

**Rancang Bangun Pemotong Surja Tegangan
Pada kWh Meter Tiga Fasa Menggunakan PCB
(*Printed Circuit Board*)**

PUBLIKASI JURNAL SKRIPSI



Disusun oleh:

**DESINTA AYU WORO HENDRASWARI
NIM. 0910633040-63**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2014**

Rancang Bangun Pemotong Surja Tegangan Pada kWh Meter Tiga Fasa Menggunakan PCB (*Printed Circuit Board*)

Desinta Ayu Woro Hendraswari¹, Drs.Ir.Moch.Dhofir,MT.², Dr.Ir.Harry Soekotjo D,M.Sc.³

¹Mahasiswa Teknik Elektro, ^{2,3}Dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: desintadesinta@yahoo.com

Abstrak— Penelitian ini menguraikan tentang “Rancang Bangun Pemotong Surja Tegangan pada kWh Meter Tiga Fasa Menggunakan PCB (*Printed Circuit Board*)”. Arrester tiga fasa ini dapat digunakan pada kategori III yang memiliki tegangan ketahanan impuls 4 kV. Arrester tegangan rendah untuk catu daya 380 V/50 Hz dapat berupa susunan elektroda sela udara. Agar efisien, ekonomis, dan sederhana dalam rekayasanya, maka dibuat arrester tiga fasa dari bahan PCB (*Printed Circuit Board*). Metode yang digunakan adalah perencanaan arrester, pengujian, dan analisis. Arrester direncanakan sebagai peralatan pelindung surja tegangan untuk peralatan tegangan rendah 380 V/50 Hz dengan tingkat proteksi 4 kV impuls. Perencanaan arrester meliputi bentuk geometri elektroda, jarak sela elektroda, dan perbesaran (panjang sela) elektroda. Dalam penelitian ini, elektroda sela udara yang dirancang menggunakan pendekatan perkiraan tegangan tembus kemudian disimulasikan menggunakan FEMM 4.2 untuk mengetahui efisiensi keseragaman arrester PCB. Selanjutnya dilakukan pengujian dan analisis karakteristik v-t, ketahanan arrester PCB terhadap tegangan AC, probabilitas tembus arrester PCB. Sebagai hasil akhir, dalam skripsi ini disimpulkan bahwa pada karakteristik v-t arrester PCB tiga fasa dapat memotong 4 kV impuls sesaat sebelum puncak impuls. Selain itu, arrester PCB tiga fasa dapat kepastian tembus lebih dari 95% yaitu 4 kV.

Kata Kunci— Tegangan impuls, arrester PCB, FEMM 4.2, v-t curve, probabilitas.

I. PENDAHULUAN

Sering kebutuhan akan listrik ini semakin meningkat, banyak masyarakat yang menyalah gunakan listrik ini untuk kepentingan pribadi. Seperti yang sering terjadi di salah satu kasus pencurian listrik pelanggaran yang sering terjadi didominasi oleh pelanggaran kategori satu atau memperbesar daya listrik secara diam-diam. Dengan cara merusak salah satu fasa pada kWh meter tersebut.

Dari penjelasan diatas keberadaan alat pelindung terhadap tegangan lebih telah menjadi suatu keharusan, dan bukan lagi sebagai pelengkap dalam sistem proteksi tegangan rendah. Untuk mengamankan peralatan listrik dari bahaya tegangan lebih digunakan arrester jenis PCB sebagai proteksi. Arrester berfungsi melindungi peralatan sistem tenaga listrik dengan cara membatasi surja tegangan yang datang dan mengalirkannya ke tanah.

Menurut standart DIN VDE 0110/IEC Publ.664, arrester kategori III dapat memotong 4 kV sesuai

dengan aplikasi arrester yaitu proteksi kWh meter. Arrester dengan jenis PCB dipilih karena memiliki bentuk yang efisien, fleksibel, mudah didapat, dan harga yang terjangkau. Selain itu arrester dengan jenis PCB ini merupakan suatu inovasi, karena sebelumnya arrester proteksi tegangan rendah dibuat dengan menggunakan lain.

