

# PEMODELAN KARAKTERISTIK ARUS BOCOR BAHAN ISOLATOR KERAMIK DENGAN DAN TANPA LAPISAN GLASIR PADA KONDISI KERING DAN BASAH

Adhitya Sukma Wijaya<sup>\*)</sup>, Mochammad Facta, Yuningtyastuti

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang  
Jl. Prof. Sudharto, SH, kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

<sup>\*)</sup> Email: *adhitya.sw90@gmail.com*

## Abstrak

Selama ini arus bocor isolator diasumsikan berupa model rangkaian yang terdiri dari resistansi linear dan kapasitansi, sehingga arus bocor isolator berbentuk sinusoidal murni. Namun, beberapa penelitian menunjukkan bahwa arus bocor tidak selamanya berbentuk sinusoidal murni. Oleh sebab itu, diperlukan adanya model arus bocor isolator yang mampu mengakomodir peristiwa yang mengakibatkan gelombang arus bocor isolator menjadi tidak sinusoidal. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan arus bocor bahan isolator keramik yang telah dan belum diglasir pada kondisi kering dan basah. Gelombang arus bocor bahan isolator keramik yang tidak sinusoidal murni berusaha diperoleh modelnya dalam tugas akhir ini. Pemodelan arus bocor bahan isolator dilakukan dengan menyusun rangkaian ekuivalen dari arus bocor isolator yang terdiri dari resistansi dan kapasitansi linier serta resistansi non-linear menggunakan program ATP / EMTP. Selain itu, dilakukan pemodelan matematis dengan pendekatan deret Fourier yang digambarkan dan diilustrasikan dengan program MATLAB. Hasil validasi antara arus bocor hasil pemodelan dan pengukuran menunjukkan hasil yang mirip. Hasil penelitian menunjukkan amplitudo gelombang arus bocor hasil pemodelan memiliki nilai yang mirip dengan pengukuran. Persentase THD model memiliki nilai yang hampir sama dengan perbedaan kurang dari 1%.

**Kata kunci:** *Isolator Pasang Luar, Arus Bocor, Rangkaian Listrik Ekuivalen, Simulasi Komputer.*

## Abstract

Insulator leakage current is generally assumed by a circuit model consists of a linear resistance and capacitance, so the leakage current is pure sinusoidal. However, some studies show that the leakage current is not always purely sinusoidal. Therefore, it is necessary to have an insulator leakage current models that able to simulate events that make insulator leakage current waveform become not pure sinusoidal. In this research, a leakage current model of ceramic insulator material with and without glaze coating in wet and dry conditions is to be observed. Insulators leakage current model is carried out by arranging an equivalent circuit model consist of linear resistance, capacitance and non-linear resistance and it is simulated using ATP / EMTP software package. A mathematical model performed in Fourier series approach are described and simulated by using MATLAB software package. The validation results show good similarities between measured and simulated leakage current waveforms. The results show that the amplitudes of leakage current of model are matched to direct measurements. The percentage of THD of models show good similarities with direct measurements with difference less than 1%.

**Keywords:** *outdoor insulator, leakage current, equivalent circuit, computer simulation*

## 1. Pendahuluan

Keramik telah lama digunakan sebagai bahan isolator pada sistem tenaga listrik hingga sekarang. Salah satu aplikasi keramik adalah sebagai bahan isolator jaringan tegangan menengah 20 KV. Sebagai isolator pemasangan luar, keramik memiliki kelemahan yaitu rentan terhadap pengaruh lingkungan seperti kelembaban dan kontaminan / polutan. Kedua faktor tersebut jika dikombinasikan dengan tekanan elektrik yang bekerja pada isolator dapat

menyebabkan timbulnya arus bocor pada permukaan isolator. Panas yang ditimbulkan oleh aliran arus bocor tersebut dapat menyebabkan degradasi permukaan isolator jika mengalir dalam waktu yang lama. Degradasi permukaan yang terjadi akan mempermudah timbulnya flashover pada isolator. Berbagai cara dilakukan untuk mengatasi kelemahan isolator keramik terhadap pengaruh lingkungan, misalnya dengan pemberian lapisan glasir. Selama ini teori umum mengenai arus bocor pada isolator mengasumsikan isolator berupa model rangkaian yang terdiri dari komponen resistansi linear dan kapasitansi,

sehingga arus bocor yang mengalir pada isolator berupa gelombang sinusoidal murni[1][2]. Namun, beberapa penelitian menunjukkan bahwa tidak selamanya arus bocor memiliki bentuk gelombang sinusoidal murni[3][4][5][6][7]. Oleh sebab itu, diperlukan adanya model arus bocor isolator yang mampu mengakomodir peristiwa – peristiwa yang mengakibatkan gelombang arus bocor isolator menjadi tidak sinusoidal.

