



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Suwarno

**DIAGNOSIS
PERALATAN TEGANGAN TINGGI
DAN SMART GRID**

25 Maret 2011
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

Hak cipta ada pada penulis

**Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**

25 Maret 2011

Profesor Suwarno

**DIAGNOSIS
PERALATAN TEGANGAN TINGGI
DAN SMART GRID**



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Judul: DIAGNOSIS PERALATAN TEGANGAN TINGGI DAN SMART GRID
Disampaikan pada sidang terbuka Majelis Guru Besar ITB,
tanggal 25 Maret 2011.

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah swt atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tulisan ini. Merupakan suatu kehormatan bagi penulis untuk menyampaikan Pidato Ilmiah Guru Besar di ITB di dalam Sidang Majelis Guru Besar ITB. Tulisan ini penulis beri judul "**Diagnosis isolasi Peralatan Tegangan Tinggi dan Smart Grid**" yang berisi sebagian hasil penelitian yang dikerjakan dan arah baru pengembangan keilmuan teknik tegangan tinggi khususnya material dan teknologi isolasi tegangan tinggi.

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada segenap pimpinan dan anggota Majelis Guru Besar ITB atas dorongan dan kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menghasilkan tulisan ini. Tulisan ini penulis selesaikan sebagai salah satu bentuk pertanggung-jawaban akademik penulis sebagai Guru Besar ITB. Kiranya tulisan ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Bandung, 25 Maret 2011

Hak Cipta ada pada penulis
Data katalog dalam terbitan

Suwarno

DIAGNOSIS PERALATAN TEGANGAN TINGGI DAN SMART GRID
Disunting oleh Suwarno

Suwarno

Bandung: Majelis Guru Besar ITB, 2011
vi+86 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-8468-33-6
1. Rekayasa 1. Suwarno

DAFTAR ISI

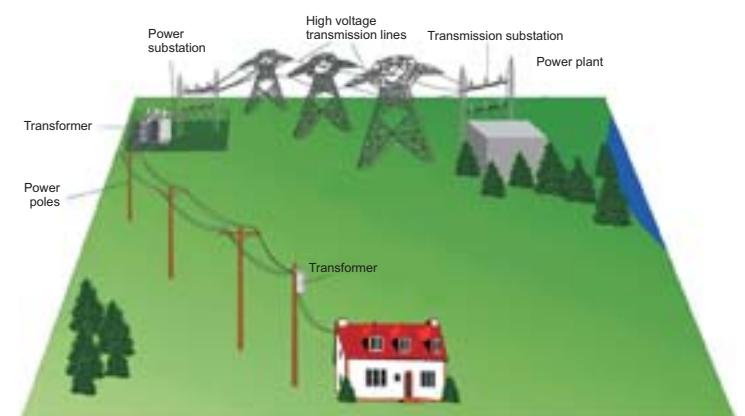
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1. PENDAHULUAN	1
2. PELUAHAN SEBAGIAN (PARTIAL DISCHARGE)	5
2.1 Pendahuluan	5
2.2 Pengukuran Partial Discharge	10
2.3 Model partial discharge	13
2.4 Peluahan korona	14
2.5 Peluahan pada isolasi cair	16
2.6 Peluahan pada isolasi padat	18
2.7 Diagnosis peralatan dengan pola PD	21
3. ARUS BOCOR PADA ISOLATOR	21
3.1 Pengukuran Arus Bocor	21
3.2 Pola arus bocor	22
3.3 Model rangkaian Ekivalen Isolator dan simulasi	24
4. DIAGNOSIS ISOLASI PERALATAN TEGANGAN TINGGI	28
4.1 Diagnosis isolator	28
4.2 Diagnosis mesin listrik	30
4.3 Diagnosis GIS	34
4.4 Diagnosis kabel tenaga	37
4.5 Diagnosis transformator	41

5. SMART GRID	51
6. RENCANA KEGIATAN MENDATANG	53
7. PENUTUP	55
8. UCAPAN TERIMA KASIH	56
REFERENSI	59
CURRICULUM VITAE	69

DIAGNOSIS ISOLASI PERALATAN TEGANGAN TINGGI DAN SMART GRID

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di dunia dan Indonesia naik terus berkembang. Energi listrik sangat diminati karena sangat praktis, mudah dibangkitkan, ditransmisikan, dikendalikan dan dikonversikan ke dalam jenis energi lain. Tingkat konsumsi energi listrik berkorelasi erat dengan tingkat kesejahteraan masyarakat dan berbanding lurus dengan GNP suatu Negara[1-3]. Energi listrik biasanya dibangkitkan di suatu pusat pembangkit listrik, dialirkan melalui jaringan transmisi dan distribusi sebelum sampai pada pengguna berupa industri, komersial, perkantoran maupun perumahan yang terangkai dalam suatu sistem tenaga listrik. Secara umum sistem tenaga listrik tersusun atas pembangkit listrik, saluran transmisi, distribusi dan beban seperti diilustrasikan pada gambar 1[4].



Gambar 1
Ilustrasi suatu
sistem tenaga listrik

Untuk mentransmisikan energi listrik yang besar maka diperlukan sistem transmisi dengan tegangan tinggi, ekstra tinggi atau ultra tinggi. Tegangan transmisi tertinggi di dunia yaitu 1200 kV secara komersial telah dioperasikan untuk mentransmisikan energi listrik dari Ekibashtuz and Kokchetva sepanjang 500 km sejak 1985. Namun transmisi ultra tinggi 1200 kV ini dihentikan sejak kejatuhan Uni Sovyet dan digantikan dengan tegangan 550 kV. Saat ini China mengoperasikan sistem kelistrikan dengan tegangan transmisi tertinggi yaitu 1000 kV di Jindognan-Nanyang-Jingmen sepanjang 650 km [5-7].

Dengan kapasitas daya terpasang 31 GW (kapasitas dunia sekitar 5.000 GW), Indonesia saat ini mengoperasikan level tegangan 500 kV, 275 kV, 150 kV dan 70 kV untuk sistem transmisi dan 20 kV dan 220/380 V untuk distribusi. Sistem transmisi tegangan ekstra tinggi (*extra high voltage, EHV*) 500 kV merupakan *back bone* sistem kelistrikan Jawa-Bali dengan 16 gardu induk konvensional dan 6 *Gas Insulated Substation (GIS)* dan lebih dari 5.074 km-circuit saluran transmisi EHV. Transmisi EHV dengan tegangan 275 kV digunakan di Sumatra. Saat ini dioperasikan 38 buah transformator dengan level tegangan 500/150 kV, 4 buah dengan level tegangan 275/150 kV, 64 buah dengan level tegangan 150/70 kV, 714 buah dengan level tegangan 150/20 kV serta 145 buah transformator dengan level tegangan 70/20 kV[8-9].

Dalam suatu sistem kelistrikan terdapat sejumlah peralatan utama tegangan tinggi seperti generator, transformator, isolator dan kabel .

Setiap peralatan tegangan tinggi mempunyai sistem isolasi untuk memisahkan antara bagian bertegangan dengan bagian bertegangan lain dan bagian bertegangan dengan netral.

Isolasi suatu peralatan listrik tegangan tinggi memegang peranan yang sangat penting bagi operasi normal peralatan tersebut. Kontribusi kegagalan peralatan akibat kegagalan isolasi dan kontribusi kegagalan peralatan terhadap kegagalan sistem kelistrikan ditunjukkan dalam tabel 1.

Tabel 1

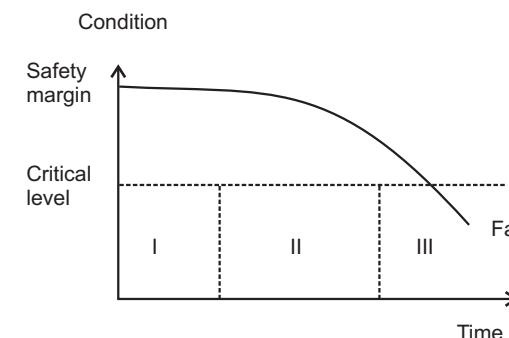
Kontribusi terhadap kegagalan sistem dan kegagalan peralatan tegangan tinggi akibat masalah isolasi [10,11]

Peralatan	Kontribusi Terhadap Kegagalan Sistem (%)	Kegagalan Akibat Gagalnya Isolasi (%)
Isolator	35	90
Generator	15	47
Transformator	12	84
GIS & switchgear	15	95
Kabel	10	89

Selama beroperasi peralatan mengalami berbagai beban (*stress*) yang dapat mengurangi kekuatan isolasi. Secara umum beban yang dialami dapat dikelompokkan menjadi *Thermal, Electrical, Ambient dan Mechanical (TEAM)*. Beban termal dapat berupa temperatur maksimum, beban tinggi, *temperature gradient* maupun siklus temperatur. Beban listrik dapat berupa

tegangan (AC,DC atau impuls), arus dan frekuensi. Beban lingkungan dapat berupa gas, kelembaban, radiasi UV atau zat kimia sedangkan beban mekanik dapat berupa gaya tarik, kompresi maupun vibrasi.

Akibat penuaan tingkat kondisi isolasi dapat menurun dan bila telah berada di bawah level kritis kegagalan peralatan akan terjadi sebagaimana gambar 2.



Gambar 2: Tipikal level kondisi peralatan tegangan tinggi sebagai fungsi waktu

Perawatan (*maintenance*) dan *remedial repair* dapat dilakukan untuk menaikkan kondisi isolasi peralatan agar berada di atas level kritis. Strategi perawatan peralatan tegangan tinggi merupakan kunci mempertahankan peralatan agar tetap beroperasi normal. Strategi perawatan peralatan dapat dilakukan dengan (i) *Breakdown maintenance*, BM (ii) *Time based maintenance*, TBM, (iii) *Condition based maintenance*, CBM dan (iv) *Reliability centered maintenance*, RCM. Pada *condition based maintenance* (CBM) pemeliharaan peralatan didasarkan atas kondisi peralatan tersebut

sehingga sangat ditentukan oleh kualitas diagnosis yang diterapkan.

Kegagalan peralatan utama dapat menyebabkan terputusnya pasokan listrik. Dalam kondisi terburuk dapat menyebabkan *blackout* seperti yang terjadi pada tanggal 14-15 Agustus 2003 di Amerika yang memutuskan aliran listrik pada 55 juta pelanggan atau seperti di Jawa-Bali pada tanggal 18 Agustus 2005 yang dirasakan oleh 100 juta orang dan menjadi *blackout* dengan jumlah orang kehilangan pasokan listrik terbanyak dalam sejarah.

2. PELUAHAN SEBAGIAN (PARTIAL DISCHARGE)

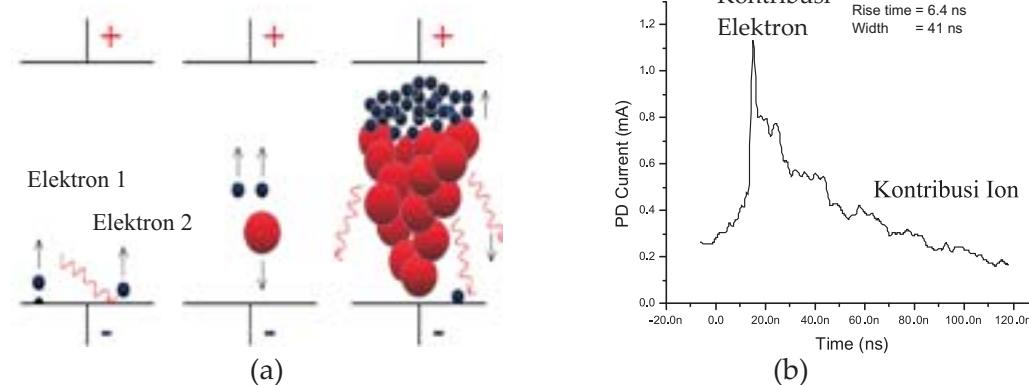
2.1 Pendahuluan

Dalam suatu peralatan tegangan tinggi terdapat isolasi dari jenis gas, cair atau padat. Isolasi akan menahan medan tinggi.

Partial discharge (PD) akan muncul ketika medan listrik dalam void atau gelembung melebihi kekuatan medan listrik gas dalam void atau gelembung tersebut. Menurut standar IEC No 60270: 2000[12] partial discharge didefinisikan sebagai peluahan listrik yang hanya menjem-batani sebagian dari isolasi diantara konduktor.

Partial discharge muncul akibat medan tinggi lokal pada bagian tertentu di dalam atau permukaan isolasi. Ketika tegangan AC diterapkan pada suatu kondisi tertentu ada suatu harga tegangan dimana PD tidak akan terjadi apabila tegangan yang diterapkan di bawah tegangan ini.

Tegangan ini disebut dengan tegangan insepsi PD (V_i). Meskipun tegangan dinaikkan hingga harga tegangan percik (*spark voltage*), PD tidak akan terjadi hingga tersedia elektron awal yang akan memulai proses PD. Ketersediaan elektron awal ini bersifat stokastik dan menjadi penyebab karakteristik stokastik PD. Proses terjadinya PD diilustrasikan pada gambar 3(a).

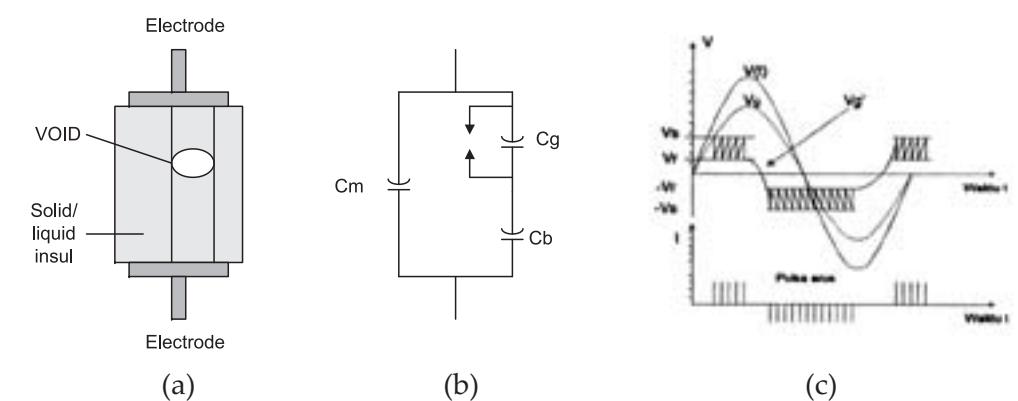


Gambar 3: Proses peluahan (a) avalanche elektron and (b) tipikal arus peluahan (korona)

Elektron awal dapat muncul dari katoda akibat emisi medan listrik tinggi (elektron 1) atau akibat efek fotolistrik (elektron 2). Elektron panas dengan energi tinggi bergerak di dalam gas dan menyebabkan terjadinya *electron avalanche*. Pergerakan elektron dan ion positif berkontribusi terhadap arus peluahan masing-masing untuk bagian waktu daki (*rise time*) dan bagian ekor. Tipikal arus peluahan adalah beberapa μA sampai mA sedangkan waktu beberapa ns.

Tipikal arus peluahan pada susunan elektroda jarum Ogura 3 μm di udara ditunjukkan pada gambar 3(b). Bagian muka hingga puncak gelombang merupakan arus elektron dengan kecepatan tinggi sedangkan bagian ekor merupakan arus ion positif dengan kecepatan yang lebih rendah.

Suatu isolasi padat atau cair dengan void atau gelembung gas dan rangkaian ekivalennya ditunjukkan pada gambar 4(a) dan 4(b).



Gambar 4: Isolasi dengan void (a) rangkaian ekivalen (b) dan pulsa PD (c)

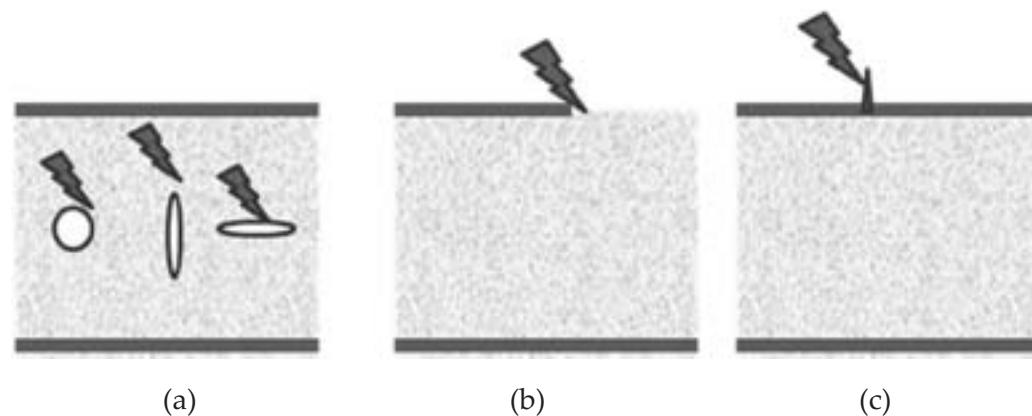
C_g adalah kapasitansi void, C_b adalah kapasitansi seri dari isolasi dan C_m adalah kapasitansi bagian isolasi lainnya. Pada saat tidak ada peluahan dan tegangan yang diterapkan $v(t)$ maka tegangan pada void adalah

$$v_g(t) = \frac{C_b}{C_g + C_b} v(t) \quad (1)$$

Pada saat tegangan AC dengan amplitudo melebihi tegangan insepsi

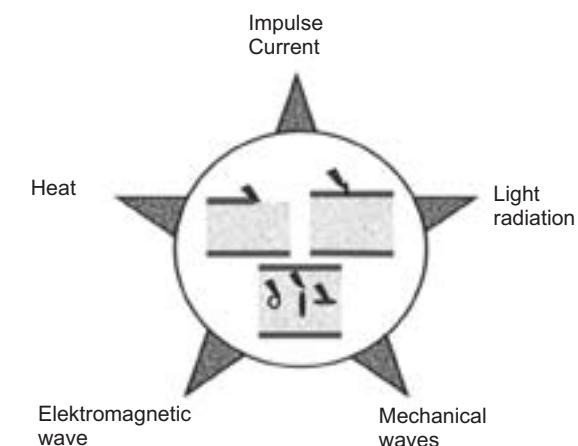
hingga mencapai V_s maka dimungkinkan terjadi peluahan. Tegangan void akan jatuh hingga ke tegangan sisa V_r . Selanjutnya tegangan void naik lagi. Bila tegangan yang diberikan cukup tinggi maka dimungkinkan terjadi peluahan berkali-kali dalam setengah siklus yang sama seperti ditunjukkan pada gambar 4(c).

Secara umum ada 3 tipe sumber PD yaitu internal PD (a), peluahan permukaan (b) dan korona (c) sebagaimana ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5: Sumber PD (a) internal (b) permukaan (c) korona

PD pada suatu peralatan tegangan tinggi akan mengeluarkan energi dalam berbagai bentuk seperti ditunjukkan pada gambar 6. Aliran elektron dan ion menghasilkan arus peluahan berbentuk impuls. Apabila arus ini diintegrasikan maka diperoleh muatan peluahan. Peluahan akan mengemisikan radiasi terutama dalam kisaran ultra violet (UV).



Gambar 6: Energi yang dihasilkan oleh PD

Tabel 2: Sinyal PD, sensor dan aplikasi

SINYAL PD	SENSOR	APPLIKASI
Gelombang EM	Elektroda UHF, Antena	GIS, Switchgear, Saluran udara
Tegangan dari impuls arus	Coupling Capacitor	Mesin listrik, kabel
Arus Impuls	Transformator arus frekuensi tinggi (HF CT)	Kable, transformator
Suara/Vibrasi	Sensor Ultrasonic (AE)	Transformator, GIS
Cahaya	Sensor Pockels UV camera	GIS, isolator, transformator
Panas	IR Camera	Isolator, Mesin listrik

Intensitas UV sangat tergantung dari besar dan jumlah PD. PD merupakan fenomena impuls yang menghasilkan impuls mekanik yang akan merambat dalam bentuk gelombang akustik. Dalam kondisi khusus

seperti pada *gas insulated sub station* (GIS) gelombang akustik cukup kuat dan dapat dideteksi dalam rangka diagnosis kondisi. PD juga mengemisikan gelombang electromagnet yang dapat dideteksi dengan antena. PD juga menghasilkan panas yang akan menaikkan temperature di sekitar lokasi terjadinya PD. Energi yang dihasilkan oleh PD dapat dijadikan sinyal untuk deteksi PD dengan menggunakan sensor yang sesuai seperti ditunjukkan pada tabel 2.

2.2 Pengukuran Partial Discharge

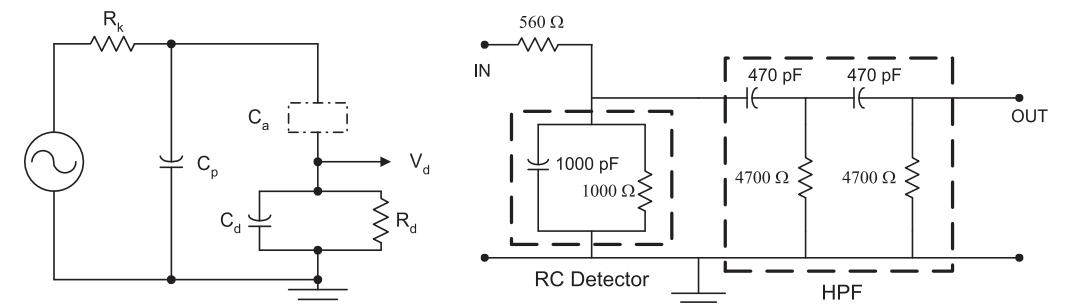
Perkembangan komputer telah meningkatkan kemampuan pengukuran di berbagai bidang. Pengukuran PD berbasis komputer (*Computer-aided PD measurement systems*) memungkinkan diperoleh data PD lebih detail dalam jumlah yang besar dengan kandungan informasi yang lebih lengkap. Tipikal rangkaian deteksi arus PD ditunjukkan pada gambar 7. Frekuensi *cut off* bawah sistem pengukuran ini adalah sekitar 250 kHz. Rangkaian berfungsi sebagai integrator sehingga tegangan keluaran V_d sebanding dengan integrasi arus PD yang tidak lain adalah muatan PD. Dengan sistem pengukuran seperti ini sejumlah parameter PD seperti muatan, jumlah PD dan sudut phasa terjadinya PD dapat diperoleh dan disimpan untuk analisa lebih lanjut.