Maka dari pembahasan diatas penulis mencoba merancang arrester dengan tingkat proteksi 4 kV dengan menggunakan PCB dan menguji karakteristik impulsnya. Dari karakteristik tersebut akan didapatkan probabilitas tembus dan kelayakan arrester dengan PCB untuk memproteksi tegangan lebih tersebut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Tegangan Lebih

Suatu sistem tenaga listrik bisa mengalami gangguan yang dapat mengakibatkan terhentinya penyaluran daya listrik. Salah satu penyebab gangguan yang mungkin terjadi adalah rusaknya salah satu fasa pada kumparan tegangan kWh meter karena pengaruh tegangan lebih akibat injeksi tegangan yang berlebihan maupun akibat surja hubung. Oleh karena itu, dalam pengoperasian sistem tenaga listrik perlu perhatian khusus pada sistem proteksi terhadap tegangan lebih (Arismunandar, 1990). Tegangan lebih adalah tegangan yang hanya dapat ditahan untuk waktu yang terbatas (Sirait dan Zorro, 1987).

B. Arrester Jenis PCB

perlindung terhadap tegangan surja berfungsi untuk melindungi peralatan dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang datang dan mengalirkannya ke tanah. Arrester digunakan untuk mengamankan peralatan sistem terhadap gangguan petir secara tidak langsung. Arrester dirancang untuk dapat membatasi tegangan lebih surja di sistem pada harga yang aman. Pada kondisi normal, arrester bersifat sebagai isolator namun ketika terdapat surja arrester bersifat sebagai konduktor dengan meneruskan surja tersebut ke tanah. Setelah surja dilepaskan, arus masih mengalir karena adanya tegangan sistem. Arus ini dinamakan arus dinamik atau arus susulan. Arrester harus mempunyai ketahanan termis yang cukup terhadap energi dari arus susulan ini, dan mampu memutuskannya.

Arrester jenis PCB merupakan inovasi arrester baru sebagai salah satu komponen pelindung surja yang digunakan pada sistem tegangan rendah. PCB biasa digunakan untuk mendukung semua komponen-komponen elektronika yang berada diatasnya. Tingkat proteksinya (*protection level*) ditentukan oleh jarak sela dan dimensi dari elektroda tersebut.

Prinsip kerja dari arrester PCB ini adalah keluaran tegangan R, S, T, N, G pada kWh meter dihubungkan

pada masing-masing fasa, sedangkan netral dan ground ditempatkan satu titik (node). Pada penelitian ini pengujian akan dilakukan antar fasa-ground dan netral-ground.

C. Faktor Efisiensi

Bila efisiensi medan suatu elektroda diketahui, maka kuat medan maksimum dari suatu dielektrik pada sela elektroda pada sela elektroda dapat ditentukan. Demikian pula bila kuat medan tembus suatu dielektrik dan faktor efisiensi medan suatu sela elektroda diketahui maka tegangan tembus pada sela elektroda tersebut dapat ditentukan yaitu :

$$U_d = E_m \cdot s \cdot \eta$$

$$\text{dan } \eta = \frac{E_r}{E_m}, E_r = \frac{U_d}{s}$$

keterangan:

η = efisiensi medan listrik pada susunan elektroda

E_r = kuat medan listrik rata-rata (kV/cm)

E_m = kuat medan listrik lokal tertinggi (kV/cm)

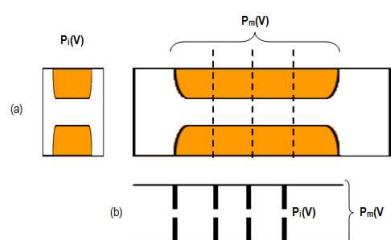
U_d = tegangan tembus pada susunan elektroda (kV)

s = jarak sela antar elektroda (cm)

Dari persamaan diketahui bahwa tingkat tegangan tembus berbanding lurus dengan jarak sela. Sedangkan E_m merupakan kekuatan dielektrik udara yang pada kerapatan udara tegangan impuls besarnya 41 kV/cm. Pada medan seragam kenaikan tegangan tembus U_d berbanding lurus dengan kenaikan jarak sela (s). Namun demikian kenaikan jarak sela dapat menyebabkan penurunan homogenitas medan di dalam ruang diantara elektroda, sehingga hubungan antara jarak sela dan tegangan tembus tidak linier lagi.