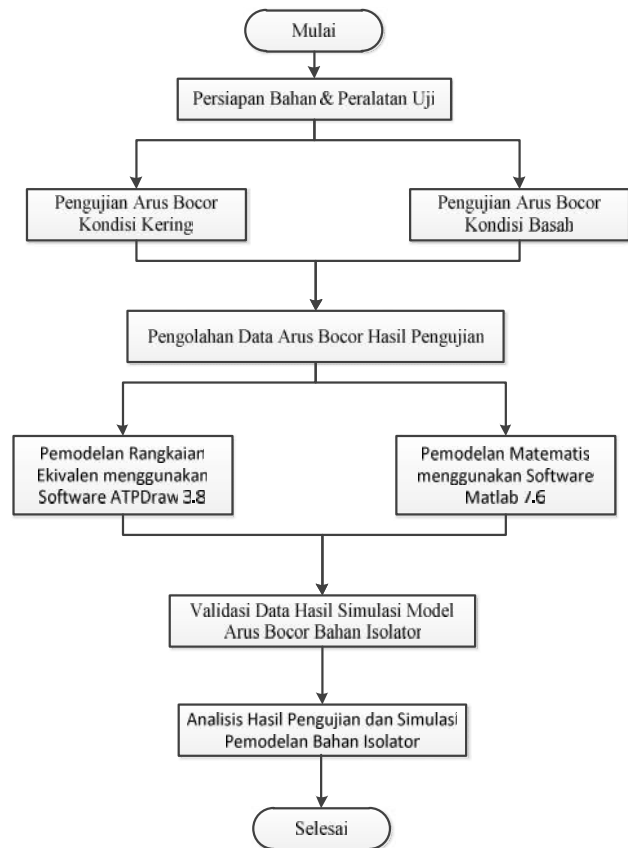
Penulis dalam tugas akhir ini akan memodelkan karakteristik arus bocor bahan isolator keramik yang telah dan belum diberi lapisan glasir. Bentuk gelombang arus bocor bahan isolator keramik yang tidak sinusoidal murni berusaha diperoleh modelnya dalam tugas akhir ini. Berdasarkan hasil pemodelan tersebut dapat diketahui pengaruh pemberian lapisan glasir terhadap kinerja bahan isolator keramik terutama terhadap faktor kelembaban. Kinerja bahan isolator keramik ditinjau dari karakteristik arus bocor, dan karakteristik tahanan permukaan bahan isolator yang diperoleh dari hasil pemodelan. Pengukuran arus bocor dalam tugas akhir ini dilakukan pada kondisi kering dan basah. Pemodelan arus bocor bahan isolator dilakukan dengan menyusun rangkaian ekuivalen dari arus bocor isolator yang terdiri dari resistansi linier, kapasitansi dan resistansi non-linear menggunakan program ATP / EMTP. Selain itu, dilakukan pemodelan matematis yang diperoleh dengan pendekatan deret fourier yang digambarkan dan diilustrasikan dengan program MATLAB. Adapun beberapa tujuan Tugas Akhir ini antara lain :

1. Melakukan pengukuran untuk memperoleh karakteristik arus bocor bahan isolator keramik pada kondisi kering dan basah.
2. Melakukan pemodelan rangkaian ekuivalen dan pemodelan matematis arus bocor bahan isolator keramik.
3. Menganalisis pengaruh pemberian lapisan glasir terhadap nilai arus bocor dan tahanan permukaan bahan isolator keramik pada kondisi kering dan basah.

## 2. Metode

### 2.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut disajikan diagram alir penelitian yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

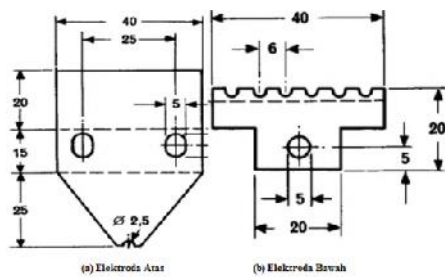
### 2.2 Pengujian Arus Bocor Bahan Isolator

Spesimen uji yang digunakan adalah bahan isolator keramik 20 KV dengan kode sampel L+5AL. Spesimen uji yang digunakan terdiri dari dua jenis bahan isolator yaitu bahan isolator yang belum diglasir dan bahan isolator yang telah diglasir dengan dimensi yaitu 7 x 8,5 x 4,2 cm. Gambar spesimen uji sampel bahan isolator 20 KV ditunjukkan pada gambar 2.



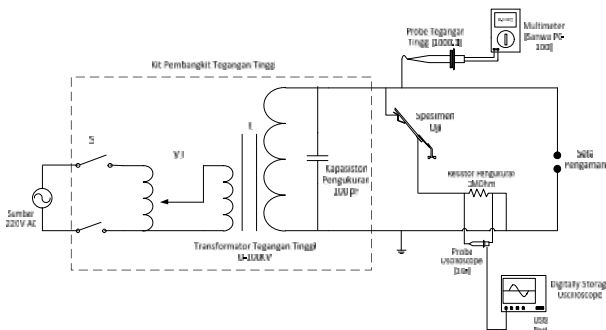
Gambar 2. Sampel Bahan Isolator Keramik 20 KV

Elektroda yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari bahan stainless stell. Elektroda ini disebut elektroda atas dan elektroda bawah, sesuai standar IEC 587:1984.



Gambar 3. Elektroda Pengujian

Untuk mendapatkan data-data arus bocor pada masing-masing sampel, maka dilakukan pengukuran arus bocor pada kondisi kering dan basah dengan rangkaian pengujian yang ditunjukkan pada gambar 4.



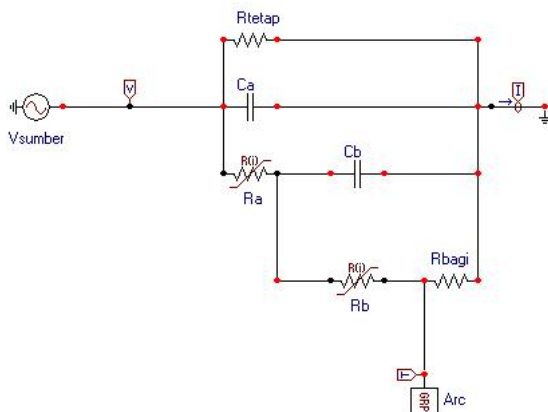
Gambar 4. Rangkaian Pengukuran Arus Bocor

Melalui perhitungan data tegangan osiloskop, diperoleh nilai arus bocor bahan isolator sesuai persamaan 1.

$$I_{LC} = 1 \times 10^{-6} * V_{\text{osiloskop}} \quad (1)$$

### 2.3 Simulasi Pemodelan Rangkaian Ekuivalen Bahan Isolator Keramik

Pemodelan rangkaian ekuivalen bahan isolator keramik dilakukan dengan bantuan program ATP/EMTP. Bentuk rangkaian listrik yang digunakan sebagai model dari bahan isolator pada tugas akhir ini ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Pemodelan rangkaian listrik ekuivalen bahan isolator

Rtetap bernilai 4421 M $\Omega$ , sedangkan Ca dan Cb bernilai masing – masing 0,1 pF dan 0,5 pF. Karakteristik resistansi non-linear yang digunakan pada pemodelan disesuaikan dengan nilai gelombang arus bocor hasil pengujian.

