



UNIVERSITAS DIPONEGORO

**PEMBUATAN DAN ANALISIS KARAKTERISTIK ARUS
BOCOR ISOLATOR POLIMER RESIN EPOKSI 20 KV
DENGAN *FILLER* PASIR SILIKA DAN Al_2O_3 (ALUMINIUM
OKSIDA) PADA KONDISI IKLIM TROPIS BUATAN**

TUGAS AKHIR

**GANGSAR ZAENUROHMAN
21060114120013**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM STUDI SARJANA**

**SEMARANG
DESEMBER 2018**



UNIVERSITAS DIPONEGORO

**PEMBUATAN DAN ANALISIS KARAKTERISTIK ARUS
BOCOR ISOLATOR POLIMER RESIN EPOKSI 20 KV
DENGAN *FILLER* PASIR SILIKA DAN Al_2O_3 (ALUMINIUM
OKSIDA) PADA KONDISI IKLIM TROPIS BUATAN**

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**GANGSAR ZAENUROHMAN
21060114120013**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM STUDI SARJANA**

**SEMARANG
DESEMBER 2018**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

NAMA : GANGSAR ZAENUROHMAN

NIM : 21060114120013

Tanda Tangan :



Tanggal : 20 Desember 2018

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

NAMA : GANGSAR ZAENUROHMAN
NIM : 21060114120013
Departemen/Program Studi : TEKNIK ELEKTRO / SARJANA (S1)
Judul Skripsi : Pembuatan dan Analisis Karakteristik Arus Bocor
Isolator Polimer Resin Epoksi 20 kV dengan *Filler*
Pasir Silika dan Al₂O₃ (Aluminium Oksida) pada
Kondisi iklim Tropis Buatan

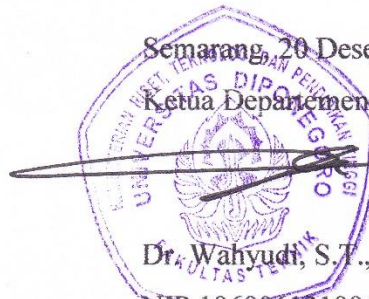
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Sarjana, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

TIM PENGUJI

| | | |
|---------------|-----------------------------------|---------|
| Pembimbing I | : Dr. Abdul Syukur, ST., MT. | (.....) |
| Pembimbing II | : Dr. Ir. Hermawan, DEA | (.....) |
| Penguji I | : Dr. Susatyo Handoko, S.T., M.T. | (.....) |
| Penguji II | : Ir. Agung Warsito, DHET | (.....) |

Semarang, 20 Desember 2018

Ketua Departemen Teknik Elektro



Dr. Wahyudi, S.T., M.T.

NIP-196906121994031001

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Diponegoro, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : GANGSAR ZAENUROHMAN
NIM : 21060114120013
Program Studi : SARJANA (S1)
Departemen : TEKNIK ELEKTRO
Fakultas : TEKNIK
Jenis Karya : TUGAS AKHIR

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Diponegoro **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*None-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

PEMBUATAN DAN ANALISIS KARAKTERISTIK ARUS BOCOR ISOLATOR POLIMER RESIN EPOKSI 20 KV DENGAN *FILLER* PASIR SILIKA DAN Al₂O₃ (ALUMINIUM OKSIDA) PADA KONDISI IKLIM TROPIS BUATAN

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti/Noneksklusif ini Universitas Diponegoro berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Semarang
Pada Tanggal : 20 Desember 2018
Yang menyatakan,



(GANGSAR ZAENUROHMAN)
21060114120013

ABSTRAK

Meningkatnya pertumbuhan penduduk dan industri harus disertai dengan suplai energi listrik yang memadai dan sistem distribusi energi listrik yang handal. Salah satu komponen penting untuk menunjang kehandalan sistem adalah isolator. Isolator berfungsi untuk mengisolir suatu konduktor bertegangan dengan kerangka penyangga yang dikembumikan sehingga tidak ada arus listrik mengalir dari konduktor tersebut ke tanah. Berbagai jenis bahan untuk isolator telah dikembangkan. Salah satunya adalah isolator dengan bahan resin epoksi. Isolator dengan bahan resin epoksi memiliki kelebihan dibandingkan dengan isolator porselen dan gelas, salah satunya memiliki bobot yang lebih ringan dibandingkan bahan porselen dan gelas. Namun isolator jenis ini masih tergolong baru, sehingga untuk meningkatkan performa dari isolator ini, salah satu caranya adalah dengan menambahkan bahan pengisi. Selain itu, isolator ini merupakan isolator pemasangan luar dimana kinerja isolator dipengaruhi oleh kondisi lingkungan sekitar. Wilayah Indonesia memiliki iklim tropis yang mana isolator secara langsung terpapar oleh kondisi lingkungan ini. Pada penelitian ini, dipaparkan pengaruh suhu dan kelembaban udara serta penambahan pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium Oksida) sebagai bahan pengisi terhadap nilai arus bocor isolator 20 kV bahan resin epoksi tipe sirip BBB dan BKB. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan suhu dan kelembaban udara mempengaruhi nilai arus bocor. Pada variasi suhu, nilai arus bocor meningkat seiring dengan kenaikan suhu. Untuk variasi kelembaban udara, nilai arus bocor juga meningkat seiring dengan kenaikan kelembaban udara. Namun pada variasi kelembaban udara 100%, nilai arus bocor meningkat sangat drastis karena uap air di dalam chamber pengujian terlalu jenuh.

Kata kunci: *isolator, resin epoksi, pasir silika, Al_2O_3 , iklim tropis, suhu, kelembaban udara, arus bocor*

ABSTRACT

Increase of the citizen population and industry must be accompanied by adequate electricity supply and reliable electrical energy distribution systems. One of the important component to support reliabilities of a system is an insulator. Insulator serve to isolate a conductor with a suspended support frame so that no electric current flows from the conductor to the ground. Various types of materials for insulators have been developed. One of them is an insulator with epoxy resin material. Insulators with epoxy resin have advantages compared to porcelain and glass insulators, one of which has a lighter weight than porcelain and glass. But this type of insulator is still relatively new, so to improve the performance of this insulator, one way is to add fillers. In addition, this insulator is an outdoor insulator where the performance of the insulator influenced by the surrounding environment. Indonesia has a tropical climate where insulators are directly exposed to these environmental conditions. In this study, the effect of temperature and air humidity and the addition of silica sand and Al_2O_3 (Aluminum Oxide) as insulators filler against the value of leakage current for 20 kV epoxy resin insulator with BBB and BKB fin type. The results show that changes in temperature and air humidity affect the value of the leakage current. At variations in temperature, the value of the leakage current increases with increasing temperature. For variations in air humidity, the value of leakage currents also increases with increasing air humidity. But in a variation of 100% air humidity, the value of the leakage current increases very dramatically because the water vapor in the test chamber is too saturated.

Keywords : insulator, epoxy resin, silica sand, Al_2O_3 , tropical climate, temperature, air humidity, leakage current

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat, karunia, kemampuan, dan berkat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dan penyusunan laporan Tugas Akhir ini.

Tugas Akhir dengan judul “PEMBUATAN DAN ANALISIS KARAKTERISTIK ARUS BOCOR ISOLATOR POLIMER RESIN EPOKSI 20 KV DENGAN *FILLER* PASIR SILIKA DAN Al_2O_3 (ALUMINIUM OKSIDA) PADA KONDISI IKLIM TROPIS BUATAN” ini diajukan untuk memenuhi syarat akhir untuk menyelesaikan pendidikan Program Sarjana pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang.

Adapun penyusunan dan penyelesaian laporan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan semua pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Wahyudi, ST. MT., selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang.
2. Bapak Yuli Christiyono, ST., MT., selaku Ketua Program S1 Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang.
3. Bapak Dr. Abdul Syakur, ST., MT., selaku Dosen Pembimbing I yang selalu sabar dalam memberikan motivasi, bimbingan, semangat, serta arahan yang membangun kepada penulis hingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir. Hermawan, DEA, selaku Dosen Pembimbing II yang selalu sabar dalam memberikan motivasi, bimbingan, semangat, serta arahan yang membangun hingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Budi Setiyono, ST, MT., selaku Dosen Pembimbing II yang selalu sabar dalam memberikan motivasi, bimbingan, semangat, serta arahan yang membangun hingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.

6. Bapak Ir. Agung Warsito, DHET selaku Dosen Wali yang selalu memberi arahan dan informasi yang mendukung penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
7. Ibu Yayuk selaku karyawan Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro yang selalu membantu penulis dengan memberikan arahan dan informasi mengenai syarat-syarat dalam hal pendaftaran seminar dan sidang Tugas Akhir.
8. Segenap Dosen dan Staff Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.
9. Bapak dan Ibu yang tidak henti-hentinya selalu memberikan Doa, semangat, kasih sayang, nasehat, dan jalan keluar ketika mendapat masalah untuk penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
10. Agnes Manik Sari Utami dan Widyantoro Tri Pamungkas teman seperjuangan dan partner Tugas Akhir penulis yang selalu memberikan semangat, hiburan, dan banyak bantuan ketika penulis mengalami kendala dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
11. Mayang Istnaini Ayu Hidayati yang senantiasa memberi semangat, perhatian, dan motivasi kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
12. Ali, Siska, Yoga, Adit, dan Aul selaku kawan-kawan “Lakon Lulus Keri” yang selalu memberi motivasi, keceriaan, dan berbagi banyak pelajaran hidup.
13. Kawan-kawan “Divergent” Elektro angkatan 2014 khususnya konsentrasi Teknik Tenaga Listrik, terima kasih atas dukungan, kerjasama, dan segala bentuk bantuan yang telah diberikan selama ini.
14. Teman-teman angkatan 2013, 2015, dan 2016 yang selalu memberi semangat dan bantuan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
15. Dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu hingga dari awal hingga akhir.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini tidak luput dari kekurangan, dan oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun sangatlah diperlukan oleh penulis demi kebaikan dan kesempurnaan penyusunan laporan di masa yang akan datang. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan menambah pengetahuan bagi kita semua.

Semarang, 20 Desember 2018

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|--|-------------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN..... | iii |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI..... | iv |
| ABSTRAK | v |
| ABSTRACT | vi |
| KATA PENGANTAR..... | vii |
| DAFTAR ISI..... | x |
| DAFTAR GAMBAR..... | xiii |
| DAFTAR TABEL | xvi |
| | |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Tujuan Penelitian..... | 4 |
| 1.3 Batasan Masalah..... | 4 |
| 1.4 Sistematika Penulisan Tugas Akhir..... | 5 |
| BAB II DASAR TEORI..... | 6 |
| 2.1 Isolator..... | 6 |
| 2.1.1 Isolator Pasangan Luar (Outdoor)..... | 6 |
| 2.1.2 Parameter Geometris Isolator..... | 8 |
| 2.1.3 Karakteristik Elektrik Isolator..... | 11 |
| 2.2 Faktor Lingkungan | 12 |
| 2.3 Bahan Isolasi Padat | 14 |
| 2.4 Polimer Sebagai Bahan Isolator | 15 |
| 2.5 Resin Epoksi Sebagai Material Isolator | 16 |
| 2.6 Bahan Pengisi | 18 |
| 2.6.1 Silane..... | 18 |
| 2.6.2 Pasir Silika | 18 |
| 2.6.3 Aluminium Oksida..... | 19 |
| 2.7 Arus Bocor Pada Isolator | 19 |

| | | |
|-----------------------------|---|-----------|
| 2.7.1 | Standar Nilai Arus Bocor | 21 |
| 2.7.2 | Rangkaian Pembagi Tegangan Pengukuran Arus Bocor | 22 |
| BAB III | METODOLOGI PENELITIAN | 24 |
| 3.1 | Diagram Alir Penelitian..... | 24 |
| 3.2 | Pembuatan Isolator | 25 |
| 3.2.1 | Alat dan Bahan | 25 |
| 3.2.2 | Langkah Pembuatan | 26 |
| 3.3 | Sampel dan Bahan Uji | 36 |
| 3.3.1 | Sampel Uji..... | 36 |
| 3.3.2 | Bahan Uji | 37 |
| 3.4 | Peralatan Pengujian | 40 |
| 3.4.1 | Peralatan Pengujian Arus Bocor | 40 |
| 3.5 | Langkah-langkah Pengujian | 45 |
| 3.5.1 | Pengujian Arus Bocor Isolator Uji..... | 45 |
| 3.6 | Pengolahan Data Pengujian | 47 |
| BAB IV | HASIL DAN ANALISIS | 48 |
| 4.1 | Pengukuran Arus Bocor Variasi Tegangan | 48 |
| 4.2 | Pengukuran Arus Bocor Variasi Suhu..... | 53 |
| 4.2.1 | Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV - 10%..... | 53 |
| 4.2.2 | Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV | 59 |
| 4.2.3 | Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV + 5%..... | 64 |
| 4.2.4 | Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Bocor Variasi Suhu..... | 69 |
| 4.3 | Pengukuran Arus Bocor Variasi Kelembaban Udara..... | 70 |
| 4.3.1 | Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV - 10%..... | 70 |
| 4.3.2 | Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV | 75 |
| 4.3.3 | Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV + 5%..... | 80 |
| 4.3.4 | Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Bocor Variasi Kelembaban Udara | 85 |
| BAB V | PENUTUP..... | 87 |
| 5.1 | Kesimpulan..... | 87 |
| 5.2 | Saran | 87 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 89 |
| BIODATA | | |
| LAMPIRAN A | | |