D. Hukum Perbesaran (Enlargement Law)

Pada hukum perbesaran ini menggambarkan bahwa tegangan tembus terjadi ketika sistem isolasi diperbesar (bertambah) dimensinya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2



Gambar 2 Representasi perbesaran dimensi
Sumber : Hauschild, W.,1992;260

E. Pengujian Volt-Time Curve Arrester

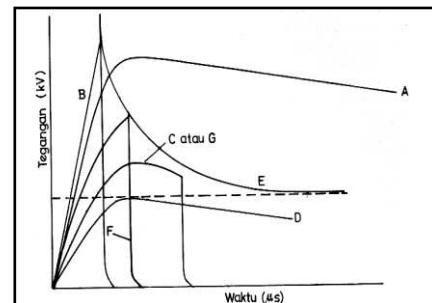
Volt-Time Curve (u-t curve) merupakan tempat kedudukan titik potong gelombang tegangan impuls oleh suatu arrester. Dengan demikian kurve ini merupakan karakteristik pemotongan tegangan arrester. Kurva ini diimplementasikan untuk koordinasi isolasi antara arrester sebagai peralatan pengaman tegangan lebih dengan peralatan listrik yang diamankan. Tembus lengkap terjadi setelah waktu interval kelambatan

waktu statistik t_s dan kelambatan waktu formatif t_f dikombinasikan disebut kelambatan waktu penyalaan (ignition time lag), yang dapat dituliskan dalam bentuk persamaan :

$$t_l = t_f + t_s$$

dimana jika $t_s \ll 0$ ($t_s \ll t_f$), $t_l = t_0 + t_s + t_f$

Bentuk kurva karakteristik tegangan tembus terhadap waktu seperti pada gambar 2 berikut



Gambar 3 Lengkung volt-waktu
Sumber : Arismunandar, 1983 : 115

F. Penentuan Nilai Probabilitas Tembus

Pada kelompok penyelidikan yang pertama diterapkan tegangan dengan bentuk tertentu secara berulang pada sampel yang sama (atau pada beberapa sampel yang identik sehingga terjadi tembus yang merusak); jumlah peluahan tembus n_d dari seluruh penerapan n setiap saat ditentukan untuk nilai tegangan U yang tertentu. Probabilitas tembus $P(U) = n/n_d$ dengan demikian akan diperoleh secara langsung. Beberapa nilai karakteristik yang penting ialah tegangan U_{d-50} , U_{d-5} dan U_{d-95} .

Fungsi kerapatan probabilitas dari variabel acak menjelaskan frekuensi yang relatif pada nilai yang berbeda terhadap variabel acak. Fungsi kerapatan probabilitas pada distribusi Normal diberikan pada Persamaan () (Lovric, 789,1738).

$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)}$$

dengan:

x : nilai pada axis

μ : nilai rata-rata dari seluruh data

σ : nilai deviasi standar seluruh data

Sedangkan untuk mencari nilai mean atau rata-rata μ dan deviasi standar σ dari data-data tersebut adalah

(Lovric, 789, 1739)

$$\mu = \frac{\sum f x}{f}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

dengan:

f : frekuensi data

x : nilai data

N : jumlah keseluruhan data

x_i : nilai data pada urutan ke-i

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Studi Literatur

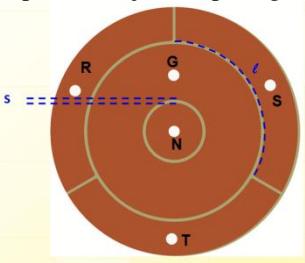
Untuk studi literatur digunakan, teori mengenai tegangan lebih atau surja petir yang mengakibatkan perlunya proteksi terhadap peralatan tegangan rendah,

teori mengenai impuls, dimensi (perbesaran) elektroda, bentuk geometri elektroda dan jarak sela antar elektroda agar dapat memotong tegangan lebih.