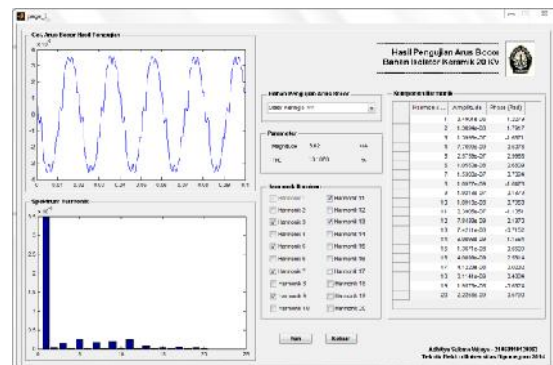
### 2.4 Simulasi Pemodelan Matematis Bahan Isolator Keramik

Pemodelan matematis bahan isolator dilakukan dengan bantuan program Matlab. Data arus bocor yang diperoleh disimpan menjadi file bertipe teks ASCII dan disimpan dengan nama yang unik untuk masing – masing pengujian dalam folder yang sama dengan program simulasi.

Tampilan cover awal program dapat dilihat pada Gambar 6, sedangkan tampilan utama program dapat dilihat pada Gambar 7.

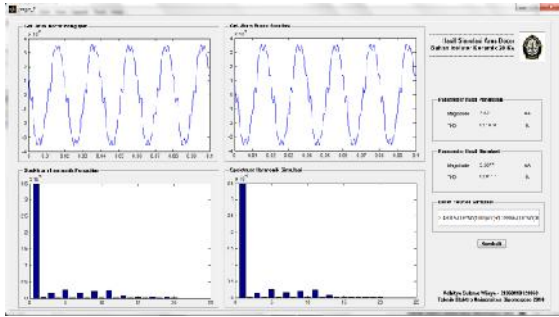


Gambar 6. Tampilan Pembuka Program Simulasi Matlab



Gambar 7. Tampilan Utama Program Simulasi Matlab

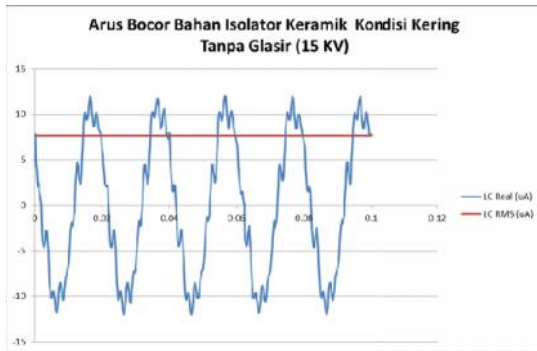
Pemodelan matematis bahan isolator dapat dilakukan dengan memilih salah satu jenis pengujian pada tampilan utama program dan memilih komponen harmonik dominan yang akan diolah dalam persamaan deret fourier bahan isolator. Tampilan simulasi pemodelan deret fourier ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Tampilan Simulasi Pemodelan

### 3. Hasil Analisis dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil Pengukuran Arus Bocor Bahan Isolator Keramik



(a) Bahan Isolator Tanpa Glasir



(b) Bahan Isolator Dengan Glasir

Gambar 9. Gelombang Arus Bocor Bahan Isolator Keramik (a) Tanpa Lapisan Glasir dan (b) Dengan Lapisan Glasir Pengujian Kering pada Tegangan 15 KV

Tabel 1. Data Pengukuran Arus Bocor Kondisi Kering

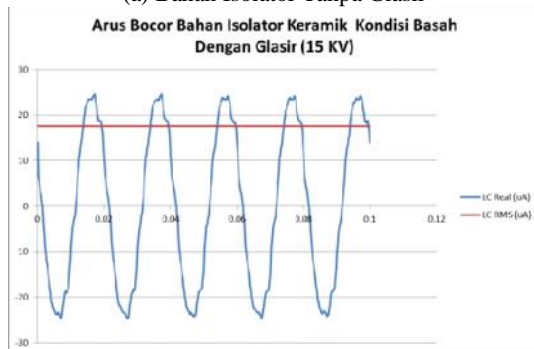
V (KV)	Nilai Arus Bocor		Penurunan Arus Bocor Akibat Lapisan Glasir
	Tanpa Glasir (uA)	Dengan Glasir (uA)	
5	2.65	2.49	6%
10	5.11	4.79	6%
15	7.66	7.52	2%

Nilai arus bocor pada kondisi kering mengalami peningkatan rata-rata sebesar 2,51 uA untuk setiap kenaikan nilai tegangan yang diterapkan pada bahan isolator. Hal ini disebabkan ketika nilai tegangan yang diterapkan pada bahan isolator meningkat, pelepasan muatan yang terjadi pada permukaan isolator akan semakin besar.

Nilai arus bocor bahan isolator dengan glasir pada kondisi kering bernilai lebih kecil dari nilai arus bocor bahan isolator tanpa glasir pada semua variasi tegangan. Persentase penurunan arus bocor yang terjadi akibat adanya lapisan glasir adalah sebesar 5%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pemberian lapisan glasir pada permukaan isolator dapat meningkatkan performa kerja isolator pada kondisi permukaan yang kering.