LAMPIRAN B
LAMPIRAN C

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 2.1 | Jenis - jenis isolator pendukung | 7 |
| Gambar 2.2 | Bentuk - bentuk isolator gantung | 8 |
| Gambar 2.3 | Profil dan parameter geometris isolator | 8 |
| Gambar 2.4 | Nilai m, n, dan w untuk berbagai jarak percikan | 13 |
| Gambar 2.5 | Proses terjadinya <i>flashover</i> pada material isolasi..... | 20 |
| Gambar 2.6 | Rangkaian ekivalen isolator | 21 |
| Gambar 2.7 | Rangkaian pembagi tegangan..... | 23 |
| Gambar 3.1 | Diagram alir penelitian..... | 24 |
| Gambar 3.2 | Model sirip besar isolator | 26 |
| Gambar 3.3 | Cetakan sirip besar isolator | 27 |
| Gambar 3.4 | Model sirip kecil isolator..... | 28 |
| Gambar 3.5 | Cetakan sirip kecil isolator | 28 |
| Gambar 3.6 | Model sela isolator | 29 |
| Gambar 3.7 | Cetakan sela isolator..... | 30 |
| Gambar 3.8 | Cetakan inti isolator | 30 |
| Gambar 3.9 | Pelapisan mika pada cetakan sirip besar isolator | 31 |
| Gambar 3.10 | Proses pengeringan sirip besar isolator | 31 |
| Gambar 3.11 | Hasil pembukaan cetakan sirip besar isolator | 32 |
| Gambar 3.12 | Pelapisan mika pada cetakan sirip kecil isolator | 32 |
| Gambar 3.13 | Proses pengeringan sirip kecil isolator..... | 33 |
| Gambar 3.14 | Hasil pembukaan cetakan sirip kecil isolator | 33 |
| Gambar 3.15 | Pelapisan mika pada cetakan sela isolator..... | 34 |
| Gambar 3.16 | Proses pengeringan sela isolator | 34 |
| Gambar 3.17 | Hasil pembukaan cetakan sela isolator..... | 34 |
| Gambar 3.18 | Proses pengeringan sela isolator | 35 |
| Gambar 3.19 | Isolator uji | 37 |
| Gambar 3.20 | Resin epoksi dan bahan pengeras..... | 38 |

| | |
|--|----|
| Gambar 3.21 Silane atau <i>silicon rubber</i> | 39 |
| Gambar 3.22 Bahan pengisi | 40 |
| Gambar 3.23 Rangkaian pengujian arus bocor | 40 |
| Gambar 3.24 Perangkat meja kontrol kit pembangkit tegangan tinggi..... | 41 |
| Gambar 3.25 Perangkat pembangkit tegangan tinggi | 42 |
| Gambar 3.26 Rangkaian pembagi tegangan..... | 42 |
| Gambar 3.27 Osiloskop digital OWON SDS8202..... | 43 |
| Gambar 3.28 <i>Chamber</i> pengujian | 44 |
| Gambar 3.29 Perangkat <i>hygrometer</i> dan <i>thermometer</i> | 44 |
| Gambar 3.30 Contoh hasil <i>plotting</i> gelombang arus bocor | 47 |
| Gambar 4.1 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi tegangan uji (a) 11 kV, (b) 12 kV, (c) 13 kV, (d) 14 kV, dan (e) 15 kV..... | 49 |
| Gambar 4.2 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi tegangan uji (a) 11 kV, (b) 12 kV, (c) 13 kV, (d) 14 kV, dan (e) 15 kV..... | 50 |
| Gambar 4.3 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi tegangan | 52 |
| Gambar 4.4 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi suhu (a) 25 ⁰ C, (b) 28 ⁰ C, (c) 31 ⁰ C, (d) 34 ⁰ C, dan (e) 37 ⁰ C | 54 |
| Gambar 4.5 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi suhu (a) 25 ⁰ C, (b) 28 ⁰ C, (c) 31 ⁰ C, (d) 34 ⁰ C, dan (e) 37 ⁰ C | 55 |
| Gambar 4.6 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi suhu dengan tegangan uji 11,547 kV - 10% | 58 |
| Gambar 4.7 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi suhu (a) 25 ⁰ C, (b) 28 ⁰ C, (c) 31 ⁰ C, (d) 34 ⁰ C, dan (e) 37 ⁰ C | 59 |
| Gambar 4.8 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi suhu (a) 25 ⁰ C, (b) 28 ⁰ C, (c) 31 ⁰ C, (d) 34 ⁰ C, dan (e) 37 ⁰ C | 60 |
| Gambar 4.9 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi suhu dengan tegangan uji 11,547 kV | 63 |
| Gambar 4.10 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi suhu (a) 25 ⁰ C, (b) 28 ⁰ C, (c) 31 ⁰ C, (d) 34 ⁰ C, dan (e) 37 ⁰ C | 64 |
| Gambar 4.11 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi suhu (a) 25 ⁰ C, (b) 28 ⁰ C, (c) 31 ⁰ C, (d) 34 ⁰ C, dan (e) 37 ⁰ C | 66 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.12 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi suhu dengan tegangan uji 11,547 kV + 5% | 68 |
| Gambar 4.13 Grafik perbandingan arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi suhu | 69 |
| Gambar 4.14 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi kelembaban udara (a) 60%, (b) 70%, (c) 80%, (d) 90%, dan (e) 100% | 71 |
| Gambar 4.15 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi kelembaban udara (a) 60%, (b) 70%, (c) 80%, (d) 90%, dan (e) 100% | 72 |
| Gambar 4.16 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi kelembaban udara dengan tegangan uji 11,547 kV - 10% | 74 |
| Gambar 4.17 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi kelembaban udara (a) 60%, (b) 70%, (c) 80%, (d) 90%, dan (e) 100% | 75 |
| Gambar 4.18 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi kelembaban udara (a) 60%, (b) 70%, (c) 80%, (d) 90%, dan (e) 100% | 77 |
| Gambar 4.19 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi kelembaban udara dengan tegangan uji 11,547 kV | 79 |
| Gambar 4.20 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi kelembaban udara (a) 60%, (b) 70%, (c) 80%, (d) 90%, dan (e) 100% | 80 |
| Gambar 4.21 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi kelembaban udara (a) 60%, (b) 70%, (c) 80%, (d) 90%, dan (e) 100% | 82 |
| Gambar 4.22 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi kelembaban udara dengan tegangan uji 11,547 kV + 5% | 84 |
| Gambar 4.23 Grafik perbandingan arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi kelembaban udara | 85 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1 Pendekatan beberapa lingkungan yang berkaitan dengan tingkat polusi | 14 |
| Tabel 2.2 Kelebihan isolator bahan resin epoksi dengan bahan keramik | 15 |
| Tabel 2.3 Sifat elektris aluminium oksida..... | 19 |
| Tabel 2.4 IEC60479 <i>Electrical Protection of Person</i> | 22 |
| Tabel 3.1 Spesifikasi isolator uji..... | 36 |
| Tabel 3.2 Informasi produk dari DGEBA dan <i>Polyaminoamide</i> | 37 |
| Tabel 3.3 Informasi produk silane <i>Dow Corning Glass Sealant</i> | 38 |
| Tabel 3.4 Hasil uji SEM dan EDX pasir kuarsa Bangka | 40 |
| Tabel 4.1 Data hasil pengukuran arus bocor variasi tegangan..... | 52 |
| Tabel 4.2 Data hasil pengukuran arus bocor variasi suhu..... | 57 |
| Tabel 4.3 Data hasil pengukuran arus bocor variasi suhu..... | 62 |
| Tabel 4.4 Data hasil pengukuran arus bocor variasi suhu..... | 67 |
| Tabel 4.5 Data hasil pengukuran arus bocor variasi kelembaban udara | 74 |
| Tabel 4.6 Data hasil pengukuran arus bocor variasi kelembaban udara | 79 |
| Tabel 4.7 Data hasil pengukuran arus bocor variasi kelembaban udara | 84 |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring meningkatnya pertumbuhan penduduk dan industri di Indonesia harus disertai dengan peningkatan sarana dan prasarana suplai energi listrik yang memadai. Energi listrik yang disediakan oleh produsen diharapkan dapat memenuhi tingkat kebutuhan energi listrik yang akan semakin meningkat di masa mendatang dan tetap kontinu dalam kondisi apapun serta meminimalisir gangguan yang terjadi. Untuk menunjang kehandalan sistem distribusi energi listrik ini diperlukan kinerja isolator yang mumpuni.

Isolator berfungsi untuk mengisolir suatu konduktor bertegangan dengan kerangka penyangga yang dikembumikan sehingga tidak ada arus listrik mengalir dari konduktor tersebut ke tanah[1]. Bahan isolator yang umum digunakan adalah bahan porselen dan kaca. Saat ini, isolator dengan bahan polimer mulai banyak digunakan. Isolator polimer mulai dikembangkan pada tahun 1963 dan ditingkatkan hingga saat ini. Isolator polimer dikenal juga dengan sebutan isolator non-keramik atau isolator komposit[2]. Isolator polimer memiliki kelebihan dibandingkan dengan isolator porselen dan gelas, yaitu lebih ringan, sifat rugi dielektrik yang lebih kecil, resistivitas volume yang lebih tinggi, proses produksi relatif lebih cepat, dan biaya produksi yang lebih murah[3].

Penggunaan isolator polimer untuk pasangan luar akan mengalami pengaruh simultan dari terpaan iklim dan cuaca yang terjadi. Indonesia yang terletak pada garis katulistiwa merupakan wilayah beriklim tropis dimana rata-rata lama penyinaran matahari sekitar 12 jam dan memiliki kelembaban udara yang tinggi. Kontaminasi pada permukaan isolator menjadi masalah besar terhadap kinerja isolator pasangan luar. Pada daerah pantai dan industri terdapat kontaminan garam, debu, dan bahan kimia yang dapat menempel pada permukaan isolator sehingga menyebabkan kristalisasi yang berakibat bertambahnya kekasaran

permukaan material isolasi. Pada kondisi lingkungan dengan polusi dan kelembaban tinggi, lapisan polutan yang menempel pada permukaan terjadi pembasahan menyebabkan arus bocor mengalir sehingga terjadi pemanasan polutan pada lapisan. Lapisan polutan yang menempel pada permukaan isolator dapat membentuk pita kering (*dry band*) akibat dialiri arus bocor yang terus menerus. Kondisi ini pada tegangan tertentu dapat menyebabkan pelepasan muatan melintasi pita kering. Busur pelepasan muatan dapat memanjang sehingga terjadi flashover yang melalui seluruh permukaan isolator[4]. Untuk mengevaluasi ketahanan jangka panjang dari rancangan isolator resin epoksi pasangan luar, diperlukan penelitian mengenai parameter listrik dari isolator, yaitu arus bocor. Faktor utama yang mempengaruhi performa material isolasi polimer adalah sifat menolak air atau hidrofobik.

Abdul Syakur[5] melakukan penelitian mengenai analisis arus bocor pada isolator resin epoksi silane dengan pengisi pasir silika pada kondisi iklim tropis. Material uji yang digunakan dalam penelitian adalah resin epoksi yang dibentuk dari *diglycidil ether of bisphenol-A* (DGEBA) dan *metaphenylene-diamine* (MPDA) yang dicampur dengan *silicon rubber* (SiR) dan pasir silika. Untuk komposisi sampel uji yaitu 30% DGEBA, 30% MPDA, 20% *Silicon Rubber*, dan 20% pasir silika. Dalam penelitian tersebut, dilakukan pengujian arus bocor pada isolator resin epoksi silane 20 kV dibawah iklim tropis buatan dengan parameter kelembaban udara, suhu udara, dan kondisi kering dan basah. Pengujian yang dilakukan berdasarkan beberapa variasi, yaitu variasi tegangan uji, variasi suhu udara, dan variasi kelembaban udara. Hasil pengujian arus bocor didapatkan semakin tinggi nilai tegangan uji dan kelembaban udara maka nilai arus bocor semakin besar. Untuk parameter suhu udara, semakin tinggi suhu udara maka nilai arus bocor semakin kecil.

Mustamin[6] melakukan penelitian mengenai analisis arus bocor pada isolator polimer *silicone rubber* (SiR) pada kondisi iklim tropis buatan yang dipercepat. Dalam penelitian tersebut, dilakukan pengujian karakteristik arus bocor pada isolator polimer SiR dengan kondisi variasi tegangan uji, variasi radiasi ultra violet (UV), variasi suhu udara, variasi kelembaban udara, pengaruh hujan, dan

pengaruh kabut garam. Hasil pengujian arus bocor didapatkan semakin tinggi nilai tegangan uji, kelembaban udara, intensitas hujan, dan konduktivitas polusi maka nilai arus bocor semakin besar. Untuk parameter suhu udara, semakin tinggi suhu udara maka nilai arus bocor semakin kecil. Untuk variasi radiasi ultra violet diketahui bahwa tidak ada hubungan secara langsung yang dapat terdeteksi tentang pengaruh radiasi UV terhadap arus bocor. Perubahan nilai arus bocor sangat kecil dari variasi terpaan radiasi ultra violet (UV) yang diberikan.

Muhamad Mukti Ali[7] melakukan penelitian mengenai analisis sudut kontak dan arus bocor pada isolator resin epoksi silane dengan pengisi *fly ash* tipe sirip tak seragam. Material uji yang digunakan dalam penelitian adalah resin epoksi yang dibentuk dari *diglycidil ether of bisphenol-A* (DGEBA) dan *metaphenylene-diamine* (MPDA) yang dicampur dengan silane dan *fly ash*. Untuk komposisi sampel uji yaitu 35% DGEBA, 35% MPDA, 15% Silane, dan 15% *fly ash*. Dalam penelitian tersebut, dilakukan pengujian arus bocor pada isolator resin epoksi silane 20 kV dengan pengaruh *coating* permukaan isolator dan kondisi kering dan basah. Pengujian yang dilakukan berdasarkan variasi tegangan uji. Hasil pengujian sudut kontak, dengan menerapkan *coating* terhadap permukaan isolator akan meningkatkan nilai sudut kontak sehingga bersifat hidrofobik. Hasil pengujian arus bocor didapatkan semakin tinggi nilai tegangan uji nilai arus bocor semakin besar.

Berdasarkan uraian hasil penelitian terdahulu, maka dalam tugas akhir ini dilakukan pembuatan dan analisis isolator resin epoksi dengan bahan pengisi pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium Oksida). Material uji yang digunakan dalam tugas akhir adalah resin epoksi yang dibentuk dari *bisphenol A - epichlorohydrin* (DGEBA) dan *polyaminoamide* yang dicampur dengan silane, pasir silika, dan Al_2O_3 . Untuk komposisi sampel uji yaitu 35% DGEBA, 35% *Polyaminoamide*, 15% Silane, 7,5% pasir silika, dan 7,5% Al_2O_3 . Dengan tipe sirip isolator yaitu tipe sirip besar-besar-besar (BBB) dan tipe sirip besar-kecil-besar (BKB) dengan jumlah sirip tiga buah. Pengujian yang dilakukan adalah arus bocor dengan pengaruh variasi tegangan uji, variasi suhu udara dan variasi kelembaban udara.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari pembuatan penelitian ini adalah :

1. Mengetahui cara pembuatan isolator.
2. Melakukan pengukuran untuk memperoleh karakteristik arus bocor bahan isolator polimer resin epoksi pengisi pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium Oksida) pada variasi tegangan, suhu dan kelembaban udara.
3. Mengetahui perbedaan karakteristik arus bocor pada isolator polimer resin epoksi pengisi pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium Oksida) tipe sirip besar-besar-besar (BBB) dan tipe sirip besar-kecil-besar (BKB).

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyederhanakan permasalahan dalam Tugas Akhir ini maka diberikan batasan-batasan sebagai berikut :

1. Bahan dasar material isolator yang digunakan adalah polimer resin epoksi dengan *Bisphenol A-Epichlorohydrin* dan *Polyaminoamide* sebagai bahan pengeras serta lem kaca (Silane) dengan pengisi pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium Oksida) dengan komposisi RTV23 (*Bisphenol A-Epichlorohydrin* 35%, *Polyaminoamide* 35%, Silane 15%, pasir silika 7,5%, dan Al_2O_3 7,5%) karena isolator polimer dengan bahan-bahan tersebut berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan dapat menghasilkan isolator yang memiliki kualitas lebih unggul dibandingkan dengan isolator jenis keramik dan gelas.
2. Isolator uji yang digunakan adalah isolator tiga sirip dengan tipe sirip besar-besar-besar (BBB) dan tipe sirip besar-kecil-besar (BKB).
3. Suhu dan kelembaban udara ruang (*chamber*) pengujian divariasikan antara 25°C - 37°C dan 60% - 100%.
4. Tidak membahas secara detail unsur kimia dari bahan isolator polimer resin epoksi silane pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium Oksida).

