Detection ," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2019.
- [47] F. Nugraha, "Perbandingan Karakteristik Antena Bowtie Dan Antena Dipole Dalam Mendeteksi Partial Discharge ," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2022.
- [48] U. Khayam dan F. Nugraha, "Study of Antenna Development for Partial Discharge Measurement," dalam 2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), 2021, hlm. 541–546. doi: 10.1109/ICHVEPS53178.2021.9601072.
- [49] A. W. Shopiyudin, "Perancangan Dan Implementasi Antena Bowtie Dengan Modifikasi Lumped Element Sebagai Sensor UHF Untuk Pengukuran Partial Discharge ," Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2021.

- [50] Y. Mustopa, “Perancangan Antena Dipol Dengan Penambahan Matching Impedance Sebagai Sensor UHF Untuk Pengukuran Partial Discharge ,” Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2021.
- [51] T. Rhamdhani, “Perancangan Dan Implementasi Tie-Square Dipole Antena Cetak Sebagai Sensor Untuk Pengukuran Partial Discharge (PD) Pada Sistem Berisolasi Gas,” Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2022.
- [52] T. Rhamdhani, U. Khayam, dan A. Zaeni, “Improving Antenna Performance by Combining Dipole and Bowtie Antenna for Partial Discharge Measurement in *Gas Insulated Switchgear*,” dalam 2022 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA), 2022, hlm. 1–4. doi: 10.1109/ICPEA53519.2022.9744679.
- [53] J. P. Uwiringiyimana, Suwarno, dan U. Khayam, “New Design of UHF Microstrip Patch Antenna for Partial Discharge Detection on Power Transformer,” dalam 2021 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2021, hlm. 1–6. doi: 10.1109/UPEC50034.2021.9548236.
- [54] J. P. Uwiringiyimana, Suwarno, dan U. Khayam, “Design of an Ultra-Wide Band Microstrip Patch Antenna for Partial Discharge Detection on Power Transformer,” dalam 2021 IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 2021, hlm. 242–245. doi: 10.1109/ICPADM49635.2021.9493945.
- [55] J. P. Uwiringiyimana, Suwarno, dan U. Khayam, “Design of a Rectangular Microstrip Patch Antenna as UHF Sensor for Partial Discharge Detection on Power Transformer,” dalam 2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), 2021, hlm. 563–568. doi: 10.1109/ICHVEPS53178.2021.9601064.
- [56] J. P. Uwiringiyimana, U. Khayam, dan Suwarno, “Application of a Novel Type of UHF Antenna for Partial Discharge Detection in Power Transformers Oil Insulation,” dalam 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2022, hlm. 442–447. doi: 10.23919/CMD54214.2022.9991524.
- [57] J. P. Uwiringiyimana, U. Khayam, Suwarno, dan G. C. Montanari, “Design and Implementation of Ultra-Wide Band Antenna for Partial Discharge Detection in High Voltage Power Equipment,” IEEE Access, vol. 10, hlm. 10983–10994, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3144416.
- [58] A. M. Wibowo, “Perancangan Antena Kombinasi Bow-Tie Dan Long Bow-Tie Antena PCB Untuk Pengukuran Partial Discharge Pada Sistem Berisolasi Gas ,” Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2023.

- [59] A. M. Wibowo dan U. Khayam, “Performance Improvement of Partial Discharge Sensor by Combination of Bowtie and Long Bowtie Antenna,” dalam 2022 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), 2022, hlm. 1–5. doi: 10.1109/ICPERE56870.2022.10037271.
- [60] M. Hadi, U. Khayam, Rachmawati, “Performance Improvement of Circular Patch Microstrip Antenna (CPMA) for Detecting Partial Discharge on High Voltage Equipment”, 2023 4rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), 2023.
- [61] W. A. Ramadhan, U. Khayam, M. Hadi, B. Y. Sadewo, “Modification and Optimization of Circular Patch Microstrip Antenna (CPMA) for Partial Discharge Detection against High Voltage”, 2025 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), 2024.
- [62] M. Kodrat, U. Khayam, “Frequency Spectrum Analysis of Partial Discharge Measurement in 150-kV Outdoor Cable Sealing End—A Case Study”, IEEE Access, 2025.
- [63] J. P. Uwiringiyimana, U. Khayam, Suwarno, and G. C. Montanari, “Comparative analysis of partial discharge detection features using a UHF antenna and conventional HFCT sensor,” IEEE Access, vol. 10, pp. 107214–107226, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3212746.
- [64] D. Götz and H. T. Putter, “UHF pd-diagnosis at high voltage cable terminations—International case studies,” in Proc. 13th Int. Electr. Insul. Conf. (INSUCON), May 2017, pp. 1–5, doi: 10.23919/INSUCON.2017.8097194.

CURRICULUM VITAE



Nama	: Umar Khayam
Tempat/tgl lahir	: Surakarta, 8 September 1975
Kel. Keahlian	: Teknik Ketenagalistrikan
Alamat Kantor	: Jl. Ganesha 10 Bandung, 40132
Nama Istri	: Ira Artilia
Nama Anak	: Muhammad Ibrahim Rasyid Salma Hanim Rafifa Syarifa Rania Maryam Muhammad Mishbah Raihan Muhammad Rais Hanif Umar

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

2020:	Program Profesi Insinyur, ITB
2005-2008:	Doktor, Kyushu Institute of Technology, Jepang
1998-2000:	Magister, Teknik Elektro, ITB
1993-1998:	Sarjana, Teknik Elektro, ITB
1990-1993:	SMA Negeri 3 Surakarta
1987-1990:	SMP Negeri 6 Surakarta
1981-1987:	SD Muhammadiyah 14 Surakarta
1980-1981:	TK Bustanul Athfal Aisyiyah Grogol Sukoharjo

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

2025 – sekarang:	Wakil Dekan Bidang Akademik Sekolah Pascasarjana Ilmu dan Teknologi Multidisiplin
2021 – 2025:	Ketua Program Studi Doktor Teknik Elektro dan Informatika
2018 – 2021:	Ketua Program Studi Sarjana Teknik Tenaga Listrik
2015 – 2018:	Sekretaris Lembaga Kemahasiswaan
2012 – sekarang:	Kepala Laboratorium Teknik Tegangan dan Arus Tinggi
2008 – sekarang:	Dosen, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika ITB

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

2024 Pembina Utama Muda (IV/c)
2022 Pembina Tingkat I (IV/b)

2020 Pembina (IV/a)
2018 Penata Tingkat I (III/d)
2014 Penata (III/c)
2008 Penata Muda Tingkat I (III/b)

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

2024 Guru Besar
2017 Lektor Kepala
2013 Lektor
2009 PNS
2008 CPNS

V. KEGIATAN PENELITIAN

- (1) Team Leader, Pengujian Respons Sensor Partial Discharge Desain Baru pada Pengukuran Partial Discharge Positif dan Negatif, Riset P2MI ITB, 2025
- (2) Team Leader, Indeks Kesehatan Peralatan Listrik Tegangan Tinggi, Riset P2MI GB ITB, 2025
- (3) Project Director, Kajian Assesment dan Prioritas *Gas Insulated Switchgear* di Wilayah Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Timur dan Bali, ITB, 2025
- (4) Project Director, Assesmen Teknologi Metallic Screen, ITB, 2025.
- (5) Team Leader, Penelitian Kerja Sama Luar Negeri - Nusantara - MELInda: Mastering Efficient Lighting for Indonesia Area, LPDP, 2024
- (6) Team Leader, Pengujian Performansi Sensor PD Desain Baru dan Perbandingannya dengan Sensor PD Lainnya dalam Pengukuran PD pada Peralatan Listrik Tegangan Tinggi, Riset P2MI ITB, 2024.
- (7) Project Director, Pekerjaan Jasa Konsultansi Rekondisi GIS Labuan, GIS Grogol, dan GIS Abadi Guna Papan, ITB 2024
- (8) Project Director, Pekerjaan Jasa Kajian Penentuan Healthy Index & Prioritisasi Overhaul GIS di Unit Induk Transmis Jawa Bagian Tengah, ITB, 2024
- (9) Project Director, Pekerjaan Jasa Konsultansi Pekerjaan Kajian Kelayakan Aset MTU Sealing End, ITB, 2024.
- (10) Engineer, Jasa Konsultansi Perencanaan Pekerjaan Pengadaan dan Penggantian Fasilitas ATM (ATC System) Wilayah Ruang Udara Timur RI (FIR Ujung Pandang) di Denpasar, Surabaya, Yogyakarta, dan MATSC, ITB, 2024
- (11) Team Leader, Mastering Efficient Lighting for Indonesia Area, Penelitian Dasar Kompetitif Nasional, Kemenristekdikti, 2023.