(a) Bahan Isolator Tanpa Glasir



(b) Bahan Isolator Dengan Glasir

Gambar 10. Gelombang Arus Bocor Bahan Isolator Keramik (a) Tanpa Lapisan Glasir dan (b) Dengan Lapisan Glasir Pengujian Basah pada Tegangan 15 KV

Tabel 2. Data Pengukuran Arus Bocor Kondisi Basah

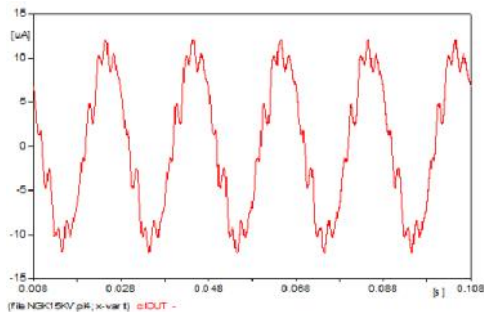
V (KV)	Nilai Arus Bocor		Penurunan Arus Bocor Akibat Lapisan Glasir
	Tanpa Glasir (uA)	Dengan Glasir (uA)	
5	8.40	5.68	32%
10	13.92	12.83	8%
15	19.36	17.61	9%

Arus bocor pada kondisi permukaan isolator basah bernilai lebih besar dibandingkan arus bocor pada kondisi permukaan isolator kering pada setiap variasi tegangan. Pada kondisi basah, tetesan air yang terdapat pada permukaan isolator meningkatkan nilai konduktifitas permukaan isolator. Dengan adanya pertambahan nilai konduktifitas permukaan isolator, maka nilai tahanan permukaan isolator pada kondisi basah akan berkurang. Akibatnya arus bocor permukaan isolator pada kondisi basah bernilai lebih besar dari arus bocor permukaan isolator pada kondisi kering.

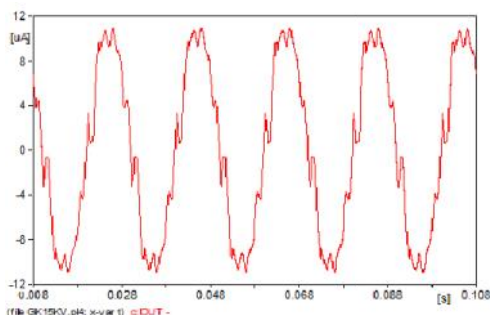
Nilai arus bocor bahan isolator dengan glasir pada kondisi basah bernilai lebih kecil dari bahan isolator tanpa glasir. Adanya lapisan glasir pada permukaan isolator dapat mengurangi nilai arus bocor permukaan bahan isolator pada kondisi basah sebesar 16%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pemberian lapisan glasir pada permukaan isolator dapat meningkatkan performa kerja dari isolator pada kondisi permukaan basah.

**3.2 Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian Listrik Ekuivalen Bahan Isolator Keramik**

Hasil pemodelan rangkaian ekuivalen arus bocor bahan isolator keramik pada kondisi kering dengan tegangan 15 KV adalah sebagai berikut :



(a) Bahan Isolator Tanpa Glasir



(b) Bahan Isolator Dengan Glasir

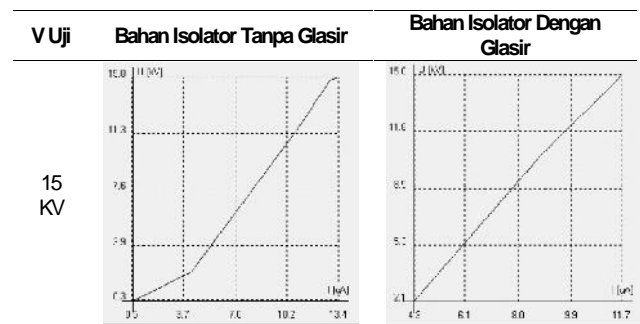
**Gambar 11. Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian Ekuivalen Arus Bocor Bahan Isolator Keramik (a) Tanpa Lapisan Glasir dan (b) Dengan Lapisan Glasir Pengujian Kering pada Tegangan 15 KV**

**Tabel 3. Validasi Hasil Pemodelan Arus Bocor**

Parameter	Hasil Pengukuran	Hasil Simulasi
Model Isolator Tanpa Glasir (15 KV)		
- Amplitudo	- 12 uA	- 12 uA
- Harmonik Dominan	- 11,5,9,7	- 11,5,9,7
- THD	- 15,874 %	- 15,889 %
Model Isolator Dengan Glasir (15 KV)		
- Amplitudo	- 11 uA	- 11 uA
- Harmonik Dominan	- 11,5,9,7	- 11,5,9,7
- THD	- 15,997 %	- 15,951 %

Hasil perbandingan parameter validasi pemodelan menunjukkan hasil yang baik. Dengan demikian pemodelan yang dibuat dapat mensimulasikan gelombang arus bocor bahan isolator keramik pada kondisi kering dengan tepat. Karakteristik tahanan permukaan bahan isolator keramik pada kondisi kering dapat diketahui berdasarkan karakteristik resistansi non-linear yang digunakan pada pemodelan. Karakteristik non-linear yang digunakan pada pemodelan bahan isolator keramik pada kondisi kering ditunjukkan pada tabel 4 dan tabel 5.

**Tabel 4. Karakteristik V-I Tahanan Non-Linear Pemodelan Bahan Isolator Keramik Kondisi Kering**



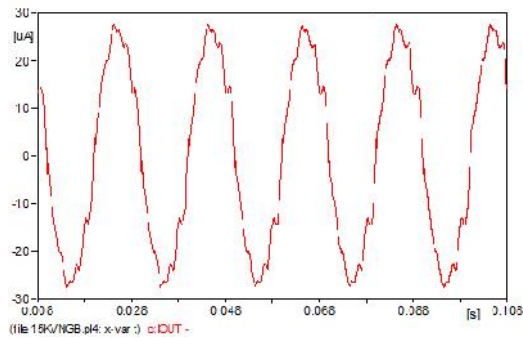
**Tabel 5. Nilai Tahanan Permukaan Bahan Isolator Keramik Kondisi Kering**

Tegangan Uji	R Ke-	Tanpa Glasir	Dengan Glasir
		R (M )	R (M )
15 KV	1 (3 KV)	627.39	628.63
	2 (6 KV)	868.92	938.43
	3 (9 KV)	997.75	1223.04
	4 (12 KV)	1082.82	1118.99
	5 (15 KV)	1128.06	1285.35