5. Pengujian dan analisis hanya dilakukan pada isolator resin epoksi silane pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium Oksida) dan belum melakukan perbandingan dengan isolator jenis lain.
6. Pengujian yang dilakukan yaitu magnitude arus bocor dan bentuk gelombang arus bocor, belum melakukan pengujian yang lain seperti tegangan tembus, tangen delta, dan kekuatan mekanis.

1.4 Sistematika Penulisan Tugas Akhir

Laporan Tugas Akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, maksud dan tujuan, batasan masalah, metoda pengumpulan data dan analisis, dan sistematika penulisan.

BAB II DASAR TEORI

Berisi studi pustaka mengenai dasar teori pendukung yang berhubungan dengan isolator, faktor lingkungan, bahan isolasi padat, polimer sebagai bahan isolator, resin epoksi sebagai material isolator, bahan pengisi, dasar pengujian arus bocor isolator.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Membahas pembuatan isolator dan metode pengujian yang meliputi sampel dan bahan pengujian, peralatan, dan rangkaian pengujian, prosedur pengujian, serta akuisisi dan pengolahan data pengujian.

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

Memaparkan data hasil pengujian dan analisis

BAB V PENUTUP

Mengambil kesimpulan dan memberi saran atas tugas akhir yang dibuat.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Isolator

Isolasi adalah bahan yang dapat memisahkan secara elektrik dua buah penghantar (atau lebih) yang berdekatan sehingga tidak terjadi kebocoran arus, terjadi lompatan bunga api (*flashover*), ataupun percikan api (*sparkover*). Isolator merupakan alat listrik yang dipakai untuk mengisolasi penghantar[8].

Stress listrik adalah tekanan yang disebabkan oleh tegangan pada material[9]. Kemampuan isolator untuk menahan *stress* listrik disebut kekuatan dielektrik. Kekuatan dielektrik isolator merupakan salah satu faktor yang sangat penting untuk menentukan kualitas isolator yang nantinya akan mendukung keseluruhan sistem tenaga listrik. Semakin tinggi kekuatan dielektrik suatu bahan isolasi, maka isolator tersebut semakin baik.

Menurut pemasangannya, isolator digolongkan menjadi 2 yaitu isolator luar dan isolator dalam. Sedangkan menurut macam bahan isolasi yang dipakai yaitu padat, cair dan gas. Berdasarkan fungsinya, bahan isolator dapat digolongkan menjadi:

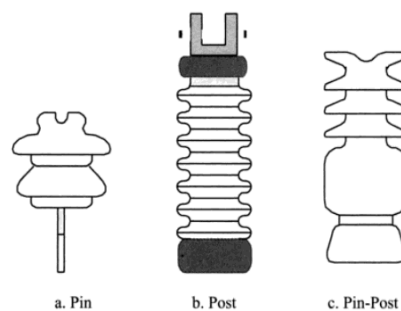
1. Penyangga/penggantung (*solid support*) yaitu bahan isolator berbentuk padat, misalnya porselin, keramik, polimer, kayu dan sebagainya.
2. Bahan pengisi (*filling media*) yaitu bahan isolator berbentuk cair atau gas, misalnya minyak, bitumen, aneka gas dan udara.
3. Bahan penutup (*covering material*) yaitu bahan isolator yang biasanya terdapat pada bagian luar, berupa bahan padat atau cair, misalnya mika, pernis atau enamel.

2.1.1 Isolator Pasangan Luar (Outdoor)

Isolator pasangan luar dibuat bersirip untuk memperpanjang lintasan arus bocor dan mencegah terjadinya jembatan air yang terbentuk jika isolator dibasahi

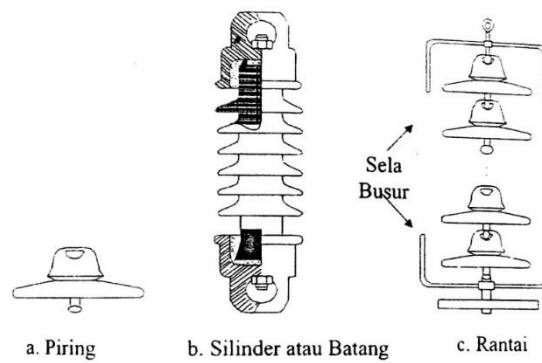
air hujan. Dilihat dari konstruksinya isolator terdiri dari isolator pendukung dan isolator gantung (*suspension*). Isolator pendukung terdiri dari tiga jenis, yaitu: isolator *pin*, isolator *post* dan isolator *pin-post*[1].

Isolator jenis *pin* digunakan untuk jaringan distribusi hantaran udara tegangan menengah, dipasang pada palang tiang tanpa beban tekuk. Isolator *pin* dapat juga digunakan untuk tiang yang mengalami beban tekuk, dalam hal ini isolator dipasang ganda pada palang ganda. Jenis *pin-post* digunakan untuk jaringan distribusi hantaran udara tegangan menengah, dipasang pada tiang yang mengalami gaya tekuk. Isolator jenis *post* digunakan untuk pasangan dalam, antara lain sebagai penyangga rel daya pada panel tegangan menengah. Isolator jenis *post* tidak bersirip. Seperti halnya jenis *pin-post*, karena isolator ini dirancang untuk pasangan dalam[1]. Gambar 2.1 merupakan merupakan isolator pendukung yang terdiri dari tipe *pin*, *post*, dan *pin-post*.



Gambar 2.1 Jenis - jenis isolator pendukung[1]

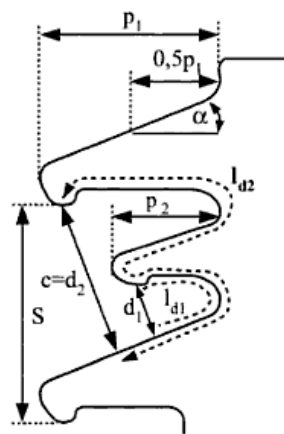
Dilihat dari bentuknya, isolator gantung terdiri dari dua jenis, yaitu isolator piring (Gambar 2.2.a) dan isolator silinder (Gambar 2.2.b). Isolator gantung digunakan untuk jaringan hantaran udara bertegangan menengah dan tegangan tinggi. Pada jaringan tegangan menengah digunakan pada tiang akhir dan tiang sambungan. Untuk transmisi tegangan tinggi, isolator piring dirangkai berbentuk rantai, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.c. Isolator rantai ada yang dilengkapi dengan tanduk busur (*arching horn*) untuk melindungi isolator saat terjadi layardenyar akibat tegangan lebih pada jaringan[1].



Gambar 2.2 Bentuk - bentuk isolator gantung[1]

2.1.2 Parameter Geometris Isolator

Profil dari suatu isolator ditentukan oleh parameter geometrisnya yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Profil dan parameter geometris isolator[10]

Keterangan:

- c = Jarak minimum antar sirip
- d = Jarak bebas
- S = Jarak spasi antar sirip
- P = Rentangan sirip
- I_d = Jarak rambat
- α = Kemiringan sirip

Adapun parameter isolator yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan jaringan adalah[10]:

1. Jarak minimum antar sirip (c)

c adalah jarak minimum antar sirip berdekatan yang berdiameter sama. Harga c minimal 30 mm, untuk isolator yang panjang total kurang dari atau sama dengan 550 mm. Sedangkan untuk isolator yang mempunyai rentang sirip terpendek (P lebih kecil dari 40 mm), maka harga c sekitar 20 mm. Jarak minimum antar sirip c dipertimbangkan untuk mencegah penjembatanan air hujan antara dua sirip yang berurutan.

2. Perbandingan antar spasi dengan rentangan sirip (S/P)

Perbandingan S/P menggambarkan pembatasan dalam pemilihan jarak bocor yang terlalu besar. Nilai S/P harus lebih besar dari 0.8, kecuali untuk isolator bentuk sirip datar (tanpa rusuk) harga S/P dapat direduksi menjadi 0.65. S/P bertujuan untuk menentukan sifat *self cleaning* dari isolator.

3. Perbandingan antara jarak rambat dengan jarak bebas ($1_d/d$)

Perbandingan ini dipertimbangkan untuk mencegah terjadinya hubung singkat lokal dengan nilai lebih kecil dari 5. Perbandingan diambil pada bagian isolator yang paling buruk misalnya pada bagian bawah isolator jenis anti kabut. Pada Gambar 2.3 ditunjukkan ada dua harga $1_d/d$, yaitu $1_{d1}/d_1$ dan $1_{d2}/d_2$. $1_{d1}/d_1$ adalah perbandingan jarak rambat 1_{d1} dengan jarak bebas d_1 . $1_{d2}/d_2$ adalah perbandingan jarak rambat 1_{d2} dengan jarak bebas d_2 .

4. Sirip berselang-seling

Selisih (P_1-P_2) antara dua rentang sirip berurutan bertujuan untuk mencegah penjembatanan air hujan antar sirip berurutan. Dengan nilai (P_1-P_2) tidak boleh kurang dari 15 mm.

P_1 adalah rentang sirip yang lebih besar.

P_2 adalah rentang sirip yang lebih kecil.

5. Kemiringan sirip (α)

Kemiringan sirip perlu dipertimbangkan karena hal ini menyangkut sifat *self cleaning* isolator. Sudut permukaan atas isolator harus membentuk sudut lebih besar dari 5° , kecuali untuk sirip tanpa rusuk besar sudut minimum 2° .

6. Faktor jarak rambat (*creepage faktor/CF*)

Parameter ini diperlukan jika isolator terdiri dari gabungan beberapa unit isolator. Parameter ini menunjukkan karakteristik isolator secara keseluruhan.

$$CF = \frac{I_t}{S_t} \quad (2.1)$$

I_t = jarak rambat total.

S_t = jarak terpendek antara bagian-bagian logam yang dikenakan tegangan normal.

Harga CF dianjurkan tidak lebih besar 3,5 di daerah dengan tingkat polusi I dan II, serta CF tidak lebih besar dari 4 untuk daerah dengan tingkat polusi III dan IV.

7. Faktor profil (PF)

Faktor profil adalah perbandingan jarak bocor yang disederhanakan (I_s) dengan jarak rambat isolasi sebenarnya (I_a) yang diukur antara dua yang ditetapkan sebagai spasi (S).

$I_s = 2P + S$ untuk isolator satu ukuran sirip

$I_s = 2P_1 + 2P_2 + S$ untuk isolator sirip berselang-seling

Jadi, untuk isolator satu ukuran sirip:

$$PF = \frac{2P + S}{I_a} \quad (2.2)$$

Untuk isolator dengan sirip berselang-seling:

$$PF = \frac{2P_1 + 2P_2 + S}{I_a} \quad (2.3)$$

Dalam hubungannya dengan tingkat polusi, harga PF dianjurkan sebagai berikut :

PF lebih besar dari 0,8 untuk tingkat polusi I dan II.

PF lebih besar dari 0,7 untuk tingkat polusi III dan IV.

2.1.3 Karakteristik Elektrik Isolator

Karakteristik elektrik dari isolator yang dimaksud adalah kemampuan menahan flashover dan arus bocor. Isolator yang terpasang pada jaringan udara (terutama jaringan outdoor) sangat mudah dipengaruhi oleh perubahan kondisi lingkungan udara sekitar. Perubahan-perubahan tersebut dapat mempengaruhi kinerja dari isolator, yaitu kemampuan isolator menahan tegangan. Apabila di permukaan isolator terbentuk lapisan polutan akan mempengaruhi kinerja dari isolator tersebut. Kinerja isolator juga akan berbeda apabila permukaan isolator dalam kondisi basah dan dalam kondisi kering.

Tegangan lewat denyar bolak – balik digunakan untuk memperkirakan kekuatan elektrik isolator jika memikul tegangan lebih internal. Karakteristik tegangan-waktu digunakan untuk memperkirakan kekuatan elektrik isolator jika memikul tegangan lebih surja akibat sambaran petir. Tegangan lewat denyar bolak-balik kering adalah karakteristik utama dari isolator yang dipasang pada ruangan tertutup. Tegangan lewat denyar ditentukan pada keadaan isolator kering dan bersih[1].

Tegangan lewat denyar bolak-balik basah suatu isolator merupakan karakteristik yang sangat penting jika isolator akan dipasang di ruang terbuka. Tegangan lewat denyar bolak-balik suatu isolator merupakan gambaran kekuatan dielektrik isolator tersebut pada saat basah akibat air hujan atau basah berembun akibat perubahan suhu tanpa adanya campuran polutan. Sifat air yang membasahi suatu isolator dicirikan atas tiga hal, yaitu intensitas, arah, dan konduktivitas air yang membasahi isolator tersebut. Menurut standar IEC No 60-1, ciri – ciri air yang membasahi isolator saat pengujian adalah :

1. Intensitas penyiraman adalah $3 \text{ mm}^3 / \text{menit}$
2. Resistivitas air adalah $10^4 \Omega/\text{cm}$
3. Arah penyiraman air membentuk sudut 45° dengan sumbu tegak isolator.

Tegangan lewat denyar bolak-balik basah suatu isolator juga bergantung pada kondisi udara.

2.2 Faktor Lingkungan

Kondisi wilayah beriklim tropis dengan curah hujan dan kelembaban udara yang tinggi berpengaruh pada performa isolator, terutama isolator pasangan luar (*outdoor insulator*) yang secara langsung terpapar oleh kondisi lingkungan ini. Wilayah dengan iklim tropis terletak pada batas 23^o 27' LU sampai 23^o 27' LS. Lingkungan ini hampir sepanjang tahun terkena radiasi matahari. Ciri – ciri lain lingkungan tropis adalah :

1. Suhu udara : 20^oC - 35^oC
2. Curah hujan tahunan : 1960 - 3185 mm
3. Kelembaban udara : 50 - 98%
4. Tekanan udara : 924,10 - 1014,90 mb

Posisi Indonesia terletak di daerah khatulistiwa, sehingga memperoleh sinar matahari secara maksimal dan merata sepanjang tahun. Rata-rata suhu udara di Indonesia setiap tahunnya adalah 27^oC, untuk daratan rata-rata 28^oC dan lautan sebesar 26,3^oC. Semua diukur di atas permukaan air laut. Untuk setiap kenaikan 100 meter pada suhu normal akan mengalami penurunan sebesar 0,60^oC, tetapi untuk udara kering suhu udara turun 1^oC[11].