B. Variabel Penelitian

Variabel utama yang terkait dengan penelitian ini adalah jarak sela (d), perbesaran dimensi elektroda yang merupakan perbesaran dimensi ruang elektroda (panjang, luas, atau volume), bentuk geometri elektroda yang diukur dari faktor efisiensi medan (η).

Ketiga variabel tersebut digambarkan sebagai obyek uji seperti ditunjukkan pada gambar 5,



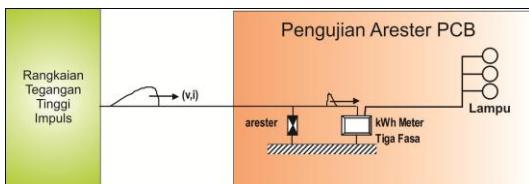
Gambar 5 Objek Uji dengan Dimensi
Sumber : Perencanaan

Keterangan :

- R,S,T : Fasa
- N : Netral
- G : Ground
- s : Jarak sela
- ℓ : Perbesaran panjang sela

C. Sistem Pengujian

Berikut adalah sistem pengujian arester PCB

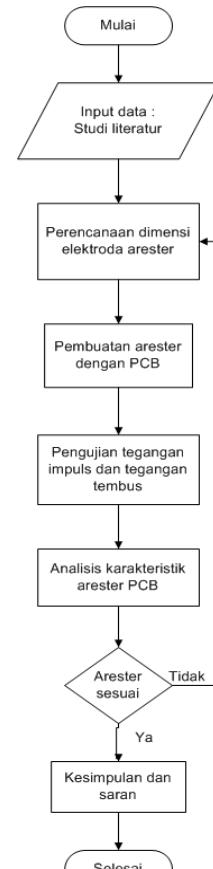


Gambar 6 Sistem pengujian arester PCB

Pengujian dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi. Dengan menaikkan tegangan 4 kV-40 kV impuls. Arester dengan PCB dicatu tegangan tinggi impuls. Naikkan tegangan pemuatan (DGM) sampai harga hingga 4-40 kV, dengan rentang 5 kV setiap kenaikannya (7 kali pengambilan data), atur sela percik sehingga terjadi tembus pada EZK. Peluahkan muatan pada kapasitor pemuatan (CS) dengan memberikan trigger pada sela percik (F) sehingga tegangan impuls dari kapasitor pemuatan ini dapat menembus pada objek uji. Data-data yang diinginkan seperti U_{dc} , U_{impuls} , dan gelombang pemotongan yang terukur secara waktu yang tetap pada alat ukur DGM, DSTM, dan osiloskop. Setelah selesai diuji hingga 40 kV, arester dihubung open dengan terlebih dahulu, lalu kWh meter tiga fasa dihubungkan ke terminal 380 V dan terlihat apakah kWh meter masih membaca normal pada lampu yang menyala. Jika kWh meter tiga fasa masih berjalan normal maka arester berhasil memproteksi. Ulangi prosedur diatas untuk pengujian terhadap fasa yang lain. Catat hasil pengukuran pada tabel dan simpan hasil pemotongan tegangan dari osiloskop.

D. Diagram Alir Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini secara umum tersusun sebagai berikut:



Gambar 7 Diagram Alir Penelitian

IV. PERANCANGAN, PENGUJIAN DAN ANALISIS

A. Perkiraan tegangan tembus pada elektroda sela udara

Dengan tingkat proteksi yang diinginkan yaitu 4 kV sesuai standard untuk arester kelas C kategori III, maka jarak sela adalah sebagai berikut :

$$U_d = s \times 4,1 \times 1$$

$$4 = 4,1 \times s$$

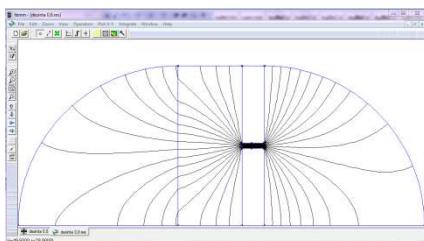
$$s = \frac{4}{4,1}$$

$$s = 0,97 \text{ mm}$$

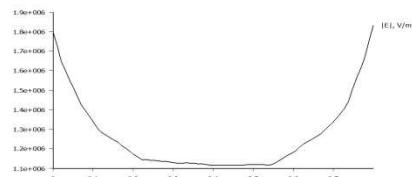
Jarak sela ini sebagai hasil pendekatan perhitungan yang selanjutnya dijadikan dasar pembuatan konstruksi susunan elektroda yang akan diuji di laboratorium.