Tegangan output yang detector PD dapat dinyatakan sebagai

$$V_d(t) = \frac{1}{C_d} \int_0^t i(t) dt \quad (2)$$

Besarnya muatan PD akan sebanding dengan tegangan output sesuai dengan persamaan

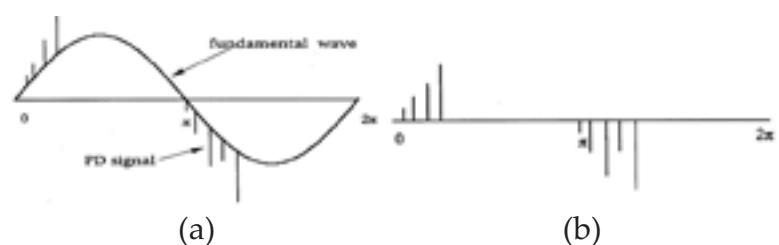
$$q \approx V_d \cdot C_d \quad (3)$$



Gambar 7: Diagram pengukuran of PD

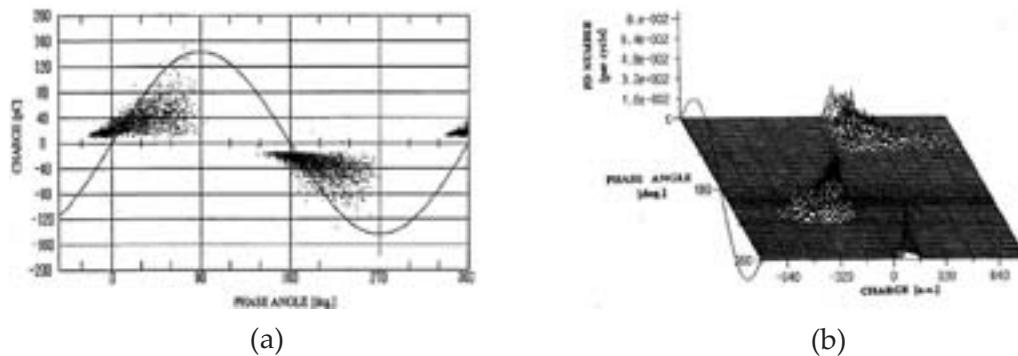
R_k	= resistor pembatas arus	C_p	= kapasitansi uji
C_a	= kapasitansi sampel,	C_d	= kapasitansi deteksi
R_d	= resistor deteksi	V_d	= tegangan output

Secara umum suatu sinyal PD dinyatakan dalam besar muatan (q) dalam pC dan sudut phasa (ϕ) dari tegangan dimana PD terjadi. Pada suatu siklus tertentu PD disertai dengan komponen fundamental 8(a). Dengan penggunaan *high pass filter* maka komponen frekuensi rendah dapat dihilangkan dan diperoleh hanya sinyal PD seperti diilustrasikan pada gambar 8(b).



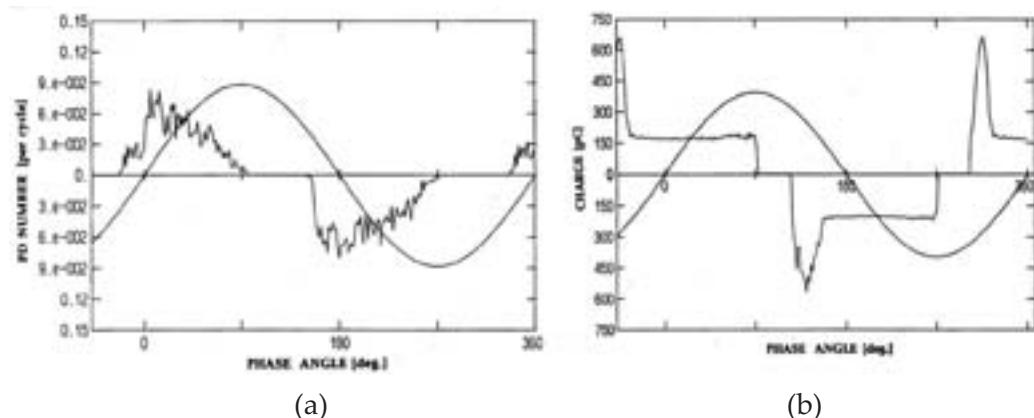
Gambar 8: Pulsa PD dengan (a) dan tanpa (b) gelombang fundamental

PD dapat juga dinyatakan dalam pola (ϕ -q-n) seperti 9(a) dan dalam gambar tiga dimensi 9(b).



Gambar 9: PD digambarkan dalam (a) pola ϕ -q-n (b) 3 dimensi

Suatu pola ϕ -q-n dapat disederhanakan menjadi pola ϕ -n dan ϕ -q seperti pada gambar 10. Pola-pola seperti ini sangat berguna untuk keperluan diagnosis isolasi tegangan tinggi [13-14].



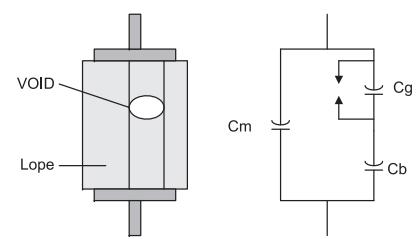
Gambar 10: PD digambarkan dalam pola (a) ϕ -n dan (b) ϕ -q

2.3 Model *partial discharge*

Interpretasi data PD menjadi penting dalam rangka diagnosis modern peralatan tegangan tinggi. Whitehead mengusulkan model PD pada tahun 1953[15]. Pada model tersebut suatu partial discharge di dalam isolasi padat dinyatakan dengan kapasitansi dan sela percik seperti pada gambar 11.



Whitehead (1872-1954)



Gambar 11: Whitehead dan rangkaian ekivalen PD

Model ini telah dipergunakan secara luas untuk menjelaskan fenomena peluahan sebagian di dalam isolasi padat[16-20]. Atas jasa yang besar ini maka nama Whitehead telah diabadikan sebagai nama IEEE Award di bidang material dan teknik isolasi tegangan tinggi sejak 1984. Prof. Devins adalah penerima IEEE Whitehead Award yang pertama[16]. Penerima IEEE Whitehead Award sepuluh tahun terakhir tertera pada tabel 3.

Tabel 3: Penerima IEEE Whitehead Memorial Lecture Award

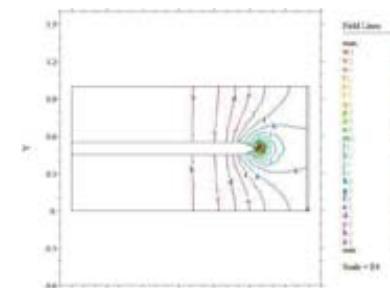
TAHUN	PENERIMA AWARD	TAHUN	PENERIMA AWARD
2001	J.K. Nelson (US)	2006	T. Mizutani (Japan)
2002	L. Dissado (UK)	2007	Y. Ohki (Japan)
2003	T. Tanaka (Japan)	2008	S. Bamji (Canada)
2004	J.P. Crine (US)	2009	K. Friedrich (Germany)
2005	E. Cherney (Canada)	2010	G.C. Montanari (Italy)

Namun demikian, dengan perkembangan teknik pengukuran PD dan muatan ruang maka model PD Whitehead gagal untuk menjelaskan beberapa fenomena terkait PD seperti PD pemohonan listrik, korona dan GIS [21-23]. Modifikasi dari model PD diperlukan untuk menjelaskan PD terutama di dalam isolasi padat akibat peran muatan ruang dalam peristiwa PD. Model baru dari PD diusulkan berdasarkan pada suatu rangkaian ekivalen[24-29]. Pola-pola PD disimulasikan dengan komputer untuk mendalami perilaku PD pada berbagai jenis isolasi[30-35].

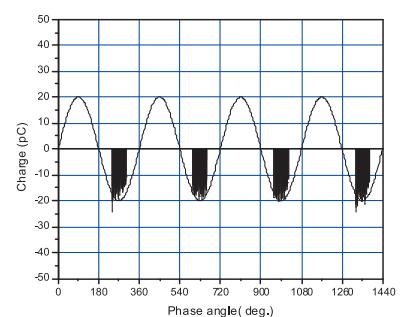
2.4 Peluahan Korona

Korona adalah peluahan muatan listrik di udara yang terjadi di daerah dengan medan sangat tinggi. Contoh distribusi medan listrik dan pola korona pada suatu ujung jarum dengan sudut kurvatur 30° dan radius ujung $3 \mu\text{m}$ pada tegangan sinusoidal tertera pada gambar 12 dan 13. Pola ϕ -q-n dan ϕ -n secara jelas menunjukkan bahwa peluahan terjadi pada setengah siklus negatif dan terkonsentrasi pada daerah puncak

gelombang tegangan. Hal ini menunjukkan peran penting dari tegangan dalam proses kejadian PD. Magnitudo peluahan juga sebanding dengan tegangan sesaat.

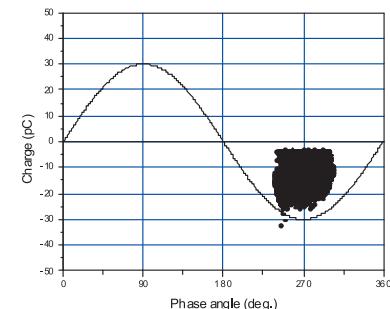


(a)

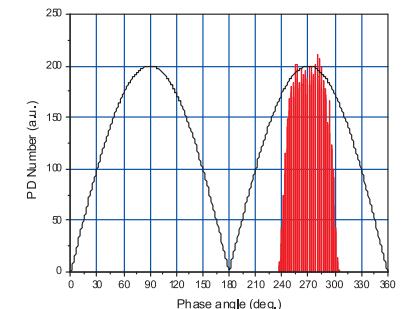


(b)

Gambar 12: Distribusi medan di sekitar ujung jarum (a) dan pulsa peluahan dalam 4 siklus untuk susunan jarum pelat 4mm dan tegangan 1.3 kV



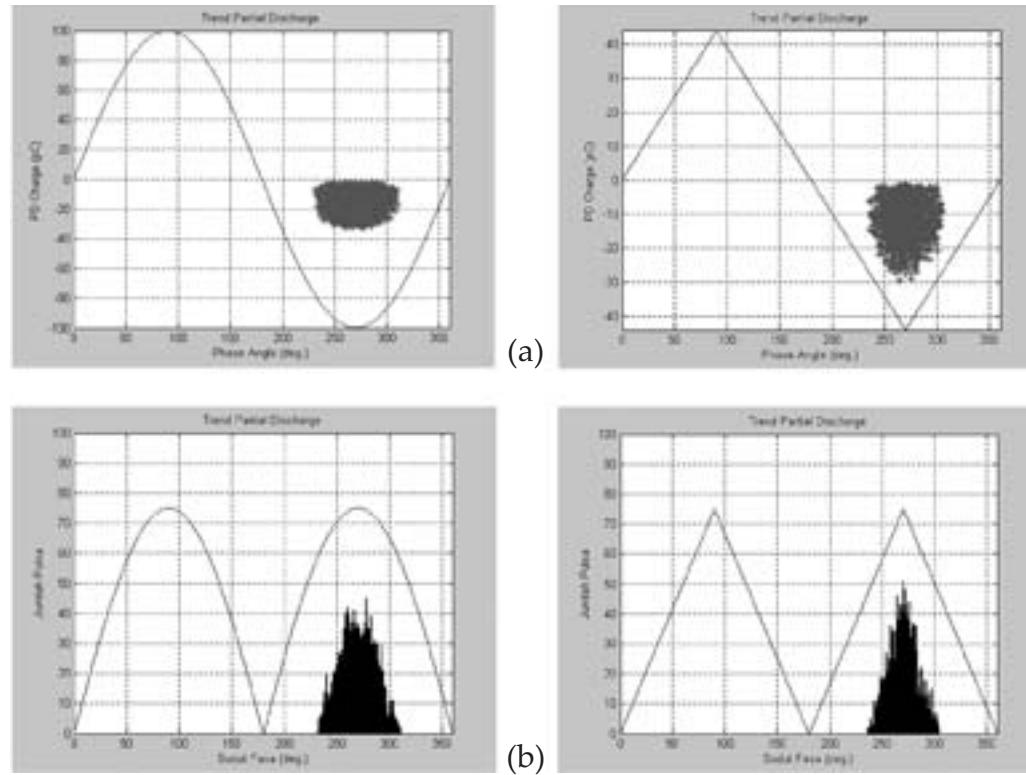
(a)



(b)

Gambar 13: Tipikal pola peluahan korona (a) ϕ -q-n dan (b) ϕ -n pada tegangan sinusoidal

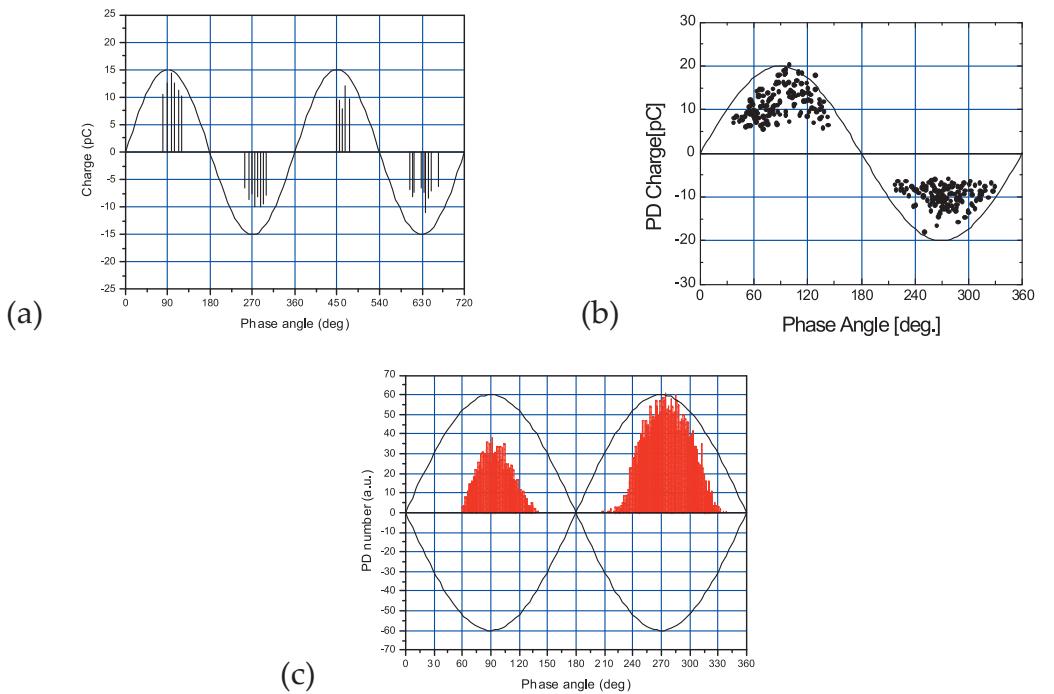
Simulasi computer dilakukan dengan dasar hasil pengukuran menggunakan model Whitehead termodifikasi. Tipikal pola PD hasil simulasi ditampilkan pada gambar 14.



Gambar 14: Tipikal hasil simulasi PD (a) pola ϕ -q-n (c) pola ϕ -n untuk tegangan sinusoidal dan segitiga

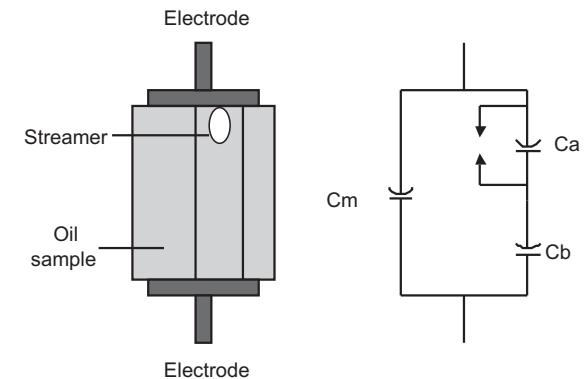
2.5 Peluahan pada isolasi cair

Peluahan juga mungkin terjadi di dalam isolasi cair dalam bentuk *streamer*. Tegangan insepsi peluahan pada isolasi cair (minyak silikon) dengan viskositas 100 cS elektroda jarum 3 μ m-pelat dan sela 4 mm adalah 6.7 kV yang berkorelasi dengan medan sekitar 7.4 MV/m. Tipikal pola PD tertera pada gambar 15.



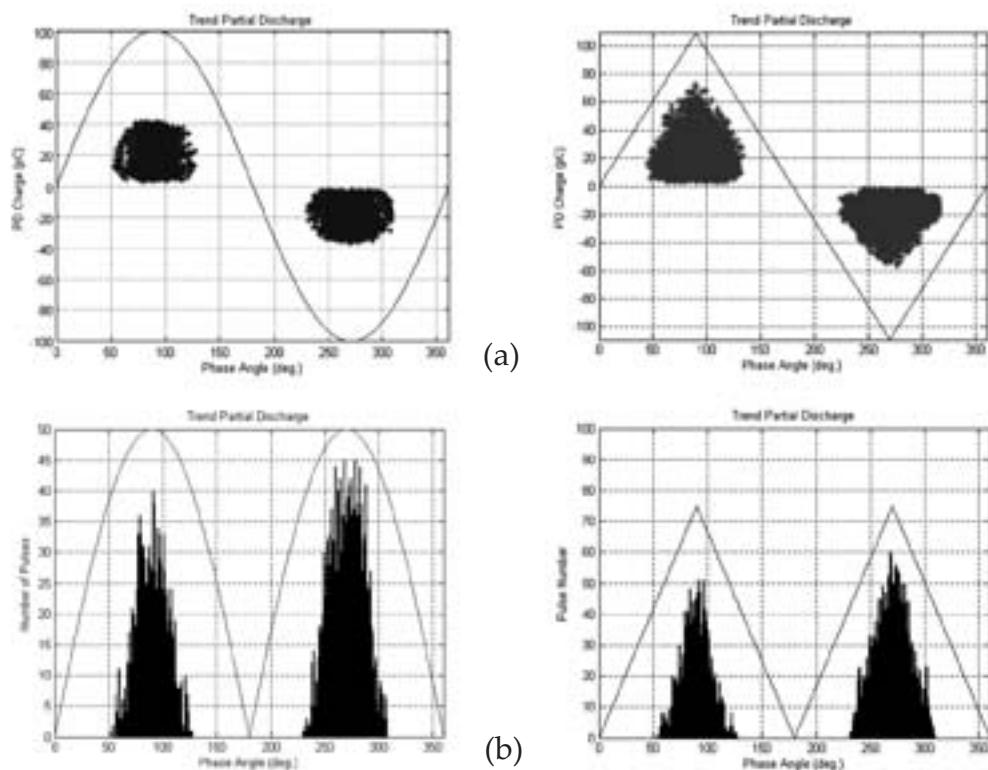
Gambar 15: Tipikal pola PD (a) pulsa PD (b) ϕ -q-n dan (c) ϕ -n untuk tegangan sinusoidal 8 kV

Dari hasil ini suatu model rangkaian ekivalen PD pada isolasi cair dapat digambarkan seperti pada gambar 16.



Gambar 16: Rangkaian ekivalen PD pada isolasi cair

Berdasarkan rangkaian ekivalen tersebut maka dilakukan simulasi PD untuk isolasi cair. Tipikal pola PD yang diperoleh dari simulasi untuk tegangan sinusoidal dan segitiga ditampilkan pada gambar 17.

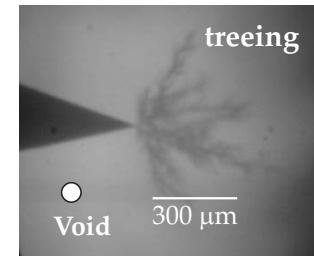


Gambar 20: Tipikal hasil simulasi PD dalam isolasi cair (a) pola ϕ -q-n (b) pola ϕ -n untuk tegangan sinusoidal dan segitiga

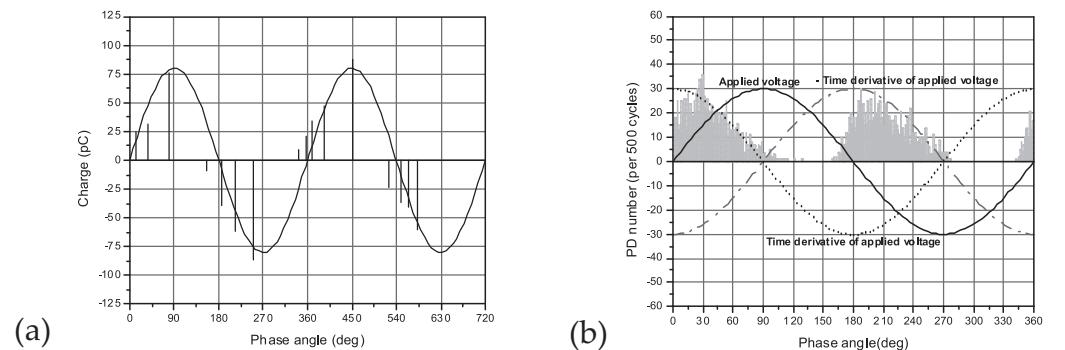
2.6 Peluahan pada isolasi padat

Di dalam isolasi padat PD dapat muncul dari suatu void atau *electrical treeing* seperti diilustrasikan pada gambar 18. *Electrical treeing* atau pemohonan listrik dikenalkan oleh D.W. Kitchin dan O.S. Pratt pada tahun 1958 di dalam polyethylene [36]. Pemohonan listrik menjadi penyebab

kegagalan isolasi padat khususnya polimer. Void di dalam isolasi padat juga menginduksikan PD dan dalam jangka panjang selalu diikuti kemunculan pemohonan listrik dimana pola PD ditampilkan pada gambar 18.