Sifat listrik udara dipengaruhi oleh kerapatan dan kelembaban udara. Akibatnya, hasil pengujian isolasi eksternal tergantung pada kondisi udara. Karena itu, hasil pengujian ketika udara dalam keadaan standar perlu dinyatakan, yaitu pada ketika suhu udara 20^oC, tekanan udara 760 mmHg, dan kelembaban udara 11 g/m³. Hasil pengujian pada keadaan standar dapat ditentukan dengan Persamaan 2.4[17].

$$V_{us} = (k_h/k_d) \cdot V_u \quad (2.4)$$

dengan :

V_{us} = Hasil pengujian pada keadaan standar

V_u = Hasil pengujian pada sembarang keadaan udara

k_d = Faktor koreksi kerapatan udara

k_h = Faktor koreksi kelembaban udara

Pada Persamaan 2.4 terdapat faktor koreksi kerapatan udara (k_d) dan faktor koreksi kelembaban udara (k_h). Faktor koreksi kerapatan udara dapat dihitung dengan Persamaan 2.5.

$$kd = \left(\frac{p}{760}\right)^m \times \left(\frac{293}{273+\theta}\right)^n \quad (2.5)$$

dengan:

kd = Faktor koreksi kerapatan udara

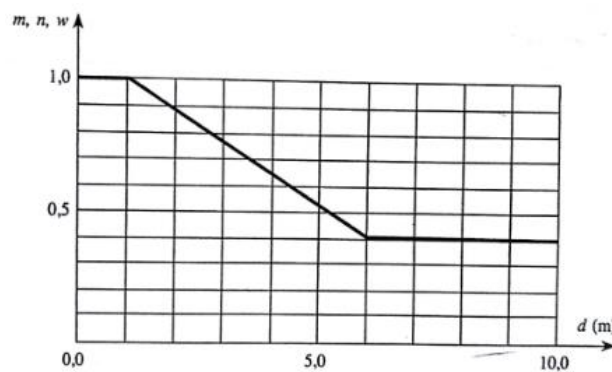
θ = Temperatur udara ($^{\circ}\text{C}$)

p = Tekanan udara (mmHg)

m, n = 1,0 untuk pengujian dengan tegangan tinggi dc dan impuls petir

= 1,0 untuk semua objek uji yang ditempatkan pada sela elektroda bola-bola

Untuk pengujian tegangan tinggi ac dan tegangan tinggi impuls hubungan polaritas positif, nilai m dan n diambil dari kurva yang diberikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Nilai m, n, dan w untuk berbagai jarak percikan[17]

Faktor koreksi kelembaban udara dihitung dengan Persamaan 2.6.

$$kh = (k)^w \quad (2.6)$$

dengan:

k_h = Kelembaban mutlak

w = Eksponen faktor koreksi udara

Pemasangan isolator pada wilayah yang beriklim tropis tak lepas dari polusi pada isolator itu sendiri. Selain dari pengaruh kondisi iklim tropis, polusi juga mempengaruhi performa isolator. Umumnya polutan akan melekat pada air yang menempel pada isolator. Berikut adalah tingkatan polusi menurut SPLN 10-3B 1993:

Tabel 2.1 Pendekatan beberapa lingkungan yang berkaitan dengan tingkat polusi[10]

| Tingkat Polusi | Ciri Lingkungan |
|-------------------|--|
| I - Ringan | <ul style="list-style-type: none"> • Kawasan tanpa industri dan kepadatan rumah rendah yang dilengkapi sarana pembakaran. • Kawasan dengan kepadatan industri rendah atau kepadatan rumah rendah tapi sering terkena angin dan/atau hujan. • Kawasan pertanian. • Kawasan pegunungan. <p>Semua kawasan harus berjarak minimum 10 km sampai 20 km dari laut dan bukan kawasan terbuka bagi hembusan angin langsung dari laut</p> |
| II - Sedang | <ul style="list-style-type: none"> • Kawasan industri yang tidak secara khusus menghasilkan asap polusi dan/atau dengan kepadatan rumah sedang yang dilengkapi sarana pembakaran. • Kawasan dengan kepadatan rumah tinggi dan/atau kepadatan industri tinggi, tapi sering terkena angin dan/atau hujan. • Kawasan terbuka bagi angin dari laut, tapi tidak dekat dengan laut. • Kawasan dengan kepadatan industri tinggi dan di pinggir kota besar dengan kepadatan sarana pembakaran tinggi yang menghasilkan polusi. |
| III - Berat | <ul style="list-style-type: none"> • Kawasan dekat laut atau dalam setiap keadaan terbuka bagi hembusan angin yang relatif kencang dari laut. • Kawasan yang umumnya luasan cukup, terkena debu konduktif dan asap industri yang khususnya menghasilkan endapan konduktif tebal. |
| IV - Sangat Berat | <ul style="list-style-type: none"> • Kawasan yang umumnya luasan cukup sangat dekat dengan laut atau hembusan angin yang sangat kencang dan terpolusi dari laut. • Kawasan padang pasir yang tidak ada hujan dalam jangka waktu yang lama, terbuka bagi angin kencang yang membawa pasir dan garam serta terkena kondensasi yang tetap. |

2.3 Bahan Isolasi Padat

Bahan isolasi padat yang selama ini digunakan yaitu bahan porselin/keramik dan kaca/gelas. Sekarang ini telah mulai dikembangkan bahan isolator padat dari jenis polimer. Isolator padat digunakan secara luas dalam peralatan sistem tenaga

listrik, terutama untuk isolator pasangan luar. Oleh sebab itu, bahan dielektrik pada isolator pasangan luar harus memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dan tidak mudah dipengaruhi oleh kondisi sekitarnya[12].

Isolator berbahan porselin memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi, namun dari segi mekanik memiliki berat yang cukup tinggi. Sedangkan isolator berbahan gelas memiliki sifat higroskopis pada permukaan isolator, hal ini dikarenakan adanya larutan alkali dalam komposisi gelas, sehingga konduktifitas isolator menjadi lebih besar. Kelebihannya dari segi ekonomi yaitu isolator gelas lebih murah dibanding isolator porselin.

Berdasarkan uraian diatas untuk menyelesaikan masalah isolator porselin/keramik yang berat dan isolator kaca/gelas dengan sifat higroskopisnya, sehingga dikembangkan isolator berbahan polimer. Tabel 2.2 adalah Tabel kelebihan isolator berbahan resin epoksi dibanding dengan bahan keramik.

Tabel 2.2 Kelebihan isolator bahan resin epoksi dengan bahan keramik[12]

| | Resin Epoksi | Keramik |
|-----------------|---|---------------------------|
| Berat | Rendah | Tinggi |
| Sifat | Hidrofobik | hidrofobik |
| Kuat Mekanik | Tinggi | Mudah pecah |
| Suhu Pembuatan | RTV 5°C - 80°C atau HTV 100°C- 300°C | didas 1000 ⁰ C |
| Kuat dielektrik | Tinggi | Rendah |
| Biaya Pembuatan | Murah | Mahal |

2.4 Polimer Sebagai Bahan Isolator

Polimer merupakan zat yang terdiri atas rangkaian panjang molekul kecil (monomer) yang berulang-ulang membentuk molekul besar (makromolekul). Pada umumnya polimer dikenal sebagai plastik. Sifat bahan ini yaitu ringan, mudah dibentuk, elastis, dan bersifat isolator karena tidak memiliki elektron bebas, sehingga cocok digunakan untuk isolator kabel.

Polimer dapat dijumpai pada kategori besar, yaitu[12]:

1. Termoplastik

Termoplastik terdiri dari ikatan fisika yang linear atau cabang molekul besar yang pada temperatur ruang atau sekeliling berbentuk padat dan akan berubah bentuknya pada temperatur lebih tinggi. Proses pengerasan dan pencairan sebagai fungsi dari temperatur bersifat dapat kembali (*reversible*).

2. Termoset

Termoset pada temperatur ruang atau sekeliling berbentuk cair, dapat berbentuk padat melalui pengerasan dengan proses reaksi kimia antara komponen yang berbeda pada temperatur ruang. Setelah padat tidak dapat kembali cair (*irreversible*).

Polimer terikat silang adalah satu molekul yang sangat besar dan mempunyai titik lebur di atas titik leburnya atau suhu transisi kaca. Ikatan silang dapat diperoleh dengan salah satu cara yaitu pembentukan dengan bahan pengeras. Pengeras kimia dapat ditambahkan untuk menghasilkan ikatan silang. Resin epoksi adalah polimer berjenis termoset, campuran dari resin dengan pengeras kimia menghasilkan bahan seperti kaca yang memiliki sifat isolasi listrik yang baik[12].

2.5 Resin Epoksi Sebagai Material Isolator

Resin epoksi merupakan suatu produk yang dihasilkan oleh reaksi bahan dasar dan pengeras. Yang memiliki karakteristik sebagai berikut:[12]

1. Sifat kekentalan yang rendah

Cairan resin mudah untuk diproses atau dimodifikasi.

2. Mudah dibentuk

Resin epoksi secara praktis dapat dibentuk dengan cepat dan mudah dalam temperatur 5°C-80°C untuk RTV dan 100°C-300°C untuk HTV tergantung pada pemilihan bahan pengerasnya.

3. Penyusutan yang rendah

Salah satu keuntungan resin epoksi adalah penyusutan yang rendah selama dibentuk.

4. Tingkat kerekatan tinggi

Resin epoksi merupakan polimer dengan perekat sempurna, karena terbentuk dari gabungan polar *hydroxil* dan *ether*.

5. Sifat mekanis yang tinggi

Kekuatan resin epoksi yang diformulasikan dengan baik biasanya melampaui resin lain yang terjadi karena penyusutan yang rendah, sehingga meminimalkan tekanan yang dapat melemahkan struktur mekanik.

6. Isolasi listrik yang tinggi

Resin epoksi merupakan bahan isolasi yang baik sehingga dapat menjadi bahan isolator yang baik pula.

7. Ketahanan kimia yang baik

Resin epoksi memiliki ketahanan tinggi terhadap asam.

Dalam penelitian ini, jenis resin epoksi digunakan adalah *Bisphenol A - Epichlorohydrin* (DGEBA) dengan *Polyaminoamide* sebagai *hardener*. DGEBA diperoleh dari reaksi *Epichlorohydrin* dan *Bisphenol A*, dengan berat molekul 380 dan mengandung dua gugus *glycidyl ether* per molekul. DGEBA dijual secara komersil dalam bentuk cairan bening, dapat dirubah menjadi suatu produk *thermoset* bila direaksikan dengan suatu agen pematangan (*hardener*), dengan vulkanisasi suhu ruangan (*room temperature vulcanized = RTV*) antara 5 °C sampai 80 °C[12]. Contoh beberapa jenis *hardener* adalah *amine*, *amide*, asam anhidrida, *imidazole*, *phenol*, merkaptan (*thiol*), dan metal oksida. Untuk merubah menjadi epoksi plastik pada temperatur kamar, yang biasa digunakan adalah jenis *amine*, dan *amide*. Karena jenis lain digunakan dengan kondisi temperatur lebih dari 150°C untuk dapat bereaksi dengan epoksi[13].

Polyaminoamide merupakan salah satu jenis *hardener* yang banyak digunakan saat ini. *Polyaminoamide* adalah polimer hasil kondensasi. Berawal dari reaksi *non-equilibrium* sejumlah mol *p-carboranedicarboxylic acid* dengan aromatik tetraamin. Dimana reaksi ini akan menghasilkan sebuah properti baru dari polimer. Sintesa *polyaminoamide* ini biasanya digunakan dengan pelarut *tryoctrylamine*. Rumus kimia dari *polyaminoamide* ini adalah 3,3'-*diaminobenzidine*. Sifat khas dari polimer ini adalah mempunyai adesif tinggi

terhadap material apapun. Disamping itu, *polyaminoamide* mempunyai sifat fleksibilitas yang tinggi[13].

2.6 Bahan Pengisi

Secara teknis penggunaan bahan pengisi dimaksudkan sebagai upaya memodifikasi kinerja polimer tersebut untuk meningkatkan sifat mekanis, meningkatkan konduktivitas termal, menurunkan ekspansi termal, menurunkan sifat absorpsi air. Secara ekonomis penggunaan bahan pengisi dimaksudkan sebagai bahan upaya untuk mereduksi biaya pembuatan produk tuangan[12].

2.6.1 Silane

Silane yang disebut juga *silicon rubber* adalah bahan yang tahan terhadap temperatur tinggi yang biasanya digunakan untuk isolator kabel dan bahan isolator tegangan tinggi. Kepopuleran bahan ini dibanding dengan bahan keramik/porselin dan jenis polimer lainnya karena memiliki sifat *hidrofobik* yang tinggi, dengan demikian konduktivitas permukaan isolator tetap rendah, sehingga dapat meminimalkan arus bocor. Selain itu memiliki sifat dielektrik yang baik, ringan, mudah penanganan dan pemasangannya[12].

2.6.2 Pasir Silika

Silika atau dikenal dengan silikon dioksida (SiO_2) merupakan senyawa yang banyak ditemui dalam bahan galian yang disebut pasir kuarsa, terdiri atas kristal-kristal silika (SiO_2) dan mengandung senyawa pengotor yang terbawa selama proses pengendapan. Pasir kuarsa juga dikenal dengan nama pasir putih merupakan hasil pelapukan batuan yang mengandung mineral utama seperti kuarsa dan feldspar. Pasir kuarsa mempunyai komposisi gabungan dari SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , dan K_2O , berwarna putih bening atau warna lain bergantung pada senyawa pengotornya[14].

Digunakannya silika dalam bahan pengisi isolator bertujuan untuk memperbaiki sifat mekanis isolator, dimana penambahan silika ke dalam bahan

isolasi resin epoksi berfungsi untuk meningkatkan kuat mekanis yaitu kuat tarik dan kuat tekan[15].

2.6.3 Aluminium Oksida

Aluminium oksida atau alumina adalah satu-satunya yang dibentuk oleh logam aluminium dan terjadi di alam sebagai mineral *corundum* (Al_2O_3), *diaspore* ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), *gibbsite* ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), dan paling umum sebagai bauksit[16]. Aluminium oksida dikenal memiliki sifat sebagai isolator panas dan listrik yang baik. Berikut adalah sifat elektris dari aluminium oksida.

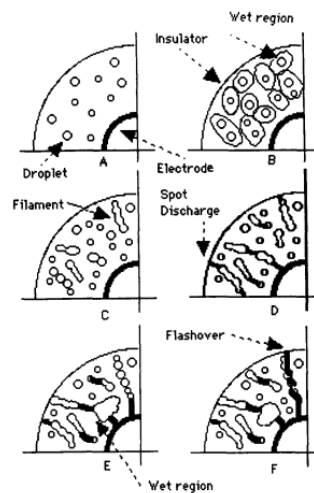
Tabel 2.3 Sifat elektris aluminium oksida[16]

| Sifat | Kondisi | Satuan | Nilai |
|---------------------------|----------|----------|------------|
| Kekuatan Dielektrik | 2,5mm tk | AC-kV/mm | 10 |
| Konstanta Dielektrik | 1 MHz | - | 9,7 |
| Resistivitas Volume | 20°C | Ohm-cm | $>10^{14}$ |
| Resistivitas Volume | 300°C | Ohm-cm | 10^{10} |
| Resistivitas Volume | 1000°C | Ohm-cm | 10^6 |
| <i>Loss Factor</i> | 1 MHz | - | 0,009 |
| <i>Dissipation Factor</i> | 1 MHz | - | 0,0001 |

2.7 Arus Bocor Pada Isolator

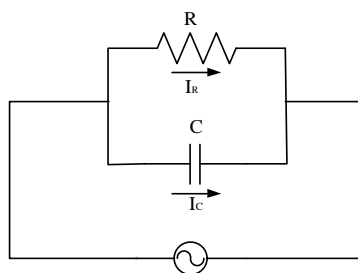
Bila suatu bahan isolasi dikenai medan elektrik, arus akan mengalir pada permukaan bahan isolasi tersebut. Arus ini sering disebut arus bocor atau arus rambat. Besarnya arus rambat ini ditentukan oleh resistansi permukaan bahan isolasi. Mudah dipahami bahwa besarnya arus rambat dipengaruhi oleh kondisi udara di sekitar isolator, yaitu temperatur, tekanan, kelembaban, dan kandungan polusi di sekitar isolator tersebut. Secara teknis, sistem isolasi harus mampu memikul arus rambat tanpa menimbulkan pemburukan pada isolator atau setidaknya pemburukan karena arus rambat tersebut dapat dibatasi. Arus rambat menimbulkan panas pada permukaan isolator, dan efek samping yang ditimbulkannya adalah penguraian bahan kimia yang melapisi permukaan isolator.