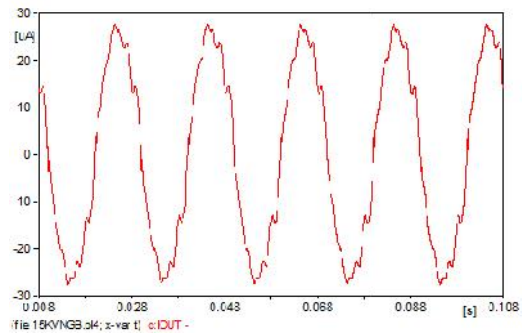
Tahanan permukaan bahan isolator yang diberi lapisan glasir memiliki nilai yang lebih besar dari resistansi bahan isolator yang tidak diberi lapisan glasir. Pemberian lapisan glasir meningkatkan nilai tahanan permukaan dari bahan isolator keramik sebesar 12 %. Hal tersebut menyebabkan nilai arus bocor permukaan yang mengalir pada bahan isolator keramik dengan lapisan glasir lebih kecil dari bahan isolator keramik yang tidak diberi lapisan glasir. Dari penjelasan tersebut dapat disimpulkan bahwa

pemberian lapisan glasir dapat meningkatkan resistansi permukaan dari bahan isolator keramik pada kondisi kering.

Hasil pemodelan rangkaian ekuivalen arus bocor bahan isolator keramik pada kondisi basah dengan tegangan 15 KV adalah sebagai berikut :



**Gambar 12. Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian Ekuivalen Arus Bocor Bahan Isolator Keramik Tanpa Lapisan Glasir Pengujian Basah pada Tegangan 15 KV**



**Gambar 13. Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian Ekuivalen Arus Bocor Bahan Isolator Keramik Dengan Lapisan Glasir Pengujian Basah pada Tegangan 15 KV**

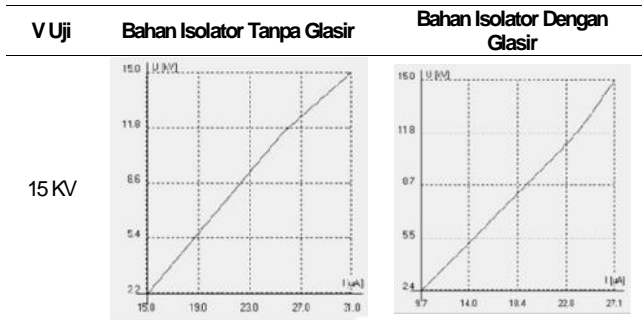
**Tabel 6. Validasi Hasil Pemodelan Arus Bocor**

Parameter	Hasil Pengukuran	Hasil Simulasi
<b>Model Isolator Tanpa Glasir (15 KV)</b>		
- Amplitudo	- 27,6 uA	- 27,6 uA
- Harmonik Dominan	- 9,3,5,11	- 9,3,5,11
- THD	- 10,153 %	- 10,153 %
<b>Model Isolator Dengan Glasir (15 KV)</b>		
- Amplitudo	- 24,6 uA	- 24,6 uA
- Harmonik Dominan	- 9,3,11,7	- 9,3,11,7
- THD	- 6,507 %	- 6,522 %

Hasil perbandingan parameter validasi pemodelan menunjukkan hasil yang baik. Dengan demikian pemodelan yang dibuat dapat mensimulasikan gelombang arus bocor bahan isolator keramik pada kondisi basah dengan tepat. Karakteristik tahanan permukaan bahan isolator keramik pada kondisi basah dapat diketahui

berdasarkan karakteristik resistansi non-linear yang digunakan pada pemodelan. Karakteristik non-linear yang digunakan pada pemodelan bahan isolator keramik pada kondisi basah ditunjukkan pada tabel 7 dan tabel 8.

**Tabel 7. Karakteristik V-I Tahanan Non-Linear Pemodelan Bahan Isolator Keramik Kondisi Basah**



**Tabel 8. Nilai Tahanan Permukaan Bahan Isolator Keramik 20 KV Kondisi Basah**

Tegangan Uji	R Ke-	Tanpa Glasir	Dengan Glasir
		R (M )	R (M )
15 KV	1 (3 KV)	187.59	281.57
	2 (6 KV)	309.66	395.58
	3 (9 KV)	395.77	459.26
	4 (12 KV)	456.29	501.00
	5 (15 KV)	483.87	554.94

Tahanan permukaan kedua jenis bahan isolator keramik pada kondisi basah memiliki nilai yang lebih kecil daripada resistansi permukaan bahan isolator pada kondisi kering. Pada kondisi basah, tetesan - tetesan air pada permukaan isolator akan meningkatkan konduktifitas permukaan dari isolator. Akibatnya nilai tahanan permukaan dari isolator akan berkurang. Apabila nilai tahanan permukaan isolator berkurang, maka nilai arus bocor yang mengalir akan semakin besar. Hal tersebut dapat menimbulkan panas pada permukaan isolator yang mempercepat terjadinya penuaan isolator. Tahanan permukaan bahan isolator yang diberi lapisan glasir memiliki nilai yang lebih besar dari resistansi bahan isolator yang tidak diberi lapisan glasir. Pemberian lapisan glasir memberikan peningkatan nilai tahanan permukaan dari bahan isolator keramik sebesar 35%. Hal tersebut menyebabkan nilai arus bocor permukaan yang mengalir pada bahan isolator keramik dengan lapisan glasir lebih kecil dari bahan isolator keramik yang tidak diberi lapisan glasir. Dari penjelasan tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian lapisan glasir dapat meningkatkan resistansi permukaan dari bahan isolator keramik pada kondisi basah.