- (12) Team Leader, Perancangan Sensor Partial Discharge pada Peralatan Listrik Tegangan Tinggi Berisolasi Gas, Riset P2MI ITB, 2023.
- (13) Project Director, Kajian Kelayakan Proyek dan Kajian Prioritasi Refurbishment Transformator / Interbus Transformator, ITB, 2023
- (14) Project Director, Kajian Prioritisasi Potensi dan Mitigasi Gangguan Penghantar di Sistem Timor dan Sistem Flores, ITB, 2023.
- (15) Team Leader, Mastering Efficient Lighting for Indonesia Area, Riset Kemitraan Dasar, Kemenristekdikti, 2022.
- (16) Team Leader, Perancangan Sensor Partial Discharge pada Peralatan Listrik Tegangan Tinggi Berisolasi Gas, Riset P2MI ITB, 2022.
- (17) Team Leader, Karakteristik Antena sebagai Sensor Partial Discharge untuk Diagnosis dan Monitoring Kondisi Peralatan Listrik Tegangan Tinggi, World Class Research, Kemenristekdikti, 2022.
- (18) Expert Engineer, Studi Kelistrikan pada Pertamina Hulu Rokan, ITB, 2022
- (19) Engineer, Studi Peralatan Pemutus Daya di Pelabuhan Indonesia, ITB, 2022
- (20) Team Leader, Mastering Efficient Lighting for Indonesia Area, Riset Kemitraan Dasar, Kemenristekdikti, 2021.
- (21) Team Leader, Mastering Efficient Lighting for Indonesia Area (MELIndA), SAME BOPTN, Kemenristekdikti, 2021.
- (22) Team Leader, Perancangan Sensor Partial Discharge pada Peralatan Listrik Tegangan Tinggi Berisolasi Gas, Riset P2MI ITB, 2021.
- (23) Team Leader, Karakteristik Antena sebagai Sensor Partial Discharge untuk Diagnosis dan Monitoring Kondisi Peralatan Listrik Tegangan Tinggi, World Class Research, Kemenristekdikti, 2021.
- (24) Project Member, MESFIA, Mastering Energy Supply for Insulated Area, Erasmus, 2021.
- (25) Project Director, Pekerjaan Jasa Konsultansi Penataan Sistem Proteksi Tegangan Lebih (Surge Voltage) di Area Operasional Pelabuhan, PT Pelabuhan Indonesia I, ITB, 2020.
- (26) Project Director, Konsultansi Pengawasan Pembangunan Interkoneksi Kabel Laut 20 kV Pulau Sumatera Utara – Pulau Sembilan di Daerah Kerja PT PLN (Persero) UP3 Binjai, PT PLN (Persero) UP3 Binjai, ITB, 2020.
- (27) Team Leader, Karakteristik Antena sebagai Sensor Partial Discharge untuk Diagnosis dan Monitoring Kondisi Peralatan Listrik Tegangan Tinggi, World Class Research, Kemenristekdikti, 2020.
- (28) Team Leader, Perancangan Sensor Partial Discharge pada Peralatan Listrik Tegangan Tinggi Berisolasi Gas, Riset P3MI ITB, 2020.
- (29) Engineer, Pra-Investigasi Kegagalan Generator Transformer (GT) Unit 3 PT PLN Tanjung Jati B, ITB, 2020

- (30) Project Member, MESFIA, Mastering Energy Supply for Insulated Area, Erasmus, 2020.
- (31) Engineer, Studi Desain Enjiniring Sistem 500kV Sulawesi, ITB, 2020.
- (32) Team Leader, Peningkatan Performansi Antena sebagai Detektor Partial Discharge pada Peralatan Listrik Tegangan Tinggi, 2019.
- (33) Team Leader, Pengujian Fungsi dan Operasional Unit Mobil Deteksi Saluran Kabel Tegangan Menengah 20 kV Sistem Tiga Fasa, 2019.
- (34) Team Leader, Pengujian Unit Kabel Bergerak TM Merk PYUNGIL, 2019.
- (35) Team Leader, Uji Fungsi dan Uji Operasional Alat Asesmen Kabel SKTM, 2019.
- (36) Team Leader, Pengujian dan Justifikasi Teknis Kabel untuk Penerangan Jalan Bertenaga Surya, 2019.
- (37) Team Leader, Pemeriksaan dan Pengujian (Jimatek) terhadap Mobile UPS 200 kVA PT Schneider Indonesia, 2019.
- (38) Project Member. MESFIA, Mastering Energy Supply for Insulated Area, 2019.
- (39) Engineer, Study of Pabelokan Zelda 34.5 kV Subsea Cable Replacement and Remaining Life Assesment, 2019
- (40) Engineer, Jasa Enjiniring dan Studi Sistem di Wilayah Jawa Bagian Tengah - Penelitian Tingkat Keberhasilan Auto Reclose Akibat Resonansi SUTET 500 kV Ungaran-Batang 2 dan Breakdown Trafo Tenaga, 2019.
- (41) Engineer, Kajian Teknis Pengaruh Gelombang Eletromagnetik SUTT 150 KV Terhadap Perangkat Lunak TVRI Bandung Jawa Barat, 2019
- (42) Team Leader, Perancangan dan Pembuatan Antena sebagai Detektor Partial Discharge dalam Rentang Ultrawide Band pada Peralatan Listrik Tegangan Tinggi, 2018
- (43) Team Leader, Pemeriksaan dan Pengujian Alat Deteksi Gangguan SKTM 20 kV Portable, 2018
- (44) Team Leader, Pengujian Coil Generator 8,5 MW, 2018
- (45) Penyusunan Soal Seleksi Kompetensi Bidang Kementrian ESDM, 2018.
- (46) Studi Kajian Desain Enjiniring Sistem 500 kV Sumatera, 2018
- (47) Analisis dan Investigasi Unwanted Trips PT. PLN (Persero) Area Jakarta, 2018
- (48) Desain dan Implementasi Switchgear Berisolasi Gas (GIS) Kompak III, 2016-2018.
- (49) Team Leader, Pengukuran Partial Discharge pada Peralatan yang Terselubung Metal Menggunakan Sensor Internal dan Sensor Eksternal, 2017.
- (50) Team Leader, Pengujian Resistansi Konduktor Pembumian Tiang Listrik di PT Waskita Beton Precast Plant Sadang, 2017.
- (51) Team Leader, Pengujian Kabel Fleksibel 20 kV, 2017

- (52) Kajian Tentang *Gas Insulated Switchgear* (GIS) Merk Ganz dan Insulator, Pole Tower di Wilayah Bali, 2017
- (53) Assesmen Sistem Kelistrikan di Bandara I Gusti Ngurah Rai Bali, Bandara Juanda Surabaya, Bandara Sultan Hasanuddin Makassar dan Bandara Sultan Aji Muhammad Sulaiman Sepinggian Balikpapan, 2017.
- (54) Desain dan Implementasi Switchgear Berisolasi Gas (GIS) Kompak II, 2016-2017-2018.
- (55) Team Leader, Desain Baru dan Pembuatan Rangkaian Pendeteksi Partial Discharge Ultrawide Band, 2016.
- (56) Team Leader, Pengukuran dan Analisis Medan Listrik di Sekitar Instalasi Tegangan Tinggi, 2016.
- (57) Pengaruh Penuaan Termal terhadap Karakteristik Dielektrik Isolasi Komposit Kertas pada Minyak Mineral, 2016.
- (58) Desain dan Implementasi Switchgear Berisolasi Gas (GIS) Kompak I, 2016-2018.
- (59) Sistem Instrumentasi dan Rele Modern pada Sistem Tenaga Tegangan Tinggi, 2016.
- (60) Team Leader, Perancangan dan Implementasi Rangkaian Pendeteksi dan Pengukuran Partial Discharge dalam Jangkauan Frekuensi sampai Satu Giga Hertz, 2015.
- (61) Team Leader, Development of Estimation Method of Reliability of Electrical Insulation in High Voltage Apparatus and Power Electronics Equipment, 2015.
- (62) Team Leader, Development of Diagnostics Technology of Insulation of Electric Power Apparatus, 2015.
- (63) Sistem Instrumentasi dan Rele Modern pada Sistem Tenaga Tegangan Tinggi, 2015
- (64) Static VAR Compensator and Static Synchronous Compensator in Java Bali System to Supress Disturbance III, 2013-2015.
- (65) Pengembangan Purwarupa Sistem Penggerak dan Motor Listrik untuk Mobil Listrik Nasional IV, 2012-2015.
- (66) Penelitian Proteksi tower kembar & SUTET penyeberangan selat bali setinggi 376 meter terhadap sambaran petir, 2014.
- (67) Electrical Safety and Operability of Substation and Transmission Line of North Coridor Project, PT Chevron Pacific Indonesia, 2014.
- (68) Desain of Electrical System of 80 Passanger Commercial Aeroplane, 2014.
- (69) Static VAR Compensator and Static Synchronous Compensator in Java Bali System to Supress Disturbance II, 2013-2015.
- (70) Pengembangan Purwarupa Sistem Penggerak dan Motor Listrik untuk Mobil Listrik Nasional III, 2012-2015.

- (71) Team Leader, Karakteristik Medan Listrik pada Daerah Antar Fasa pada Peralatan Listrik Tegangan Tinggi Tiga Fasa, 2013.
- (72) Static VAR Compensator and Static Synchronous Compensator in Java Bali System to Suppress Disturbance I, 2013-2015.
- (73) Audit CME & Fasilitas Data Center untuk Dukungan Implementasi Cost Transformasi dan Eco Energy serta Kajian dan Design Engineering Sistem Alternatif untuk Perangkat Backbone dan Akses Outdoor di Lingkup Telkom Grup, 2013.
- (74) Studi Konfigurasi Kabel Tegangan Tinggi 150 kV yang Ditanam Langsung, 2013.
- (75) Pengembangan Purwarupa Sistem Penggerak dan Motor Listrik untuk Mobil Listrik Nasional II, 2012-2015.
- (76) Studi dan Evaluasi Koordinasi Isolasi dan Peningkatan Sistem Proteksi Petir pada Gardu Induk dan Hantaran di daerah Lampung, Sumatera Bagian Selatan dan Bengkulu, 2012.
- (77) Pengembangan Purwarupa Sistem Penggerak dan Motor Listrik untuk Mobil Listrik Nasional I, 2012-2015.
- (78) Engineer, Feasibility Study of Bangka Power Plant Project Non Site Aspect, 2012-2013.
- (79) Researcher, Research Corporation between Kyushu Institute of Technology Japan and Hongkong SET on Development of Database of PD from Various Sources in *Gas Insulated Switchgear* Based on Partial Discharge Measurement using External and Internal Sensor, 2011-2012.
- (80) Researcher, Research Corporation between Kyushu Institute of Technology Japan, Toshiba Corporation, Tokyo Electric Power Company Japan on Application and Influence of Epoxy Spacer on PD Induced EMW Propagation on *Gas Insulated Switchgear*, 2010-2012.
- (81) Researcher, Research Corporation between Kyushu Institute of Technology Japan, Japan AE Power System, and Hitachi Engineering and Service Japan on Application of Single-phase PD Monitoring Device on Three-phase *Gas Insulated Switchgear*, 2007-2009.
- (82) Researcher, Development of Diagnosis System for Three-phase *Gas Insulated Switchgear*, Japan, 2004-2008.
- (83) Surveyor and Engineer, Study on Performance of Electric Power System of Indonesia Electrical Company PT PLN, 2003.
- (84) Surveyor and Engineer, Study on Lightning Protection System in PT Bumi Siak Pusako Riau, 2003.
- (85) Surveyor and Engineer, Study on Lightning Protection System in Indonesia Oil and Mining Company PT Pertamina Unit VI Balongan, 2003.