Efek yang sangat nyata dari penguraian kimia ini adalah timbulnya jejak arus pada permukaan isolator. Jejak arus inilah yang disebut dengan kerak dielektrik. Bergabungnya beberapa kerak dielektrik dapat memicu terjadinya peluahan sempurna atau flashover pada permukaan isolator[17]. Isolator pada saluran udara pasangan luar dibentuk sedemikian rupa sehingga memiliki jarak rambat (*creeping distance*) arus bocor yang panjang. Hal tersebut dilakukan untuk memperbesar resistansi permukaan dari isolator. Peningkatan resistansi permukaan akan memperkecil nilai arus bocor



Gambar 2.5 Proses terjadinya *flashover* pada material isolasi[18]

Tegangan bolak – balik (AC) yang diterapkan pada suatu isolator akan menimbulkan dua komponen arus, yaitu : arus resistif dan arus kapasitif. Oleh sebab itu, selama ini isolator dimodelkan dalam suatu rangkaian ekuivalen yang dapat menampilkan kedua komponen arus di atas. Rangkaian ekuivalen isolator tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.6. Model arus bocor isolator tersebut mencerminkan kondisi linear dimana arus bocor yang mengalir berupa sinusoidal murni. Pada isolator saluran transmisi, komponen resistif memberikan pengaruh yang lebih dominan dibandingkan komponen kapasitif. Hal ini disebabkan isolator digunakan pada frekuensi 50 Hz sehingga efek kulit dan kapasitansi bernilai rendah dan konstan.



Gambar 2.6 Rangkaian ekivalen isolator

Namun, arus bocor tidak selalu bernilai linear dan menghasilkan arus bocor dengan bentuk gelombang sinusoidal murni. Pada kondisi tertentu, misalnya ketika mulai terjadi *dry-band arcing* yang kecil pada permukaan isolator, bentuk gelombang arus bocor akan menjadi tidak linear. Bentuk gelombang arus bocor akan mengalami distorsi dari bentuk awal yang berupa gelombang sinusoidal murni. Ketika terjadi korona pada permukaan isolator, akan terjadi *spike* pada gelombang arus bocor.

2.7.1 Standar Nilai Arus Bocor

Nilai arus bocor untuk isolator saat ini belum ditetapkan oleh organisasi standardisasi manapun. Alasan utamanya adalah isolator selalu dipasang pada ketinggian sehingga kriteria arus bocor isolator lebih didasarkan pada kehandalan operasi sistem tenaga daripada keamanan. Oleh sebab itu, tidak ada batas yang pasti untuk nilai maksimum arus bocor isolator yang diperbolehkan bagi isolator apa saja. Sebagai gantinya, batasan nilai arus bocor yang ada biasanya ditetapkan oleh perusahaan energi listrik dari negara yang bersangkutan. Batas nilai arus bocor tentu bermacam-macam nilainya pada antar negara dan bahkan di negara itu sendiri. Batas ini ditentukan berdasarkan tipe isolator yang digunakan, rating tegangan dan batasan rugi – rugi saluran yang diperbolehkan. Umumnya batas nilai arus bocor *spike* yang diperbolehkan adalah 100 mA, meskipun nilai-nilai yang pernah diamati pada kondisi cuaca kering dari beberapa mikrometer hingga 50 mA dan pada kondisi cuaca hujan arus bocor lonjakan dapai mencapai 50 mA atau lebih tapi tetap dianggap aman[19].

Mengacu pada IEC 60950-1 “Safety Standard”[20] dimana arus bocor yang diijinkan untuk peralatan sensitif di perangkat kesehatan maksimal 3,5 mA. Berhubungan dengan hal tersebut, apabila arus bocor pada isolator tidak sengaja dikenai oleh manusia pada tiang penghantar dan terjadi tegangan sentuh, maka dapat menimbulkan efek sebagai berikut berdasarkan IEC60479 “*Electrical Protection Of Person*”.

Tabel 2.4 IEC60479 *Electrical Protection of Person*[21]

| Batasan | Efek pada Tubuh |
|---------------------------|--|
| Daerah 1 (0,1 – 0,5 mA) | Jantung tidak terpengaruh sama sekali bahkan dalam jangka waktu lama |
| Daerah 2 (0,5 – 10 mA) | Jantung bereaksi dan rasa kesemutan muncul di permukaan kulit. |
| (10 mA – 200 mA) | Jantung tahan sampai jangka waktu maksimal 2 detik saja. |
| Daerah 3 (200 – 500 mA) | Jantung merasakan sengatan kuat dan terasa sakit, jika melewati 0,5 detik termasuk dalam daerah bahaya |
| Daerah 4 (di atas 500 mA) | Jantung akan rusak dan secara permanen dapat merusak system peredaran darah yang berakibat kematian. |

2.7.2 Rangkaian Pembagi Tegangan Pengukuran Arus Bocor

Pengukuran arus bocor dimaksudkan untuk mendapatkan data berupa nilai arus bocor dari isolator ketika diterapkan tingkat tegangan tertentu. Pengamatan arus bocor ini memerlukan alat bantu berupa osiloskop dan pembagi tegangan. Osiloskop digunakan untuk menganalisa gelombang tegangan masukan dari rangkaian pembagi tegangan. Pembagi tegangan diperlukan untuk membatasi tegangan besar yang masuk ke dalam osiloskop[22].

Pembagi tegangan resistif digunakan untuk pengukuran tegangan tinggi dc, tegangan tinggi impuls, dan tegangan tinggi ac. Pembagi tegangan resistif ini terdiri atas dua resistor yang terhubung seri, yaitu resistor tegangan tinggi R_h dan resistor tegangan rendah R_l . Alat ukur tegangan rendah (voltmeter atau osiloskop)

dihubungkan paralel dengan resistor tegangan rendah R_1 . V_x merupakan tegangan yang diukur dan V_u merupakan tegangan yang ditunjukkan oleh alat ukur. Arus yang mengalir pada kedua resistor R_h dan R_1 dapat dinyatakan sebagai persamaan berikut[17].

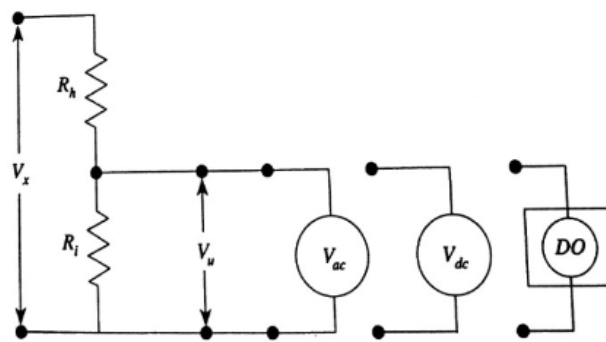
$$I = \frac{V_x}{R_h + R_1} \quad (2.7)$$

Tegangan yang diukur oleh alat ukur (voltmeter atau osiloskop)

$$V_u = I \cdot R_1 \quad (2.8)$$

Sehingga dapat dicari nilai arus bocor yang mengalir dari Persamaan 2.9.

$$I = \frac{V_u}{R_1} \quad (2.9)$$



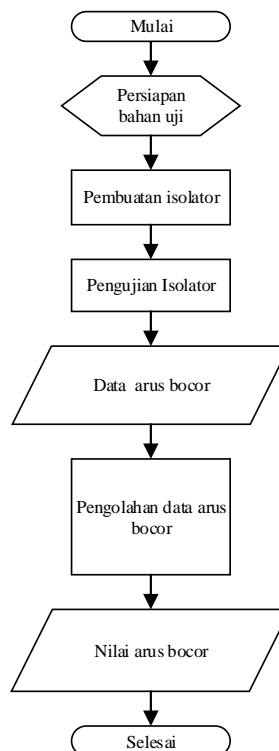
Gambar 2.7 Rangkaian pembagi tegangan[17]

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan penerapan tegangan tinggi pada isolator guna mendapatkan sudut kontak, tahanan isolasi, dan arus bocor pada isolator uji. Penggunaan tegangan tinggi dimaksudkan agar terjadi tekanan listrik (kuat medan listrik) yang cukup pada permukaan isolator. Pengujian dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Listrik dan Sistem Tenaga Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang.

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Pada Gambar 3.1, dapat dijelaskan langkah-langkah dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Pembuatan Isolator Polimer

Pada tahap ini dilakukan pembuatan isolator dari tahap mengumpulkan bahan sampai proses pembuatan isolator

2. Persiapan Bahan dan Peralatan Pengujian.

Pada tahap ini dilakukan persiapan bahan dan peralatan yang dibutuhkan dalam pengujian arus bocor bahan isolator polimer.

3. Pengujian Arus Bocor pada Isolator Uji.

Pada tahap ini dilakukan pengujian arus bocor bahan isolator polimer. Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh variasi suhu dan kelembaban udara terhadap nilai arus bocor. Langkah – langkah pengujian yang dijelaskan pada Sub-bab 3.5.1.

4. Pengolahan Data Arus Bocor Hasil Pengujian.

Pada tahap ini dilakukan pengolahan data gelombang arus bocor sebagaimana dijelaskan pada Sub-bab 3.6.

5. Analisis Hasil Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian, dilakukan analisis mengenai pengaruh nilai tahanan isolasi terhadap nilai arus bocor permukaan isolator polimer pada variasi suhu dan kelembaban udara.

3.2 Pembuatan Isolator

3.2.1 Alat dan Bahan

- | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 1. Resin Epoksi A | 5. Silane | 8. <i>Silicone Rubber</i> RTV-52 |
| 2. <i>Hardener B</i> | 6. Pipa PVC | |
| 3. Pasir silika | 7. <i>Fitting</i> aluminium | 9. <i>Catalyst</i> |
| 4. Aluminium oksida (Al_2O_3) | | 10. Gelas ukur 10 ml dan 250 ml |

- | | | |
|---------------------|-------------------|---------------|
| 11. Batang pengaduk | 15. Gelas plastik | 20. Amplas |
| 12. Kayu | 16. Plastisin | 21. Penggaris |
| 13. Kaca | 17. Mika | 22. Spidol |
| 14. Selotip | 18. Gunting | 23. Timbangan |
| | 19. Gergaji | |

3.2.2 Langkah Pembuatan

1. Pembuatan cetakan

1.1. Sirip besar

- a. Membuat model sirip isolator dari bahan kayu dengan ukuran sebagai berikut:

- Diameter total : 14 cm
- Diameter lubang untuk inti : 2,3 cm
- Tebal bagian tengah sirip : 1,5 cm
- Tebal bagian pinggiran sirip : 0,5 cm
- Sudut kemiringan : 14°



Gambar 3.2 Model sirip besar isolator

- b. Menghaluskan model sirip isolator dengan amplas
- c. Menyiapkan cetakan kaca dengan ukuran 16 cm x 16 cm x 4 cm
- d. Melapisi cetakan kaca tersebut menggunakan selotip
- e. Menyiapkan *Silicone Rubber* RTV-52 sebanyak 400 ml dan *Catalyst* sebanyak 10 ml

- f. Meletakkan model sirip isolator pada tengah-tengah cetakan kaca
- g. Untuk pencampuran antara *silicone rubber* dengan *catalyst* dibagi menjadi 4 kali pencampuran, yaitu setiap kali pencampuran untuk jumlah *Silicone Rubber* RTV-52 sebanyak 100 ml dan *Catalyst* sebanyak 2,5 ml. Hal ini bertujuan agar *silicone rubber* dan *catalyst* tercampur secara merata
- h. Menuangkan campuran ke dalam cetakan kaca
- i. Mendinginkan selama 1 x 24 jam agar campuran mengeras sempurna
- j. Melepaskan *silicone rubber* yang sudah mengeras dari cetakan dan lepaskan model sirip isolator dari *silicone rubber*



Gambar 3.3 Cetakan sirip besar isolator

1.2. Sirip kecil

- a. Membuat model sirip isolator dari bahan kayu dengan ukuran sebagai berikut:
 - Diameter total : 11 cm
 - Diameter lubang untuk inti : 2,3 cm
 - Tebal bagian tengah sirip : 1,5 cm
 - Tebal bagian pinggiran sirip : 0,5 cm
 - Sudut kemiringan : 14°
- b. Menghaluskan model sirip isolator dengan amplas
- c. Menyiapkan cetakan kaca dengan ukuran 13 cm x 13 cm x 4 cm

- d. Melapisi cetakan kaca tersebut menggunakan selotip
- e. Menyiapkan *Silicone Rubber* RTV-52 sebanyak 300 ml dan *Catalyst* sebanyak 7,5 ml
- f. Meletakkan model sirip isolator pada tengah-tengah cetakan kaca
- g. Untuk pencampuran antara *silicone rubber* dengan *catalyst* dibagi menjadi 3 kali pencampuran, yaitu setiap kali pencampuran untuk jumlah *Silicone Rubber* RTV-52 sebanyak 100 ml dan *Catalyst* sebanyak 2,5 ml. Hal ini bertujuan agar *silicone rubber* dan *catalyst* tercampur secara merata
- h. Menuangkan campuran ke dalam cetakan kaca
- i. Mendinginkan selama 1 x 24 jam agar campuran mengeras sempurna
- j. Melepaskan *silicone rubber* yang sudah mengeras dari cetakan dan lepaskan model sirip isolator dari *silicone rubber*



Gambar 3.4 Model sirip kecil isolator



Gambar 3.5 Cetakan sirip kecil isolator

1.3. Sela

- a. Membuat model sela isolator dari bahan kayu dengan ukuran sebagai berikut:
 - Diameter : 3,8 cm
 - Panjang sela : 5 cm



Gambar 3.6 Model sela isolator

- b. Menghaluskan model sela isolator dengan amplas
- c. Menyiapkan cetakan kaca dengan ukuran 5,5 cm x 5,5 cm x 6 cm
- d. Melapisi cetakan kaca tersebut menggunakan selotip
- e. Menyiapkan *Silicone Rubber* RTV-52 sebanyak 200 ml dan *Catalyst* sebanyak 5 ml
- f. Meletakkan model sirip isolator pada tengah-tengah cetakan kaca
- g. Untuk pencampuran antara *silicone rubber* dengan *catalyst* dibagi menjadi 2 kali pencampuran, yaitu setiap kali pencampuran untuk jumlah *Silicone Rubber* RTV-52 sebanyak 100 ml dan *Catalyst* sebanyak 2,5 ml. Hal ini bertujuan agar *silicone rubber* dan *catalyst* tercampur secara merata
- h. Menuangkan campuran ke dalam cetakan kaca
- i. Mendinginkan selama 1 x 24 jam agar campuran mengeras sempurna