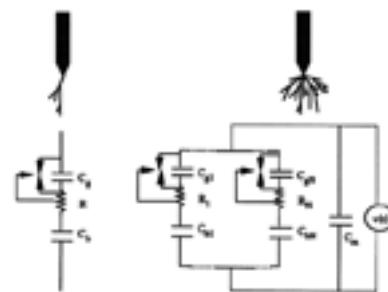
Gambar 18: Electrical treeing dan void di dalam isolasi padat



Gambar 19: Tipikal pola PD pada electrical treeing untuk tegangan sinusoidal (a) urutan pulsa dan (b) θ -n

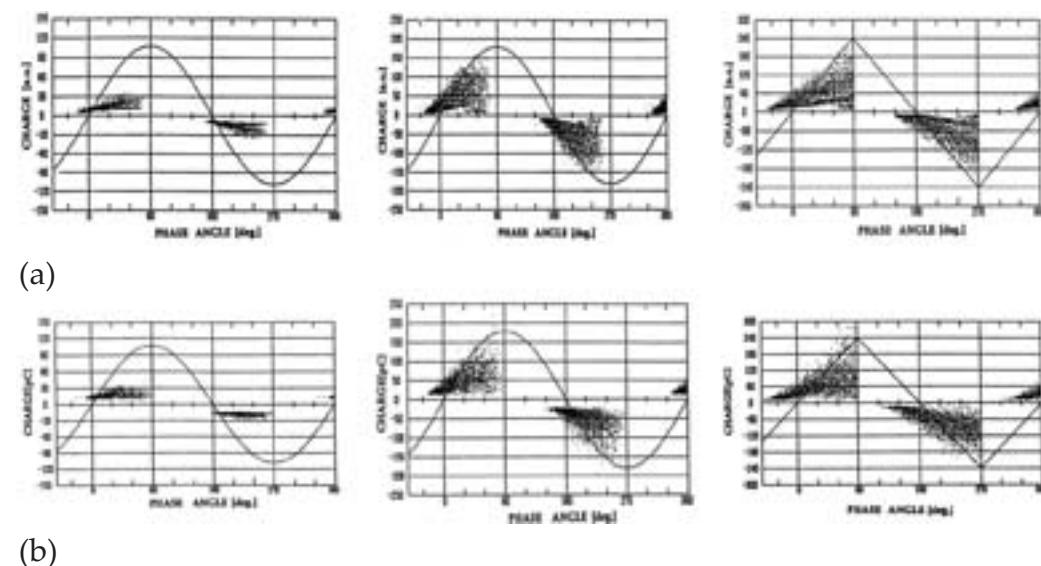
Karakteristik peluahan akibat pemohonan listrik dapat disarikan sebagai: (a) muatan proporsional terhadap tegangan, (b) kejadian PD sebanding dengan turunan waktu dari tegangan (dv/dt), (c) ada tegangan ambang dimana PD tidak terjadi bila tegangan lebih kecil dari tegangan

ambang. Rangkaian ekivalen PD untuk pemohonan listrik digambarkan seperti gambar 20.



Gambar 23: Rangkaian ekivalen pemohonan listrik[21]

Simulasi PD dilakukan berdasar rangkaian ekivalen tersebut. Tipikal hasil simulasi tertera pada gambar 21.



Gambar 21: Pola PD (a) hasil simulasi (b) hasil pengukuran

2.7 Diagnosis peralatan dengan pola PD

Tujuan utama diagnosis isolasi peralatan tegangan tinggi adalah menentukan kualitas dari isolasi. PD sangat erat kaitannya dengan kerusakan isolasi. Diagnosis isolasi dengan menggunakan PD secara prinsip terdiri dari 2 tahap yaitu penentuan sumber PD (jenis dan lokasi kerusakan isolasi) dan intensitas PD (jumlah dan besar) yang mengindikasikan tingkat kerusakan isolasi.

Setelah jenis sumber PD ditentukan maka langkah berikutnya adalah menentukan tingkat PD dan seberapa bahaya kerusakan isolasi yang terjadi. Besar PD (dalam pC) dan jumlah pulsa PD per satuan waktu merupakan ukuran terpenting untuk menentukan tingkat kerusakan isolasi tegangan tinggi.

3. ARUS BOCOR PADA ISOLATOR

3.1 Pengukuran Arus bocor

Isolator pasangan luar terterpa lingkungan secara langsung. Akibat kondisi lingkungan dan medan listrik tinggi maka arus bocor (*leakage current*, LC) dapat mengalir pada permukaan isolator. Arus bocor yang besar dapat merusak permukaan isolator dan merupakan rugi-rugi energi. Gambar 22 menunjukkan isolator di daerah polusi (a) dan isolator gagal (b).



(a)



(b)

Gambar 22: Isolator di daerah terpolusi (a) dan isolator gagal (b)

Gelombang arus bocor dapat diukur dengan menggunakan osiloskop. Arus bocor secara umum terdistorsi dari bentuk sinusoidal dan mengandung harmonik. Untuk kuantifikasi harmonik arus bocor dipergunakan THD (*total harmonic distortion*) yang didefinisikan sebagai:

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \quad (4)$$

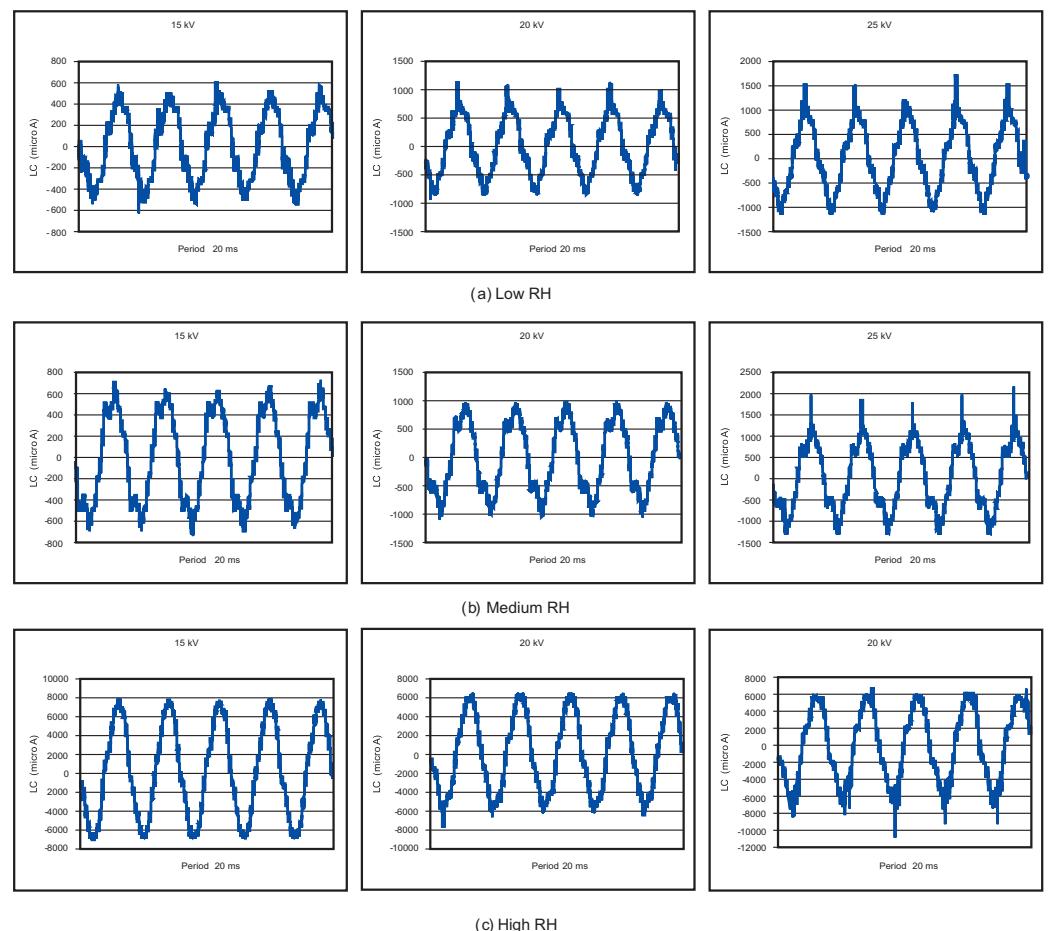
dimana I_1 = harmonik pertama (fundamental)

I_n = harmonik ke n untuk $n=2,3,4,\dots$

3.2 Pola arus bocor

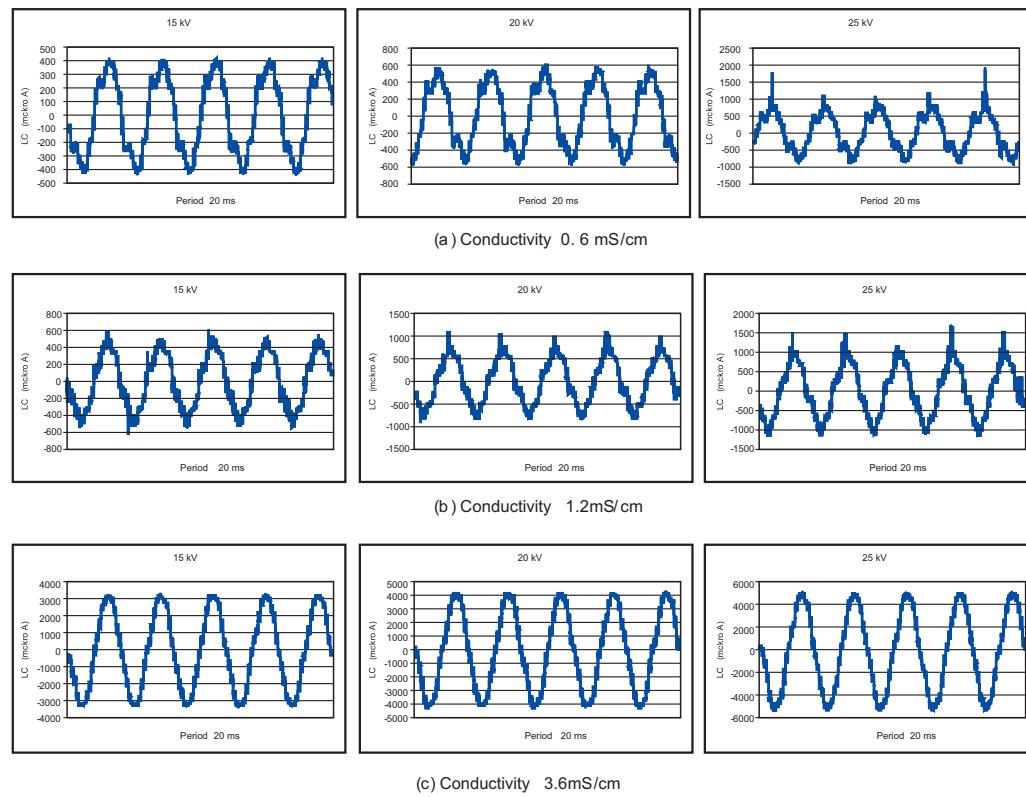
Gambar 23 menunjukkan bentuk gelombang arus bocor isolator bersih dalam kabut garam 1.2 mS/cm pada berbagai tingkat kelembaban. Pada kelembaban rendah peluahan positif mulai muncul pada tegangan

sekitar 20 kV dan semakin intensif dengan kenaikan tegangan. Pada kelembaban tinggi distorsi dominan muncul pada setengah gelombang negatif. Perbedaan ini terjadi karena kemunculan muatan pemicu peluahan terjadi pada setengah siklus yang berbeda untuk tingkat kelembaban yang berbeda. Pada kelembaban rendah peluahan dipicu oleh muatan dari udara sekitar permukaan namun pada kelembaban tinggi berasal dari lapisan isolator yang mengikat polutan garam.



Gambar 23: Tipikal bentuk gelombang arus bocor untuk isolator bersih dalam kabut garam 1.2 mS/cm dan tegangan 15, 20 and 25 kV[37]

Gambar 24 menunjukkan bentuk gelombang arus bocor pada kabut garam dengan tingkat konduktivitas yang berbeda-beda. Arus bocor mengalami kenaikan dengan kenaikan konduktivitas namun tingkat distorsi (THD)menurun.

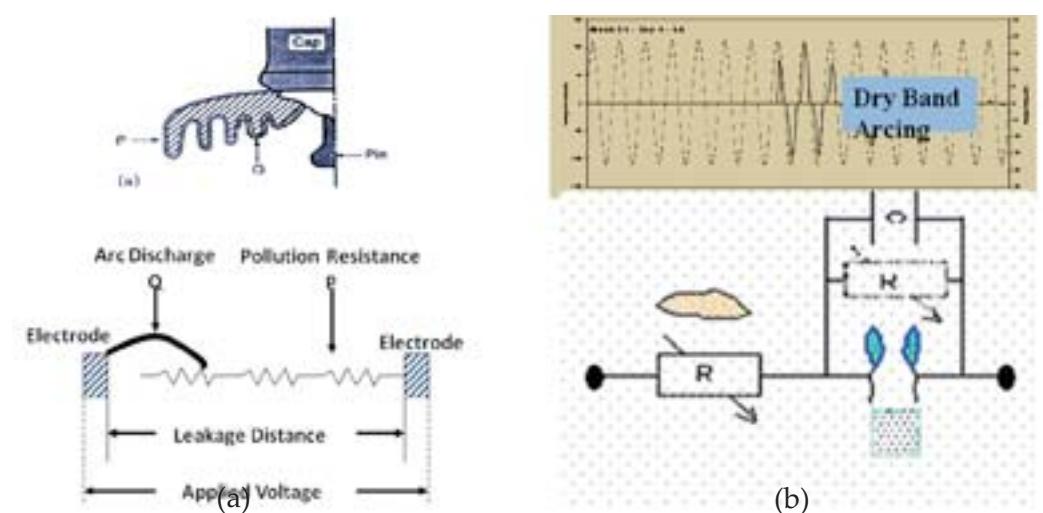


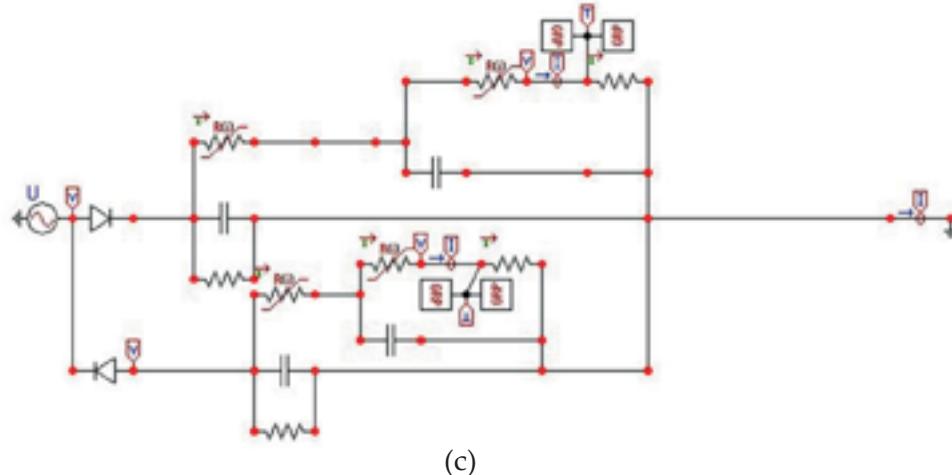
Gambar 24: Bentuk gelombang arus isolator dalam kabut garam 0.6, 1.2 and 2.4 mS/cm dan tegangan 15, 20 dan 25 kV.

3.3 Model rangkaian Ekivalen Isolator dan simulasi

Sejumlah peneliti telah melakukan penelitian tentang flashover isolator dan arus bocor. Obenous mengusulkan suatu model isolator flashover pada tahun 1958 sebagaimana gambar 32 (a)[38]. Model ini telah

dipergunakan secara luas untuk menjelaskan fenomena flashover isolator pasangan luar [39-41]. Namun demikian model Obenous tidak menjelaskan fenomena arus bocor isolator. Gelombang arus bocor terdistorsi telah dilaporkan oleh sejumlah peneliti [42-44]. Pada tahun 2002, Vosloo mengusulkan suatu model arus bocor terdistorsi simetri pada saat terjadi busur pita kering [45]. Model ini ditunjukkan pada gambar 32(b). Telah dilaporkan bahwa pada kondisi tertentu arus bocor pada isolator menjadi tak simetris [46-49].

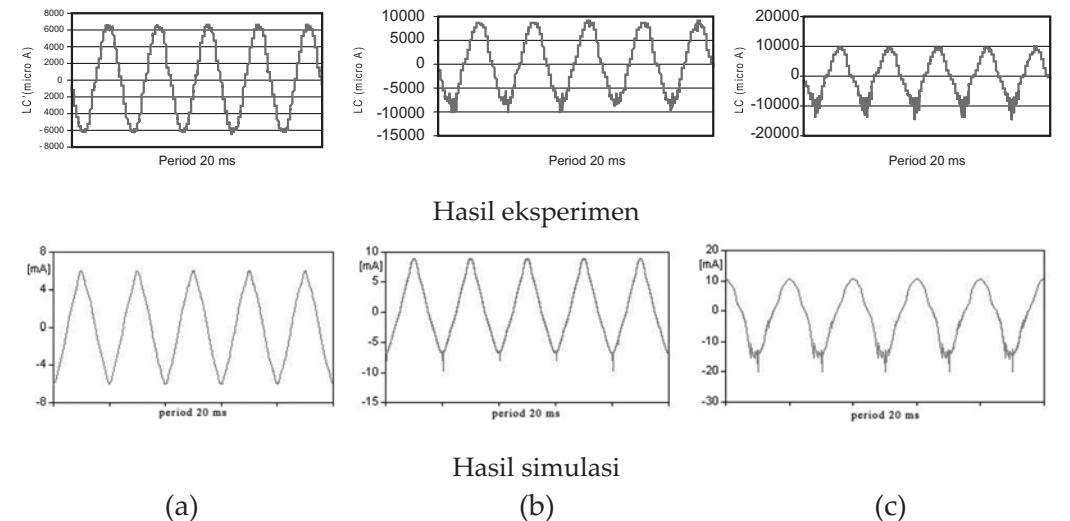




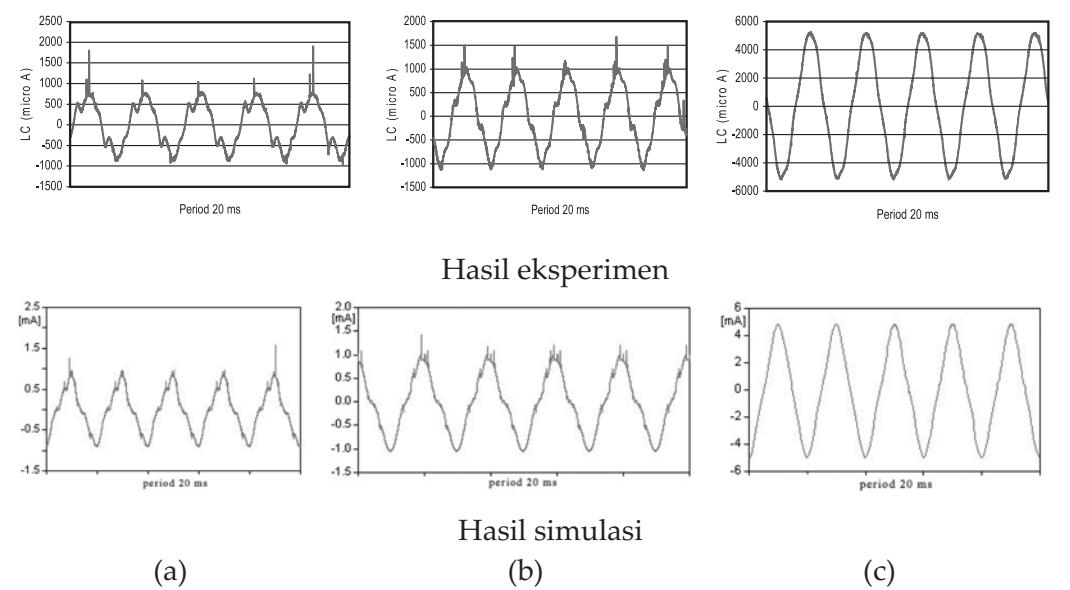
Gambar 25: Model isolator (a) model Obenau (b) model Vosloo dan (c) model Suwarno.