- (86) Surveyor and Engineer, Study on Lightning Protection System in Indonesia Electrical Company: PT PLN Distribusi Jawa Barat dan Banten Cabang Bogor, 2002.
- (87) Surveyor and Engineer, Implementation and Application of Software for Technical and Non Technical Losses Tracking and Calculation in Indonesia Electrical Company: PT PLN Distribusi Jawa Tengah dan DI Yogyakarta, 2002.
- (88) Surveyor and Engineer, Implementation and Application of Software for Technical and Non Technical Losses Tracking and Calculation in Indonesia Electrical Company: PT PLN Distribusi Jawa Barat dan Banten, 2002.
- (89) Surveyor and Engineer, Study on 450 VA and 900 VA Electrical Company Customer Characteristics on Indonesia Electrical Company: PT PLN Area Pelayanan Kudus dan Pekalongan, 2002.
- (90) Surveyor and Engineer, Study on Electrical Potencies, Infrastructure, and Regional Tariff of Indonesia Electrical Company: PT PLN Wilayah II Sumatra Utara, 2001.
- (91) Surveyor and Engineer, Study on Lightning Protection System in PT Caltex Pacific Indonesia, 2001.
- (92) Member of Team, Implementation of Quality Assurance in Department of Electrical Engineering ITB, 2000.
- (93) Surveyor and Engineer, Study on Application of Moving Substation Unit in Indonesia Electrical Company: PT PLN Distribusi Jakarta Raya dan Tangerang Cabang Kebayoran, 1999.
- (94) Surveyor and Engineer, Study on Application of VLF Partial Discharge Detection in Indonesia Electrical Company: PT PLN Distribusi Jakarta Raya dan Tangerang, 1998.

VI. PUBLIKASI

2025:

1. Kodrat, M., **Khayam, U.**, “Frequency Spectrum Analysis of Measurement in 150 kV Outdoor – A Case Study”, IEEE Access, 2025. **(Q1 JOURNAL)**
2. Josia, H.R., Prabhasalma, K., **Khayam, U.**, “Improving MHz - GHz detection using high-gain low-noise amplifiers with modified cascade and cascode topologies”, e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 2025, 11, 100929. **(Q1 JOURNAL)**
3. Ahmad, D.J., Hariyanto, N., **Khayam, U.**, “Issues, Challenges, & Solution Option for On-Grid Multi microgrid Game Theory: A Systematic Review”, IEEE Access, 2025. **(Q1 JOURNAL)**

2024:

4. **Umar Khayam**, Yuda Muhamad Hamdani, Rachmawati, "Design of Modified UWB Microstrip Antenna for UHF Sensor", *Emerging Science Journal* Volume 8 Issue 5, 2024. (**Q1 JOURNAL**)
5. Wulung,A., Sutardi,B.M., Muslim,J., **Khayam,U.**, Suwarno,"Comprehensive Study on Power Transformer Fault Detection and Diagnosis Post-Cianjur Earthquake: A Case Investigation", *International Journal on Electrical Engineering and Informatics* Volume 16, Issue 1, Pages 1 – 17, March 2024.
6. Sulistyaningsih, **Khayam, U.**, Munir, A., "Study on Reflection and Transmission Characteristics of Electromagnetic Waves Propagation in Different Medium Based on Constitutive Parameters", 2024 Photonics and Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2024 - Proceedings, 2024.
7. Pierre Uwiringiyimana, J., **Khayam, U.**, Suwarno, Carlo Montanari, G., "Planar Rectangular Microstrip Antenna for Detection: Experimental Validation on Oil-Filled Transformer Tank", *IEEE Access*, 2024, 12, pp. 133199–133208.
8. Khan, W., Topham, L., **Khayam, U.**, Ortega-Martorell, S., Heather, P., Ansell, D., Al-Jumeily, D., Hussain, A., "Person de-Identification: A Comprehensive Review of Methods, Datasets, Applications, and Ethical Aspects Along-With New Dimensions", *IEEE Transactions on Biometrics, Behavior, and Identity Science*, 2024.
9. Diantari, R.A., Nalendra, A.D., Rachmawati, Permatasari, F.A., **Khayam, U.**, Suwarno, "The Effect of Silicone Rubber on the Relative Permittivity and Hydrophobicity of Gum Rosin As an Alternative Outdoor Insulator Coating", *Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2024, pp. 262–265.
10. Nurmantris, D.A., **Khayam, U.**, Sutisna, N., Munir, A., "3.5 GHz Reflective Electromagnetic Surfaces for Linear-to-Circular Polarizer", 2024 IEEE Region 10 Symposium, TENSYP 2024, 2024.
11. Zaeni, A., **Khayam, U.**, Suwarno, "The Influence of Transient Earth Voltage Sensor Dimensions on Its Performance as a PD Detector", 2024 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2024, 2024, pp. 315–319.
12. Zaeni, A., **Khayam, U.**, Suwarno, "Measurement of in a GIS Model at Various Pressures Using TEV Sensor", 2024 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2024, 2024, pp. 93–97.

13. **Khayam, U.**, Wahyuningsih, T., Kodrat, M., Zaeni, A., Rachmawati, “GIS Overhaul Prioritization Based on the GIS *Health Index*”, 2024 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2024, 2024, pp. 328–331.
14. Arif, A.I., Kozako, M., Hikita, M., Suwarno, **Khayam, U.**, Bando, S., Hayashisaka, N., “Improvement of Initiation *Voltage* of Polyimide Film by Adding Boehmite Alumina Nanofiller”, 2024 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2024, 2024, pp. 222–225.
15. Semuel, R.S., **Khayam, U.**, Putra, M.A.A., “Performance Comparison of Various Calibrators”, Proceedings - ICE3IS 2024: 4th International Conference on Electronic and Electrical Engineering and Intelligent System: Leading-Edge Technologies for Sustainable Societies, 2024, pp. 344–349.
16. Theng, J., Denov, B., **Khayam, U.**, Zoro, R., “Design of Lightning Protection System for Oil and Gas Tanks using 3-D Modeling Rolling Sphere Method”, 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2024 - Proceedings, 2024.
17. Sadewo, B.Y., Amiruddin, W.A.R., Hadi, M., **Khayam, U.**, “The Use of a Newly Design Microstrip Antenna Sensor for PD Measurement in SF6 Gas Insulation”, 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2024 - Proceedings, 2024.
18. Josia, H.R., **Khayam, U.**, “Design and Simulation of 0.3 - 3000 MHz HBT Low Noise Amplifier (LNA) Topologies for More Sensitive Measurements”, 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2024 - Proceedings, 2024.
19. Sulaiman, M.R., Putra, M.A.A., Pratama, M.R., Anwari, L., Poekoel, R.S.S., **Khayam, U.**, “Comparison of Various PD Calibrators in Determination of PD Charge Measured by RC Detector and HFCT”, 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2024 - Proceedings, 2024.
20. Gumilar, E.A., Refikhanata, V., Denov, B., **Khayam, U.**, “Implementation and Analysis of a Generator *Health Index* Model Based on Condition *Assessment* Data at Coal-Fired Power Plant”, 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2024 - Proceedings, 2024.

21. Arif, A.I., Kozako, M., Hikita, M., Suwarno, **Khayam, U.**, Bando, S., Hayashisaka, N., “ *Initiation Voltage Mechanism Improvement of Polyimide Film by Adding Boehmite Alumina Nanofiller under Impulse Voltage*”, 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2024 - Proceedings, 2024.
22. Kodrat, M., **Khayam, U.**, “Performance of A Loop Antenna for *Corona Discharge Detection Under Positive DC Voltage*”, 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2024 - Proceedings, 2024.
23. Ramadhan Amiruddin, W.A., **Khayam, U.**, Hadi, M., Sadewo, B.Y., “Modification and Optimization of Circular Patch Microstrip Antenna (CPMA) for Detection against High *Voltage*”, 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2024 - Proceedings, 2024.
24. Wahyuningsih, T., Harsoyo, A., **Khayam, U.**, "Design Modification of Dipole Antena for Detection in Power Apparatus”, 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2024 - Proceedings, 2024.
25. Kodrat, M., **Khayam, U.**, “The Implementation of RC Sensor to Examine and Analyze Discharge Occurring in XLPE-insulated Power s in the Extruded State Under Negative DC *Voltage*”, 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2024 - Proceedings, 2024.
26. Prabowo, A.R., Denov, B., **Khayam, U.**, Zoro, R., “Lightning Protection System for Multicircuit Tower in Tropical Areas”, 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2024 - Proceedings, 2024.
27. Refikhanata, V., Gumilar, E.A., Denov, B., **Khayam, U.**, “Determining Component and Parameter Weighting Factors using Analytic Hierarchy Process for Thermal Generator *Health Index Model*”, 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2024 - Proceedings, 2024.