- j. Melepaskan *silicone rubber* yang sudah mengeras dari cetakan dan lepaskan model sela isolator dari *silicone rubber*



Gambar 3.7 Cetakan sela isolator

1.4. Inti

- a. Memotong pipa ukuran 0,75 inch sepanjang 30 cm
- b. Menghaluskan kedua ujung pipa yang telah dipotong dengan amplas
- c. Melapisi pipa dan kaca dengan mika
- d. Merekatkan pipa pada kaca
- e. Memberikan plastisin pada sambungan antara pipa dan kaca



Gambar 3.8 Cetakan inti isolator

2. Pembuatan alat

2.1. Sirip besar

- a. Menyiapkan cetakan sirip besar isolator yang telah dibuat dan melapisi permukaan cetakan menggunakan mika
- b. Menyiapkan 49 gram resin epoksi, 49 gram *hardener*, 21 gram silane, 10,5 gram pasir silika, dan 10,5 gram aluminium oksida
- c. Mencampurkan resin epoksi, silane, pasir silika, dan aluminium oksida pada gelas plastik
- d. Menambahkan *hardener*
- e. Menuangkan campuran ke dalam cetakan dan mendiamkan selama 2 x 24 jam
- f. Membuka cetakan



Gambar 3.9 Pelapisan mika pada cetakan sirip besar isolator



Gambar 3.10 Proses pengeringan sirip besar isolator



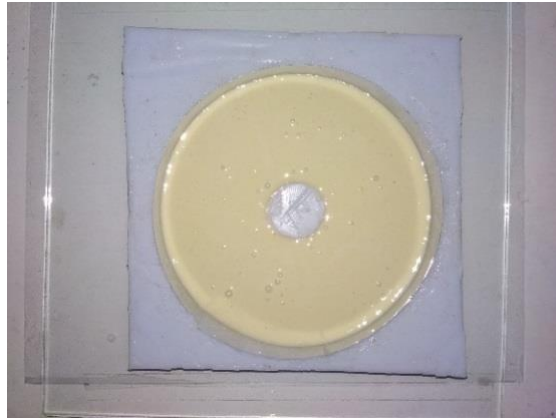
Gambar 3.11 Hasil pembukaan cetakan sirip besar isolator

2.2. Sirip kecil

- a. Menyiapkan cetakan sirip kecil isolator yang telah dibuat dan melapisi permukaan cetakan menggunakan mika
- b. Menyiapkan 35 gram resin epoksi, 35 gram *hardener*, 15 gram silane, 7,5 gram pasir silika, dan 7,5 gram aluminium oksida
- c. Mencampurkan resin epoksi, silane, pasir silika, dan aluminium oksida pada gelas plastik
- d. Menambahkan *hardener*
- e. Menuangkan campuran ke dalam cetakan dan mendinginkan selama 2 x 24 jam
- f. Membuka cetakan



Gambar 3.12 Pelapisan mika pada cetakan sirip kecil isolator



Gambar 3.13 Proses pengeringan sirip kecil isolator



Gambar 3.14 Hasil pembukaan cetakan sirip kecil isolator

2.3.Sela

- a. Menyiapkan cetakan sela isolator yang telah dibuat dan melapisi permukaan cetakan menggunakan mika
- b. Menyiapkan 24,5 gram resin epoksi, 24,5 gram *hardener*, 10,5 gram silane, 5,25 gram pasir silika, dan 5,25 gram aluminium oksida
- c. Mencampurkan resin epoksi, silane, pasir silika, dan aluminium oksida pada gelas plastik
- d. Menambahkan *hardener*
- e. Menuangkan campuran ke dalam cetakan dan mendiamkan selama 2 x 24 jam
- f. Membuka cetakan

- g. Melubangi sela untuk inti isolator dengan diameter 2,3 cm



Gambar 3.15 Pelapisan mika pada cetakan sela isolator



Gambar 3.16 Proses pengeringan sela isolator



Gambar 3.17 Hasil pembukaan cetakan sela isolator

2.4.Inti

- a. Menyiapkan 35 gram resin epoksi, 35 gram *hardener*, 15 gram silane, 7,5 gram pasir silika, dan 7,5 gram aluminium oksida
- b. Mencampurkan resin epoksi, silane, pasir silika, dan aluminium oksida pada gelas plastik
- c. Menambahkan *hardener*
- d. Menuangkan campuran ke dalam cetakan yang telah dibuat dan mendiamkan selama 2 x 24 jam



Gambar 3.18 Proses pengeringan sela isolator

3. Penyatuan alat

1. Menyiapkan 2 inti, 5 sirip besar, 1 sirip kecil, 8 sela 5 cm, dan 2 pasang *fitting* aluminium
2. Menyiapkan perekat yang dibuat dari campuran resin epoksi dan *hardener*
3. Merekatkan sirip pada inti menggunakan perekat yang telah dibuat
4. Mengulagi langkah 2 untuk sirip dan sambungan
5. Merekatkan aluminium pada bagian ujung-ujung inti menggunakan perekat tersebut
6. Mendiamkan selama 1 x 24 jam agar perekat tersebut mengering

3.3 Sampel dan Bahan Uji

3.3.1 Sampel Uji

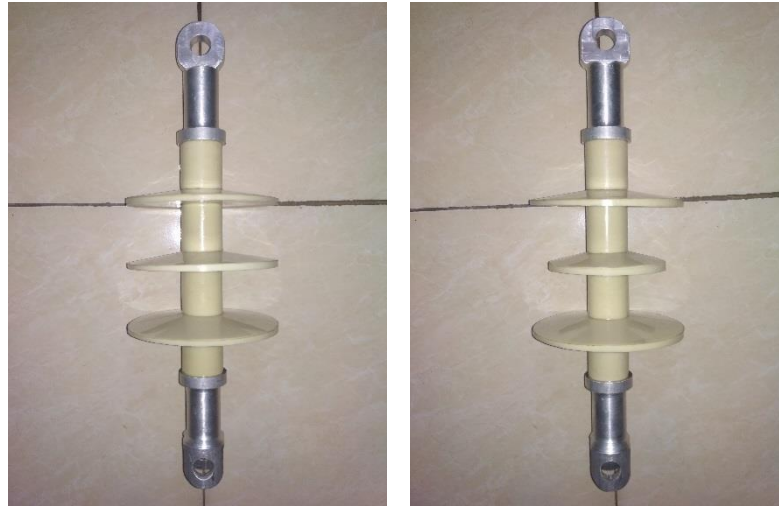
Sampel uji yang digunakan pada pengujian ini adalah isolator polimer resin epoksi silane *filler* pasir silika dan Al_2O_3 (aluminium oksida) untuk isolasi jaringan tegangan menengah 20 kV yang telah dibuat di Laboratorium Konversi Energi Listrik dan Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.19. Detail ukuran bentuk fisik isolator yang meliputi jarak rambat, jarak antar sirip, sudut kemiringan sirip dan jarak lewat denyar dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi isolator uji

| Tipe Isolator | Parameter | Nilai | |
|---|---|-------------------------------|--------|
| BBB | Dimensi | | |
| | Panjang tanpa <i>fitting</i> | 232 mm | |
| | Panjang dengan <i>fitting</i> | 482 mm | |
| | Diameter | 139 mm | |
| | Berat | 988 gram | |
| | Jarak <i>flashover</i> | 350 mm | |
| | Jarak rambat arus bocor | 494 mm | |
| | Jarak minimum antar sirip (c) | 52 mm | |
| | Perbandingan antar spasi dengan rentangan sirip (S/P) | 1,14 | |
| | Perbandingan antara jarak rambat dengan jarak bebas (I_d/d) | 2,67 | |
| | Kemiringan sirip ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) | 14°, 14°, 14° | |
| | BKB | Dimensi | |
| | | Panjang tanpa <i>fitting</i> | 242 mm |
| | | Panjang dengan <i>fitting</i> | 493 mm |
| Diameter | | 139 mm | |
| Berat | | 950 gram | |
| Jarak <i>flashover</i> | | 353 mm | |
| Jarak rambat arus bocor | | 459 mm | |
| Jarak minimum antar sirip (c) | | 110 mm | |
| Perbandingan antar spasi dengan rentangan sirip (S/P) | | 2,26 | |
| Perbandingan antara jarak rambat dengan jarak bebas (I_d/d) | | 2,27 dan 2,25 | |

Tabel 3.1 Lanjutan

| | |
|---|---------------|
| Sirip berselang-seling (P_1 - P_2) | 15 mm |
| Kemiringan sirip ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) | 14°, 14°, 14° |



(a) Isolator BBB

(b) Isolator BKB

Gambar 3.19 Isolator uji

3.3.2 Bahan Uji

Bahan yang digunakan dalam pembuatan isolator uji ini adalah sebagai berikut:

1. Resin epoksi

Bahan dasar polimer resin epoksi yang digunakan adalah jenis DGEBA (*Diglycidyl Ether of Bisphenol A*), bahan pematang / pengeras *Polyaminoamide*, yang mudah diperoleh di toko bahan kimia. Berikut adalah Tabel 3.2 mengenai spesifikasi dari DGEBA dan *Polyaminoamide* dan Gambar 3.20 merupakan bahan DGEBA dan *Polyaminoamide*.

Tabel 3.2 Informasi produk dari DGEBA dan *Polyaminoamide*

| Bahan | Sifat | Satuan | Hasil |
|--------------|--------|--------|--|
| Resin Epoksi | Jenis | | <i>Diglycidyl Ether of Bisphenol A</i> |
| | Bentuk | | Cairan |
| | Warna | | Bening |

Tabel 3.2 Lanjutan

| Bahan | Sifat | Satuan | Hasil |
|-----------------|--------------------------------------|----------|-----------------------|
| <i>Hardener</i> | <i>Hydrolyzable chlorine content</i> | % | < 0,05 |
| | Berat | kg | 1 |
| | Viskositas pada 25°C | mPa-s | 13000 ± 2000 |
| | <i>Epoxy equivalent</i> | g/equiv | 189 ± 5 |
| | Jenis | | <i>Polyaminoamide</i> |
| | Bentuk | | Cairan |
| | Warna | | Coklat bening |
| | Berat | kg | 1 |
| | Viskositas pada 25°C | poise | 100 - 200 |
| | Jumlah <i>Amine</i> | mg KOH/g | 335 - 550 |



Gambar 3.20 Resin epoksi dan bahan pengeras

2. Silane

Dalam penelitian ini digunakan silane dengan merk *Dow Corning Glass Sealant* yang mudah ditemukan pada toko bangunan. Berikut adalah Tabel 3.3 informasi produk silane dari *Dow Corning Glass Sealant* dan Gambar 3.21 merupakan silane sebagai bahan pengisi.

Tabel 3.3 Informasi produk silane *Dow Corning Glass Sealant*

| Sifat | Satuan | Hasil |
|----------|--------|-----------------------|
| Tampilan | | Pasta <i>non-slum</i> |
| Warna | | Bening |

Tabel 3.3 Lanjutan

| Sifat | Satuan | Hasil |
|--|-------------------|-------|
| Tingkat Ekstrusi | g/min | 369 |
| Waktu <i>tack-free</i> | min | 11 |
| <i>Depth cure</i> pada 25 ⁰ C/50% RH untuk 1 hari | mm | 3,2 |
| Massa jenis | g/cm ³ | 1,02 |
| Tingkat kekerasan Durometer | | 34 |
| Kuat tekan | MPa | 2,1 |
| Pemanjangan | % | 450 |

Gambar 3.21 Silane atau *silicon rubber*

3. Pasir silika dan aluminium oksida

Dalam penelitian ini, digunakan pasir kuarsa Bangka dan Al₂O₃ (aluminium oksida) sebagai bahan pengisi isolator. Untuk ukuran, pasir kuarsa Bangka memiliki ukuran 200 mesh. Sedangkan untuk Al₂O₃ (aluminium oksida) berbentuk bubuk dengan tingkat kemurnian 99,99% dan memiliki ukuran 325 mesh. Untuk pengujian kandungan senyawa dari pasir kuarsa Bangka menggunakan metode SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDX (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) yang dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro. Berikut

adalah Tabel 3.4 hasil dari pengujian kandungan senyawa pada pasir kuarsa Bangka dan Gambar 3.22 merupakan pasir silika dan aluminium oksida.

Tabel 3.4 Hasil uji SEM dan EDX pasir kuarsa Bangka

| No | Nama Sampel | Komponen | Komposisi (% berat) |
|----|--------------|-----------------------------------|---------------------|
| 1 | Pasir Silika | Karbon, C | 9,62 |
| | | Silika Dioksida, SiO ₂ | 90,38 |



(a) Pasir silika

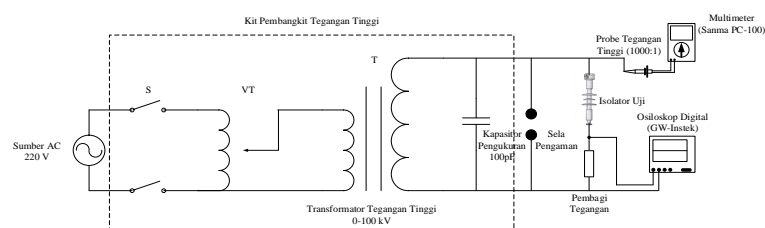
(b) Aluminium oksida

Gambar 3.22 Bahan pengisi

3.4 Peralatan Pengujian

3.4.1 Peralatan Pengujian Arus Bocor

Untuk memperoleh data karakteristik arus bocor dari masing-masing sampel, maka dilakukan pengujian arus bocor dengan rangkaian pengujian sesuai yang ditunjukkan oleh Gambar 3.23. Rangkaian ini digunakan untuk mengukur karakteristik elektrik dari isolator uji seperti karakteristik arus bocor terhadap kenaikan tegangan dan pengukuran bentuk gelombang arus bocor yang digunakan dalam pemodelan bahan isolator.



Gambar 3.23 Rangkaian pengujian arus bocor

Rangkaian pengujian yang digunakan terdiri dari :

a. Sumber Jala – Jala

Sumber jala-jala yang digunakan pada pengujian ini adalah sumber jala-jala satu fasa 220 V, 50 Hz dari PLN.

b. Kit Pembangkit Tegangan Tinggi

Kit pembangkit tegangan tinggi digunakan untuk menghasilkan tegangan tinggi yang dibutuhkan dalam pengujian. Kit pembangkit tegangan tinggi terdiri dari meja kontrol, transformator tegangan tinggi dan kapasitor pengukuran. Meja kontrol berfungsi untuk mengatur tegangan keluaran kit pembangkit tegangan tinggi. Meja kontrol terdiri dari perangkat DMI (*Digital Measuring Instrument*) yang menampilkan hasil pengukuran tegangan keluaran dari kit pembangkit tegangan tinggi dan *Operating Terminal* yang mengatur operasi rangkaian pembangkit tegangan tinggi dan mengatur nilai tegangan masukan transformator tegangan tinggi. Gambar 3.24 menunjukkan perangkat meja kontrol kit pembangkit tegangan tinggi.