Pada 2009, Suwarno et al mengklasifikasikan adanya 4 jenis bentuk gelombang arus bocor yaitu (a) arus bocor tak terdistorsi (b) arus bocor terdisorsi simetris (c) arus bocor terdistorsi positif dominan dan (d) arus bocor terdistorsi negatif dominan. Berdasarkan bentuk gelombang arus bocor tersebut Suwarno mengusulkan rangkaian ekivalen isolator pasangan luar[48]. Rangkaian ekivalen umum tersebut ditunjukkan pada gambar 25(c). Rangkaian ekivalen diuji dengan suatu simulasi dengan memanfaatkan program ATP/EMTP [48-51]. Kesesuaian antara arus bocor hasil simulasi dan pengukuran dievaluasi dengan menggunakan 4 indikator yaitu (a) magnitude arus bosor (b) THD (c) komponen harmonic dominan dan ketidak simetrisan.

Gambar 26 menunjukkan gelombang arus bocor hasil pengukuran dan simulasi untuk isolator terpolusi kaolin-garam dalam kabut bersih.



Gambar 26: Tipikal bentuk gelombang arus bocor dari pengukuran dan simulasi untuk isolator terpolusi kaolin-garam pada tegangan (a) 5 kV, (b) 10 kV dan (c) 15 kV.



Gambar 27: Tipikal bentuk gelombang arus bocor hasil eksperimen dan simulasi untuk isolator bersih pada kabut garam (a) 0.6, (b) 1.2 dan (c) 3.6 mS/cm pada tegangan 25 kV.

Gambar 27 menunjukkan tipikal bentuk gelombang arus bocor isolator bersih dalam kabut garam dengan berbagai tingkat konduktivitas pada tegangan 25 kV hasil eksperimen dan simulasi.

4. DIAGNOSIS ISOLASI PERALATAN TEGANGAN TINGGI

4.1 Diagnosis isolator

Dari penelitian bentuk gelombang didapatkan 5 bentuk gelombang arus bocor yang berkaitan dengan kondisi isolator baik dalam kondisi normal hingga sebelum isolator mengalami kegagalan yaitu kondisi pre flashover. Karakteristik arus bocor dari kelima kondisi ditampilkan pada tabel 4.

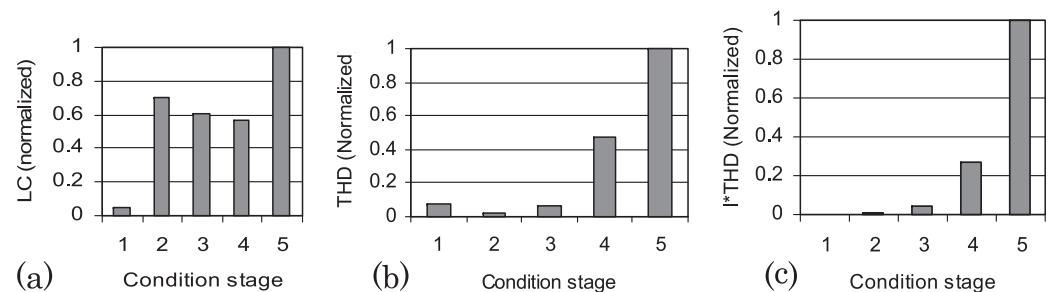
Tabel 4:

Karakteristik arus bocor pada berbagai tingkat kondisi isolator [46]

STAGE	LC MAGNITUDE	WAVEFORM	HARMONIC COMPONENT	THD
1 (normal)	Low	distorted	Odd - small	Medium
2	High	sinusoidal	Odd- very small	Low
3	High	Symmetrical-distorted	Odd - medium	Medium
4	High	Symmetrical - distorted	Odd - high	High
5 (pre flash over)	High	Unsymmetrical-highly distorted	Odd and even Very high	High

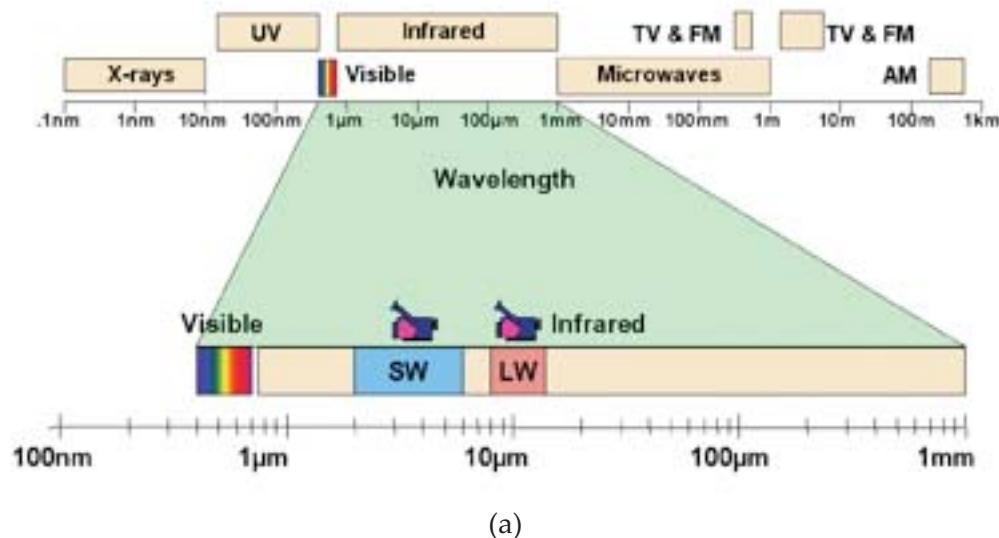
Selama ini magnitudo arus bocor dijadikan sebagai kriteria untuk

diagnosis kondisi isolator. Dengan memanfaatkan bentuk gelombang arus bocor diagnosis kondisi isolator menjadi lebih akurat seperti diperlihatkan pada gambar 28.



Gambar 28: Korelasi antara indicator arus bocor dan tingkat kondisi isolator (a) Magnitudo, (b) THD dan (c) perkalian antara magnitude dan THD

Perkalian antara THD dan magnitudo arus bocor berkorelasi dengan kondisi isolator sebesar 0.9999. Angka ini lebih baik dibandingkan jika hanya menggunakan THD yaitu 0.9970 dan 0.8326 bila hanya menggunakan magnitudo arus bocor. Metoda diagnosis lain untuk isolator adalah dengan kamera korona (ultra violet) dan kamera infra merah (IR) seperti pada gambar 29. Kamera korona mendeteksi adanya sinar ultraviolet yang diradiasikan oleh sebuah peluhan termasuk korona, dry band arcing ataupun flash over. Kamera infra merah mendeteksi radiasi Infra merah pada panjang gelombang sekitar 0,7 – 1000 μm . IR camera mendeteksi adanya pemanasan pada suatu tempat tertentu.

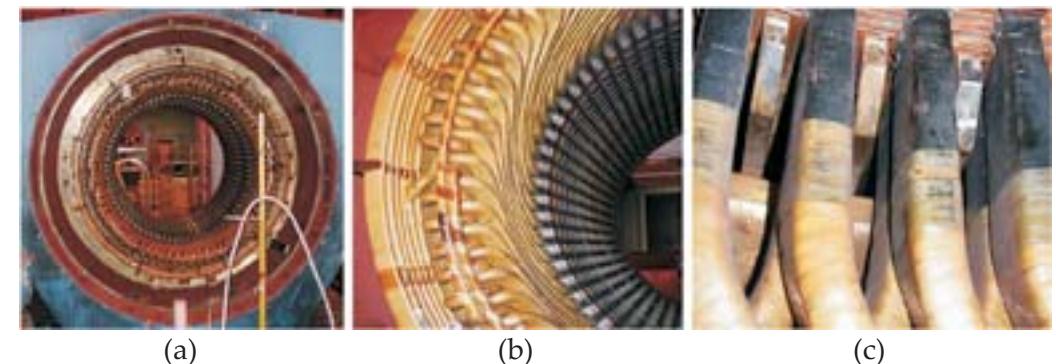


Gambar 29: (a) Spektrum frekuensi(b) kamera korona dan (c) kamera infra merah[52]

4.2 Diagnosis Mesin Listrik

Generator merupakan peralatan penting dalam suatu pusat pembangkit listrik. Kegagalan isolasi berkontribusi sekitar 47% dari kegagalan generator. Gambar 39 menunjukkan gambar stator, *end winding*

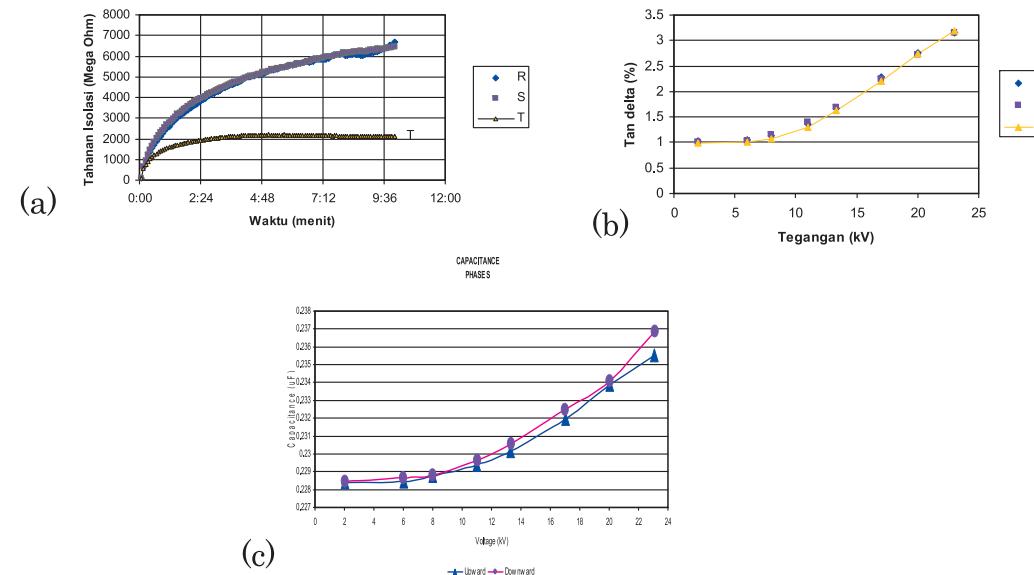
dan kerusakan pada *stress grading system*.



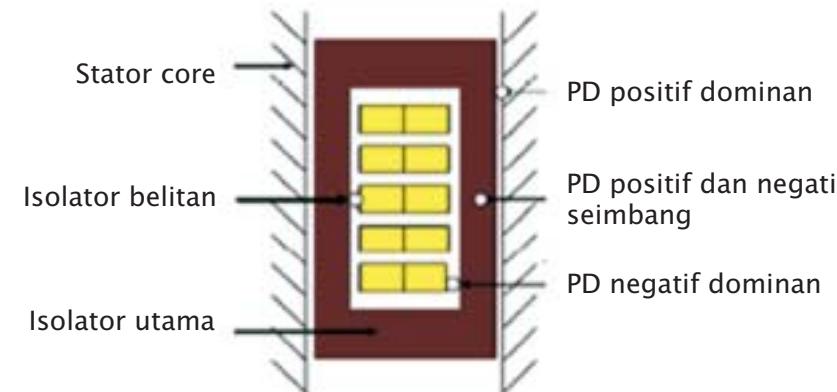
Gambar 30: Tipikal sistem isolasi generator (a) stator (b) *end winding* dan (c) kerusakan pada *stress grading system*.

Penuaan isolasi pada suatu mesin listrik dapat disebabkan oleh faktor listrik, thermal maupun mekanik. Diagnosis kondisi isolasi mesin listrik dilakukan dengan beberapa cara yaitu dengan mengukur beberapa besaran seperti tahanan isolasi DC, indeks polarisasi, faktor rugi-rugi ($\tan \delta$), Kapasitansi dan dengan pengukuran partial discharge. Cara terakhir menjadi sangat penting dalam CBM karena dapat dilakukan secara *on line* dan *real time*. Tipikal tahanan isolasi, $\tan \delta$ dan kapasitansi mesin listrik ditampilkan pada gambar 31.

Gambar 32 menunjukkan penampang stator dan posisi dimana PD mungkin terjadi yaitu pada slot, dalam isolasi atau interface antara isolasi dan konduktor. Dengan pengukuran pola PD serta analisa ketidakseimbangan PD antara polaritas positif dan negative maka kondisi isolasi stator generator dapat diperkirakan.



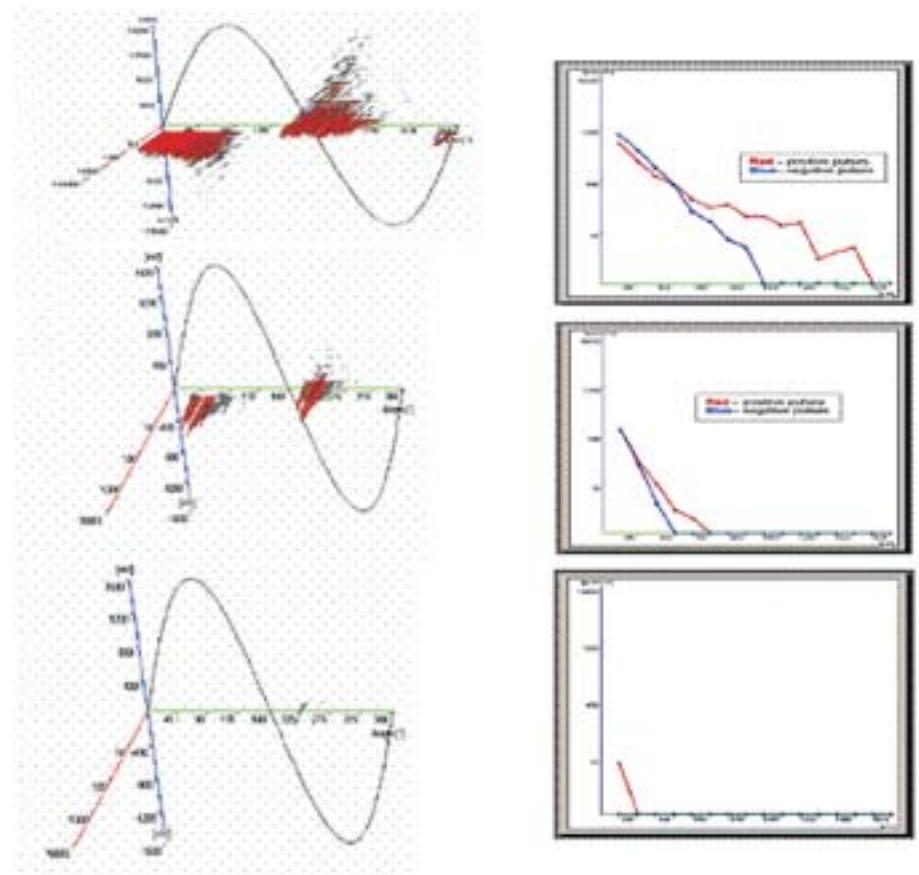
Gambar 31: Tipikal tahanan isolasi DC, tan δ dan kapasitansi suatu turbo generator (400 MW, 23 kV)



Gambar 32: Partial discharge di dalam stator mesin listrik tegangan tinggi

Sebagai contoh hasil pengukuran PD pada suatu asesmen turbo generator dengan pendingin hydrogen yang telah beroperasi sejak 1985 dilakukan pada tahun 2005 ditunjukkan pada gambar 33. Aktivitas PD

rendah dan tidak seimbang antara positif dan negatif. Data menunjukkan adanya aktivitas peluhuan permukaan ringan. Isolasi stator dalam keadaan baik. Generator telah divonis bahwa umurnya tinggal 2 tahun berdasarkan data operasi dan parameter diagnostik konvensional. Kenyataannya hingga saat ini mesin masih beroperasi dengan baik. Sesuai dengan rekomendasi telah dipasang *on line PD monitoring*.



Gambar 33: Contoh pola PD dari suatu generator [53]

4.3 Diagnosis GIS

Gas-Insulated substation (GIS) banyak dipergunakan karena ukuran yang kompak, aman dan praktis [65]. Sulphur Hexafluoride (SF₆) bersifat non toxic, tidak berwarna, tidak bau, titik bakar tinggi yang dalam kondisi normal mempunyai massa jenis 6,13 g/l [54-55]. GIS ada yang ditempatkan di dalam ruang (*indoor*) dan ada pula di luar ruangan (*outdoor*) sebagaimana gambar 34.



(a)



(b)

Gambar 34: Tipikal GIS (a) indoor (b) outdoor

Diagnosis suatu GIS dapat dilakukan dengan berbagai pengukuran seperti: kemurnian (*purity*) gas, titik embun (Dew point), produk hasil dekomposisi (*decomposition product*), tekanan dan *partial discharge*.

Tekanan (*pressure*)

Penurunan tekanan akan mengurangi kekuatan dielektrik dan akan rentan terjadi *breakdown*. Tidak eksak disebutkan karena dapat berbeda

pada setiap kompartemen, hanya ditekankan laju penurunan tekanan (*leakage rate*) tidak melebihi 1 % per tahun (IEEE C37.122)[56].

Kemurnian (*purity*)

Penurunan tingkat kemurnian gas SF₆ akan menurunkan kemampuan dalam menahan medan listrik. Untuk gas SF₆ baru, menurut IEC standard 60376 nilai kemurnian yang disyaratkan adalah 99.9% [57].

Titik embun (*dew point*)

Nilai titik embun ini sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan terutama suhu. Semakin tinggi suhu maka semakin tinggi kandungan uap air yang berada didalamnya. Dew point Maksimal -5° C pada tekanan 400 Pa (IEC 60694)[58].

Produk hasil dekomposisi (*decomposition product*)

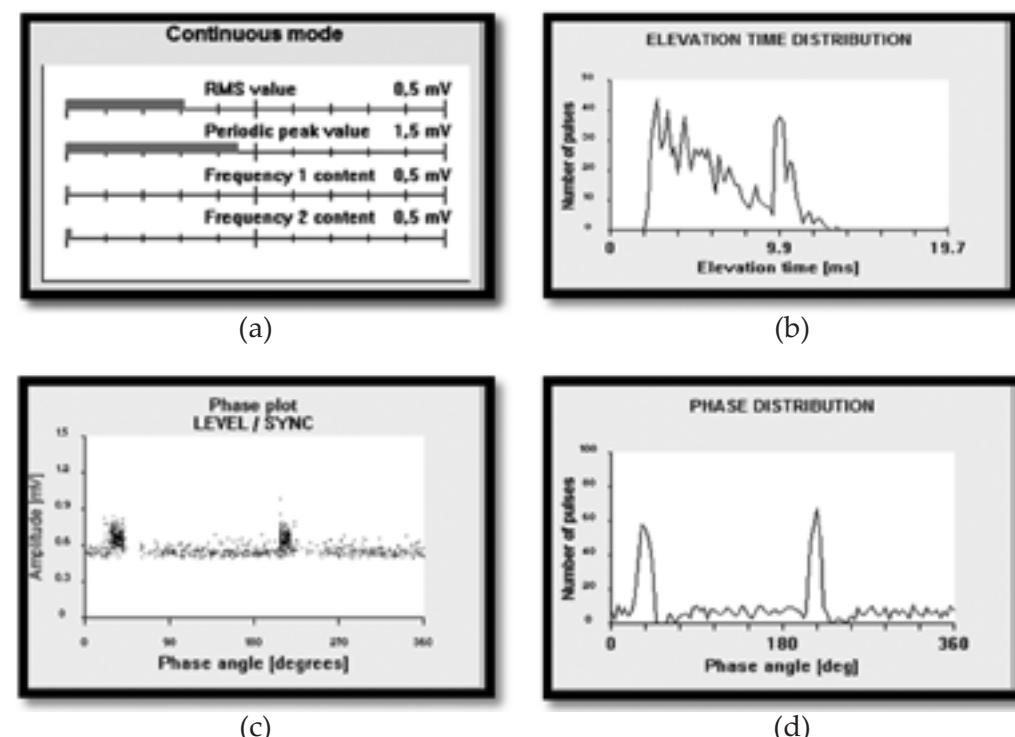
Produk hasil dekomposisi terjadi karena adanya pemanasan berlebih, peluahan listrik dan busur listrik atau karena kebocoran. Beberapa senyawa yang dapat muncul diantaranya N₂, O₂, H₂O, HF, SO₂, SF₂, SF₄, SOF₂, WF₆, AlF₃, dan CuF₂ [59]. Jika produk hasil dekomposisi ini terjadi dalam jumlah yang besar, maka kekuatan dielektrik dari isolasi gas SF₆ akan mengalami penurunan. Nilai produk hasil dekomposisi dijaga pada level < 1000 ppmv (CIGRE 23.10 Task force 01)[60].

PD di dalam GIS

Dalam GIS PD dapat muncul akibat (a) protrusi pada konduktor atau

tangki, (b) partikel konduktif pada spacer (c) void pada spacer (d) partikel bebas dan (e) elektroda mengambang.