2023:

28. **Umar Khayam**, Asep Andi Suryandi, Rachmawati,” Design of *Bowtie Antenna With Rounded Edge and Middle-Sliced Modifications for UHF Sensor*”, IEEE Access (Volume: 11), Page(s): 22822 – 22834, Date of

Publication: 03 March 2023, Electronic ISSN: 2169-3536, DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3252006, Publisher: IEEE, 2023 (**Q1 JOURNAL**)

29. **Umar Khayam**, Arpan Zaeni, Kevin Marojahan Banjar-Nahor, Deny Hamdani, N.I. Sinisuka, Pascal Dupuis, Georges Zissis, Laurant Canale, "Status of Lighting Technology Application in Indonesia", *Sustainability*, Volume 15, Issue 7 April 2023, Article number 6283, ISSN: 20711050, DOI: 10.3390/su15076283) (**Q1 JOURNAL**)
30. Syarif Hidayat, Muhammad Rizal Fabio, and **Umar Khayam**, "Novel Method to Reduce Electric Field Intensity on Gas-Insulated Switchgear Spacer with Conductor Topology", *International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 15, Number 1, March 2023*. Printed ISSN 2085-6830/ online e-ISSN 2087-5886, [DOI: 10.15676/ijeei.2023.15.1.5].
31. Sulistyaningsih, **Khayam, U.**, Munir, A., "Analytical Approach of em Wave Propagation in Different Stacked Materials Encapsulated by Rectangular Waveguide", 2023 International Conference for Advancement in Technology, ICONAT 2023, 2023.
32. Fabio, M.R., Furqani, J., Hidayat, S., **Khayam, U.**, "Injected Current Effects on Magnetic Field and Torque Characteristic of Home Appliance Switched Reluctance Motor", *ICPE 2023-ECCE Asia - 11th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia: Green World with Power Electronics*, 2023, pp. 681–687.
33. Kodrat, M., **Khayam, U.**, "Pulse Shape Analysis of in Air Insulation Using Commercial HFCT Sensor", 2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications: Leveraging Intelligent Systems to Achieve Sustainable Development Goals, *ISITIA 2023 - Proceeding*, 2023, pp. 770–773.
34. Sihite, L., **Khayam, U.**, Viviantoro, D., Kodrat, M., Hadi, M., "Bow-tie Antenna with Low-noise Amplifier for Detection in Oil Insulation", 2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications: Leveraging Intelligent Systems to Achieve Sustainable Development Goals, *ISITIA 2023 - Proceeding*, 2023, pp. 764–769.
35. Arsyah, N.R., Suwarno, **Khayam, U.**, Arief Auluddin, M., "Reducing Activity in a Large Generator Unit by Increasing Hydrogen (H₂) Pressure", *Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems*, *ICHVEPS 2023*, 2023, pp. 493–498.
36. Nainggolan, J.C.B., Banjar-Nahor, K.M., Zaeni, A., Hamdani, D., Sinisuka, N.I., Dupuis, P., Zissis, G., Canale, L., **Khayam, U.**, "Impact of Power

Quality of Microgrids with High Penetration of Renewable Energy on the Characteristics of LED Lamp”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 589–593.

37. Syakur, A., Facta, M., Aulia, Khairunnas, I., Septian, T., Sigiyo, T., **Khayam, U.**, “Adding of SiO₂Nanocomposite on Insulation Properties for Epoxy Resin Insulating Material”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 146–151.
38. Wibowo, A.M., **Khayam, U.**, “Fabrication and Testing of Bow-tie and Long Bow-tie Combination Antenna”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 504–510.
39. Wulung, A., Sutardi, B.M., Agung Kusumajati, R., **Khayam, U.**, Suwarno, “Post-Seismic Fault Detection and Diagnosis on Power Transformer: A Comprehensive Review and Study Case of Cianjur Earthquake”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 216–221.
40. Fauzan, N.H., **Khayam, U.**, “Simulation, VNA Test, and Calibration of Improvement Detector Using Pi-Attenuator Circuit”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 356–361.
41. Hartman, H., **Khayam, U.**, Hamdani, D., Mandaris, D., Galvez, J.R.L., “Analysis of Off-Grid PV Generation Systems for 3T (Frontier, Outermost, and Least Developed) Regions Using Lead Acid Battery Energy Storage”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 76–80.
42. **Khayam, U.**, Zaeni, A., “Review of Transient Earth Voltage Sensor Implementation to Detect in High Voltage Equipment”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 516–520.
43. Diantari, R.A., Rachmawati, **Khayam, U.**, Suwarno, “Insulator Coating To Improve Outdoor Insulator Performance”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 287–292.
44. Sutardi, B.M., Wulung, A., Prakoso, M.H., Pudiatmoko, A., Abd, A.R.M., **Khayam, U.**, Suwarno, “Evaluation of Various Transformer Field

- Conditions Using Cross-Combined Frequency Response Analysis to Identify Specific Deformity”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 46–51.
45. Uwiringiyimana, J.P., **Khayam, U.**, Suwarno, “Development of Printed Rectangular Microstrip Patch Antenna as UHF Sensor for Detection in Power Transformers”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 362–367.
 46. Kodrat, M., **Khayam, U.**, “Analysis of Pulse-sequence Pattern in Air Insulation”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 701–704.
 47. Fabio, M.R., Hidayat, S., **Khayam, U.**, “Effect of Conductor Notches Size Inside of 150kV *Gas Insulated Switchgear* Spacer on Electric Field Distribution”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 439–444.
 48. Prabowo, A.R., Denov, B., **Khayam, U.**, Zoro, R., “A Proper Lightning Arrester Placement to Protect Traction Substation in Jakarta Bandung High Speed Railway System”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 609–613.
 49. Hadi, M., **Khayam, U.**, Rachmawati, “Performance Improvement of Circular Patch Microstrip Antenna (CPMA) for Detecting on High Voltage Equipment”, *Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023*, 2023, pp. 750–753.
 50. Meylinda, V.C., Putra, A.C., Hamdani, D., **Khayam, U.**, Banjar-Nahor, K.M., Zaeni, A., Sinisuka, N.I., Dupuis, P., Zissis, G., Canale, L., “Designing Harmonic Filters on LED Lamp Loads to Reduce Odd Order THD”, Proceedings of 2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2023, 2023, pp. 573–578.
 51. Fabio, M.R., Hidayat, S., **Khayam, U.**, “Effect of HV Guard in Reducing Electric Field Intensity of *Gas Insulated Switchgear* Spacer”, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics, 2023.
 52. Khan, W., Kelly, J., Al-Kafri, A., Kleanthous, N., **Khayam, U.**, Khan, B., “Stationary Vehicles Detection on Smart Highways and Roads using Spatio-

temporal Tracking”, Proceedings - International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE, 2023, pp. 73–78.

53. Hidayat, S., Fabio, M.R., **Khayam, U.**, “Novel Method to Reduce Electric Field Intensity on Gas-Insulated Switchgear Spacer with Conductor Topology”, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 2023, 15(1), pp. 64–81.
54. **Khayam, U.**, Zaeni, A., Banjar-Nahor, K.M., Hamdani, D., Sinisuka, N.I., Dupuis, P., Zissis, G., Canale, L., “Status of Lighting Technology Application in Indonesia”, Sustainability (Switzerland), 2023, 15(7), 6283.

2022:

55. Jean Pierre Uwiringiyimana, **Umar Khayam**, Suwarno, Gian Carlo Montanari,”Design and Implementation of Ultra-Wide Band Antenna for Detection in High Voltage Power Equipment, IEEE Access, 2022, Volume: 10 **Page(s):** 10983 – 10994, **Date of Publication:** 18 January 2022, **Electronic ISSN:** 2169-3536, **INSPEC Accession Number:** 21589092, **DOI:** 10.1109/ACCESS.2022.3144416, Publisher: IEEE, 2022. **(Q1 JOURNAL)**
56. Nazar, N.S.M., Mansor, N.S., **Khayam, U.**, Muhamad, N.A., Mustapha, M.J., Mohamed, A.I., Jamil, M.K.M,”Effect of silica nanofiller in cross-linked polyethylene as electrical tree growth inhibitor”, International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 12, No. 3, June 2022, pp. 2256~2263, 2022. ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v12i3.pp2256-2263
Link:<https://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/article/view/25977/15604> **(Q2 JOURNAL)**
57. Jean Pierre Uwiringiyimana, **Umar Khayam**, Suwarno, Gian Carlo Montanari,” Comparative Analysis of Detection Features Using a UHF Antenna and Conventional HFCT Sensor”, **Page(s):** 107214 – 107226, **Date of Publication:** 06 October 2022, **Electronic ISSN:** 2169-3536, **INSPEC Accession Number:** 22138492, **DOI:** 10.1109/ACCESS.2022.3212746, Publisher: IEEE, 2022 **(Q1 JOURNAL)**
58. Shopiyudin, A.W., **Khayam, U.**, Hamdani, Y.M., Eriyadi, M.,”Bowtie Antenna Design with Lumped Element Modification for Measurement Applications”, Lecture Notes in Electrical Engineering, 2022. DOI: 10.1007/978-981-16-8129-5_26, Link: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-8129-5_26

59. Nazar, N.S.M., Mansor, N.S., **Khayam, U.**, Mohamed, A.I., Muhamad, N.A., Jaafar, M., Jamil, M.K.M., "Electrical Tree Inception *Voltage* and Propagation in XLPE Containing Silica Nanofiller", Lecture Notes in Electrical Engineering, 2022. DOI: 10.1007/978-981-16-8129-5_128, Link: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-8129-5_128
60. Azmi, K., Ishak, D., Muhamad, N.A., Zuhairi, A., **Khayam, U.**, Jamil, M.K.M., Activity Under Influence of Metal Particle Number in Mineral Oil and PFAE", Lecture Notes in Electrical Engineering, 2022, DOI: 10.1007/978-981-16-8129-5_129, Link: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-8129-5_129
61. Uwiringiyimana, J.P., **Khayam, U.**, Suwarno, Montanari, G.C., "Design and Implementation of Ultra-Wide Band Antenna for Detection in High *Voltage* Power Equipment", IEEE Access, 2022, 10, pp. 10983–10994.
62. Rhamdhani, T., **Khayam, U.**, Zaeni, A., "Improving Antenna Performance by Combining Dipole and *Bowtie* Antenna for Measurement in *Gas Insulated Switchgear*", 2022 IEEE International Conference in Power Engineering Application, ICPEA 2022 - Proceedings, 2022.
63. Sulistyaningsih, Oktafiani, F., Hamid, E.Y., Wijayanto, Y.N., Munir, A., "Theoretical Approach on Analysis of Ridged Waveguide Properties Using Equivalent Transmission Line Circuit", 2022 IEEE Region 10 Symposium, TENSYP 2022, 2022.
64. Uwiringiyimana, J.P., **Khayam, U.**, Suwarno, Montanari, G.C., "Comparative Analysis of Detection Features Using a UHF Antenna and Conventional HFCT Sensor", IEEE Access, 2022, 10, pp. 107214–107226.
65. Fabio, M.R., Furqani, J., Hidayat, S., **Khayam, U.**, "Comparison of Amorphous Steel, Supercore, and Soft Iron on 8/6 Switched Reluctance Motor Magnetic Field Distribution and Torque Ripple", 7th International Conference on Electric Vehicular Technology, ICEVT 2022 - Proceeding, 2022, pp. 128–133.
66. Sriyono, **Khayam, U.**, Suwarno, "Investigating the Frequency Spectrum of Incoming Waveform in the Transformer Terminal Considering the *Voltage* Distribution Characteristics", 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2022, 2022, pp. 458–462.
67. Uwiringiyimana, J.P., **Khayam, U.**, Suwarno, "Application of a Novel Type of UHF Antenna for Detection in Power Transformers Oil Insulation", 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2022, 2022, pp. 442–447.