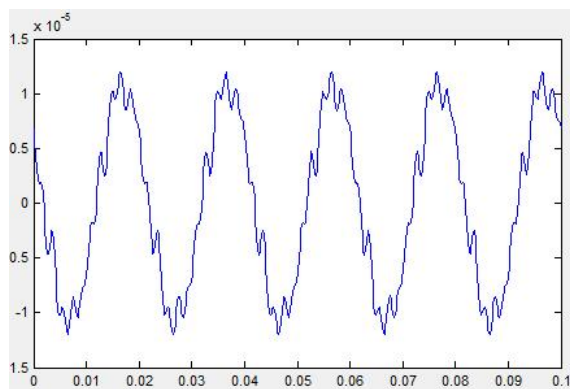
**3.4 Hasil Simulasi Pemodelan Matematis Bahan Isolator Keramik**

Persamaan matematis yang digunakan pada pemodelan arus bocor bahan isolator pada kondisi kering ditunjukkan pada tabel 9.

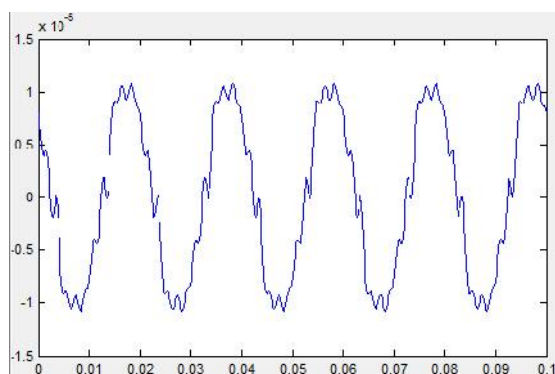
**Tabel 9.** Persamaan Matematis Deret *Fourier* Gelombang

Isolator Tanpa Glasir	Isolator Dengan Glasir
<b>Tegangan Uji 15 KV</b>	
$y(x) =$ $8.9311 \cdot 10^{-6} \sin(2\pi \cdot 50 \cdot x)$ $+ 5.2581 \cdot 10^{-6} \sin(2\pi \cdot 150 \cdot x)$ $+ 5.2149 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 250 \cdot x)$ $- 2.0279 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 350 \cdot x)$ $+ 4.5082 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 450 \cdot x)$ $- 1.4124 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 550 \cdot x)$ $- 1.5722 \cdot 10^{-8} \sin(2\pi \cdot 650 \cdot x)$ $+ 5.8718 \cdot 10^{-6} \cos(2\pi \cdot 50 \cdot x)$ $- 1.2174 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 150 \cdot x)$ $+ 6.8186 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 250 \cdot x)$ $- 3.6466 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 350 \cdot x)$ $- 6.4195 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 450 \cdot x)$ $+ 1.1257 \cdot 10^{-6} \cos(2\pi \cdot 550 \cdot x)$ $+ 1.8235 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 650 \cdot x)$	$y(x) =$ $7.2695 \cdot 10^{-6} \sin(2\pi \cdot 50 \cdot x)$ $- 1.8359 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 150 \cdot x)$ $+ 6.6799 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 250 \cdot x)$ $- 4.4541 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 350 \cdot x)$ $+ 6.4072 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 450 \cdot x)$ $- 1.7758 \cdot 10^{-8} \sin(2\pi \cdot 550 \cdot x)$ $- 8.487 \cdot 10^{-8} \sin(2\pi \cdot 650 \cdot x)$ $+ 7.5653 \cdot 10^{-6} \cos(2\pi \cdot 50 \cdot x)$ $- 3.9052 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 150 \cdot x)$ $+ 4.6559 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 250 \cdot x)$ $- 3.9533 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 350 \cdot x)$ $- 4.5523 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 450 \cdot x)$ $+ 9.7463 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 550 \cdot x)$ $+ 1.2852 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 650 \cdot x)$

Hasil pemodelan matematis bahan isolator keramik pada kondisi kering dengan tegangan 15 KV adalah sebagai berikut :



**Gambar 14.** Hasil Simulasi Pemodelan Arus Bocor Bahan Isolator Keramik Tanpa Lapisan Glasir Pengujian Kering pada Tegangan 15 KV



**Gambar 15.** Hasil Simulasi Pemodelan Arus Bocor Bahan Isolator Keramik Dengan Lapisan Glasir Pengujian Kering pada Tegangan 15 KV

**Tabel 10.** Validasi Hasil Pemodelan Arus Bocor

Parameter	Hasil Pengukuran	Hasil Simulasi
<b>Model Isolator Tanpa Glasir (15 KV)</b>		
- Amplitudo	- 12 uA	- 11,98 uA
- Harmonik Dominan	- 11,5,9,7	- 11,5,9,7
- THD	- 15,874 %	- 15,599 %
<b>Model Isolator Dengan Glasir (15 KV)</b>		
- Amplitudo	- 11 uA	- 10,78 uA
- Harmonik Dominan	- 11,5,9,7	- 11,5,9,7
- THD	- 15,997 %	- 15,735 %

Hasil perbandingan parameter validasi pemodelan menunjukkan hasil yang baik. Dengan demikian pemodelan yang dibuat dapat mensimulasikan gelombang arus bocor bahan isolator keramik pada kondisi kering dengan tepat.

Data pada tabel 9. merepresentasikan karakteristik komponen harmonik yang terdapat pada gelombang arus bocor. Komponen harmonik tersebut menyebabkan bentuk gelombang arus bocor bahan isolator keramik pada kondisi kering berupa gelombang sinusoidal yang terdistorsi.

Gelombang arus bocor bahan isolator keramik pada kondisi kering memiliki komponen harmonisa kelipatan ganjil termasuk harmonisa dengan frekuensi 150 Hz dan 250 Hz. Adanya komponen harmonisa dengan frekuensi 150 Hz dan 250 Hz identik dengan terjadinya *discharge* pada permukaan bahan isolator[5][9]. Aktifitas *discharge* pada permukaan isolator dapat meningkatkan pemanasan pada permukaan isolator. Pemanasan pada permukaan isolator akan mempercepat terjadinya penuaan isolator. Komponen harmonisa dengan frekuensi 150 Hz dan 250 Hz dari gelombang arus bocor bahan isolator keramik pada kondisi kering memiliki perbandingan nilai rata-rata sebesar 5% dari komponen fundamental dari gelombang arus bocor isolator. Hal ini menunjukkan bahwa aktifitas *discharge* pada permukaan isolator tergolong rendah.