Pengukuran PD pada GIS dapat dilakukan dengan metoda listrik yaitu menggunakan impedansi kapasitif atau induktif, dengan antenna (*ultra high frequency*, UHF) maupun metoda akustik. Metoda terakhir sangat cocok untuk GIS dengan kompartemen logam. Metoda akustik merupakan metoda don destruktif dengan memanfaatkan sensor piezoelectric untuk mendeteksi sinyal akustik akibat PD yang muncul di dalam tangki GIS. Tipikal frekuensi operasi sensor 0 – 32 kHz. Tipikal hasil



Gambar 35: Continue mode (a) elevation time (b) pola ϕ -q-n (c) dan pola ϕ -n (d) untuk

SE fasa R

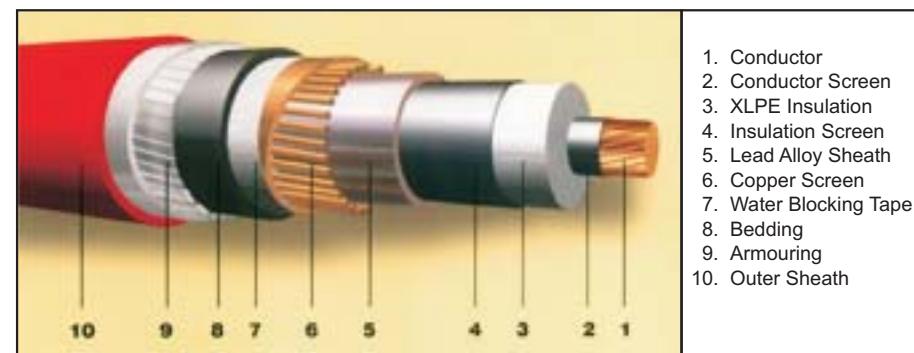
pengukuran PD pada suatu GIS 150 kV, 55 MW yang mulai dioperasikan 1994 ditunjukkan pada gambar 35. Dari analisis diperoleh kondisi gangguan pada GIS sebagaimana tertera pada tabel 5.

Tabel 5:
Contoh hasil diagnosis GIS berdasar pola PD[23]

PARAMETER	SE PHASE R	SE PHASE S	SE PHASE T
Max amplitude (mV)	1.92	2.13	3.38
Average amplitude (mV)	1.21	1.41	1.79
Frequency 1 and 2	weak	weak	weak
Phase-resolved PD magnitude	concentrated at certain phase angle	concentrated at certain phase angle	concentrated at certain phase angle
Elevation time (ms)	12.7	2.59	12.59
Unbalance of PD pattern	yes	yes	yes
Possibility of PD sources	protrusion	protrusion/ free particle	protrusion

4.4. Diagnosis Kabel Tenaga

Ditinjau dari sisi isolasi kabel tenaga tegangan tinggi dikelompokkan ke dalam *oil-filled cable*, *paper impregnated cable* dan *solid cable*. Kabel jenis terakhir berkembang pesat dengan penggunaan isolasi polimer seperti karet alam, Poly vinyl Chloride (PVC), Ethylene Propylene Rubber(EPR), Silicone Rubber, Polyethylene (PE), Crosslinked Polyethylene (XLPE) dan Tree - Retardant XLPE. Tipikal struktur kabel berisolasi polimer diperlihatkan pada gambar 36.



Gambar 45: Tipikal struktur kabel berisolasi polimer

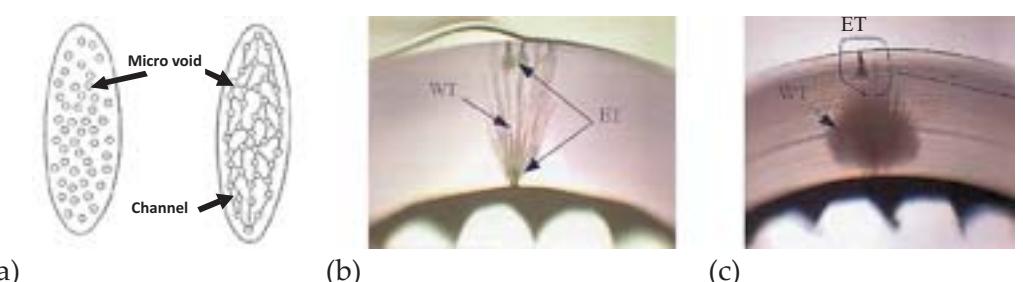
Mekanisme kegagalan isolasi kabel polimer tegangan tinggi diuraikan oleh Densley sebagai berikut[61].

Water Treeing dan Electrical Treeing

Dalam kabel berisolasi polimer maka water treeing dapat muncul terutama untuk kabel yang ditanam dan kabel yang berada pada daerah lembab. Investigasi secara mendalam menunjukkan bahwa water treeing merupakan kanal-kanal sangat halus (sub mikron) yang menghubungkan void sub mikron yang terisi oleh molekul air.

Water treeing diketahui tidak konduktif sehingga walaupun telah menjembatani kedua konduktor, isolasi masih dapat berfungsi dengan baik. *Water treeing* juga tidak diikuti oleh peluahan sebagian (PD) sebagaimana electrical treeing selalu diikuti oleh PD. Oleh karena itu deteksi *water treeing* tidak dapat dilakukan dengan pengukuran PD. Meskipun *water treeing* tidak secara langsung menghasilkan kegagalan

isolasi namun dalam jangka panjang sangat merugikan karena dapat menghasilkan losses tinggi. Yang paling berbahaya dari *water treeing* adalah apabila ukuran *water treeing* telah besar dan terjadi konversi dari *water treeing* menjadi *electrical treeing* yang akan mengakibatkan isolasi mengalami tembus. Ilustrasi *water treeing* dan konversi *water treeing* menjadi *electrical treeing* ditampilkan pada gambar 37[62].



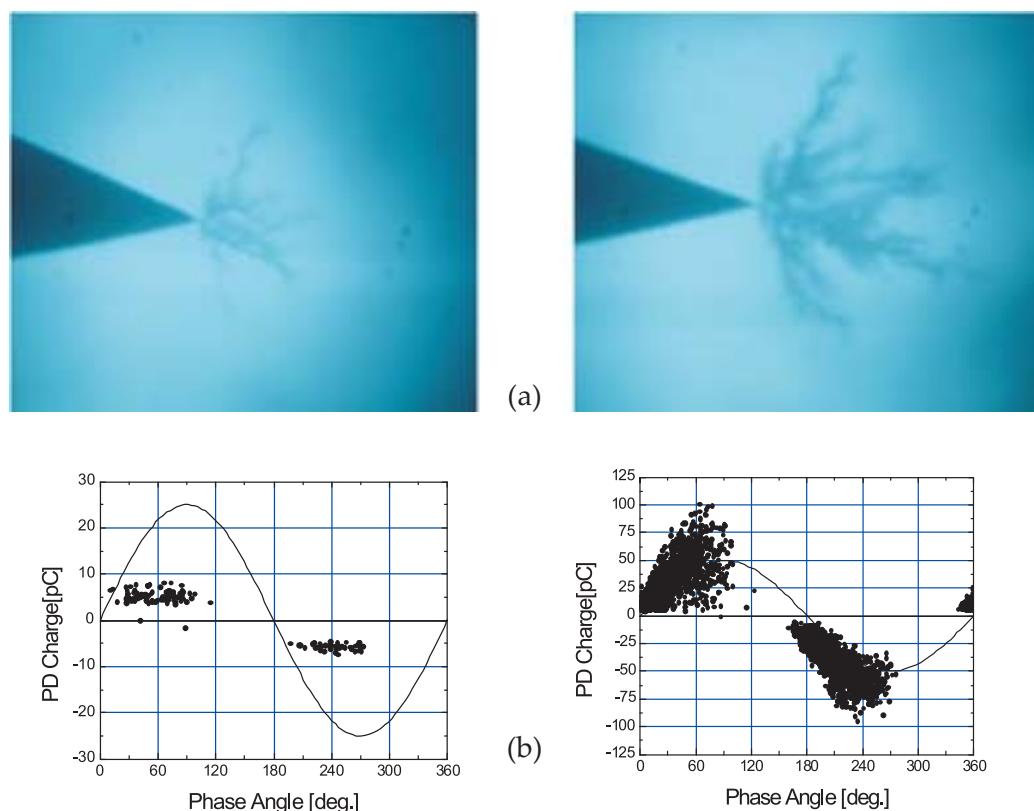
Gambar 37: water treeing (a) konversi dari water treeing ke electrical treeing (b,c)

Diagnosis kabel tenaga dilakukan dengan beberapa cara seperti:

Diagnosis kabel polimer dapat dilakukan dengan analisis arus bocor AC. Dengan pemberian tegangan AC maka bentuk gelombang arus bocor pada kabel akan berubah bila di dalam kabel telah terjadi *water tree*. Tingkat distorsi arus bocor menunjukkan tingkat harmonik yang lebih tinggi terutama harmonik ke-3. Semakin besar *water tree* maka semakin besar pula harmonik ke-3 dan semakin kecil sudut harmonik ke-3 tersebut. Dengan analisa bentuk arus bocor pada kabel maka dapat diperkirakan *water tree* di dalam isolasi.

Diagnosis kabel tenaga juga dilakukan dengan aplikasi tegangan frekuensi sangat rendah 0.1Hz VLF (*very low frequency*). Cara lain adalah dengan pengukuran faktor rugi-rugi atau $\tan \delta$. Dengan hasil diagnosis $\tan \delta$ kabel dapat diklasifikasikan ke dalam baru, kabel tua dan kabel gagal.

Pola PD dapat dipergunakan untuk diagnosis kabel seperti contoh pada gambar 38. Dengan pengukuran PD keberadaan dan ukuran pemohonan listrik dapat ditentukan[63].



Gambar 38: Electrical treeing di dalam isolasi polyethylene (a) dan pola PD θ-q-n (b)

Belum ada batasan yang disepakati secara luas berkaitan dengan besarnya PD secara eksak yang diperbolehkan di dalam suatu kabel. Namun demikian ditinjau dari sisi PD maksimum maka diusulkan adanya batasan besaran PD untuk kabel tenaga sebagaimana pada tabel 6.

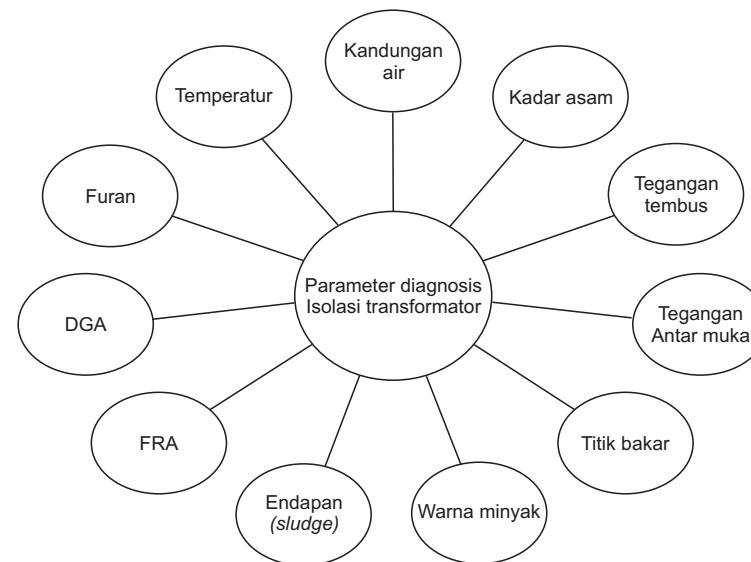
Tabel 7:
Tipikal batasan besaran PD untuk kabel tenaga[64]

BAGIAN KABEL	TIPE KABEL	BATASAN
Isolasi	Kertas	hingga 10.000 pC
	PE /XLPE	< 20 pC
Sambungan (joint)	Isolasi minyak	> 10.000 pC
	Isolasi minyak/resin	5.000 pC
Terminasi	Isolasi silicon/EPR	500 - 1.000 pC
	Terminasi minyak	6.000 pC
	Terminasi kering	3.500 pC

Untuk menentukan lokasi PD di dalam kabel digunakan metoda pemantulan domain waktu (time-domain reflectometry) atau beda fasa untuk kabel pendek dan analisis waktu datang (arrival time analysis) untuk kabel panjang.

4.5 Diagnosis Transformator

Kondisi termal yang eksesif dan medan tinggi di dalam transformator dapat menyebabkan reaksi kompleks yang mengarah pada penuaan isolasi[65] dan timbulnya gas dalam isolasi minyak[66]. Parameter diagnosis kondisi isolasi transformator diilustrasikan pada gambar 39.



Gambar 39: Parameter diagnosis kondisi isolasi transformator

Furan

Kualitas kertas isolasi dalam transformator sangat tergantung dari derajat polimerisasi (DP). Akibat stress listrik dan thermal isolasi kertas dapat mengalami penuaan yang akan menurunkan derajat polimerisasi. Emsley[67] mengusulkan suatu formula kecepatan reaksi kertas di dalam minyak sebagai:

$$\frac{1}{DP_{vt}} - \frac{1}{DP_{v0}} = kt \quad (10)$$

DP_{vt} dan DP_{v0} adalah DP pada waktu t dan mula-mula sedangkan k adalah konstanta. Dengan menggunakan beberapa data pengukuran maka k dapat ditentukan dan umur sisa dari isolasi dapat diperkirakan dengan formula berikut:

$$k = Ae^{\frac{E}{R(T+273)}} \quad (11)$$

$$\text{life} = \frac{0.004}{A} e^{\frac{13600}{T-273}} \text{ jam}$$

A adalah konstanta yang tergantung kondisi operasi transformator, T temperatur, R konstanta gas dan E adalah energy aktivasi.

Tegangan tembus

Tegangan tembus isolasi minyak ditentukan dengan elektroda standar bispheris dengan jarak 2.5 mm seperti foto pada gambar 40. Metoda pengujian sesuai dengan IEC 156 (1990)[69] dan ASTM D 877 (1980)[70]. Tegangan AC 50 Hz diterapkan dengan kecepatan kenaikan 2 kV/s.



Gambar 40: Elektroda untuk penentuan tegangan tembus isolasi cair

Faktor rugi-rugi dielektrik ($\tan \delta$) dan konstanta dielektrik

Faktor rugi-rugi dielektrik ($\tan \delta$) merupakan ukuran tingkat rugi-

rugi daya dari suatu isolasi tegangan tinggi. Bila medan listrik E pada frekuensi f maka daya terdisipasi per satuan volume isolasi adalah $W = 2\pi f E^2 \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta$. Di sini ϵ_0 adalah permitivitas vakum dan ϵ_r adalah konstanta dielektrik. Faktor rugi-rugi dielektrik ($\tan \delta$) dan konstanta dielektrik (ϵ_r) ditentukan dengan jembatan Schering menurut IEC 247 (2004)[71].

Viskositas

Viskositas isolasi sangat menentukan laju transfer panas dan dengan demikian mempengaruhi tingkat kenaikan temperatur transformator. Secara umum minyak isolasi rendah viskositas lebih baik.

Keasaman (acidity)

Minyak isolasi yang baik bersifat netral. Selama dipergunakan asam akan muncul yang mengindikasikan penurunan kualitas isolasi. Tingkat keasaman minyak transformator ditentukan dengan titrasi menurut ASTM D 974[72]. Bilangan keasaman (acidity number) menunjukkan berapa mg potassium hydroxide (KOH) untuk menetralkan 1 g sampel minyak transformator.

Dissolved Gas Analysis (DGA)

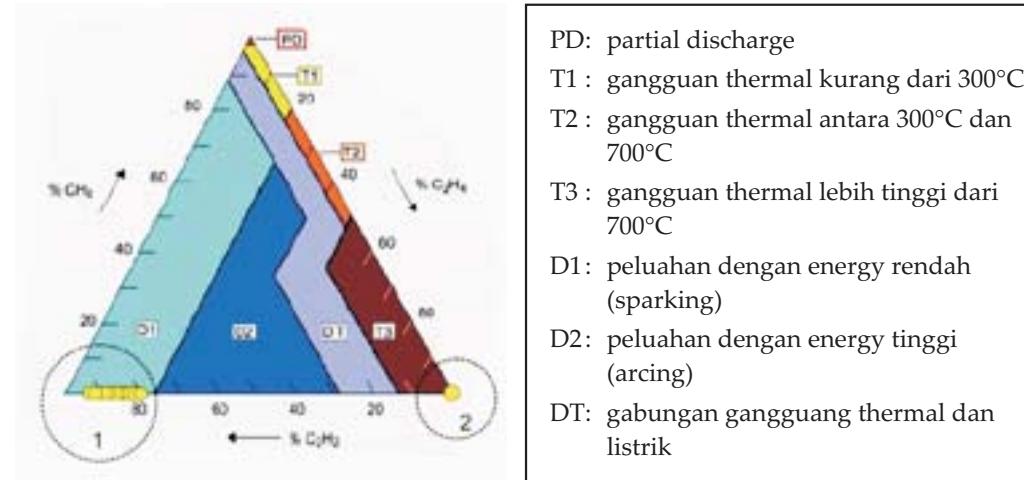
Gas dalam minyak isolasi dapat muncul karena gangguan seperti arcing, korona (*partial discharges*) dan *overheating* dari minyak atau isolasi kertas. Diantara gas yang muncul dalam transformator maka gas yang mudah terbakar (*combustible gasses*) adalah yang paling berbahaya karena dapat menyebabkan transformator terbakar dan meledak. Combustible

gasses yang biasanya muncul di dalam transformator adalah H_2 (hydrogen), CH_4 (Methane), C_2H_6 (Ethane), C_2H_4 (ethylene) dan C_2H_2 (Acetylene). Hasil penelitian menunjukkan bahwa corona, overheating dan arcing merupakan 3 penyebab utama kerusakan isolasi pada transformator. Arcing menghasilkan pemanasan paling tinggi dan memunculkan berbagai gas seperti H_2 (hydrogen), C_2H_6 (Ethane), C_2H_4 (ethylene) dan C_2H_2 (Acetylene) CO (carbon monoxide) and CO_2 (carbon dioxide)[73]. Interpretasi gas dalam isolasi minyak transformator dilakukan dengan berbagai cara seperti Total Combustible Gas-TCG, Key Gas Method, Roger's Ratio Method dan Duval Triangle.

Standar IEEE yaitu standar C57-104-1991[74] serta ASTM D-3612[75] memberikan petunjuk mengenai penggunaan analisis dengan TCG serta kandungan gas-gas secara individual. Masing-masing kondisi transformator di atas dikelompokkan sesuai konsentrasi TCG. *Key Gas Method* didasarkan pada standar IEEE C57.104. Metode Rasio Rogers (*Rogers Ratio Method*) merupakan salah satu metoda analisis kandungan gas terlarut dengan membandingkan kuantitas dari berbagai gas-gas kunci yang akan memberikan sebuah nilai rasio suatu gas kunci terhadap gas lainnya. Rasio Rogers diperoleh dengan perbandingan gas-gas CH_4/H_2 , C_2H_6/CH_4 C_2H_4/C_2H_6 C_2H_2/C_2H_4 . Jika nilai perbandingan gas-gas tersebut >1 maka rasio Rogers bernilai 1 dan jika perbandingan gas-gas tersebut $=1$ maka rasio Rogers bernilai 0.

Segitiga duval [77] sebagaimana diperlihatkan pada gambar 41

merupakan salah satu metoda analisis konsentrasi gas yang terkandung di dalam minyak dan jenis gangguan yang terjadi pada isolasi minyak.



Gambar 41: Analisis DGA dengan segitiga Duval

Diagnosis transformator dengan analisa respon frekuensi

Metoda *Frequency Response Analysis* (FRA) diperkenalkan untuk diagnosis transformator[78-79]. Beberapa deformasi mekanik mempengaruhi komponen kapasitif, konduktif dan resistif dari transformator. FRA dikembangkan berdasarkan respons frekuensi transformator. Model rangkaian transformator dengan resistor (R), kapasitor (C) dan inductor (L) telah diperkenalkan[80-81] sebagaimana pada gambar 42.