B. Analisis distribusi medan listrik pada FEMM

Distribusi medan listrik pada elektroda sela udara dapat disimulasikan dengan menggunakan program Femm 4.2. Tujuan analisis ini adalah untuk mengetahui efisiensi medan listrik elektroda sela udara.



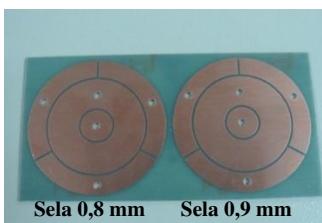
Gambar 8 Garis equipotensial hasil simulasi



Gambar 9 Hasil simulasi grafik kuat medan listrik

C. Arester PCB (Printed Circuit Board).

Pada penelitian ini digunakan arester sela udara, berikut hasil perancangan arester PCB.



Gambar 10 Rancang bangun arester PCB tiga fasa

D. Rangkaian pengujian arester PCB

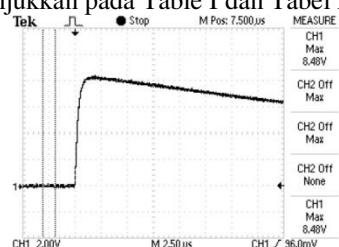
Pada Gambar 11 merupakan gambar papan simulasi pengujian arester PCB.



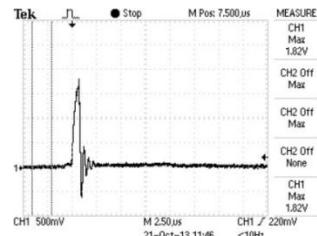
Gambar 11 Pengujian arester PCB
Sumber : Perancangan

E. Hasil Pengujian dan Karakteristik v-t

Gambar 12 dan Gambar 13 merupakan gambar sebelum dan sesudah dipasang arester dan untuk hasil pengujian \hat{U}_i (kV) (U_{impuls}) dan waktu potong ditunjukkan pada Table I dan Tabel II.



Gambar 12 Gelombang sebelum arester PCB terpasang



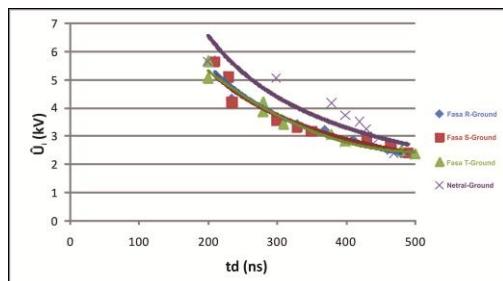
Gambar 13 Gelombang pemotongan tegangan lebih oleh arester PCB

a. Konfurasasi 1
 $d = 0,8$ mm

Tabel I Hasil pengujian arester PCB pada sela 0,8 mm

| No | Titik Pengujian | \hat{U}_i (kV) | U_d (kV) | td (ns) |
|----|-----------------|------------------|------------|-----------|
| 1 | Fasa R-G | 4,41 | 2,40 | 480 |
| | | 8,63 | 2,52 | 460 |
| | | 12,99 | 2,84 | 410 |
| | | 17,45 | 3,18 | 370 |
| | | 21,54 | 3,40 | 330 |
| | | 25,90 | 3,54 | 300 |
| | | 30,12 | 4,31 | 235 |
| | | 34,50 | 5,04 | 230 |
| | | 40,06 | 5,64 | 210 |
| 2 | Fasa S-G | 4,46 | 2,40 | 490 |
| | | 8,66 | 2,64 | 465 |
| | | 13,06 | 2,94 | 430 |
| | | 17,40 | 3,16 | 350 |
| | | 21,59 | 3,30 | 330 |
| | | 25,83 | 3,54 | 300 |
| | | 30,21 | 4,19 | 235 |
| | | 34,58 | 5,09 | 230 |
| | | 39,99 | 5,62 | 210 |
| 3 | Fasa T-G | 4,46 | 2,37 | 500 |
| | | 8,76 | 2,48 | 480 |
| | | 12,98 | 2,82 | 400 |
| | | 17,21 | 3,06 | 380 |
| | | 21,66 | 3,42 | 310 |
| | | 25,90 | 3,86 | 280 |
| | | 30,15 | 4,19 | 280 |
| | | 34,5 | 5,06 | 200 |
| | | 40,06 | 5,64 | 200 |
| 4 | N-G | 4,57 | 2,36 | 490 |
| | | 8,79 | 2,37 | 470 |
| | | 13,06 | 2,72 | 470 |
| | | 17,39 | 3,23 | 430 |
| | | 21,66 | 3,49 | 420 |
| | | 25,86 | 3,71 | 430 |
| | | 30,13 | 4,15 | 380 |
| | | 34,48 | 5,04 | 300 |
| | | 40 | 5,62 | 200 |