(a) *Operating Terminal* (b) *Digital Measuring Instrument*

Gambar 3.24 Perangkat meja kontrol kit pembangkit tegangan tinggi

Transformator yang digunakan pada kit pembangkit tegangan tinggi berupa trafo *step-up* dengan perbandingan tegangan primer dan sekunder sebesar 220V/100kV dengan daya 7,5 kVA. Sedangkan kapasitor yang digunakan pada kit pembangkit tegangan tinggi merupakan kapasitor khusus untuk pengukuran tegangan tinggi bolak - balik dengan nilai kapasitansi sebesar 100 pF. Gambar 3.25 menunjukkan transformator tegangan tinggi dan kapasitor pengukuran.

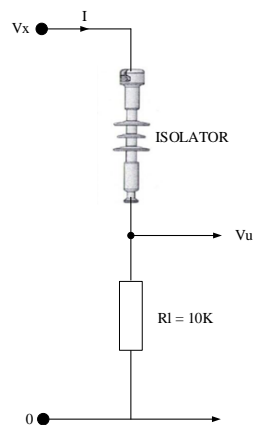


(a) Trafo tegangan tinggi (b) Kapasitor pengukuran

Gambar 3.25 Perangkat pembangkit tegangan tinggi

c. Resistor pembagi tegangan

Resistor yang disusun secara seri ini berfungsi untuk membagi tegangan agar tegangan yang masuk sesuai dengan kemampuan osiloskop dan pengaman agar arus yang masuk osiloskop tidak terlalu besar pada saat terjadi pengukuran. Gambar 3.26 berikut merupakan rangkaian resistor pembagi tegangan.



Gambar 3.26 Rangkaian pembagi tegangan

Pada Gambar 3.26 terdapat dua buah tahanan, yaitu isolator yang berfungsi sebagai resistor tegangan tinggi (R_h) dan resistor batu 10 K Ω 10W sebagai resistor tegangan rendah (R_l). V_u merupakan tegangan keluaran yang terbaca pada osiloskop dan I merupakan arus bocor yang

mengalir pada isolator. Nilai arus bocor yang mengalir dapat dicari menggunakan Persamaan 2.9.

$$I = \frac{Vu}{Rl}$$

Dimana nilai R_l adalah 10K, maka persamaan menjadi sebagai berikut.

$$I = \frac{Vu}{10K} \quad (3.1)$$

d. *Multimeter dan Probe* Tegangan Tinggi

Multimeter berfungsi untuk mengukur nilai tegangan pengujian dengan menggunakan *probe* tegangan tinggi. Pengukuran ini berfungsi sebagai validasi dari nilai tegangan hasil pengukuran DMI. Multimeter yang digunakan adalah Multimeter Sanwa PC-100. Sedangkan *probe* tegangan tinggi ini menghasilkan tegangan keluaran dengan perbandingan 1000 : 1.

e. Osiloskop Digital

Osiloskop yang digunakan adalah osiloskop digital merk OWON Tipe SDS8202. Osiloskop digital ini digunakan untuk mengukur tegangan output rangkaian pembagi tegangan yang selanjutnya diolah untuk mendapatkan nilai arus bocor isolator uji. Gambar 3.27 menunjukkan osiloskop digital yang digunakan dalam pengujian.



Gambar 3.27 Osiloskop digital OWON SDS8202

f. Laptop

Laptop berfungsi sebagai media penyimpanan data hasil pengukuran arus bocor dari osiloskop digital.

g. *Chamber* pengujian

Chamber pengujian berfungsi untuk mengatur kondisi suhu dan kelembaban udara di sekitar isolasi uji agar sesuai dengan kondisi yang dikehendaki.



Gambar 3.28 *Chamber* pengujian

h. *Thermometer*

Alat ini dipakai untuk mengetahui suhu *chamber* pengujian pada saat berlangsungnya pengujian.

i. *Hygrometer*

Alat ini dipakai untuk mengetahui kelembaban *chamber* pengujian pada saat akan pengujian maupun saat berlangsungnya pengujian. Gambar 3.29 menunjukkan perangkat hygrometer dan thermometer yang digunakan dalam pengujian.



Gambar 3.29 Perangkat *hygrometer* dan *thermometer*

3.5 Langkah-langkah Pengujian

3.5.1 Pengujian Arus Bocor Isolator Uji

Pengujian arus dilakukan pada variasi tegangan, variasi suhu, dan variasi kelembaban udara dengan prosedur untuk masing – masing pengujian sebagai berikut :

1. Pengujian Arus Bocor Bahan Isolator Variasi Tegangan

Pengujian ini merepresentasikan merepresentasikan kondisi perubahan tegangan yang dipikul oleh isolator pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV. Prosedur pengujian isolator yang dilakukan adalah sebagai berikut :

- a. Siapkan isolator yang akan diuji dan bersihkan isolator tersebut dari debu yang menempel dengan kertas tisu atau kain lap yang bersih.
- b. Atur nilai suhu dan kelembaban udara *chamber* pengujian. Suhu dan kelembaban untuk pengujian dikondisikan agar suhu bernilai 25⁰C dan kelembaban udara 60%.
- c. Jika kondisi telah sesuai, pasang isolator tersebut pada *chamber* pengujian dan persiapkan peralatan pengujian yang lain seperti pada Gambar 3.25.
- d. Terapkan tegangan uji secara bertahap yaitu 11 kV, 12 kV, 13 kV, 14 kV dan 15 kV.
- e. Untuk setiap variasi tegangan, simpan data bentuk gelombang arus bocor ke dalam Laptop untuk diolah menggunakan Microsoft Office Excel 2013 dan lakukan pengulangan sebanyak 3 kali.

2. Pengujian Arus Bocor Bahan Isolator Variasi Suhu

Pengujian ini merepresentasikan merepresentasikan kondisi perubahan suhu lingkungan di sekitar isolator tersebut. Prosedur pengujian isolator yang dilakukan adalah sebagai berikut :

- a. Siapkan isolator yang akan diuji dan bersihkan isolator tersebut dari debu yang menempel dengan kertas tisu atau kain lap yang bersih.

- b. Atur nilai suhu dan kelembaban udara *chamber* pengujian. Variasi suhu yang diterapkan adalah 25⁰C, 28⁰C, 31⁰C, 34⁰C, dan 37⁰C dan menjaga kelembaban udara agar tetap bernilai 60%.
 - c. Jika kondisi telah sesuai, pasang isolator tersebut pada *chamber* pengujian dan persiapkan peralatan pengujian yang lain seperti pada Gambar 3.25.
 - d. Terapkan tegangan uji secara bertahap yaitu 11,547 kV - 10%, 11,547 kV, dan 11,547 kV + 5%, dimana nilai tersebut merupakan tegangan fasa - netral jaringan tegangan menengah 20 kV yaitu 11,547 kV dengan minimum -10% dan maksimum +5% sesuai dengan SPLN 1:1995 “Tegangan - Tegangan Standar”.
 - e. Untuk setiap tahap tegangan, simpan data bentuk gelombang arus bocor ke dalam Laptop untuk diolah menggunakan Microsoft Office Excel 2013 dan lakukan pengulangan sebanyak 3 kali.
3. Pengujian Arus Bocor Bahan Isolator Variasi Kelembaban Udara
- Pengujian ini merepresentasikan kondisi perubahan kelembaban udara lingkungan di sekitar isolator tersebut. Prosedur pengujian isolator yang dilakukan adalah sebagai berikut :
- a. Siapkan isolator yang akan diuji dan bersihkan isolator tersebut dari debu yang menempel dengan kertas tisu atau kain lap yang bersih.
 - b. Atur nilai suhu dan kelembaban udara *chamber* pengujian. Variasi kelembaban udara yang diterapkan adalah 60%, 70%, 80%, 90%, dan 100% dan menjaga suhu agar tetap bernilai 25⁰C.
 - c. Jika kondisi telah sesuai, pasang isolator tersebut pada *chamber* pengujian dan persiapkan peralatan pengujian yang lain seperti pada Gambar 3.25.
 - d. Terapkan tegangan uji secara bertahap yaitu 11,547 kV - 10%, 11,547 kV, dan 11,547 kV + 5%, dimana nilai tersebut merupakan tegangan fasa - netral jaringan tegangan menengah 20 kV yaitu

11,547 kV dengan minimum -10% dan maksimum +5% sesuai dengan SPLN 1:1995 “Tegangan - Tegangan Standar”.

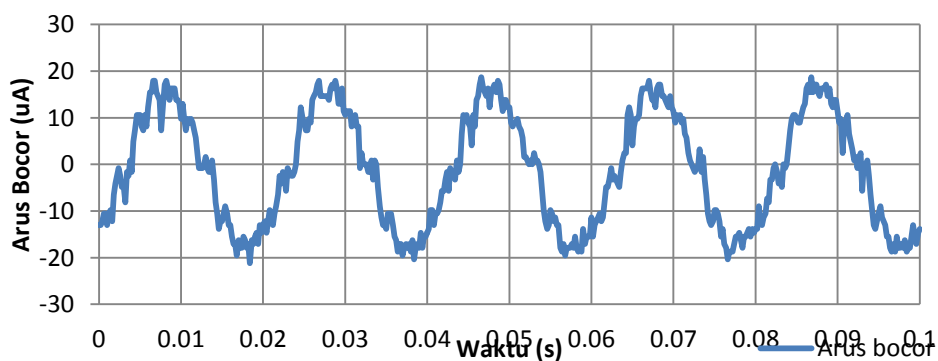
- e. Untuk setiap tahap tegangan, simpan data bentuk gelombang arus bocor ke dalam Laptop untuk diolah menggunakan Microsoft Office Excel 2013 dan lakukan pengulangan sebanyak 3 kali.

3.6 Pengolahan Data Pengujian

Pada penelitian ini, data yang akan dianalisis berupa bentuk gelombang arus bocor pada permukaan isolator. Pengolahan data gelombang arus bocor dilakukan dengan sebuah laptop yaitu aplikasi Microsoft Office Excel 2013. Data arus bocor tidak diperoleh secara langsung dari pengujian. Data terukur oleh osiloskop adalah tegangan jatuh pada resistor yang dialiri oleh arus bocor tersebut. Resistor terpasang seri dengan osiloskop seperti terlihat pada Gambar 3.25. Drop tegangan ini kemudian diukur oleh osiloskop sebagai data tegangan dalam domain waktu. Kemudian data tegangan tersebut kemudian dicuplik oleh osiloskop dengan $N = 500$ titik, sehingga menjadi data tegangan dalam bentuk diskrit. Data tegangan dalam bentuk diskrit tersebut kemudian disimpan ke dalam Laptop dalam format CSV. Dengan perangkat lunak Microsoft Office Excel 2013, data tegangan pada file CSV diubah menjadi data arus bocor isolator dengan Persamaan 3.1.

$$I = \frac{V_{out}}{10K}$$

Kemudian dilakukan plotting data arus bocor hasil perhitungan sehingga diperoleh bentuk gelombang arus bocor. Contoh hasil *plotting* gelombang arus bocor ditunjukkan pada Gambar 3.30.



Gambar 3.30 Contoh hasil *plotting* gelombang arus bocor

BAB IV

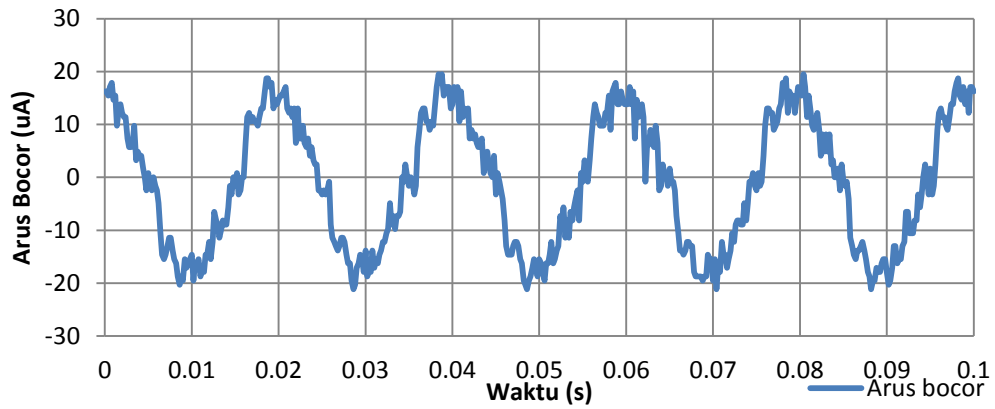
HASIL DAN ANALISIS

Penelitian untuk Tugas Akhir ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Listrik dan Sistem Tenaga Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang. Penelitian dimulai dengan tahap pembuatan isolator. Isolator ini dilakukan pengukuran arus bocor pada kondisi suhu dan kelembaban udara yang berbeda. Data-data yang didapatkan dari pengukuran isolator ini yaitu nilai arus bocor. Semua data yang diperoleh dari pengukuran ini diolah sehingga dapat dipergunakan untuk mengetahui pengaruh tegangan uji, pengaruh suhu, dan kelembaban udara pada isolator yang diuji.

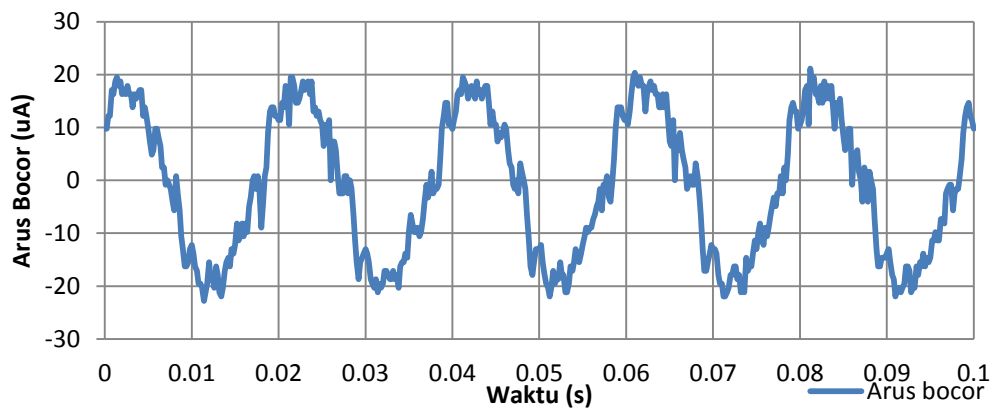
Pengukuran arus bocor ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi tegangan, variasi suhu, dan variasi kelembaban udara terhadap nilai arus bocor dari bahan isolator polimer resin epoksi *filler* pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium oksida) tipe sirip BBB dan tipe sirip BKB. Pengukuran arus bocor menggunakan variasi tegangan 11 kV, 12 kV, 13 kV, 14 kV, dan 15 kV, variasi suhu 25°C , 28°C , 31°C , 34°C , dan 37°C dan variasi kelembaban udara 60%, 70%, 80%, 90%, dan 100%.