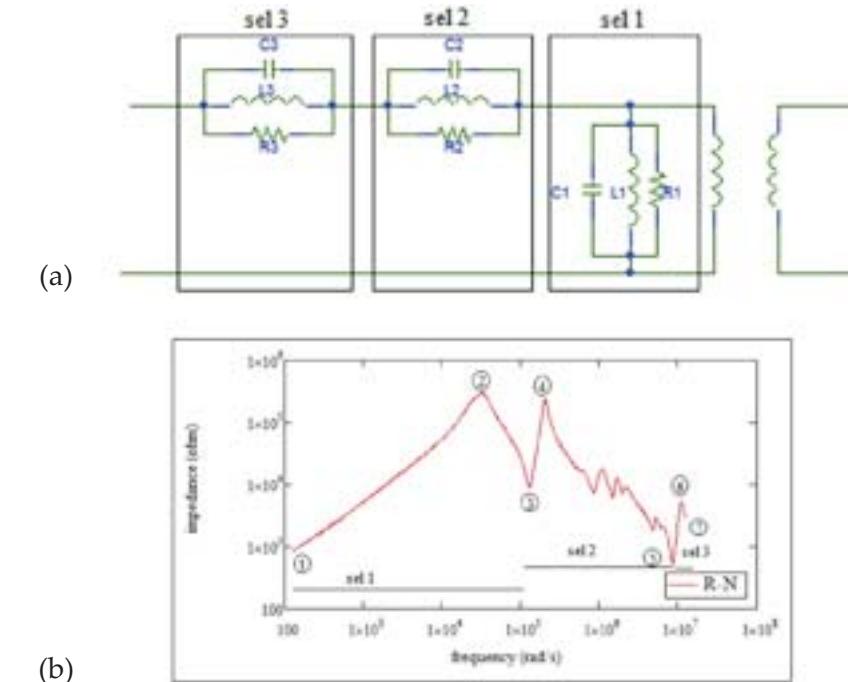
R, L dan C transformator ditentukan dengan minimisasi perbedaan antara hasil pengukuran dan perhitungan berdasarkan model. Dari kurva

FRA diperoleh admittansi $Y_R(\omega_i) = G_R(\omega_i) + jB_R(\omega_i)$. Fungsi transfer model adalah

$$Y_M(\omega_i, R, L, C) = \frac{1}{R} + j\omega_i C - \frac{1}{j\omega_i L} \quad (7)$$

Error e antara FRA data dan model adalah

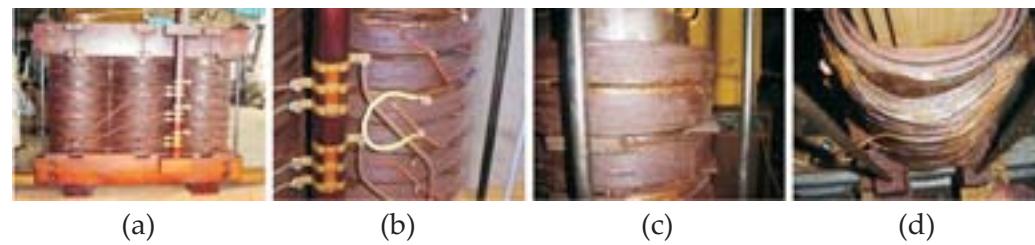
$$e = |Y_R(\omega_i) - Y_M(\omega_i, R, L, C)| \quad (8)$$



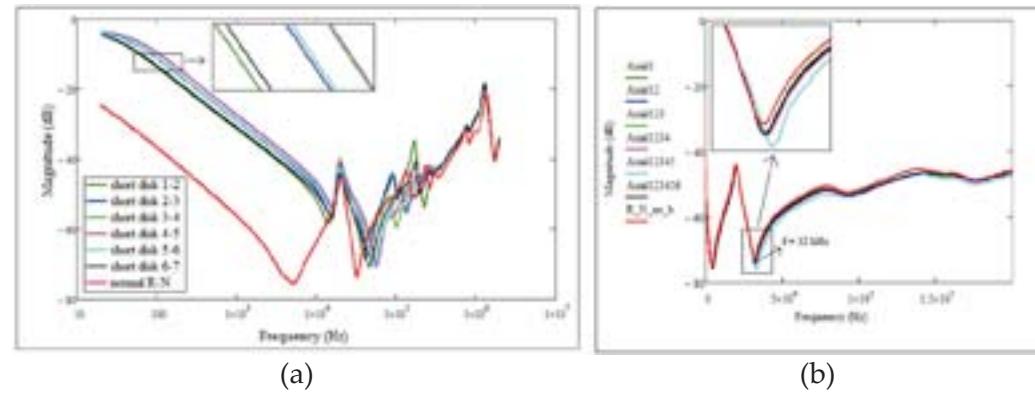
Gambar 42: (a) model rangkaian R, L dan C transformator dan (b) respons FRA

Contoh diagnosis transformator dengan FRA dilakukan untuk suatu transformator 3 fasa 100 kVA, 6000 V/220V seperti pada gambar 43(a). Transformator diberikan gangguan buatan berupa hubung singkat (b),

pergeseran aksial (c) dan radial (d). Gambar 44 menunjukkan kurva FRA untuk transformator normal (R-N), yang mengalami hubung singkat, dan deformasi aksial. Gambar dengan jelas menunjukkan bahwa transformator hubung singkat terjadi perubahan besar pada komponen frekuensi rendah (sel 1), dan hanya terjadi perubahan kecil pada sel 2 dan 3.



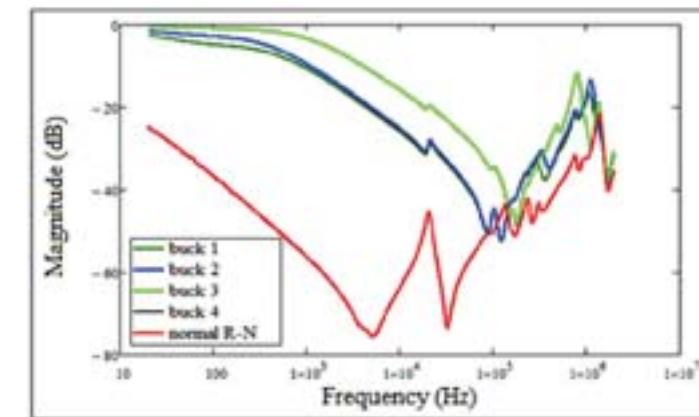
Gambar 43: Transformator (a) normal (b)hubung singkat), (c) pergeseran aksial dan (d) deformasi radial



Gambar 44: Kurva FRA untuk transformator hubung singkat (a) dan deformasi aksial (b)

Untuk transformator dengan deformasi aksial FRA mengalami perubahan signifikan pada daerah frekuensi medium (sel 2). Sedangkan

pergeseran koil radial menyebabkan perubahan kurva FRA cukup besar pada daerah frekuensi rendah dan sedang (gambar 45). Tipikal prosentase perubahan R, L dan C untuk setiap gangguan dari kondisi normal ditampilkan pada tabel 7.



Gambar 45: Kurva FRA untuk transformator normal dan deformasi radial

Tabel 7:
Prosentase perubahan R,L dan C untuk gangguan transformator

KONDISI	SEL 1			SEL 2			SEL 3		
Normal	R1 0	L1 0	C1 0	R2 0	L2 0	C2 0	R3 0	L3 0	C3 0
Hubung singkat	-92.9	-98.9	800.4	-31.3	-53.4	-30.7	-7.3	-7.2	7.6
Deformasi aksial	7.4	-7.3	-6.1	46.3	17.4	-23.0	-1.0	5.2	-2.7
Deformasi radial	-95.1	-99.9	59.0	-99.3	-99.9	141.0	-19.0	-17.5	25.3

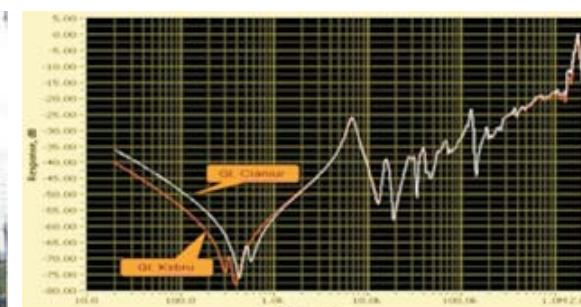
Pengaruh medan magnetik sisa

Pengukuran FRA dilakukan terhadap transformator 112 MVA

sebelum direlokasi dari gardu induk Kosambi Baru ke Cianjur sebagaimana gambar 46(a). Pengukuran dilakukan dalam kondisi terdapat magnetisasi sisa setelah injeksi arus DC pada saat pengukuran resistansi sebesar 8A.



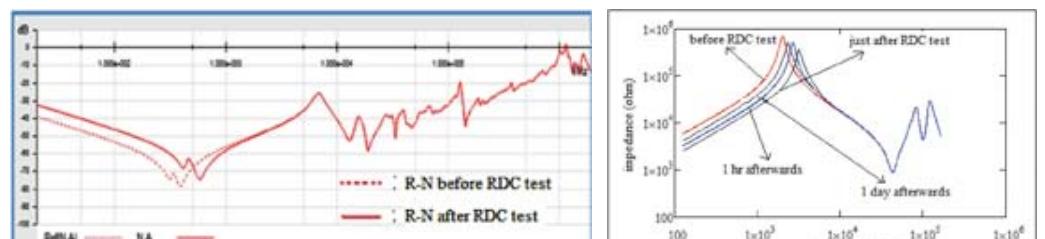
(a)



(b)

Gambar 46: (a) transformator 112 MVA direlokasi dari Gardu Induk Kosambi Baru ke Cianjur dan (b) kurva FRA

Kurva FRA ditampilkan pada gambar 46 (b). Kurva bawah diperoleh sebelum relokasi dan kurva atas setelah relokasi dan pengukuran resistansi DC. Pergeseran kurva pada frekuensi rendah (sel 1) ternyata diakibatkan oleh adanya magnetisasi sisa. Hal ini diperkuat oleh hasil pengukuran pada transformator yang sama di Cianjur pada suatu pemeliharaan setelah relokasi sebagaimana ditampilkan pada gambar 47(a). Pengaruh remanensi magnetik pada kurva FRA menurun terhadap waktu sebagaimana diperlihatkan oleh gambar 47(b).



(a)

(b)

Gambar 47: Kurva FRA sebelum dan sesudah uji resistansi DC

5. SMART GRID

Smart grid adalah suatu sistem tenaga listrik dengan dukungan aplikasi teknologi digital. Smart grid mengalirkan energy listrik dari pembangkit ke konsumen dengan komunikasi digital dua arah untuk mengendalikan sistem yang akan menghemat energy, mengurangi biaya dan meningkatkan keandalan [83].

Istilah *smart grid* setidaknya telah diperkenalkan dan meluas sejak 2005[84]. Di Eropa, kajian Smart Grid telah dilaporkan pada tahun 2006 dengan sebuah dokumen yang diterbitkan oleh **European Community: European Smart Grids Technology Platform: Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future**. Realisasi Smart Grid mendapat momentum pada saat **Presiden Obama** mengumumkan investasi penerapan smart grid dalam system kelistrikan Amerika pada suatu program pemulihan ekonomi pada October 2009 [85]. Paket stimulus Barack Obama tahun 2009 untuk smart grid adalah sebesar 4.5 miliar USD.

Sejauh ini ada 10 kota yang menerapkan smart grid yaitu Austin

(Texas), Boulder (Colo), Fort Collins(Colo), Maui (Hawaii), Sacramento(Calif), San Diego(Calif), Tempe (Ariz), Toronto (Ontario, Canada), Washington, D.C. dan Worcester(Mass).

Pada tahun 2009 China juga mengumumkan akan menggunakan smart grid. Dengan kemampuan dan perkembangan ekonomi yang sangat baik China berambisi merealisasikan smart grid dalam sistem kelistrikkannya sebelum 2020[86]. Korea juga telah mengumumkan akan merealisasikan *smart grid* dalam sistem kelistrikan secara nasional sebelum 2030. Dari data *Top Ten Smart Grid Federal Stimulus Investments by Country, 2010*, China telah memimpin dalam upaya penerapan Smart Grid dengan investasi stimulus 2010 sebesar 7,323 miliar USD untuk smart grid bahkan di atas stimulus Amerika sebesar 7,092 miliar USD[87].

Tabel 8: Top Ten Smart Grid Federal Stimulus Investments 2010

NO.	COUNTRY	INVESTMENT (MILL USD)	NO.	COUNTRY	INVESTMENT (MILL USD)
1	China	7,323	6	Germany	397
2	US	7,092	7	Australia	360
3	Japan	849	8	UK	290
4	S. Korea	824	9	France	265
5	Spain	807	10	Brazil	204

Konsep dasar Smart Grid adalah penguatan kemampuan sistem monitoring, analisis, control, dan komunikasi sehingga sistem kelistrikan

efisien dan ekonomis dan memungkinkan konsumen menggunakan energy listrik secara efisien dan ekonomis [86]. Ada 6 ciri smart grid yaitu: *reliable, secure, economic, efficient, environmentally friendly, safe*[87]. Smart grid mendorong partisipasi sumber energy terbarukan seperti geothermal, air , angin dan matahari. Smart grid mendapat sambutan yang sangat baik di dunia karena sejalan dengan kebijakan energi terbarukan (*renewable energy*) dan konservasi energy (*energy conservation*) dan dalam rangka antisipasi pemanasan global (*global warming*).

Smart Grid dan smart HV Equipments

Pengembangan Smart grid sangat dipengaruhi oleh kondisi peralatan yang membangun grid. Ketersediaan smart HV equipments semacam transformator akan mempercepat realisasi smart grid. Suatu smart *HV equipment* dilengkapi dengan sejumlah perangkat untuk mengetahui kondisi dan lebih jauh dari itu mempunyai kemampuan untuk manufer antisipasi terhadap gangguan.

6. RENCANA KEGIATAN MENDATANG

Bidang teknik tegangan tinggi khususnya material dan teknik isolasi tegangan tinggi telah dipilih oleh penulis sebagai anggota KK teknik Ketenagalistrikan untuk dikembangkan. Bidang ini mempunyai tempat yang strategis untuk menunjang tercapainya smart grid di kancah nasional dan internasional. Road map pengembangan keilmuan

diuraikan secara ringkas sebagai berikut:

- a. pengembangan teori isolasi tegangan tinggi dan teknik diagnosis peralatan tegangan tinggi.
- b. pengembangan teknik isolasi tegangan tinggi dengan memasukkan faktor lingkungan Indonesia sebagai negara tropis dan dapat diaplikasikan pada sistem kelistrikan Indonesia.
- c. pengembangan material isolasi baru ramah lingkungan dan terkait dengan keunggulan lokal Indonesia. Penelitian tentang *biodegradable liquid insulations* yang sedang dijalankan akan diteruskan dengan berkolaborasi baik nasional maupun internasional.
- d. aplikasi material baru untuk solusi masalah Indonesia seperti penggunaan *silicone rubber* yang sedang diteliti pada skala laboratorium dapat dipakai untuk menanggulangi masalah polusi pada sistem kelistrikan.

Disamping itu pengembangan kelembagaan dan jejaring nasional dan internasional juga menjadi komitmen penulis seperti:

- a. Program pendidikan tingkat magister/doktor dengan peminatan Manajemen Aset dan Diagnosis Peralatan tegangan tinggi bekerjasama dengan berbagai instansi internasional yaitu Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI, Japan), Kyushu Institute of Technology, Japan, Nagoya University, Japan, TU Graz, Austria, Xian Jiaotong University dan North China Electric Power University,

China, TU Delft dan Bologna University, Italy. Kegiatan ini akan diperkuat dengan kerjasama penelitian di bidang teknik ketenagalistrikan khususnya material dan teknologi isolasi tegangan tinggi.

- b. Menggalakkan pendidikan dan penelitian di bidang teknik tegangan tinggi nasional melalui wadah seperti FOSTU dan HALTI.
- c. Aktif menggerakkan kegiatan ilmiah internasional di bidang isolasi dan diagnostik tegangan tinggi dalam rangka smart grid seperti CMD, ICPADM, ISEIM dan ICEEI.
- d. Meningkatkan journal ICEEI menjadi jurnal internasional yang berkualitas.

7. PENUTUP

Kebutuhan energi listrik dunia dan Indonesia meningkat terus. Sistem kelistrikan yang andal, aman, cukup, efisien, ramah lingkungan dan ekonomis diperlukan untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Sistem kelistrikan yang baik memerlukan dukungan peralatan utama seperti generator, transformator, GIS, isolator dan kabel tegangan tinggi dengan tingkat keandalan tinggi. Diagnosis peralatan tegangan tinggi diperlukan untuk menjaga keandalan peralatan guna mendukung sistem kelistrikan. Perkembangan teknologi komputer telah mendorong teknik diagnosis peralatan tegangan tinggi semakin maju dan aplikasi diagnosis secara on line menjadi kenyataan. Pengembangan sistem kelistrikan cerdas (*smart*

grid) akan memerlukan dukungan diagnosis peralatan yang akurat. Aplikasi diagnosis peralatan tegangan tinggi di Indonesia akan semakin diperlukan untuk mendukung pertumbuhan kelistrikan yang masih sangat tinggi dalam rangka mendorong pertumbuhan ekonomi nasional dan meningkatkan kesejahteraan seluruh rakyat dan bangsa Indonesia.

8. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis memanjatkan puji syukur kehadirat Allah swt atas karunia, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis sampai pada jabatan Guru Besar Institut Teknologi Bandung.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tinggi penulis haturkan kepada segenap pimpinan dan anggota Majelis Guru Besar ITB atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menyampaikan pidato ilmiah Guru besar di hadapan sidang majelis yang mulia ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Bapak Prof. Akhmaloka selaku Rektor ITB beserta para wakil rektor, Pimpinan dan Anggota Senat ITB atas semua dorongan dan dukungan kepada penulis mencapai jabatan guru besar.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tinggi penulis sampaikan kepada beliau yang telah mempromosikan, mendorong dan memberi masukan yaitu Prof. Adang Suwandi , Prof. Yanuarsyah Haroen, Prof. Tati Mengko, Prof. Bambang Riyanto, Prof. Suhono Supangkat dan Prof.

Ngapuli Sinisuka, Prof. Carmadi Machbub, Prof. Soedjana Sapiie dan Dr. Suhartono Tjondronegoro.

Kepada para anggota KK Teknik Ketenagalistrikan penulis sampaikan terima kasih atas kebersamaan dan kerjasama selama ini. Kepada para mahasiswa baik S3, S2 maupun S1 juga disampaikan apresiasi atas kerjasama dalam melakukan penelitian.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Prof. KT Sirait yang telah memperkenalkan kepada Prof. Mizutani dan memberikan dorongan untuk studi lanjut di Jepang dan Prof. Kenji Horii dari Nagoya University yang memberi rekomendasi untuk beasiswa Monbusho.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Prof. Mizutani dan Prof. Suzuoki dari Nagoya University, Jepang yang telah membimbing penulis menyelesaikan doktor dan mendorong penulis untuk bergabung di komunitas internasional.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada sejumlah kolega internasional seperti Prof. M. Hikita (Kyushu Institute of Technology), Prof. M. Nagao (Toyohashi University of Technology), Prof. H. Okubo (Nagoya University), Prof. T. Tanaka (Waseda University), Dr. T. Okamoto (Centre Research Institute of Electric Power Industry) Japan, Prof. Dae Hee-Park (Wonkwang University), Prof. Ja-YoonKoo (Hanyang University), Prof. Hong Jin-Woong(Kwangwoon University) Korea, Prof. Guan Zicheng (Tsinghua University), Prof. Guan Jung-Zhang (Xian Jiaotong University), Prof. Chengrong Li (North China Electric Power

University) China, Prof. T. Blackburn (University of New South Wales), Prof. Birlasekaran (Queensland University) Australia, Prof. J. Smit (TU Delft) The Netherland, Prof. Prof. G.C. Montanari & Prof. A. Cavalini (Bologna University) Italy, Prof. M. Muhr (TU Graz) Austria, Prof. R. Patsch (Seigen University), Prof. E. Gockenbach (Hannover University) Germany, Prof. S. Gubanski (Chalmers University of Technology) Sweden, Prof. L. Dissado (Leicester University) UK, Dr. Harry Orton & Dr. Bulinski (IEEE DEIS) atas kerjasama penelitian dan kebersamaan dalam mengembangkan serta melaksanakan kegiatan internasional dalam berbagai forum seperti ICPADM, ISEIM, CMD, ISH, ICHVE, ACED, ICEEI.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada rekan-rekan PLN P3B, PLN Litbang dan Indonesia Power atas bekerjasama mengembangkan dan aplikasi teknik diagnosis peralatan tegangan tinggi di lapangan.

Penulis juga berterima kasih kepada Prof. Ida Ayu Giriantari (Universitas Udayana), Prof. Iwa Garniwa (Universitas Indonesia), Prof. Syamsir Abduh (Universitas Trisakti), Dr. Tumiran (Universitas Gajah Mada) atas kebersamaan dalam FOSTU.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tinggi penulis haturkan kepada pada guru kami yang dengan tulus ikhlas telah mendidik kami sejak dari SD Negeri Teter Simo, SMP Negeri Simo Boyolali, SMA Negeri Boyolali serta Institut Teknologi Bandung. Semoga amal yang tulus dari beliau semua dicatat sebagai amal sholeh yang pahalanya terus mengalir

dari-Nya.

Terima kasih yang tak terhingga penulis haturkan kepada kedua orang tua kami H. Harjosukirno (alm) dan Hj. Sukamti yang senantiasa menyayangi dan mendoakan kami, juga kepada mertua kami H. Ahum Nitamihardja (alm) dan Hj. Enah Sukaenah. Terima kasih juga kami sampaikan kepada 2 kakak kandung kami Drs. Purwanto MA dan Dr. Ir. Suwardi dan 2 adik kandung kami Suwarso SH dan Sri Suwarsi SE, MSi.

Secara khusus penulis sampaikan terima kasih kepada istri tercinta, Dra. Elin D Hendarlin Apt. yang selalu mendampingi penulis dengan cinta, sabar dikala suka dan duka dan atas pengertian dan dukungan atas tugas yang dilaksanakan. Juga kepada anak-anak, buah hatiku tersayang Fathin Saifur Rahman, Hasna Afifah, Fauzan Abdurrahim, dan Haifa Nurul Karimah yang membangkitkan semangat dan inspirasi untuk berkarya serta penerus cita-cita.

Akhirnya penulis mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu atas segala dukungan, dorongan dan do'a.

REFERENSI

- [1] *Electricity in Indonesia, Investment and Taxation Guide*, Pricewaterhouse Coopers International Ltd, 2011.
- [2] *Key Indicators for Asia and The Pacific 2010*, 41st Edition special chapter the rise of Asia's Middle Class, Asian Development Bank, 2011.