Sumber : Hasil pengujian



Gambar 14 Grafik hasil pengujian Uimpuls potong kV terhadap waktu potong

Dari Tabel I dan Gambar 14 dapat dikatakan bahwa arester PCB dapat memotong 4 kV impuls, saat diberi tegangan \hat{U}_i (kV) 30 kV, tegangan impuls terpotong pada bagian muka tetapi dengan tingkat tegangan lebih dari 4 kV .Hasil pemotongan setiap fasa dengan ground atau netral dengan ground berbeda, hal ini dikarenakan permukaan elektroda pada PCB yang tidak merata, sehingga menghasilkan tegangan tembus yang berbeda-beda.

b. Konfigurasi 2

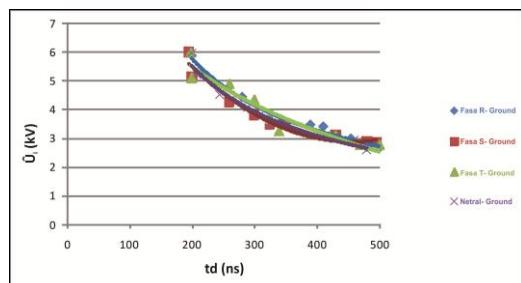
$d = 0,9$ mm

Tabel II hasil pengujian arester PCB pada sela 0,9 mm

| No. | Titik Pengujian | \hat{U}_i (kV) | U_d (kV) | t_d (ns) |
|-----|-----------------|------------------|------------|------------|
| 1 | Fasa R-G | 4,45 | 2,67 | 500 |
| | | 8,6 | 2,71 | 480 |
| | | 13,12 | 2,99 | 455 |
| | | 17,31 | 3,42 | 410 |
| | | 21,56 | 3,47 | 390 |
| | | 25,91 | 3,62 | 345 |
| | | 30,27 | 4,44 | 280 |
| | | 34,41 | 5,23 | 215 |
| | | 40,05 | 5,88 | 200 |
| | | | | |
| 2 | Fasa S-G | 4,43 | 2,87 | 495 |
| | | 8,61 | 2,89 | 480 |
| | | 13,13 | 3,11 | 430 |
| | | 17,31 | 3,47 | 350 |
| | | 21,50 | 3,49 | 325 |
| | | 25,86 | 3,81 | 300 |
| | | 30,38 | 4,27 | 260 |
| | | 34,60 | 5,14 | 200 |
| | | 40,06 | 6,00 | 195 |
| | | | | |
| 3 | Fasa T-G | 4,60 | 2,76 | 500 |
| | | 8,85 | 2,77 | 470 |
| | | 13,16 | 3,08 | 430 |
| | | 17,32 | 3,25 | 340 |
| | | 21,68 | 3,69 | 325 |
| | | 25,98 | 4,34 | 300 |
| | | 30,15 | 4,89 | 260 |
| | | 34,50 | 5,10 | 200 |
| | | 40,13 | 5,98 | 198 |
| | | | | |
| 4 | N-G | 4,40 | 2,58 | 480 |
| | | 8,78 | 2,92 | 460 |
| | | 12,90 | 3,08 | 430 |

| | | | | |
|--|--|-------|------|-----|
| | | 17,25 | 3,49 | 325 |
| | | 21,68 | 3,78 | 310 |
| | | 25,95 | 4,05 | 290 |
| | | 30,22 | 4,5 | 245 |
| | | 34,40 | 5,26 | 210 |
| | | 40 | 5,96 | 200 |