68. Khayam, U., Zaeni, A., Kamarol, M.M.J., “Calibration of Sensors in Air and SF 6 Insulation”, ICPERE 2022 - 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, Proceedings, 2022.
69. Putra, A.C., Hamdani, D., **Khayam, U.**, Banjat-Nahor, K.M., Sinisuka, N.I., Zissis, G., Dupuis, P., Canale, L., “Characterization of Energy Saving Lamps in Indonesia Based on Power Quality”, ICPERE 2022 - 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, Proceedings, 2022.
70. **Khayam, U.**, Zaeni, A., “Review of Smart Street Lighting Research in Indonesia”, ICPERE 2022 - 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, Proceedings, 2022.
71. Rachman, N.A., Risdiyanto, A., Kristi, A.A., Junaedi, A., Santosa, H.P., **Khayam, U.**, “Design and Implementation of Energy *Management* System for Small-Scale Hybrid Power Plant”, Design and Implementation of Energy *Management* System for Small-Scale Hybrid Power Plant.
72. Viviantoro, D., Hidayat, S., **Khayam, U.**, “Interactive Web Application Design of Online Monitoring Prototype”, ICPERE 2022 - 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, Proceedings, 2022.
73. Wibowo, A.M., **Khayam, U.**, “Performance Improvement of Sensor by Combination of *Bowtie* and Long *Bowtie* Antenna”, ICPERE 2022 - 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, Proceedings, 2022.
74. Fabio, M.R., Furqani, J., Hidayat, S., **Khayam, U.**, “Effects of Amorphous Iron and Supercore as Core Material on Electric Field and Torque Characteristics for 450W 8/6 Switched Reluctance Motor”, ICPERE 2022 - 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, Proceedings, 2022.
75. Diantari, R.A., Suwarno, **Khayam, U.**, “Review of Insulator Coatings to Improve Outdoor Insulator Performance”, ICSEC 2022 - 4th International Conference on Sustainable Engineering and Creative Computing, Proceedings, 2022, pp. 90–94.

2021:

76. Sriyono, **Umar Khayam**, Suwarno, ”Evaluating the Inter-Resonance Characteristics of Various Power Transformer Winding Designs”, *IEEE*

77. Yaqin, E.N., **Khayam, U.**, “Improvement of Application Cognitive Artificial Intelligence based on Doernenburg Ratio Method for *Dissolved Gas Analysis* Interpretation”, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics, 2021.
78. Fauzan, N.H., **Khayam, U.**, “Setting up Pi-Attenuator Circuit to Improve Performance of Detector”, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics, 2021.
79. **Khayam, U.**, Fauzan, N.H., “Testing New Design Detector Using *Vector Network Analyzer* and Charge Calibrator”, 2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2021, 2021, pp. 536–540.
80. Uwiringiyimana, J.P., Suwarno, **Khayam, U.**, “Design of a Rectangular Microstrip Patch Antenna as UHF Sensor for Detection on Power Transformer”, 2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2021, 2021, pp. 563–568.
81. Zaeni, A., Halimi, B., **Khayam, U.**, Suwarno, “Design and Implementation of Experimental Setup for Measurement of on GIS”, 2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2021, 2021, pp. 132–136.
82. **Khayam, U.**, Nugraha, F., “Study of Antenna Development for Measurement”, 2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2021, 2021, pp. 541–546.
83. **Khayam, U.**, Zaeni, A., “Review of Recent Research on Energy Saving Lamp in Indonesia”, 2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2021, 2021, pp. 175–180.
84. Fabio, M.R., Hidayat, S., **Khayam, U.**, “Effects of Notches in GIS Spacer Design to Hold Conductor Rods on Electric Field Distribution”, 2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2021, 2021, pp. 241–246.
85. Nurul Yaqin, E., **Khayam, U.**, “Implementation of Cognitive Artificial Intelligence for *Dissolved Gas Analysis* Interpretation in 150 kV Transformer”, ICT-PEP 2021 - International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power: Emerging Energy Sustainability, Smart Grid, and Microgrid Technologies for Future Power System, Proceedings, 2021, pp. 52–57.

86. Uwiringiyimana, J.P., Suwarno, **Khayam, U.**, “Design of an Ultra-Wide Band Microstrip Patch Antenna for Detection on Power Transformer”, Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2021, 2021-July, pp. 242–245, 9493945.
87. Uwiringiyimana, J.P., Suwarno, **Khayam, U.**, “New design of UHF microstrip patch antenna for detection on power transformer”, 2021 56th International Universities Power Engineering Conference: Powering Net Zero Emissions, UPEC 2021 - Proceedings, 2021.

2020:

88. Laksono, D.T., Laksono, D.T., **Khayam, U.**, "Comparative Measurement of Using Spiral Antenna with RC Detector on High Voltage Equipment", *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1569, Issue 323 July 2020 Article number 032089 (3rd International Conference on Science and Technology 2019, ICST 2019, 17 October 2019 - 18 October 2019)
89. Laksono, D.T., Laksono, D.T., **Khayam, U.**, "Comparison of Characteristics Detected by RC Detector and Rectangular Antenna", Volume 1569, Issue 323 July 2020 Article number 032086 (3rd International Conference on Science and Technology 2019, ICST 2019, 17 October 2019 - 18 October 2019)
90. K. O. Bachri, **Umar Khayam**, Nur T, B.A.Soedjarno, A. D. W. Sumari,"Cognitive artificial-intelligence for rogers ratio *dissolved gas analysis*", International Journal of Advanced Science and Technology, Volume 29, Issue 8, 21 May 2020, Pages 1017-1025, ISSN:2005-4238E-ISSN:2207-6360
91. K. O. Bachri, **Umar Khayam**, B.A. Soedjarno, Kartawidjaja, M.A.," Improvement of Doernenburg ratio method dissolved-gas analysis using 5-fold cross validation artificial neural network", International Journal of Advanced Science and Technology, Volume 29, Issue 7 Special Issue, 14 April 2020, Pages 3338-3346, ISSN:2005-4238E-ISSN:2207-6360.
92. Uwiringiyimana, J.P., **Khayam, U.** “Design and fabrication of double layer *bowtie* antenna with modification of wing edge as UHF sensor for detection in air insulation”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 850(1), 012015.
93. Uwiringiyimana, J.P., **Khayam, U.**, “Design and application of double layer *bowtie* antenna and single layer *bowtie* antenna as UHF sensors for

- detection”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 850(1), 012036.
94. Widjaja, C.D., Mudhiah Fahren, A.A., **Khayam, U.**, Hidayat, S., “Design of Loop Antenna as Sensor on Metal-Enclosed Power Apparatus”, 2020 IEEE Region 10 Symposium, TENSYP 2020, 2020, pp. 1506–1510, 9231030.
 95. Wibowo, S.H., **Khayam, U.**, Suwarno, Kakimoto Y., Kozako, M., Hikita, M., “Optimization of detection sensitivity of transient earth *voltage* sensors using FDTD modeling”, Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2020, 2020-September, pp. 525–528.
 96. Azmi, K., Ishak, D., Muhamad, N.A., Zuhairi A., **Khayam, U.**, Kamarol, M., “Comparison of activity in mineral oil and PFAE containing multiple spherical metal particles”, Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2020, 2020-September, pp. 576–579.
 97. Satria, K.A., Ozuno, K., Inoue, Y., Kozako M., Hikita M., Suwarno, Khayam U., Igarashi, T., Kaji, H., “Dielectric *breakdown* characteristic of refining treatment fullerene doped epoxy plate-like specimens”, Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2020, 2020-September, pp. 418–420.
 98. Sriyono, Suwarno, **Khayam, U.**, “Investigating the internal winding resonance characteristics of various power transformer winding designs”, Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2020, 2020-September, pp. 541–544.
 99. Ardiansyah, N.P., **Khayam, U.**, Nurdiansyah, R., “Measurement of on PCB using RC Detector, HFCT, and Loop Antenna”, Proceeding - 1st FORTEI-International Conference on Electrical Engineering, FORTEI-ICEE 2020, 2020, pp. 64–68, 9249908.
 100. Sriyono, S., **Khayam, U.**, Suwarno, S., “SFRA Characteristics of Power Transformer Internal Winding Considering the Resonant Effect”, Proceeding - 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2020, 2020, pp. 302–305, 9287194.

2019:

101. Uwiringiyimana, J.P., **Umar Khayam,** “Design and application of double layer *bowtie* antenna and single layer *bowtie* antenna as UHF sensors for detection”, IOP Conference Series: Materials Science and

- Engineering Volume 850, Issue 1, 22 May 2020, Article number 012036; 2nd International Symposium on Materials and Electrical Engineering, ISMEE 2019; Grand Tjokro Hotel Bandung; Indonesia; 17 July 2019 through ; Code 160140Top of Form.
102. Uwiringiyimana, J.P., **Umar Khayam**, "Design and fabrication of double layer *bowtie* antenna with modification of wing edge as UHF sensor for detection in air insulation" IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume 850, Issue 1, 22 May 2020, Article number 012015; 2nd International Symposium on Materials and Electrical Engineering, ISMEE 2019; Grand Tjokro Hotel Bandung; Indonesia; 17 July 2019 through ; Code 160140Top of Form.
 103. K. O. Bachri, **Umar Khayam**, B.A. Soedjarno, A. D. W. Sumari, A. S. Ahmad, "Cognitive Artificial-Intelligence for Doernenburg *Dissolved Gas Analysis* Interpretation", TELKOMNIKA, Vol.17, No.1, February 2019, pp.268~274 ISSN: 1693-6930, accredited First Grade by Kemenristekdikti, Decree No: 21/E/KPT/2018 DOI: 10.12928/TELKOMNIKA.v17i1.11612
 104. A. S. Habibie, M. Hikita, M. Kozako, Y. Nakano, Suwarno, **Umar Khayam**, T. Tanaka, M. Kobayashi, "Detecting Vacuum Degree Condition of Vacuum Interrupter by Measurement", 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST 2019), Kitakyushu, Japan , October 13-16, 2019.
 105. Nuraida Puspitasari, **Umar Khayam**, Suwarno, Yasutomo Kakimoto, Hina Yoshikawa, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, "Waveform Identification using Image with Convolutional Neural Network", 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Bucharest, Romania, Romania 3-6 Sept. 2019.
 106. **Umar Khayam**, Rachmawati, F. Damanik, Syarif Hidayat, "Effect of Spacer Insulation Material Permittivity on the Electric Field of 150 kV Three-Phase GIS Spacer", International Conference on High Voltage Engineering and Power System (ICHVEPS 2019), Bali, Indonesia, October 1-4, 2019.
 107. Lunnetta Safura Lumba ; **Umar Khayam** ; Lury Amatullah Lumba, "Implementing and Testing for Pattern Recognition of Signals Using Artificial Neural Network", 2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)), Bali, Indonesia, October 1-4, 2019.