Persamaan matematis yang digunakan pada pemodelan arus bocor bahan isolator pada kondisi basah ditunjukkan pada tabel 11.

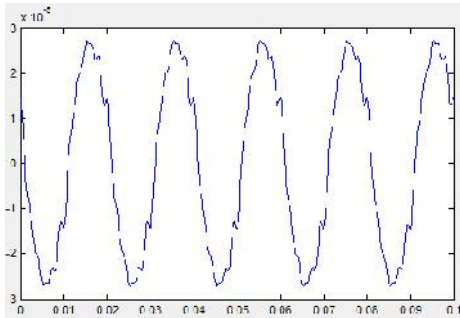
**Tabel 11.** Persamaan Matematis Deret *Fourier* Gelombang

Isolator Tanpa Glasir	Isolator Dengan Glasir
<b>Tegangan Uji 15 KV</b>	
$y(x) =$ $2.5651 \cdot 10^{-6} \sin(2\pi \cdot 50 \cdot x)$ $+ 1.8162 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 150 \cdot x)$ $- 1.4992 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 250 \cdot x)$ $- 8.6956 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 350 \cdot x)$ $- 6.8951 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 450 \cdot x)$ $- 7.2096 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 550 \cdot x)$ $+ 3.0515 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 650 \cdot x)$ $+ 9.1097 \cdot 10^{-6} \cos(2\pi \cdot 50 \cdot x)$ $+ 1.3522 \cdot 10^{-6} \cos(2\pi \cdot 150 \cdot x)$ $+ 1.1099 \cdot 10^{-6} \cos(2\pi \cdot 250 \cdot x)$ $+ 4.7997 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 350 \cdot x)$	$y(x) =$ $2.2393 \cdot 10^{-6} \sin(2\pi \cdot 50 \cdot x)$ $- 3.9384 \cdot 10^{-8} \sin(2\pi \cdot 150 \cdot x)$ $+ 2.7577 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 250 \cdot x)$ $+ 4.9129 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 350 \cdot x)$ $+ 1.0461 \cdot 10^{-6} \sin(2\pi \cdot 450 \cdot x)$ $+ 5.3345 \cdot 10^{-7} \sin(2\pi \cdot 550 \cdot x)$ $- 8.502 \cdot 10^{-8} \sin(2\pi \cdot 650 \cdot x)$ $+ 1.0777 \cdot 10^{-5} \cos(2\pi \cdot 50 \cdot x)$ $+ 9.0738 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 150 \cdot x)$ $- 6.7683 \cdot 10^{-6} \cos(2\pi \cdot 250 \cdot x)$ $+ 1.1409 \cdot 10^{-7} \cos(2\pi \cdot 350 \cdot x)$

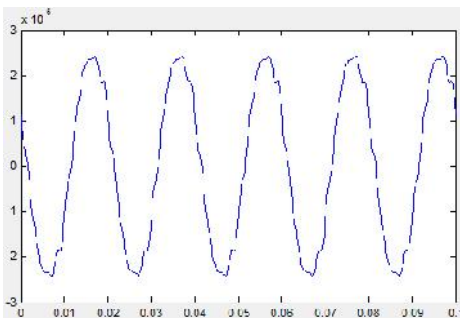
$$\begin{array}{l}
 + 1.2664 \cdot 10^{-6} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 450 \cdot x) \\
 + 8.4778 \cdot 10^{-7} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 550 \cdot x) \\
 + 1.8466 \cdot 10^{-7} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 650 \cdot x)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 - 2.2155 \cdot 10^{-7} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 450 \cdot x) \\
 - 4.7539 \cdot 10^{-8} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 550 \cdot x) \\
 + 4.5108 \cdot 10^{-8} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 650 \cdot x)
 \end{array}$$

kelipatan ganjil termasuk harmonisa dengan frekuensi 150 Hz dan 250 Hz.

Hasil pemodelan matematis bahan isolator keramik pada kondisi basah dengan tegangan 15 KV adalah sebagai berikut :



Gambar 16. Hasil Simulasi Pemodelan Arus Bocor Bahan Isolator Keramik Tanpa Lapisan Glasir Pengujian Basah pada Tegangan 15 KV



Gambar 17. Hasil Simulasi Pemodelan Arus Bocor Bahan Isolator Keramik Dengan Lapisan Glasir Pengujian Basah pada Tegangan 15 KV

Tabel 12. Validasi Hasil Pemodelan Arus Bocor

Parameter	Hasil Pengukuran	Hasil Simulasi
<b>Model Isolator Tanpa Glasir (15 KV)</b>		
- Amplitudo	- 27,6 uA	- 27,02 uA
- Harmonik Dominan	- 9,3,5,11	- 9,3,5,11
- THD	- 10,153 %	- 10,093 %
<b>Model Isolator Dengan Glasir (15 KV)</b>		
- Amplitudo	- 24,6 uA	- 24,15 uA
- Harmonik Dominan	- 9,3,11,7	- 9,3,11,7
- THD	- 6,507 %	- 6,349 %

Hasil perbandingan parameter validasi pemodelan menunjukkan hasil yang baik. Dengan demikian pemodelan yang dibuat dapat mensimulasikan gelombang arus bocor bahan isolator keramik pada kondisi basah dengan tepat.

Gelombang arus bocor bahan isolator keramik 20 KV pada kondisi basah juga memiliki komponen harmonisa

Gelombang arus bocor pada kondisi basah memiliki bentuk sinusoidal dengan distorsi yang lebih sedikit dibandingkan dengan hasil pengujian kondisi kering. Hal tersebut disebabkan terjadi peningkatan komponen fundamental yang lebih signifikan dibandingkan peningkatan komponen harmonik yang dimiliki gelombang arus bocor.