- [3] S.-H. Yoo, *The causal relationship between electricity consumption and economic growth in the ASEAN countries*, Energy Policy, Vol. 34, Issue 18, December 2006, Pages 3573-3582.
- [4] B. Marshall, *How Power Grid Works ?*, Electrical Power Engineering, Smith College, 2009.
- [5] Globaltransmissionreport, <http://www.globaltransmission.info>.
- [6] W.Mittelstadt, *Round table on UHV technology in the USSR*, IEEE Power Engineering Review, Vol. 11, Issue 2, 1991, pp. 9-14.
- [7] H.T. Kennedy, *China, India and SE Asia to spend billions constructing, upgrading transmission systems*, Power Engineering International, July 2009.
- [8] Suwarno, D. Prasetijo, *Reseaches on High Voltage Engineering: Recent Status and Future Trend in Indonesia*, ISEIM, Yokkaichi, 2008.
- [9] Report, PLN P3B, 2011.
- [10]D.A. Genutis, NETAWORLD, 2006.
- [11]G. Stone, E.A., Boulter, I. Culbert, H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines*, IEEE Press, 2004.
- [12]IEC 60270, 2000, *High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*.
- [13]Suwarno, Caesario P., Anita P., *Partial Discharge Diagnosis of Gas Insulated Station (GIS) Using Acoustic Method*, Int. Conf. Electr. Eng. And Informatics, Kualalumpur, August, 2009, pp. 667-671.
- [14]R. Bozzo, C. Gemme, F. Guataviono, M. Cacciari, A. Contin, G.C. Montanari, Aging Diagnosis of Insulation System by PD measurement, *IEEE Trans. Diel. Electr. Insul*, Vol. 5, No. 1, pp. 118-129, 1998.
- [15]Whitehead S., *Dielectric Breakdown of solids*, Oxford Univ. Press, Clarendon. 1953.
- [16]Devins, J.C. *The 1984 J. B. Whitehead Memorial Lecture the Physics of Partial Discharges in Solid Dielectrics*, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol.19, Issue: 5, pp. 475-495, 1984.
- [17]Hikita, M.; Yamada, K.; Nakamura, A.; Mizutani, T.; Oohasi, A.; Ieda, M., *Measurements of partial discharges by computer and analysis of partial discharge distribution by the Monte Carlo method*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 25, Issue 3, 1990 pp. 453–468.
- [18]H. Suzuki, *Complex behavior of a simple-discharge model*, Europhys Lett, 66, 2004, pp. 28-34.
- [19]A.C. Liew, *Novel approach to partial discharge signals modeling in dielectric insulation void*, IEEE ICPST, vol. 3, 200, pp. 1207-1212.
- [20]Y. Tustsumi, T. Yonekura, T. Kikuchi, *Cluster pulse criteria for recognition of partial discharge*, Electrical Eng. In Japan, Vol. 113, Isue 7, Interscience, 2007, pp. 23-37.
- [21]Suwarno, Y. Suzuoki, T. Mizutani, *Partial discharges due to electrical treeing in polymers*, J. Phys. D:Appl. Phys., Vol. 29, 1996, pp. 2922-2931.
- [22]M. Hiroshi, D. Maashi, K. Shunji, *Equivalent Circuit Model of Partial Discharge in Gas Insulated Switchgears*, Trans. Institute of Electrical Engineers of Japan. B, Vol.120-B;Np.6;2000, pp. 905-906
- [23]Suwarno, T. Mizutani, *Pulse Sequence Analysis of Discharges in Air, Liquid and Solid Insulating Materials*, KIEE Journal of Electrical Eng. and Technology, Vol. 1, No. 4, 2006, pp. 528-533.
- [24]Suwarno, Y. Suzuoki, T. Mizutani, K. Uchida, *A Model for electrical treeing discharges in polyethylene*, IEEE Int. Symp. Electr. Insul. Mats.,

- 1995, pp. 443-446.
- [25] Suwarno, Y. suzuki, T. Mizutani, *Model for electrical treeing discharges and computer simulation*, Proc. IEEE Int. Conf. prop. Appl. Diel. Mats., Xi,an, 2000, pp. 260-263.
- [26] Suwarno, *Comparison between void and electrical treeing discharges in polyethylene*, Proc. IEEE Int. Conf. prop. Appl. Diel. Mats., Xi,an, 2000, pp. 493-496.
- [27] Suwarno, *Time sequential and phase-resolved measurement and analysis of corona discharge in air and streamer discharge in insulating liquid*, Journal of high voltage engineering, Vol. 34, No. 12, 2008, pp.2583-2588.
- [28] Suwarno, *Comparison between Discharge patterns in Solid and Liquid Insulating Materials*, Proc. IEEE Int. Conf. prop. Appl. Diel. Mats., Harbin, July, 2009.
- [29] Suwarno, *Properties of streamer in silicone oil*, Accepted IEEE Int. Symp. High Voltage Eng., Cape Town, August, 2009.
- [30] Suwarno, Y. Suzuki, T. Mizutani, *Computer simulation of PD associated with electrical treeing*, Ann. Rep. Conf. Electr. Insul. Diel. Phenom, Montreal, 1996, pp. 480-483.
- [31] M.D. Noskov, A.S. Malinovski, M. sach, A.J. Schwab, *Self Consistent of Electrical treeing propagation and PD activity*, IEEE Trans. DEI, Vol. 7, No. 6, 2000, pp. 725-733.
- [32] A.L. Kupershokh, C.P. Stamatelatos, D.P. Agoris, *Simulation of PD activity in solid dielectrics under AC Voltage*, Technical Physcs Lett, Vol. 32, No. 8, pp. 680-683.
- [33] M.D. Noskov, M. Sack, A.S. Malinovski, A.J. Schwab, *Measurement and simulation of electrical tree growth and partial discharge activity in epoxy resin*, J. Phys. D: Appl. Phys, Vol. 34, pp. 1389-1398, 2001.
- [34] Suwarno, H. Fajarsyah, *Computer Simulation of Partial Discharges in Liquid Insulation*, Accepted Int. Conf. Electr. Eng. And Informatics, Kuala Lumpur, August, 2009.
- [35] Suwarno, *A Model of Streamer Discharges in Insulating Liquid and Computer Simulation*, Res. J. Appl. Sciences, Vol. 4, Isue 4, 2009.
- [36] D.W. Kitchin, O.S. Prat, *Treeing in Polyethylene as a prelude to breakdown*, AIEEpt.III, No. 35, 1958, pp.180-186.
- [37] Suwarno, Juniko P, *Effects of Humidity and fog conductivity on the Leakage Current Waveforms of Ceramics for Outdoor Insulators*, WSEAS Transactions on Systems, Vol. 9,Issue 4, 2010, pp. 442-452, 2010.
- [38] F.Obenaus, *Contamination Flashover and Creepage Path Length*, Deutsche Electrotechnik, Vol. 4, pp. 136-136, 1958.
- [39] A. Mekhladi, D. Namane, S. Bauazabia, A. Beroul, *Flashover of Discontinuous Pollution Layer on HV Insulators*, IEEE Trans.s on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6 No. 6, 1999, pp. 900-906.
- [40] Karady, George, G., *Flashover Mechanism of Nonceramic Insulator*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 5, October 1999.
- [41] Aydogmus, Zafer and Cebeci, Mehmet. *A New Flashover Dynamic Model of Polluted HV Insulators*, IEEE Trans.s on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No. 4, Agust, 2004.
- [42] Suwarno, *Study on the waveform of Leakage Current on Outdoor Polymeric Insulators*, Proc. 2002 Joint Conf. ACED & K-J Symp. On HV, Seoul, Korea, pp. 398-401, Nov. 2002.
- [42a] Suwarno, *Leakage Current on outdoor Insulators under tropical*

Conditions, ISEIM 2003, Himeji, Japan, November 2003 pp.111-114.

- [43] AH El Hag , S.H. Jayaram, E.A. Cherney, Fundamental and low Freq. components of LC as a diagnostic Tool to Study Aging of RTV and HTV SIR in Salt-Fog, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 10, No. 1, 2003, pp. 128- 136, Feb. 2003.
- [44] T. Suda, *Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of a String of Suspension Insulators*, IEEE Trans., Power Delivery, Vol. 20, No. 1, pp. 481-487, Jan. 2005.
- [45] Vosloo W. L., Holtzhausen J. P., *A Model For The Electrical Discharge And Leakage Current Development On High Voltage Insulators*, IASTED Int. Conf.: Power and Energy Systems, Crete, June 2002.
- [46] Suwarno, *leakage Current Waveforms of Outdoor Polymeric Insulators and Possibility of Appalication for Diagnostics of Insulator Conditions*, KIEE Journal of Electr. Eng. and Technology, Vol. 1, pp. 114-119, 2006.
- [47] AH El Hag , S.H. Jayaram, E.A. Cherney, *Fundamental and low Freq. components of LC as a diagnostic Tool to Study Aging of RTV and HTV SIR in Salt-Fog*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, No. 1, 2003, pp. 128- 136, Feb. 2003.
- [48] Suwarno, Fari Pratomosiwi, *Electrical Equivalent Circuit of Ceramic Insulators with RTV Silicone Rubber Coating and Computer Simulation of Leakage Currents*, WSEAS Trans. on Circuits and Systems, Vol 8, No. 4, 2009, pp. 360-369.
- [49] Suwarno, F. Pratomosiwi, *Computer Simulation of Leakage Current on Ceramic Insulator under Clean Fog Condition*, 3rd Asia Int. Conf. on Modelling & Simulation, 2009, pp.508-513.
- [50] Suwarno, F. Pratomosiwi, *Electrical Equivalent Circuits of Outdoor Insulators based on Leakage Current Waveforms and Computer Simulation*,

Proc. IEEE Int. Conf. prop. Appl. Diel. Mats., Harbin, July, 2009.

- [51] Suwarno, F. Pratomosiwi, *Electrical Equivalent Circuit of Ceramics Insulators with RTV Silicone Rubber Coated and Computer Simulation of Leakage Current*, Int. Conf. Electr. Eng. and Informatics, Kuala Lumpur, August, 2009.
- [52] www.flir.com dan www.corocam.co.za.
- [53] LAPI-ITB, Laporan Diagnostik Generator PLTU Suralaya, 2005.
- [54] <http://www.toshiba.co.jp/f-ene/tands/english/switch/gis11.htm>.
- [55] Jakob, Fredy and Perjanik, Nicholas. Sulfur Hexafluoride – A Unique Dielectric, (2002).
- [56] IEEE C37.122 2010 Revision, IEEE Standard for High Voltage Gas-Insulated Substations Rated Above 52 kV, 2010.
- [57] Specification of technical grade sulfur hexafluoride (SF6) for use in electrical equipment, IEC 60376, 2005.
- [58] Common Specifications For High-Voltage Switchgear and Controlgear Standards, IEC Standard 60694, 2002.
- [59] Sauers, H.W. Ellis, and L.G. Christophorou, *Neutral Decomposition Products In Spark Breakdown of SF₆*, IEEE Trans. Electrical Insulation Vol.EI-22 No.2, pp.11-119, (1986).
- [60] SF-6 Recycling guide – Re-use of SF-6 gas in electrical power equipment and final disposal" by CIGRE 23.10, Task Force 01.
- [61] J. Densley, *Aging and Diagnosis in extruded insulation for power cable insulation*, ICSD, 1995, pp. 1-5.
- [62] M. Mashikian and A. Szatkowski, *Medium Voltage Cable Defects Revealed by Off-Line Partial Discharge Testing at Power Frequency*, IEEE

Electr. Insul. Magazine, Vol. 22, No. 4, 2006, pp. 24-32.

[63] Suwarno, Y. Suzuki, F. Komori, T. Mizutani, *Partial discharges due to electrical treeing in polymers: phase-resolved and time-sequence observation and analysis*, J. Appl. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 29, No. 11, 1996, pp. 2922-31.

[64] F. Petzold, M. Beigert, E. Gulski, *Experiences with PD offline Diagnosis on MV cables – Knowledge Rules for Asset Decisions*, CIRED, Asia Pacific Conference on T&D Asset Management, November, 2006.

[65] D.R. Morais, J.G. Rolim, *A Hybrid Tool for detection of Incipient faults in Transformers Based on the Dissolved Gas Analysis of Insulating Oil*, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 21, No. 2, 2006, pp. 673-680.

[66] M.K. Pradhan, *Assessment of the Status of Insulation during Thermal Stress Accelerated Experiments on transformer Prototypes*, IEEE Trans. DEI, Vol. 13, No. 1, 2006, pp. 227-237.

[67] A.M. Emsley, Stevens, *A Reassessment of the Low temperature Thermal Degradation of Cellulose*, 6th ICDM Appl., UK, 1992, pp. 229-232.

[68] B. Pahlavanpour, *Power Transformer Insulation Aging*, CIGRE SC 15 Symp. Sydney, 1995.

[69] IEC 156, *Insulating Liquids – Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency – Test Method*, Second Edition, 1995.

[70] ASTMD 877, *Standard test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids using Disk Electrodes*, ASTM Standard, Vol. 10.03.

[71] IEC 247, *Insulating Liquids – Measurement of Relative Permittivity, Dielectric Dissipation Factor ($\tan \delta$) and D.C. Resistivity*, International Standard, Third Edition, 2004.

[72] ASTM D 974, *Standard Test Method for Neutralization Number by Color-*

Indicator Titration, Annual book of ASTM Standard, Vol 05.01, 2007.

[73] M. Wang, *A Novel Extension Method for Transformer fault Diagnosis*, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 18, No. 1, 2003, pp. 164-169.

[74] IEEE Guide for Interpretation of Gases Generated in Oil Immersed Transformers, IEEE Std. C57.104-1991.

[75] ASTM D3612 - 02(2009) *Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography*.

[76] R.R. Rogers, *IEEE and IEC codes to interpret faults in transformers using gas in oil analysis*, IEEE Trans. Elect. Insul., Vol. 13, 1978, pp. 349-354.

[77] M. Duval, *Dissolved gas analysis. It can save your transformers*, IEEE IE magazine, Vol. 5, No. 6, 1989, pp. 22-27.

[78] McGrail, Tony. *Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) Tutorial*, Doble Client Conference 2004.

[79] E.P. Dick, and C.C. Erven, *Transformer diagnostic testing by frequency response analysis*, IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-97, No-6, Nov. 1978, pp.2144-2153.

[80] N. Abeywickrama., *Modelling of High Frequency Response of Transformer for Characterization of Insulation Quality*. Thesis. Sweden. 2005.

[81] B. Eilert., *High Frequency Modelling of Power Transformers*, Doctoral Thesis. Trondheim. May 2005.

[82] Suwarno, Donald F, *Frequency response Analysis (FRA) for Diagnosis of Power Transformers*, 7th Int. Conference IEEE ECTICON 2010, Chiang Mai, May 2010-09-29.

[83] M. Granaghan, P. Myrda, A. Sundaram, *Enabling Asset management with the Smart Grid*, Proc. 2010 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis,, Tokyo, September 2010, pp. 9-15.

[84] S. Massoud Amin and Bruce F. Wollenberg, *Toward A Smart Grid*, IEEE P&E Magazine, Vol. 3, No.5, 2005, pp 34-41.

[85] <http://www.smartgrid.gov>.

[86] Elizabeth Balkan, *China's Smart Grid Ambitions Could Open Door to US-China Cooperation*, Solve Climate, Jun 5, 2009.

[87] *Smart Grid: China Leads Top Ten Countries in Smart Grid Federal Stimulus Investments*, Zpryme Reports, New York, 27 january, 2010.

[88] What is Smart Grid and why is it important?, NEMA, 2011.

[89] Joe Miller, *What is smart grid ?*, Smart Grid news.com, March, 2009.

CURRICULUM VITAE



Nama : **SUWARNO**
Tempat lahir : Boyolali
Tanggal lahir : 10 November 1965
Nama Ayah : H. Harjosukirno (alm)
Nama Ibu : Hj. Sukamti
Nama Istri : Dra. Elin D. Hendarlin Apt.

Nama Anak :
1. Fathin Saifur Rahman
2. Hasna Afifah
3. Fauzan Abdurrahim
4. Haifa Nurul Karimah

Alamat kantor : Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, ITB
E-mail : suwarno@stei.itb.ac.id atau suwarno@ieee.org

RIWAYAT PENDIDIKAN:

1. 1971-1976 : SDN Teter, Simo, Boyolali, Jawa Tengah
2. 1977-1980 : SMPN Simo, Boyolali, Jawa Tengah
3. 1980-1983 : SMAN Boyolali, Jawa Tengah
4. 1983-1988 : Institut Teknologi Bandung, Jurusan Teknik Elektro, Sarjana Teknik Elektro (Ir.)
5. 1989-1991 : Institut Teknologi Bandung, Jurusan Teknik Elektro, Magister Teknik Elektro (MT)
6. 1992-1996 : Nagoya University, Japan, Electrical Engineering, Doctor of Engineering (Dr. Eng.)

RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL:

NO.	JABATAN FUNGSIONAL	TMT
1.	Asisten Ahli Madya	1 September 1991
2.	Asisten Ahli	1 Desember 1994
3.	Lektor Muda	1 Juni 1997
4.	Lektor Madya	1 Agustus 1999
5.	Lektor	1 Januari 2001
6.	Lektor Kepala	1 Maret 2002
7.	Guru Besar	1 Juni 2010

FELLOWSHIP:

1. Nov-Dec 1991 : JSPS Fellowship, Nagoya-Osaka, Japan
2. Oct-Nop 1996 : JSPS Research Fellowship, Nagoya, Japan
3. Oct-Des 2003 : Hitachi Research Fellowship, Nagoya University, Toyohashi University of Tech., Kyushu Inst. of Technology, Japan
4. Oct-Nop 2009 : Asea Uninet, HV Institute, TU Graz, Austria

RIWAYAT JABATAN DI ITB:

1. 1998-2003 : Sekretaris dan bendahara *Quality for Under-graduate Education* (QUE) Departemen Teknik Elektro ITB
2. 2000-2002 : Anggota Redaksi Majalah MITE Elektro
3. 2004-2005 : Anggota Majelis Departemen Teknik Elektro 2004-2005
4. 2001-2004 : Sekretaris Departemen urusan Keuangan, Kemitraan dan Sumberdaya Departemen Teknik Elektro ITB
5. 2004-2005 : Sekretaris Departemen untuk Penelitian dan Program

Pascasarjana Departemen Teknik Elektro ITB

6. 2004-2005 : Sekretaris KPPs Teknik Elektro- FTI ITB
7. 2003 : Ketua Tim Akreditasi Program Studi Tingkat Sarjana Departemen Teknik Elektro, FTI-ITB
8. 2005 : Penanggungjawab Tim Akreditasi Program Studi Tingkat Magister Departemen Teknik Elektro, FTI-ITB
9. 2005 : Anggota Panitia Penyusunan RKA STEI 2006
10. 2006-2010 : Wakil Dekan Bidang Sumber Daya Sekolah Teknik Elektro dan Informatika (STEI) ITB
11. 2006-2010 : Anggota Komisi Sumber Daya Senat STEI
12. 2006 : Panitia Adhoc "Tata Tertib, Kode Etik, Visi, Misi" STEI ITB
13. 2005-2008 : Anggota Senat STEI ITB
14. 2008-2010 : Anggota Senat STEI ITB
15. 2009-skg : Editor in Chief Int. Journal on Electrical Engineering and Informatics (IJEEI)
16. 2010-skg : Anggota editor ITB Journal of Engineering Science
17. 2010-2011 : Anggota Tim Statuta ITB
18. 2011-2014 : Dekan STEI ITB

PENGAJARAN (5 tahun terakhir):

1. Teknik isolasi tegangan tinggi
2. Material Teknik Elektro
3. Medan Elektromagnetik
4. Lingkungan Tropik dan Fenomena Listrik

- 5. Tugas Akhir I
- 6. Thesis I

AKTIVITAS AKADEMIK INTERNASIONAL DAN NASIONAL

- 1. 1998 : **Ketua** Seminar Nasional dan Workshop Teknik Tegangan Tinggi Indonesia I di Bandung
- 2. 1999-skrg.: **Sekretaris & bendahara** Forum Studi Teknik Tegangan Tinggi antar Universitas (FOSTU)
- 3. 1999-2004 : **Ketua Redaksi** Jurnal Teknik Tegangan Tinggi Indonesia
- 4. 1999 : **Pengarah Nasional** Seminar Nasional dan Workshop Teknik Tegangan Tinggi, Kampus UGM Yogjakarta
- 5. 2000 : **Pengarah Nasional** Seminar Nasional dan Workshop Teknik Tegangan Tinggi, Kampus UI Depok
- 6. 2000-now : **International Advisory Committee Member**, IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)
- 7. 2001-now : **International Advisory Committee Member**, IEEE, IEEJ, Int. Symp. on Electrical Insulating Materials (ISEIM)
- 8. 2001 : **Pengarah Nasional** Seminar Nasional dan Workshop Teknik Tegangan Tinggi, Batam
- 9. 2002-skrg.: **Bendahara** Himp. Ahli Tegangan Tinggi Indonesia
- 10. 2002 : **Pengarah Nasional** Seminar Nasional dan Workshop Teknik Tegangan Tinggi, Kampus UGM Yogjakarta
- 11. 2005 : **International Scientific Committee Member**, IEEE, CIGRE, CSEE International Symp. on High Voltage

- 12. 2005 : **Session Chairman** IEEE, CIGRE, CSEE International Symp. on High Voltage Engineering (ISH), Beijing, August 2005
- 13. 2005 : **Pengarah Nasional** Seminar Nasional dan Workshop Teknik Tegangan Tinggi, Kampus UNDIP, Semarang
- 14. 2005 : **Invited Lecturer** at IEEE, IEEJ International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Kyushu, Japan, 2005
- 15. 2006 : **General Chairman**: 8th IEEE Int. Conf. on Properties and App. of Dielectric Materials (ICPADM), Bali 2006
- 16. 2006 : **Session Chairman**: 2006 IEEE, IEE, CIGRE, KIEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Changwon, Korea, April, 2006
- 17. 2006 : **Invited Speech**: 2006 IEEE, IEE, CIGRE, KIEE Int. Conf. CondMonitoring and Diagnosis, Changwon, Korea, April, 2006
- 18. 2006-now : IEEE, **Reviewer**, IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation (DEI)
- 19. 2007 : **General Chairman**: Int. Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI 2007), Bandung, July, 2007
- 20. 2007 : **Int. Scientific Comm. Member**, IEEE Int. Conference on High Voltage Engineering (ICHVE), Chongqing, China, 2007
- 21. 2007 : **Pengarah Nasional** Seminar Nasional dan Workshop Teknik Tegangan Tinggi, Kampus UNHAS Makassar