108. **Umar Khayam**, Rachmawati, F. Damanik, Syarif Hidayat,"Design Modification of Spacer and Conductor Structure for Reducing Electrical Stress on 150 kV Three-Phase GIS Spacer", International Conference on High *Voltage* Engineering and Power System (ICHVEPS 2019), Bali, Indonesia, October 1-4, 2019.
109. Lury Amatullah Lumba ; **Umar Khayam** ; Lunnetta Safura Lumba ; Claysius Dewanata Widjaja," The Step of Pattern Recognition Using Fuzzy Logic", International Conference on High *Voltage* Engineering and Power System (ICHVEPS 2019), Bali, Indonesia, October 1-4, 2019.
110. **Umar Khayam** ; Dede Furqon Nurjaman ; Rachmawati Rachmawati," Improvement of Performance of PD Detector by Modification of Pi-Attenuator Circuit and Ultrawide Band Amplifier", International Conference on High *Voltage* Engineering and Power System (ICHVEPS 2019), Bali, Indonesia, October 1-4, 2019.
111. **Umar Khayam** ; Mukhlisah Yunus," Effect of The Presence of Hole on Metal Enclosed Power Apparatus on Detected by External Sensor", International Conference on High *Voltage* Engineering and Power System (ICHVEPS 2019), Bali, Indonesia, October 1-4, 2019.
112. Lunnetta Safura Lumba , **Umar Khayam** , Rian Maulana," Design of Pattern Recognition Application of Signals Using Artificial Neural Networks", 2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Bandung, Indonesia, 9-10 July 2019.
113. **Umar Khayam** ; Arpan Zaeni ; Herlin Agustina,"Determination of Sensor Position on 150 kV Gas Insulation Switchgear", 2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Bandung, Indonesia, 9-10 July 2019.
114. Lury Amatullah Lumba ; **Umar Khayam** ; Lunnetta Safura Lumba,"Application of Fuzzy Logic for Pattern Recognition", 2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Bandung, Indonesia, 9-10 July 2019.
115. Jean Pierre Uwiringiyimana ; **Umar Khayam**," Measurement of in Air Insulation by using UHF Double Layer *Bowtie* Antenna with Modified Wings Edges", 2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Bandung, Indonesia, 9-10 July 2019.

2018:

116. **Umar Khayam**, Nhet Ra, "Effect of Insulation Medium and Internal Structures of Power Transformer on Induced Electromagnetic Wave in Power Transformer", 11th AUN/SEED-Net Regional Conference on Energy Engineering (RCEnE 2018), RC63, Manila, Philippines, September 27-28, 2018. (**BEST PAPER AWARD**)
117. Deni Tri Laksono, Dedi Tri Laksono, **Umar Khayam**, "Comparison of Two Different Designs of Planar Spiral Antenna to Detect The Characteristics in Metallic Enclosed High Voltage Equipment", International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering (IJIEEE), Volume-6, Issue-7, July 2018. , ISSN(p): 2347-6982, ISSN(e): 2349-204X, <http://ijiee.org.in>
118. T. Sumarwoto, A. Basuki, **Umar Khayam**, Naohiro Hozumi, "Signal Denoising by Discrete Wavelet Transformation", EPI International Journal of Engineering, Vol. 1, No. 1, February 2018, pp. 76-82, ISSN:2615-5109, DOI: 10.25042/epi-ije.022018.12
119. Nhet Ra, Tomohiro Kawashima, Naohiro Hozumi, Yoshinobu Murakami, **Umar Khayam**, **Suwarno**, "Simulation of Induced Electromagnetic Wave in Power Transformer", EPI International Journal of Engineering, Vol. 1, No. 1, February 2018, pp. 54-59, ISSN:2615-5109, DOI: 10.25042/epi-ije.022018.09
120. Akhmad Fauzan, **Umar Khayam**, Suwarno, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, "Design and Fabrication of 3-D Cube UHF Antenna for Detection", International Conference on Condition, Monitoring, and Diagnosis (CMD 2018), Curtin University, Perth, Australia, September 23-26, 2018.
121. Akhmad Fauzan, **Umar Khayam**, Suwarno, Yoshizumi Hiromasa, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, "Simulation of Electromagnetic Wave and Surface Current Caused by PD for Seeking Better Detection Sensitivity by TEV Sensor Attached with a Bucket", International Conference on Condition, Monitoring, and Diagnosis (CMD 2018), Curtin University, Perth, Australia, September 23-26, 2018.
122. Taufik Rossal Sukma, **Umar Khayam**, Suwarno, Ryouya Sugawara, Hina Yoshikawa, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Osamu Eda, Masanori Otsuka, Hiroshi Kaneko, Yasuharu Shiina, "Classification of Sources using Waveform Parameters and Phase-Resolved Pattern as Input for the Artificial Neural Network", International Conference on Condition,

Monitoring, and Diagnosis (CMD 2018), Curtin University, Perth, Australia, September 23-26, 2018.

123. Taufik Rossal Sukma, **Umar Khayam**, Suwarno, Ryouya Sugawara, Hina Yoshikawa, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Osamu Eda, Masanori Otsuka, Hiroshi Kaneko, Yasuharu Shiina, "Determination of Type of in Cubicle-Type *Gas Insulated Switchgear* (C-GIS) using Artificial Neural Network", International Conference on Condition, Monitoring, and Diagnosis (CMD 2018), Curtin University, Perth, Australia, September 23-26, 2018.
124. **Umar Khayam**, Herlin Agustina, Arpan Zaeni, "Analysis of the Best Placement of UHF Sensors for Diagnosis of which Laid on 70 kV GIS Conductor without Spacer and 70 kV GIS with Spacer", 4th IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE 2018), Solo, Indonesia, October 29-31, 2018.
125. Yoka Mustopa, **Umar Khayam**, "Modification of Circular Radius, Arm Patch Line Width and Power Supply Line of UWB Double Layer Printed Antenna for Detection", 5th International Conference on Vehicular Technology (ICEVT 2018), Solo, Indonesia, October 30-31, 2018.
126. Arpan Zaeni, Tria Kasna Lestari, **Umar Khayam**, "Application of Wavelet Transformation Symlet Type and Coiflet Type for Signals Denoising", 5th International Conference on Vehicular Technology (ICEVT 2018), Solo, Indonesia, October 30-31, 2018.
127. **Umar Khayam**, Yuda Muhammad Hamdani, "Modification of Arm Patch of Double Layer Printed Antenna for Detection", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Volume 602, Issue 1, 6 September 2019, Article number 012033, 1st Conference on Innovation in Technology and Engineering Science, CITES 2018; Padang, West Sumatera; Indonesia; 8 – 9 November 2018 ; Code 152222
128. **Umar Khayam**, Miftahul Husna, Arpan Zaeni, Rachmawati, "Design and Testing of Trapezoid Log Periodic Antenna for Detection", Conference on Innovation in Technology and Engineering Science (CITES 2018), paper 661, Padang, Indonesia, November, 8-9, 2018.
129. **Umar Khayam**, Arpan Zaeni, Herlin Agustina, "Propagation Properties Of Induced Electromagnetic Wave in 70kV GIS", International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS 2018), Bali, Indonesia, November 13-14, 2018.

2017:

130. Rahayu, Gama Titis Anuraga, Hikmah Prasetya, **Umar Khayam**, "Design of Fractal Features-Based Pattern Recognition using Multi Support Vector Machine Method", 2nd International Joint Conference on Advanced Engineering and Technology IJCAET 2017 and International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering ISAMPE 2017, Sanur, Bali, 24-26 Agustus 2017; MATEC Web of Conference Vol. 159, 30 March 2018, article number 02048.
131. **Umar Khayam**, Fendi Imam Fatoni, "Measurement of Induced Electromagnetic Wave using Loop Antenna", 2017 4th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI 2017), Yogyakarta, Indonesia, September 19-21, 2017.
132. **Umar Khayam**, Yushan, "Measurement of inside Metal Enclosed Power Apparatus using Internal Sensor", 2017 4th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI 2017), Yogyakarta, Indonesia, September 19-21, 2017.
133. **Umar Khayam**, Nelson Poetra Yoga Hadisoeseño, Suwarno, "Reducing Contact Resistance of High Current Connectors on Electric Vehicle by Controlling Contact Pressure and Addition of Plating Material", 4th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT 2017), pp 61-64, Bali, Indonesia, October 2-5, 2017.
134. Hikmah Prasetya, **Umar Khayam**, Suwarno, Akihiko Itose, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, "PD Pattern of Various Defects measured by TEV sensor", International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2017, TS1-3, P49, Bali, Indonesia, October 2-5, 2017.
135. Jean Pierre Uwiringiyimana, **Umar Khayam**, "Noise Measurement in High Voltage Laboratory by using High Frequency Current Transformer and Loop Antenna", International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2017, TS1-5, P165, Bali, Indonesia, October 2-5, 2017.
136. **Umar Khayam**, Reynaldi Prasetyo, Syarif Hidayat, "Electric Field Analysis of 150 kV Compact Transmission Line", International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2017, Bali, Indonesia, October 2-5, 2017.