Tabel 13. Perbandingan Nilai Spektrum Amplitudo Harmonisa Pengujian Kering dan Basah

Frekuensi Harmonisa	Pengujian Kering		Pengujian Basah	
	Tanpa Glasir	Dengan Glasir	Tanpa Glasir	Dengan Glasir
<b>Tegangan Uji 5 KV</b>				
150	1.33E-07	1.40E-07	2.69E-07	2.56E-07
250	2.68E-07	2.58E-07	4.07E-07	1.78E-07
<b>Tegangan Uji 10 KV</b>				
150	1.93E-07	1.95E-07	3.66E-07	4.39E-07
250	4.48E-07	3.92E-07	6.27E-07	4.97E-07
<b>Tegangan Uji 15 KV</b>				
150	1.33E-07	4.32E-07	1.36E-06	9.08E-07
250	8.58E-07	8.14E-07	1.12E-06	2.84E-07

Pada kondisi kering, nilai komponen harmonisa dengan frekuensi 250 Hz dari bahan isolator keramik dengan lapisan glasir lebih kecil dari bahan isolator keramik tanpa glasir. Namun, nilai komponen harmonisa dengan frekuensi 150 Hz dari bahan isolator keramik dengan glasir bernilai lebih besar dari bahan isolator keramik dengan glasir. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi kering, lapisan glasir tidak dapat mengurangi aktifitas discharge pada permukaan isolator keramik.

Sedangkan pada kondisi pengujian basah, nilai komponen harmonisa dengan frekuensi 150 Hz dan 250 Hz dari bahan isolator keramik dengan lapisan glasir mengalami penurunan dengan rata-rata penurunan sebesar 28% dari nilai komponen harmonisa dari bahan isolator keramik tanpa lapisan glasir. Hasil tersebut menunjukkan bahwa lapisan glasir dapat mengurangi aktifitas discharge pada permukaan bahan isolator pada kondisi basah.

#### 4. Penutup

Hasil validasi pemodelan rangkaian listrik ekuivalen dan pemodelan matematis menunjukkan hasil yang hampir sama dengan gelombang hasil pengukuran. Amplitudo gelombang arus bocor hasil pemodelan memiliki nilai yang mirip dengan pengukuran. Persentase THD gelombang arus bocor hasil pemodelan memiliki nilai yang hampir sama dengan perbedaan kurang dari 1%. Hal



ini menunjukkan bahwa pemodelan karakteristik arus bocor bahan isolator yang dilakukan telah benar.

Nilai arus bocor pada isolator dipengaruhi oleh kelembaban permukaan isolator. Permukaan isolator yang lembab akan menurunkan nilai tahanan permukaan isolator sehingga arus bocor yang mengalir di permukaan isolator akan semakin besar. Nilai arus bocor bahan isolator keramik 20 KV cenderung meningkat untuk setiap pertambahan variasi tegangan yang diterapkan pada isolator. Kenaikan nilai arus bocor disebabkan oleh meningkatnya jumlah pelepasan muatan yang terjadi pada permukaan isolator.

Pemberian lapisan glasir pada permukaan bahan isolator keramik 20 KV dapat memperkecil nilai arus bocor permukaan isolator sebesar 5% pada kondisi kering dan 16% pada kondisi basah. Pemberian lapisan glasir juga menyebabkan adanya peningkatan nilai tahanan permukaan isolator sebesar 12% pada kondisi kering dan 35% pada kondisi basah. Dengan demikian, pemberian lapisan glasir dapat meningkatkan performa dari bahan isolator terutama pada kondisi basah.

Peningkatan performa bahan isolator keramik dapat dilakukan dengan cara – cara yang lain seperti penambahan lapisan *Room Temperature Vulcanized (RTV) Silicone Rubber* pada permukaan isolator keramik. Selain itu, bahan lain seperti polimer dapat digunakan untuk menggantikan penggunaan keramik sebagai bahan isolator pasang luar.

## Referensi

- [1]. Arismunandar, A., 1978, Teknik Tegangan Tinggi, Pradnya Paramita, Jakarta.
- [2]. Tobing, Bonggas L, 2003, Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- [3]. Siderakis, K, D Agoris, P Eleftheria, and E Thalassinakis, "Investigation of Leakage Current on High Voltage Insulators-Field Measurements.", WSEAS Transaction on Circuits and System , 2004: 1188-1191.
- [4]. Suda, T., "Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of a String of Suspension Insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, 2005, pp 481-487.
- [5]. Suwarno, Aditya Pradana, 2010, *Properties of Leakage Current on 20 kV Ceramic Insulators and Computer Simulation Based on Electrical Equivalent Circuit*, International Conference on Electrical and Electronics Engineering, London UK, 30 Juni - 2 Juli 2010.
- [6]. Suwarno, Fari Pratomoswi, 2009, *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
- [7]. Amin, Muhammad, Salman Amin, dan Muhammad Ali, 2007, *Monitoring Of Leakage Current For Composite Insulator And Electrical Devices* , UET Taxilla, Pakistan.
- [8]. Elkalashy, Nagy I, Matti Lehtonen, Hatem A Darwish, and Mohamed A Izzularab, 2007, *Modelling and Experimental Verification of High Impedance of Arcing Faults in*

- Medium Voltage Networks*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.
- [9]. Vosloo, W.L, 'A Comparison of the Performance of High-Voltage Insulator Materials in a Severely Polluted Coastal Environment', PhD Dissertation, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Stellenbosch, South Africa, March 2002.
  - [10]. Waluyo, Parouli Marshala Pakpahan, and Suwarno, 2006, *Study on The Electrical Equivalent Circuit Models of Polluted Outdoor Insulators*, Proc. The 8th Intl. Conf. on Prop. and Appl. of Diel. Mats., Bali 26-30 June, 2006, pp. 546-549.