22. 2008 : **Session Chairman** : 2008 IEEE, IEE, CIGRE, KIEE, Int. Conf. on Condition Monitoring and Diag., Beijing, April, 2008
23. 2008-now : **Reviewer**, IET (IEE, IIE) Journal on Generation, Transmission and Distribution
24. 2008-now : **Reviewer**, Transactions of the Society for Modeling and Simulation International
25. 2010-now : **Reviewer**, Springer International Journal of Materials Engineering and Performance
26. 2010 : **Invited lecture**: IEEE, CIGRE,IET International Conference on Monitoring and Diagnosis, Tokyo, September, 2010,
27. 2010 : **Chairman**, IEEE Computational Intelligence, Modeling and Simulation, Bali, 28-30 September 2010,
28. 2010 : **Key note lecture**: Asian Conference on Electrical Discharges, Xian, China, November, 2010
29. 2011 : **Chairman** of Int. Advisory Comm., Int. Conf. on Electrical Engineering and Informatics, Bandung, July, 2011
30. Feb 2011-skrg. : **Executive Chairman** Asia-Oceania Top University League on Engineering (AOTULE)
31. 2012 : **Elected in Beijing 2008 as General Chairman** for IEEE, IEE, CIGRE, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) 2012, Bali, Indonesia

PENGHARGAAN INTERNASIONAL DAN NASIONAL

1. 2009 : **Juara I Dosen Berprestasi Tingkat Nasional 2009**, Menteri

- Pendidikan Nasional, Jakarta, 14 Agustus 2009
2. 2006 : **IEEE Service Appreciation Award** dari President IEEE DEIS, 6 Oktober 2006
3. 2003 : **Satyalencana Karyasatya 10 tahun** dari Presiden RI, Kepres No.065/TK/2003, 20 september 2003
4. 2002 : **Best Paper Presentation Award**: 2002 Joint Conf. of Asian Conf. on Electrical Discharges & Kore-Japan Symp. on Elect. Discharge and HV Eng., Seoul, Korea, 20 Nopember 2002
5. 1995 : **1995 Excellent Paper Award** (電気学会論文発表賞, 平成7年3月31日) dari President IEE Japan, Tokyo, 31 Maret 1995
6. 1994 : **ICPADM-94 Best Paper Price**, IEEE Int. Conference on properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), dari IEEE Queensland Section,Australia 1994
7. 1994 : **1994 Excellent Paper Award**,(電気学会論文発表賞, 平成6年3月31日) dari President IEE Japan, Nagoya, 31 Maret 1994

HIBAH PENELITIAN

Dalam rangka penelitian maka penulis banyak mendapatkan bantuan dalam bentuk grant penelitian:

1. 1996-1998 : URGE DIKTI
2. 1996 dan 2001 : JSPS
3. 1999-2000 : Asahi Glass Foundation
4. 2000 : Hitachi Scholarship Foundation
5. 2006-2008 : Riset KK ITB
6. 2007-2010 : Hibah Kompetensi DIKTI
7. 2009 : Riset Internasional ITB, OEAD Austria dan KIT

- Japan
8. 2010 : Hibah kerjasama Internasional DIKTI & KKITB
 9. 2011 : Asahi Glass Foundation & Hibah Bersaing DIKTI

PUBLIKASI:

BUKU:

1. Material Elektroteknik (2006), ISBN: 979-99701-1-3, 256 hal, penerbit Megatama
2. Diagnosis of High Voltage Equipments (2010), ISBN: 978-979-1344-84-5, Penerbit ITB

JURNAL INTERNASIONAL (4 tahun terakhir)

1. **Suwarno**, "Leakage Current Waveforms of Outdoor Polymeric Insulators and Possibility of Application for Diagnostics of Insulator Condition", *Journal of Electr. Engi. and Tech., The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 1, No. 1, 2006, pp. 114-119, 2006
2. **Suwarno**, Wayan Wiratmaja, Improving the Performances of Outdoor ceramic Insulators under Severe Conditions by Using Silicone Compound Coatings, *WSEAS Transaction on Power System*, Issue 6, Vol. 1, June 2006 pp. 1001-1008, 2006
3. **Suwarno**, M. Fadli Salim, "Effects of Electric Arc on Dissolved gas in Transformer Oils and Analysis using Total Combustible Gas, Key Gases, Roger's Ratio and Duval Triangle Methods", *WSEAS Trans. on Power System*, Issue 8, Vol. 1, August 2006 pp. 1484-1490, 2006
4. **Suwarno**, Sigit K. Ardianto, "Study on Leakage Current, Hydrophobicity and Flashover Characteristics of Epoxy Resin for
5. **Suwarno**, Mizutani, "Pulse Sequence Analysis of Discharges in Air, Liquid and Solid Insulating Materials", *Journal of Electrical Engineering and Technology, The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 1, No. 4, 2006, pp. 528-533, 2006
6. Syarif Hidayat, **Suwarno**, R. Zoro, "Current Status of High Voltage Engineering in Indonesia", *Trans. on Power Eng., Inst. of Electrical Engineers of Japan*, Vol 127 No. 12. Pp.1238-1241, 2007
7. Waluyo, Parouli Pakpahan, **Suwarno**, Maman Djauhari, "Study on leakage current waveforms of porcelain insulator due to various artificial pollutants" *International Journal of Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 2 no. 1 pp. 27 – 34, 2008
8. **Suwarno**, Irawan S, Dielectric properties of mixtures between mineral oil and natural ester from palm oil, *WSEAS Transactions on Power System*, Vol. 3, No. 2, 2008, pp. 37-46.
9. **Suwarno** and Juniko P, "Investigation on Leakage Current Waveforms and Flashover Characteristics of Ceramics for Outdoor Insulators under Clean and Salt Fogs", *WSEAS Transaction on Power System*, Issue 5, Vol. 3, May 2008 pp. 350 – 359, 2008
10. Waluyo, P. Pakpahan, **Suwarno**, Maman A.D., "Comparative Study on Properties of Coastal Polluted Porcelain and Epoxy Pesin Outdoor Insulators", *International Journal of Computer and Systems Science and Engineering* Vol. 2 No. 3, 2008
11. **Suwarno**, "Time Sequential and Phase-resolved measurement and Analysis of Corona Discharge in Air and Streamer Discharge in Insulating Liquid", *International Journal on High Voltage Engineering*,

Vol. 34, No. 12, December 2008, pp. 2583-2588

12. **Suwarno**, Sigit KA, "LC Waveforms and Arcing Characteristics of Epoxy Resin for Outdoor Insulators under Clean and Salt Fogs", *ITB Journal on Engineering Science*, Vol. 40 B No. 1, 2008
13. Waluyo, Ngapuli, **Suwarno**, "Comparison of Eight Month Coastal Polluted Porcelain and Epoxy Resin Outdoor Insulators", *ITB Journal on Engineering Science*, Vol. 40 B, No.2, 2008
14. **Suwarno**, Role of Applied Voltage Waveforms on Partial Discharge Patterns of Electrical Treeing in Low Density Polyethylene, *International Journal of Electrical and Power Engineering*, Vol.3, Issue 3, 2009 pp.184-190
15. **Suwarno**, Fari, "Equivalent Circuit of ceramic Insulators with RTV Silicone Rubber Coating", *WSEAS Journal on Circuits and Systems*, 2009, Vol. 8, Issue 4, pp. 360-369, 2009
16. **Suwarno**, "Model of Partial Discharges in Liquids and Computer Simulation", *Research Journal of Applied Sciences*, Vol. 4 Issue 4, pp. 134-141, 2009
17. Waluyo, N. Sinisuka, **Suwarno**, maman DJ, "Different Properties on Surface leakage and Discharge Currents of Porcelain Insulator Material", *Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering*, Vol. 2 No. 3, 2009, pp. 167-175, 2009
18. Waluyo, N. Sinisuka, **Suwarno**, maman DJ, "Study on Discharge Current Phenomena of Epoxy resin Insulator Specimen" *Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering*, Vol. 3 No. 2, pp. 99-108, 2009
19. **Suwarno**, Juniko P., "Roles of Humidity and Fog Conductivity on leakage Current of ceramic Insulators", *Journal of Engineering and*

Applied Sciences, Vol. 4, No. 4, pp. 282-287, 2009

20. Waluyo, N. Sinisuka, **Suwarno**, Maman DJ, "Comparative Study on the Properties of Porcelain and Epoxy Resin Insulators taken from Coastal Area in Indonesia", *The Int. Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, Vol. 5 No. 1, pp. 22-39, 2010
21. Waluyo, N. Sinisuka, **Suwarno**, Maman DJ, "Leakage Current and Pollutant Properties of Porcelain Insulators from Geothermal area", *Transactions on Electrical Engineering, Electronics and Communications*, Vol. 8, No. 1, pp. 126-145, 2010
22. **Suwarno**, Juniko P, "Effects of Humidity and fog conductivity on the LC Waveforms of Ceramics for Outdoor Insulators", *WSEAS Transactions on Systems*, Vol. 9, Issue 4, 2010, pp. 442-452, 2010
23. **Suwarno**, A Holistic Approach of Analysis, Modeling and Simulation of Partial Discharges, Accepted, *International Journal on High Voltage Engineering*, Vol. 37, 2011

JURNAL NASIONAL (5 TAHUN TERAKHIR)

1. **Suwarno**, Ronald P. Hutahaean, "Simulasi Pemohonan Listrik (Electrical Treeing) pada Isolasi Polimer dengan Menggunakan Metoda Cellular Automata", *Proceedings ITB Sains & Tek*, Vol. 37 A, No. 2, 2005, pp. 115-129, 2005
2. **Suwarno**, Wahid Pinto, "Analisis Gas terlarut pada Minyak Transformator tegangan Tinggi", *Jurnal ITENAS*, Vol. 9, No. 4, Des 2005- Feb 2006
3. **Suwarno**, "Dielectric Properties of Palm Oils as High Voltage Liquid Insulating Material", *Jurnal Sains dan Teknologi EMAS, UKI*, Vol. 15, No. 4 Nopember 2005, hal. 25-33

4. **Suwarno**, Perdana Hutabarat, "Studi Pemohonan Listrik dan Peluahan Sebagian isolasi Tegangan Tinggi Resin Epoksi", *Jurnal ITENAS*, Vol. 10, No. 4, Des 2006- Feb 2007

PROCEEDINGS KONF. INTERNASIONAL (5 TAHUN TERAKHIR, SELECTED)

1. **Suwarno**, Prasetijo, D., "Researches on high voltage engineering and their future trend in Indonesia", *Electrical Insulating Materials*, 2005. (ISEIM 2005). *Proceedings of 2005 International Symposium on Vol. 1*, 5-9 June 2005 Page(s):131 - 134
2. **Suwarno**, "Diagnostics of outdoor insulators using leakage current waveform parameters", *Elect. Insulating Mat.*, 2005. (ISEIM 2005). *Proc. of 2005 Int. Symp. on Vol. 1*, 5-9 June 2005 Page(s):111 - 114
3. **Suwarno**, "Suppression of leakage current and improving insulator voltage withstand using silicone compound coating", *Power Eng. Conf. IPEC 2005*, 29 Nov.-2 Dec. 2005
4. **Suwarno**, "Phase-Resolved Analysis of Discharges in Air, Liquid and Solid Insulating Materials", *Power Engineering Conference, 2005. IPEC 2005. The 7th International* 29 Nov. - 2 Dec. 2005
5. **Suwarno**, Aditama, "Dielectric Properties of Palm Oils as Liquid Insulating Materials Effects of Fat Content", *Int. Symp. on Electrical Insulating Materials, Kitakyushu*, June 2005
6. M. Latif, **Suwarno**, "Performance of 20 kV Epoxy Resin Outdoor Insulator under Various Environment Conditions", *The 8th Int. Conf. on Properties and App. of Dielectric Mats.*, Bali 26-30 June, 2006
7. **Suwarno**, Fadli Salim, "Effects of Electric Arc on Dielectric Properties of Dielectric Liquids", *The 8th Int. Conf. on Properties and*

- App. of Dielectric Mats.*, Bali 26-30 June, 2006
8. A. Syakur, **Suwarno**, "The Influence of Humidity on PD Characteristics in a Void in Polyvinyl Chloride (PVC)", *The 8th Int. Conf. on Prop. and App. of Dielectric Mats.*, Bali 26-30 June, 2006
9. Waluyo, Parouli P, **Suwarno**, "Study on Electrical Equivalent Circuit Models of Polluted Outdoor Insulators", *The 8th Int. Conf. on Properties and App. of Dielectric Mats.*, Bali 26-30 June, 2006
10. Waluyo, Parouli P, **Suwarno**, "Influences of water Droplet Sizes and Contact Angle on the Electric Field and Potential Distributions on an Insulator Surface", *The 8th Int. Conf. on Properties and App. of Dielectric Mats.*, Bali 26-30 June, 2006
11. Valdi, **Suwarno**, "Comparison of Ceramics and Epoxy Resin Performance as 20 kV Outdoor Insulator in Tropical Environment", *Int Conference on EE and Informatics*, Bandung 17-19 June 2007
12. Suwarno, Juniko P, "LC, Hidrophobicity and Flashover Characteristics of Ceramics Insulators under Artificially Pollution", *Int Conf. on EE and Informatics*, Bandung 17-19 June 2007
13. **Suwarno**, M. Ilyas, "Study on the Characteristics of Jatropha and Ricinnus Seed Oils as Liquid Insulating Materials", *15th Int. Symp. on High Voltage Eng.*, Lubjana, Slovenia, August 2007
14. **Suwarno**, T. Mizutani, "Diagnosis of Insulation Conditions : Interpretation of Partial Discharges from ϕ -q-n pattern, Pulse-Sequence and Pulse Waveform", *International Conference on Monitoring and Diagnosis of Electrical Plants*, Beijing, April 2008
15. **Suwarno**, M. Ilyas, Rubadi, "Effects of temperature on Dielectric properties of Rhicinnus Oils as insulating liquid", *Int. Conf. on Monitoring and Diagnosis of Electrical Plants*, Beijing, April 2008

16. **Suwarno** and Irawan S. Darma, "Dielectric Properties of Mixtures between Mineral Oil and Natural Ester from Palm Oil", *Int Symp. on Elect. Insulating Materials (ISEIM)*, Japan, September 2008
17. **Suwarno**, "On Comparison between Corona Discharge in Air and Streamer in Silicone Oil", *International conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing, China, November 2008
18. **Suwarno**, F. Pratomosiwi, "Computer Simulation of Leakage Current on Ceramic Insulator under Clean Fog Condition", *2009 Asia International Conference on Modelling & Simulation*, 2009
19. **Suwarno**, Fari P., "Electrical Equivalent Circuits of Outdoor Insulators based on Leakage Current Waveforms", *IEEE Int. Conf on Prop and Appl Diel Mats*, Harbin, China July 2009
20. Waluyo, Ngapuli, **Suwarno**, "Effect of Pressure on Discharge Current Harmonics of Porcelain Insulators", *IEEE Int. Conf. on Electrical Eng. and Informatics*, Kualalumpur, 5-7 August, 2009
21. **Suwarno**, Caesario, Anita, "Partial Discharge Diagnosis of Gas Insulated Station (GIS) Using Acoustic Method", *IEEE Int. Conf. on Electrical Eng. and Informatics*, Kualalumpur, 5-7 August, 2009
22. Waluyo, Maman, N.I. Sinisuka, **Suwarno**, "A Robust Canonical Analysis in the study of LC behavior of Geothermal Polluted Porcelain Insulators", *ICCI-BME*, November 2009
23. Radjab, **Suwarno**, Aminuddin, "Properties of RBDPO Oleum as candidate of palm Based Transformer Ins. Liquid", *IEEE Int. Conf. on Electrical Eng. and Informatics*, Kualalumpur, 5-7 August, 2009
24. **Suwarno**, Fajarsyah, "Computer Simulation of PD in Liquid Insulation", *IEEE Int. Conf. on Electrical Eng. and Informatics*, Kualalumpur, 5-7 August, 2009
25. **Suwarno**, "A Model and Computer Simulation of PD in High Voltage Liquid Insulation", *IEEE, Asia Modelling and Simulation Conference*, 2010, Kota Kinabalu, May 2010
26. **Suwarno**, Donald F, "Frequency response Analysis (FRA) for Diagnosis of Power Transformers", *7th Int. Conference IEEE ECTICON 2010*, Chiang Mai, May 2010
27. **Suwarno**, Aditya P, "Properties of Leakage Current on 20 kV Ceramic Insulators and Computer Simulation Based on Electrical Equivalent Circuit", *Int. Conf. on Electrical Engineering and Electronics, IAENG*, London, UK, July, 2010
28. **Suwarno**, Fajar P. "Properties of Partial Discharges in Liquid Insulating material and Computer Simulation", *IEEE-CIGRE, Int. Confon CMD*, Tokyo, September 2010, **invited paper**, 2010
29. **Suwarno**, David P, LC Waveforms of Epoxy Resin Insulators Under Clean Fog And Computer Simulation Using Atp/emtp, ", *IEEE-CIGRE, Int. Confon CMD*, Tokyo, September 2010
30. Deny Hamdani, U. Khayam, **Suwarno**, M. Kozako, M. Hikita, "Partial Discharge recognition in Three Phase GIS using Neural Network" *IEEE-CIGRE, Int. Confon CMD*, Tokyo, September 2010
31. **Suwarno**, Daniel D.P., Characteristics of Leakage Current on Epoxy Resin Insulators: Non Linear Behavior 15th Asian Conference on Electrical Discharge, November 7 - 10, 2010, Xi'an – China

PROCEEDINGS KONFERENSI NASIONAL (5 TAHUN TERAKHIR, SELECTED)

1. M. Latif, **Suwarno**, "Unjuk Kerja permukaan isolator Polimer Epoxy Resin 20 kV pada Berbagai Kondisi Lingkungan", *Seminar Nasional*

Teknik Ketenagalistrik 2005, Undip Semarang, 24 Nopember 2005

2. **Suwarno**, Charles P.M., "Pengaruh Usia Pakai thd Karakteristik Dielektrik PVC", *Seminar Nas. T. Ketenagalistrikan*, Undip, 2005
3. M. Latif, **Suwarno**, "Pola Arus Bocor Permukaan isolator Pasangan Luar Polimer Epoxy Resin 20 kV", *SITIA*, ITS Surabaya, 2 Mei, 2006
4. **Suwarno**, M. Latif, "Tegangan Lewat Denyar Isolator Polimer Epoxy Resin 20 kV", *SITIA 2006*, ITS Surabaya, 2 Mei, 2006
5. **Suwarno**, M. Furqon, "Pengaruh Korona thd Hidrofobisitas, ?rdan tan δ material SIR", *SITIA*, ITS Surabaya, 2006
6. **Suwarno**, "Pengaruh Usia Pakai terhadap Karakteristik Dielektrik dan Gas Terlarut pada Minyak Transformator", *Int. Seminar on Electrical Power, Electronics, Communication, Control and Informatics*, UNIBRAW Malang, 16-17 Mei, 2006
7. **Suwarno**, T. Anasrul, "Study on Properties of Palm Oils as Biodegradable Liquid Ins. Materials", *Int. Seminar on Electrical Power, Control and Informatics*, UNIBRAW Malang, Mei, 2006
8. **Suwarno**, R. Arif, "Pengaruh rekondisi thd Karakteristik Dielektrik Minyak Transformator", *Int. Seminar on Electrical Power, Control and Informatics*, UNIBRAW Malang, Mei, 2006
9. Rubadi, Abdul Rajab, **Suwarno**, "Studi Biodegradabilitas dan Pengaruh Busur Api (Arcing) Terhadap Karakteristik Dielektrik Metil Ester dari Minyak Jarak Pagar", *Seminar Nasional Teknik Ketenagalistrikan*, UNHAS, Makassar, 17-18 Juli 2007
10. Abdul Rajab, T. Anasrul, **Suwarno**, "Investigasi Minyak Sawit sebagai Isolasi Transformator Ramah Lingkungan", *Seminar Nasional T. Ketenagalistrikan*, UNHAS, Makassar, 17-18 Juli 2007

PENGABDIAN PADA MASYARAKAT (5 TAHUN TERAKHIR, SELECTED)

1. 2004-2005 : Team Leader LPPM ITB, Jasa Konsultansi Pekerjaan Studi/Evaluasi kelistrikan Kilang UPT II Dumai dan Pembuatan Engineering Design Package, UPT II Pertamina, Dumai
2. Team Leader LAPI ITB, Asesment isolasi generator PLTU Suralaya Unit 2, 2005
3. "Konsultansi assessment kerusakan generator GT 2 & 3 PLTGU Priok", Indonesia Power, Juli- Agustus 2007
4. "Assessment Generator PLTU Indralaya - Palembang", Indonesia Power, Nopember 2008
5. Pelatihan, "Partial Discharge, Korona dan IR Thermograpgy", Indonesia Power Kamojang, Kamojang, 27-30 April 2009
6. 2010, Asesment isolasi pada generator pada PLTP Kamojang
7. "Kajian ekstensi GIS 500 kV Kembangan", PT PLN P3B, 2009
8. "Kajian thermal transformator 500/150 kV", PT PLN P3B, 2010