Sumber : Hasil pengujian

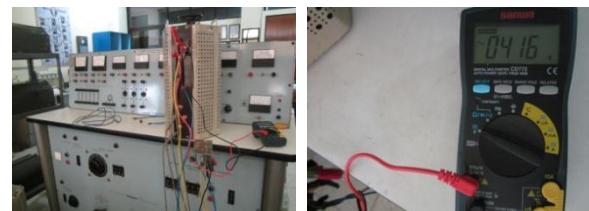


Gambar 15 Grafik hasil pengujian Uimpuls potong kV terhadap waktu potong

Pada Tabel II dan Gambar 15, didapatkan bahwa arester PCB dapat memotong 4 kV impuls, pada saat diberi tegangan \hat{U}_i (kV) 25 kV, tegangan impuls terpotong pada bagian muka tetapi dengan tingkat tegangan lebih dari 4 kV . Dibanding dengan arester PCB sela 0,8 mm, pada sela 0,9 mm memiliki permukaan yang halus, sehingga kurva v-t setiap fasa hampir sama.

F. Pengujian Ketahanan Arester PCB terhadap Tegangan AC

Arester PCB diuji ketahanannya selama 5 menit dengan tegangan sistem 400 V. Setelah diuji ternyata arester PCB layak digunakan



Gambar 16 Pengujian arester PCB pada tegangan AC

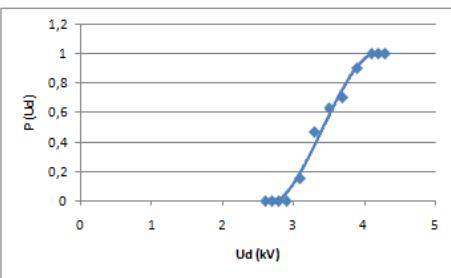
G. Probabilitas Tembus pada Pengujian Arester PCB

Nilai tegangan sebagai acuan dasar dalam pengujian berdasarkan pada hasil perhitungan pada awal pembahasan, yaitu sebesar 4 kV. Berikut data hasil pengujian tegangan tinggi impuls untuk elektroda jarak sela 0,8 mm pada beberapa tingkat tegangan yang berbeda ditunjukkan Tabel III

Tabel III Probabilitas hasil pengujian untuk jarak sela 0,8 mm

| No | U_d (kV) | Pengujian Ke- | | | | | | | | | | $P(U_d)$ |
|----|------------|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 1 | 2,97 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0% |
| 2 | 3,07 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10% |
| 3 | 3,13 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 20% |
| 4 | 3,16 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 30% |
| 5 | 3,53 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 60% |
| 6 | 3,74 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 90% |
| 7 | 3,99 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 100% |

Sumber : Hasil pengujian



Gambar 17 Grafik probabilitas tembus

Dari hasil perhitungan probabilitas didapat,

$$U_{d-5} = 3,02 \text{ kV}$$

$$U_{d-50} = 3,30 \text{ kV}$$

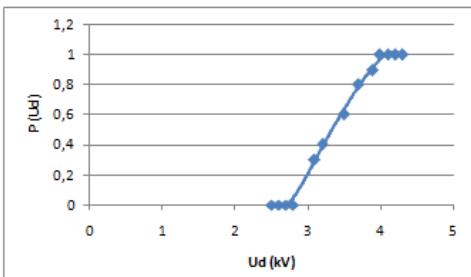
$$U_{d-95} = 3,91 \text{ kV}$$

Berikut data hasil pengujian tegangan tinggi impuls untuk elektroda jarak sela 0,9 mm pada beberapa tingkat tegangan yang berbeda ditunjukkan pada Tabel IV