137. **Umar Khayam**, Rachmawati, Reynaldi Prasetyo, Syarif Hidayat, "Magnetic Field Analysis of 150 kV Compact Transmission Line", International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2017, Bali, Indonesia, October 2-5, 2017.
138. **Umar Khayam**, FI Fatoni, "Design and Application of Loop Antenna for Induced Electromagnetic Wave Detection", The 6th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Langkawi, Malaysia, November 25-26, 2017.

2016:

139. **Umar Khayam**, Fakhri Alfaruq, "Design of Hilbert Antenna as Sensor", The Second International Conference Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (IMECE), Yogyakarta, Indonesia, October 6-7, 2016. **(BEST PAPER AWARD)**
140. Agus Risdiyanto, **Umar Khayam**, N.A. Rachman, Maulana Arifin, "Experimental and Simulation Studies of Thermal Distribution on Modified Connector of Li-Ion Battery for Electric Vehicles Application", International Journal of Electrical and Computer Engineering, Volume 6, Issue 5, 2016, October 2016 hal: 2064-2072.
141. **Umar Khayam**, Tria Kasna Lestari, "Application of Wavelet Transform on Signal Denoising", The Second International Conference Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (IMECE), Yogyakarta, Indonesia, October 6-7, 2016.
142. Syarif Hidayat, F. Damanik, **Umar Khayam**, "Electric Field Optimization on 150 kV GIS Spacer using Functionally Gradient Material", The Second International Conference Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (IMECE), Yogyakarta, Indonesia, October 6-7, 2016.
143. Syarif Hidayat, Rachmat Pujianto, **Umar Khayam**, "Electric Field Optimization on 150 kV GIS Bushing using Functionally Gradient Material", The Second International Conference Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (IMECE), Yogyakarta, Indonesia, October 6-7, 2016.
144. **Umar Khayam**, Yoga Aji Surandaka, "Design, Implementation, and Testing of Signal Processing System", The Second International Conference Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (IMECE), Yogyakarta, Indonesia, October 6-7, 2016.

145. Hendrik Maryono, Abdul Rajab, **Umar Khayam**, Suwarno, Motoo Tsuchie, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Takashi Suzuki, "Study on streaming electrification properties of palm fatty acid ester (PFAE) oil due to aging", 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), Volume: 1, Pages: 410 - 413, Paris, France, July 3-7, 2016.
146. Hikmah Prasetya, **Umar Khayam**, Suwarno, Akihiko Itose, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, "Simulation analysis of surface current as TEV signal caused by on post insulator in bus duct", 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), Volume 1, pages: 480-484, Paris, France, July 3-7, 2016.

2015:

147. Fahru Rozi, **Umar Khayam**, "Design of Loop Antenna as Sensor", International Journal of Electrical Engineering and Informatics Vol 7 No. 1, 2015.
148. Khusnul Khotimah, **Umar Khayam**, Suwarno, Yuki Tai, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, "Design of Dipole Antenna Model for Detection in GIS", The 5th International Conference on Electrical Engineering and Informatics 2015 August 10-11, 2015, Bali, Indonesia.
149. H. Gumilang, A. Rajab, Suwarno, **Umar Khayam**, M. Tsuchie, M. Kozako, M. Hikita, T. Suzuki, S. Hatada, A. Kanetani, H. Futakuchi, "Study on Static Electrification of Palm Fatty Acid Ester (PFAE) Oil Using Mini Static Tester", The 5th International Conference on Electrical Engineering and Informatics 2015 August 10-11, 2015, Bali, Indonesia.
150. **Umar Khayam**, Budi Sutrisno, Mirfa Fauzan, Suwarno, Agus Risdiyanto, "Measurement and Analysis of Contact Resistance of New Designed Battery Connection", Joint International Conference on Electric Vehicular Technology and Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (ICEVT & IMECE) 2015.

2014:

151. **Umar Khayam**, Widya Anggoro Putro, Sriyono, Koji Urano, Chen Min, Suwarno, Masahiro Kozako, and Masayuki Hikita, "Pattern of Various Defects Measured by Spiral Antenna as UHF External Sensor on 66 kV GIS Model", International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Volume 6, Number 2, pp. 404-420, June 2014.

152. Inu Suprianto, **Umar Khayam**, Suwarno, Kiichi Nishigouchi, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, "Design and Implementation of Small Glasses Model as UHF Sensor to Detect in *Gas Insulated Switchgear*", International Conference on Sensor, Sensor System, and Actuator, ICSSA 2014-008, Bandung, May 2014.
153. **Umar Khayam**, Suwarno, Achmad Susilo, Joko Muslim, Yanuar Z. Arief, Masayuki Hikita, "Characteristics and *Dissolved Gas Analysis* of Vegetable Oil", International Symposium on Electrical Insulating Material (ISEIM), Paper PA12, pp.239-232, Japan, May 1-5, 2014.
154. Inu Suprianto, **Umar Khayam**, Suwarno, Kiichi Nishigouchi, Mohamad Kamarol, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, "UHF Sensor Optimization used for Detecting Emitted Electromagnetic Wave in *Gas Insulated Switchgear*", International Symposium on Electrical Insulating Material (ISEIM), Paper VA13, pp. 330-333, Japan, May 1-5, 2014.
155. **Umar Khayam**, Zahrina Hafizhah, "Effect of the Distance of Sensor to Source on the Attenuation of induced Electromagnetic Wave in *Gas Insulated Switchgear*", International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS), Paper 75, pp. 94-97, Bali, November 5-7, 2014. ISBN : 978-1-4799-6125-2
156. **Umar Khayam**, Budi Sutrisno, Agus Risdiyanto, Suwarno, "Design of Battery Connection using Copper Conductor with Tin and Silver Coating", 2014 IEEE Joint International Conference on Electrical Engineering and Computer Science and the Second International Conference on Electric Vehicular Technology, Paper 123, pp. 399-403, 24-25 November 2014, Bali, Indonesia. 978-1-4799-8478-7/14/\$31.00 ©2014 IEEE.
157. **Umar Khayam**, Farrah Vauzia, Suwarno, "Design, Fabrication, and Testing of Double Layer Printed Bow-Tie Antenna as Sensor in *Gas Insulated Switchgear*", The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy ICPERE 2014, Paper 10B1-1, Bali, December 9-11, 2014.
158. Deva Setiawan, **Umar Khayam**, Reynaldo Zoro, "Overvoltages and Insulation Coordination on 150 kV Substation in South Sumatera Indonesia", The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy ICPERE 2014, Paper 10B2-2, Bali, December 9-11, 2014.

159. Achmad Susilo, Joko Muslim, Masayuki Hikita, Masahiro Kozako, MotooTsuchie, Yanuar Z. Arief, Nor Asiah Muhamad, Suwarno, **Umar Khayam**,"Comparative Study of Characteristics and *Dissolved Gas Analysis* on PalmBased Oil as Insulating Material", The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy ICPERE 2014, Paper 10B2-4, Bali, December 9-11, 2014.
160. Fakhru Rozi, **Umar Khayam**,"Design, Implementation and Testing of Triangle, Circle, and Square Shaped Loop Antennas as Sensor", The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2014, Paper 11B1-5, Bali, December 9-11, 2014. (**HONORABLE PAPER AWARD**)

2013:

161. **Umar Khayam**, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Tosihiro Hoshino, Shiro Maruyama, Junichi Wada and Shigemitsu Okabe, "Effect of the Presence of Epoxy Spacer on Transmission Rate of Electromagnetic Wave Propagating through T-Branch of 66 kV GIS Model Tank", IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, Volume 20 Issue 6, pp. 2254-2261, December 2013.
162. **Umar Khayam**,"Analysis of Distribution, Pattern, and Vector of Electric Field in the Inter Phases Region of Three-phase *Gas Insulated Switchgear*", International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 5, Number 4, pp. 492-500, December 2013.
163. Hanalde Andre, **Umar Khayam**,"Perancangan Antena Kupu – Kupu sebagai sensor Ultra High Frequency (UHF) untuk mendeteksi (PD) pada Gas Insulated Substation (GIS), Jurnal Nasional Teknik Elektro Vol. II No. 2, Sep. 2013.
164. Sriyono, Yong-Joo Kim, **Umar Khayam**, Suwarno, Masayuki Hikita,"Characteristics of External Loop Sensor Located near Bushing on Induced Electromagnetic Wave Measurement", International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 5, Number 1, pp. 12-23, March 2013.
165. Joko Muslim, Suwarno, **Umar Khayam**, Masayuki Hikita,"Improvement of *Bowtie* UHF Antenna Model for Detecting PD in GIS," Procedia Technology, 8C, pp. 217-224. International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Malaysia, June 24-25, 2013.

166. Achmad Susilo, Suwarno, **Umar Khayam**, Masayuki Hikita," Study on Dissolved Gas Due to Thermally Degraded Insulating Paper in Transformer Oil, *Procedia Technology*, 8C, pp. 245-250. International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Malaysia, June 24-25, 2013.
167. **Umar Khayam**, "Electric Field Characteristics inside Three-phase *Gas Insulated Switchgear* in the Presence of Foreign Metallic Particle", *Procedia Technology*, 8C, pp. 1148-1154. International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Malaysia, June 24-25, 2013.
168. Joko Muslim, Suwarno, **Umar Khayam**, Masayuki Hikita,"Enhanced *Bowtie* UHF Antenna for Detecting in Gas Insulated Substation" 48th Universities' Power Engineering Conference - UPEC2013, Dublin, Ireland, September 2-5, 2013.
169. **Umar Khayam**, "Analysis of Electric Field in the Inter Phases Region of Three-phase *Gas Insulated Switchgear*. 2013 Joint International Conference on Rural Information & Communication Technology and Electric-Vehicle Technology November 26-28, 2013, Bandung-Bali, Indonesia.
170. Joko Muslim, AchmadSusilo, KiichiNishigouchi, M. Kozako, Masayuki Hikita, , Yanuar Z. Arief, **Umar Khayam**, Suwarno,"Enhanced *Bowtie* UHF Antenna for Detecting in Gas Insulated Substation", 48th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Dublin, Ireland, 2-5 September 2013.

2012:

171. **Umar Khayam**, "Electric Field Characteristics under Three-phase *Voltage* in Three-phase *Gas Insulated Switchgear*", *International Journal on Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*, Vol. 4 No. 3, Oct. 2012.
172. **Umar Khayam**, Toshihiro Hoshino, Takashi Nakajima, Shiro Maruyama, Kiichi Nishigouchi, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita," Characteristics of PD Induced Electromagnetic Wave Propagating through T-Branch of 254 kV GIS in the Presence of Epoxy spacer, *IEEE CMD* 2012.
173. **Umar Khayam**, " Rotating Characteristics of Electric Field Vector in Three-Phase Power Apparatus", *Proceeding ofIEEE International Conference on Condition, Monitoring, and Diagnosis, CMD* 2012.

174. **Umar Khayam**,” Locus and Pattern of Electric Field Vector in the Insulation of Three-phase *Gas Insulated Switchgear*”, Proceeding of IEEE International Conference on Renewable Energy and Power Engineering – ICPERE 2012.
175. Widya Anggoro Putro, Sriyono, K. Nishigouchi, **Umar Khayam**, Suwarno, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Koji Urano, Chen Min,” Influence of Spacer Aperture Size on PD-Induced Electromagnetic Wave Measured with UHF External Sensor in 66 kV GIS Model, IEEE CMD 2012.
176. Sriyono, Widya Anggoro Putro, Kichi Nishigouchi, **Umar Khayam**, Suwarno, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Koji Urano, Chen Min,” Sensitivity Verification and Determination of the Best Location of External UHF Sensors for PD Measurement in GIS, IEEE CMD 2012.
177. Kiichi Nishigouchi, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Toshihiro Hoshino, Shiro Maruyama, Takashi Nakajima, **Umar Khayam**,” Effect of Excitation Current Waveform on PD Induced Electromagnetic Wave Propagation and Attenuation in Straight 154 kV GIS Model Tank with Epoxy Spacers, IEEE CMD 2012. (Prosiding konferensi internasional terindeks scopus).
178. **Umar Khayam**, A. Rajab, Suwarno,” Dielectric Properties, Properties and *Dissolved Gas Analysis* of Ricinus Oils as Biodegradable Liquid Insulating Materials, IEEE CMD 2012.
179. Widya Anggoro Putro, Sriyono, K. Nishigouchi, **Umar Khayam**, Suwarno, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Koji Urano, Chen Min,” PD Pattern of Various Defects Measured by UHF External Sensor on 66 kV GIS Model, IEEE CMD 2012.
180. Sriyono, Yong Joo Kim, **Umar Khayam**, Suwarno, Masayuki Hikita,” Characteristics of External Loop Sensor Located Near Bushing on Measurement, IEEE CMD 2012.

2011:

181. Abdul Rajab, **Umar Khayam**, D. Hamdani, Aminuddin S., Suwarno, Y. Abe, M. Tsuchie, M. Kozako, S. Ohtsuka, M. Hikita,” Phase Distribution of Palm Oil as Insulating Liquid”, TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control, Vol 9, No 1, April 2011.
182. **Umar Khayam**, Masayuki Hayashi, Masahiro Kozako, Masayuki Hikita, Toshihiro Hoshino, Shiro Maruyama, Takaaki Sakakibara, Junichi Wada, Sigemitsu Okabe,” *Influence of the Existence of the Epoxy Spacer on*

the Propagation Properties of Induced Electromagnetic Wave in Straight 154 kV GIS Model Tank", International Symposium on High Voltage Engineering, Germany, 2011.

183. **Umar Khayam**, "Periodic Changes of Electric Field Distribution Produced by Three Phase Voltage in Electric Power Apparatus", International Annual Meeting on Science and Technology Studies, Japan, 2011.
184. **Umar Khayam**, "Evaluation of Measurement and Diagnosis Techniques in Three-phase High Voltage Electric Power Apparatus", International Annual Meeting on Science and Technology Studies, Japan, 2011.

2010:

185. **Umar Khayam**, Shinya Ohtsuka, Masayuki Hikita, "Examination of Single Phase PDM Device for PD Diagnosis on Three-phase GIS", International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Vol. 2 No. 3, 2010.

2009:

186. **Umar Khayam**, Yutaro Abe, MotooTsuchie, Masahiro Kozako, Shinya Ohtsuka, Masayuki Hikita, Abdul Rajab, Deny Hamdani, Suwarno, "Study on Characteristics and Dissolved Gas Analysis of Ricinus Oil as Biodegradable Liquid Insulating Materials", IEEJ Joint Conference of Electrical and Electronic Engineers in Kyushu, Iizuka City, JAPAN, Paper 05-2A-02, September 28-29, 2009.
187. Abdul Rajab, **Umar Khayam**, Deny Hamdani, Aminuddin, Suwarno, Yutaro Abe, MotooTsuchie, Masahiro Kozako, Shinya Ohtsuka, Masayuki Hikita, "Study on Properties of Palm Oil as a Candidate of Palm Based Transformer Insulating Liquid", IEEJ Joint Conference of Electrical and Electronic Engineers in Kyushu, Iizuka City, JAPAN, Paper 05-2A-01, September 28-29, 2009.
188. **Umar Khayam**, Satoshi Matsumoto, Shinya Ohtsuka, Masayuki Hikita, "Partial Discharge Characteristics and Cross-interference Phenomena in a Three Phase Construction", International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Vol. I No. 1, 2009.
189. **Umar Khayam**, Hajime Takada, YuuNishiuci, Satoshi Matsumoto, Shinya Ohtsuka, Masayuki Hikita, "Characteristics of a Particle on the Spacer in Three-phase GIS", International Conference on Clean Energy System, Kitakyushu, 2009.

2008:

190. **Umar Khayam**, Yuu Nishiuci, Satoshi Matsumoto, Shinya Ohtsuka, Masayuki Hikita, *“Examination of Single Phase PDM Device for PD Diagnosis on Three-phase GIS”*, *International Conference on Electrical Engineering*, Okinawa, Japan, 2008.

2007:

191. **Umar Khayam**, Toshio Ishitobi, Satoshi Matsumoto, Shinya Ohtsuka, Masayuki Hikita, *“Effect of Elliptical Nature of Rotating Electric Field on Pattern in a Three Phase Construction”*, *IEEJ Transactions on Fundamentals and Material A* Vol. 127 No. 9, 2007.
192. **Umar Khayam**, Toshio Ishitobi, Satoshi Matsumoto, Shinya Ohtsuka, Masayuki Hikita, *“Effect of Foreign Particle on Rotating Electric Field and Characteristics in Three-phase Construction”*, *15th International Symposium on High-Voltage Engineering*, ISH 2007 (Paper 502), Slovenia 2007
193. **Umar Khayam**, Yuu Nishiuci, Satoshi Matsumoto, Shinya Ohtsuka, Masayuki Hikita, *“Measurement and Analysis of Electromagnetic Wave Signal Emitted by in Three-phase GIS using UHF Method”*, *Japan Korea Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering*, Tokyo, Japan, 2007.

2006:

194. **Umar Khayam**, Satoshi Matsumoto, Shinya Ohtsuka, Masayuki Hikita, *“Measurement on Three Phase Construction”*, *IEEE International Conference on Properties and Application of Dielectric Material* (Vol. 1, Paper K-4, pp.301-304), Bali, Indonesia, 2006
195. **Umar Khayam**, Toshio Ishitobi, Satoshi Matsumoto, Shinya Ohtsuka, Masayuki Hikita, *“Effect of Eccentricity of Rotating Electric Field on PD Distribution Pattern in Three-phase Construction”*, *Asian Conference on Electrical Discharge (ACED)*, Hokkaido, Japan 2006.

2005:

196. **Umar Khayam**, Satoshi Matsumoto, Shinya Ohtsuka, Masayuki Hikita, *“Investigation of Characteristics in Air from Artificial Defect under Three Phase Voltage (BEST PAPER AWARD)”*, (Paper PA-2, pp. 100-103), Ansan, Korea 2005.

2002:

197. Parouli Pakpahan, **Umar Khayam**, Tri Naryan, Aldi Anwar, "*Study of Lightning Effect on Induction Voltage of Medium Voltage Distribution Line*", The Indonesian Journal on High Voltage Engineering Vol. IV No. 2, July 2002.

2001:

198. NI Sinisuka, **Umar Khayam**, IGN Satriyadi, "*Availability and Reliability Performance of Power Transformer Operation in Tropical Area using Markov Model*", The Indonesian Journal on High Voltage Engineering Vol. III No. 2, July 2001.
199. NI Sinisuka, **Umar Khayam**, IGN Satriyadi, "*Availability and Reliability Performance of Power Transformer Operation using Markov Model*", CIGRE Cairns Symposium, Australia, 3-7 September 2001
200. NI Sinisuka, **Umar Khayam**, IGN Satriyadi, "*Maintenance scheduling of power transformer using Markov Model*", CIGRE Cairns Symposium, Australia, 3-7 September 2001

1999:

201. NI Sinisuka, **Umar Khayam**, "*Mathematics Modeling of Submarine Power Cables 150 kV in Bali Strait*", International Conference on Mathematics and its Application, Yogyakarta, Indonesia, July 1999.

VII. PENGHARGAAN

1. Best Paper Award, International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, 2024
2. Best Paper Award, Paper I, International Conference on High Voltage Engineering and Power System, 2023
3. Best Paper Award, Paper II, International Conference on High Voltage Engineering and Power System, 2023
4. Best Paper Award 2022.
5. Best Paper Award, AUN/SEED-Net Regional Conference on Energy Engineering (RCEnE 2018), RC63, 2018
6. Best Paper Award, The Second International Conference Industrial, Mechanical, Electrical and Chemical Engineering (IMECE), 2016
7. Best Paper Award, International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, 2014

8. Best Paper Award, Korea-Japan Symposium on High Voltage Engineering and Electrical Discharge, 2005

VIII. SERTIFIKASI

1. Sertifikasi Profesi Insinyur, ITB, 2020
2. Sertifikasi Insinyur Profesional Madya, Persatuan Insinyur Indonesia, 2017
3. Sertifikasi Profesi Insinyur, Persatuan Insinyur Indonesia, 2015



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id [FgbItb](#) [FGB_ITB](#)
📱 [@fgbitb_1920](#) [Forum Guru Besar ITB](#)