Tabel IV Probabilitas hasil pengujian untuk jarak sela 0,9 mm

| No | U_d (kV) | Pengujian Ke- | | | | | | | | | | $P(U_d)$ |
|----|------------|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 1 | 2,85 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0% |
| 2 | 3,1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 30% |
| 3 | 3,28 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 40% |
| 4 | 3,56 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 60% |
| 5 | 3,74 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 80% |
| 6 | 3,87 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 90% |
| 7 | 4,01 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 100% |

Sumber : Hasil pengujian



Gambar 18 Grafik probabilitas tembus

Dari hasil perhitungan probabilitas didapat,

$$U_{d-5} = 2,89 \text{ kV}$$

$$U_{d-50} = 3,51 \text{ kV}$$

$$U_{d-100} = 4 \text{ kV}$$

Dari grafik probabilitas tembus dengan kurva distribusi normal (gauss), didapatkan data – data di atas menunjukkan ketika tegangan berada pada level tegangan U_{d-5} , secara teori elektroda belum bekerja. Nilai tegangan ini yang disebut dengan tegangan ketahanan isolator. Pada saat level tegangan U_{d-50} , nilai probabilitas menunjukkan angka sebesar 50%. Tegangan ini yang disebut critical flashover (CFO), dimana tembus sering terjadi di level tegangan ini. Sedangkan pada level tegangan U_{d-95} yang artinya tembus terjadi pada tegangan ini dengan probabilitas 95% yang artinya jika ada 100 kali gangguan, maka tembus akan terjadi sebanyak 95 kali. Nilai tegangan ini yang disebut dengan tegangan kepastian tembus.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

- Rancang bangun arester PCB (Printed Circuit Board) dimulai dengan menentukan bentuk yang kompak dan jarak sela yang telah ditetapkan, setelah diuji, apabila tidak sesuai maka dilakukan perbesaran dimensi yang meliputi panjang sela apabila telah sesuai maka didapatkan hasil rancang bangun arester PCB tiga fasa. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa perubahan panjang sela tidak berpengaruh besar terhadap tegangan tembus. Untuk pengujian fasa – ground dan netral – ground pada suatu jarak sela dan panjang sela elektroda dapat disimpulkan bahwa menghasilkan tegangan potong dengan hubungan linier dimana tidak terlalu memiliki selisih kenaikan tegangan yang sangat jauh. Adapun selisih yang sangat kecil itu dikarenakan ketidakakuratan pada proses perekayasaan arester PCB
- Arester PCB tiga fasa dengan tingkat proteksi 4 kV memiliki jarak sela udara 0,9 mm dengan panjang sela 46,7 mm.
- Pada pengujian v-t curve, menghasilkan karakteristik yang baik. Pada arester PCB hasil rancangan selalu memotong tegangan impuls di bagian muka gelombang. Distribusi probabilitas tembus arester PCB tiga fasa memiliki tegangan kepastian tembus (probabilitas 100%) pada sela 0,9 mm dari hasil pengujian didapatkan kepastian tembus diatas 95%, U_d-95 adalah 3,94 kV dan U_d-100 adalah 4 kV.

Pada penelitian ini, beberapa saran yang dapat dilakukan antara lain :

- Perlu diteliti lebih lanjut pengaruh permukaan elektroda pada PCB (printed circuit board) yang tidak merata, karena akan mempengaruhi karakteristik pemotongan dari susunan elektroda tersebut.
- Perlu diteliti lebih lanjut apabila digunakan PCB *double layer* dan bahan yang lebih bagus.

DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar,A. 1984. *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta : PT. Pradnya Paramita
- Dhofir, Moch , dkk. 2013. *Aplikasi PCB sebagai Pemotong Tegangan Lebih Surja Petir*. Malang : Jurusan Elektro FTUB.
- Hasse, P. 1992. *Over Voltage Protection of Low Voltage System*. London : Peter Peregrinus Ltd.
- Hauschild, W, Mosch, W.1992. *Statistical Techniques for High Voltage Engineering*, London: Peter Peregrinus Ltd.
- Kind, D. 1993. *Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. Terjemahan K.T. Sirait. Bandung : Penerbit ITB.
- Sirait, K.T. dan Zorro (1987), *Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik*.Bandung : ITB