4.1 Pengukuran Arus Bocor Variasi Tegangan

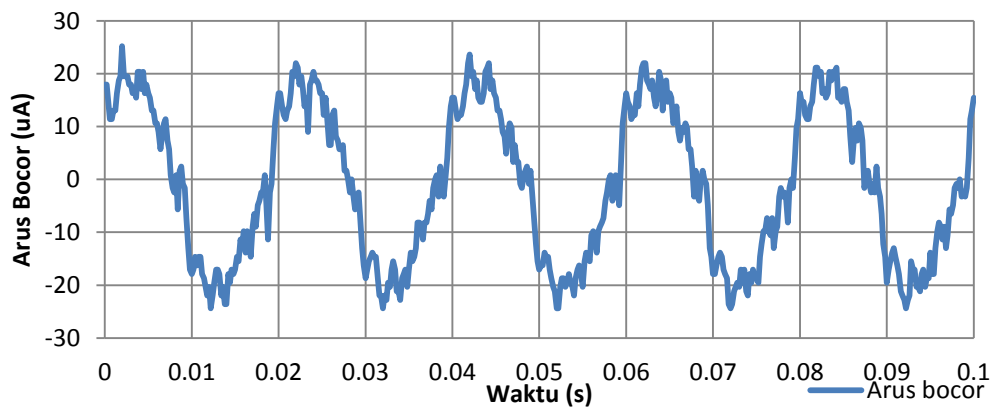
Pengukuran arus bocor dengan variasi tegangan merepresentasikan kondisi perubahan tegangan yang dipikul oleh isolator pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV. Pengukuran dilakukan dengan mengatur *chamber* pengujian dengan suhu 25°C dan kelembaban udara 60%. Hasil pengukuran arus bocor pada variasi tegangan ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 merupakan salah satu hasil pengukuran gelombang arus bocor terhadap variasi tegangan 11 kV, 12 kV, 13 kV, 14 kV, dan 15 kV. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali setiap variasi tegangan dan diambil rata-ratanya. Data-data hasil pengukuran arus bocor pada isolator resin epoksi *filler* pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium oksida) ditunjukkan pada Tabel 4.1.



(a) Tegangan uji 11 kV

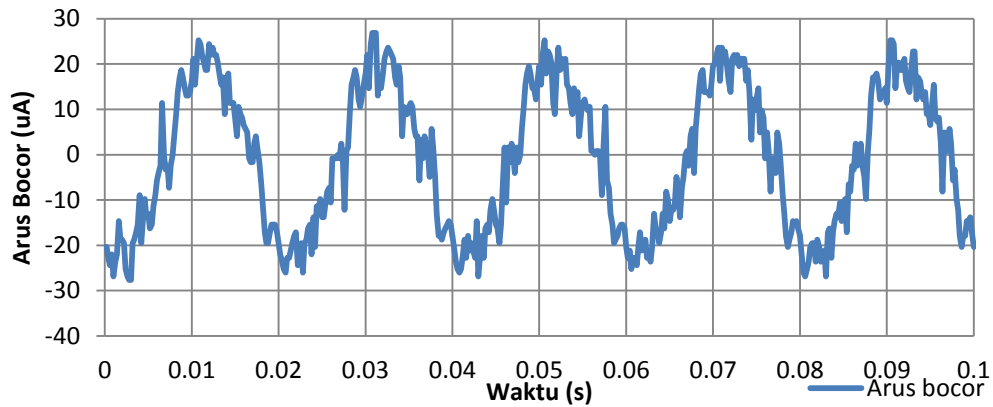


(b) Tegangan uji 12 kV

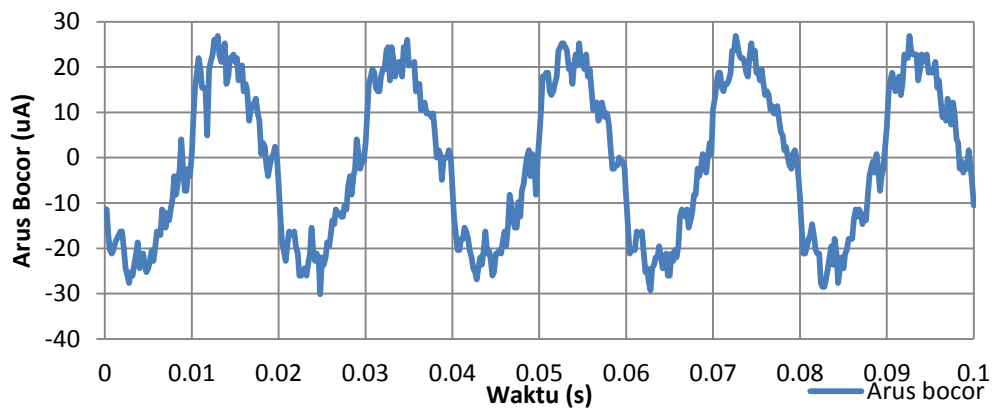


(c) Tegangan uji 13 kV

Gambar 4.1 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi tegangan uji (a) 11 kV, (b) 12 kV, (c) 13 kV, (d) 14 kV, dan (e) 15 kV

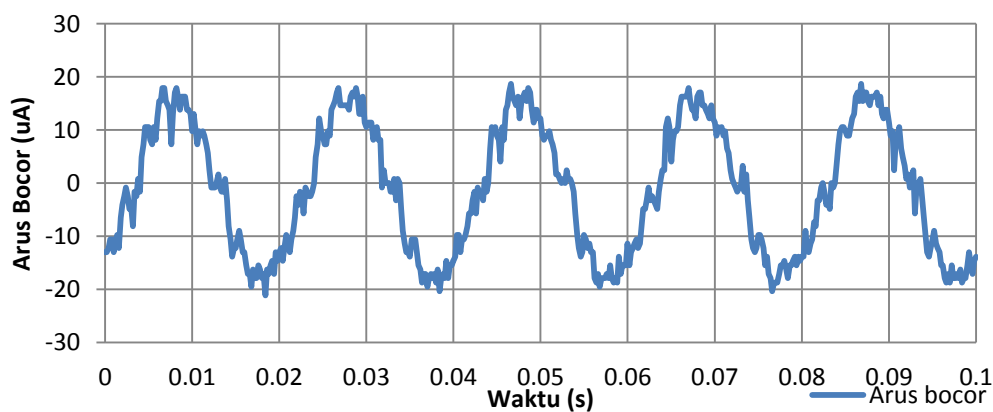


(d) Tegangan uji 14 kV



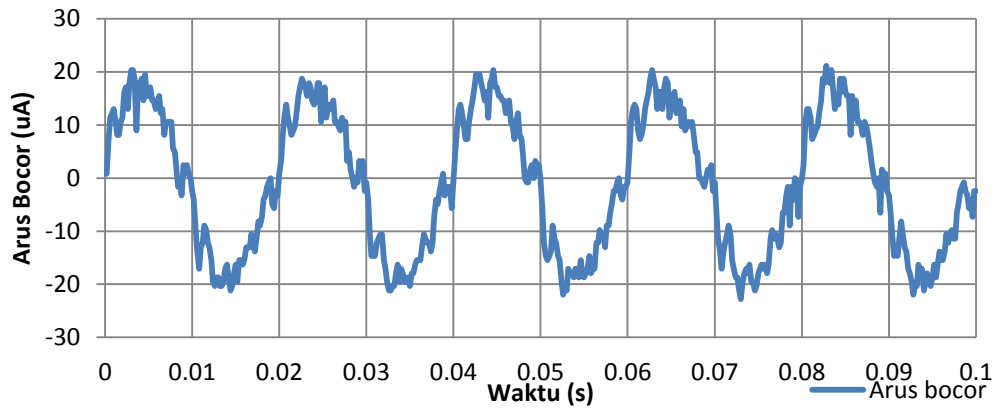
(e) Tegangan uji 15 kV

Gambar 4.1 Lanjutan

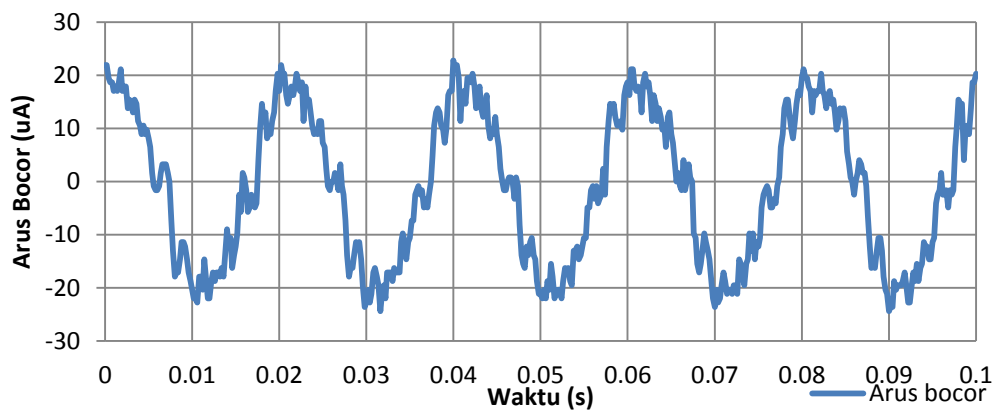


(a) Tegangan uji 11 kV

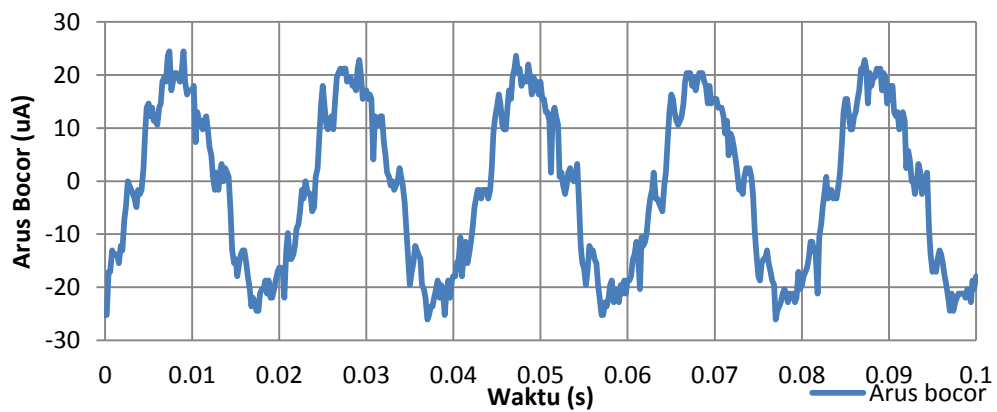
Gambar 4.2 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi tegangan uji (a) 11 kV, (b) 12 kV, (c) 13 kV, (d) 14 kV, dan (e) 15 kV



(b) Tegangan uji 12 kV

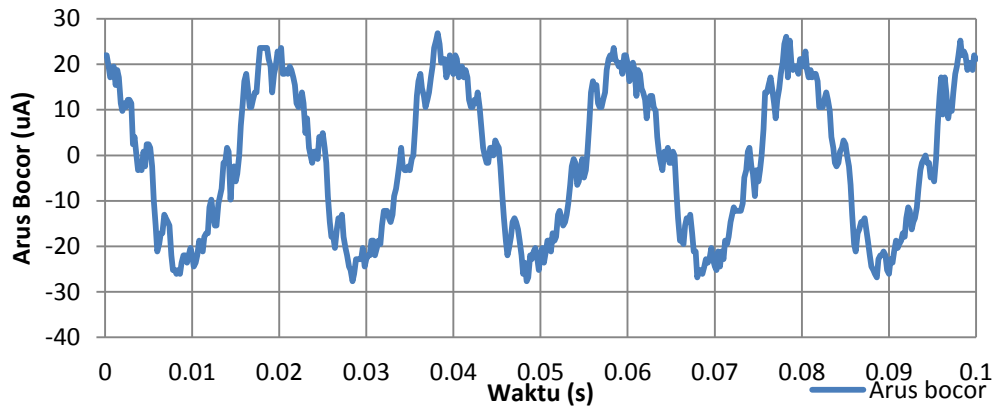


(c) Tegangan uji 13 kV



(d) Tegangan uji 14 kV

Gambar 4.2 Lanjutan



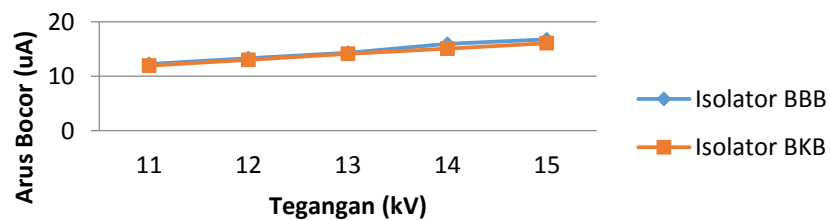
(e) Tegangan uji 15 kV

Gambar 4.2 Lanjutan

Tabel 4.1 Data hasil pengukuran arus bocor variasi tegangan

| Tipe Sirip | Tegangan Uji (kV) | Nilai Arus Bocor (uA) | | | |
|------------|----------------------|-----------------------|-------|-------|-----------|
| | | I | II | III | Rata-rata |
| BBB | 11 | 12,30 | 12,17 | 12,21 | 12,23 |
| | 12 | 13,40 | 13,26 | 13,30 | 13,32 |
| | 13 | 14,38 | 14,38 | 14,49 | 14,31 |
| | 14 | 15,83 | 15,88 | 16,11 | 15,94 |
| | 15 | 16,88 | 16,74 | 16,78 | 16,80 |
| BKB | 11 | 12,06 | 11,89 | 11,92 | 11,95 |
| | 12 | 13,04 | 12,94 | 13,01 | 13,00 |
| | 13 | 14,11 | 14,29 | 13,97 | 14,13 |
| | 14 | 15,11 | 15,05 | 15,11 | 15,09 |
| | 15 | 16,15 | 15,98 | 16,00 | 16,04 |

Berdasarkan data pada Tabel 4.1 dapat dibuat grafik pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi tegangan

Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 4.3, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat tegangan uji yang diberikan pada isolator uji juga meningkat. Hal ini disebabkan ketika tegangan yang diterapkan pada bahan isolator meningkat, pelepasan muatan yang terjadi pada permukaan isolator akan semakin besar. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara tegangan dan arus bocor berbanding lurus, semakin besar tegangan yang diterapkan pada isolator maka arus bocor yang dihasilkan akan semakin besar.

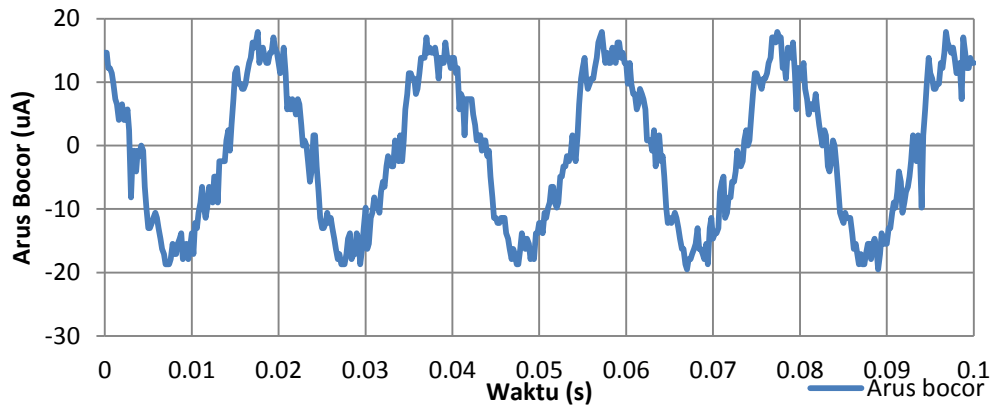
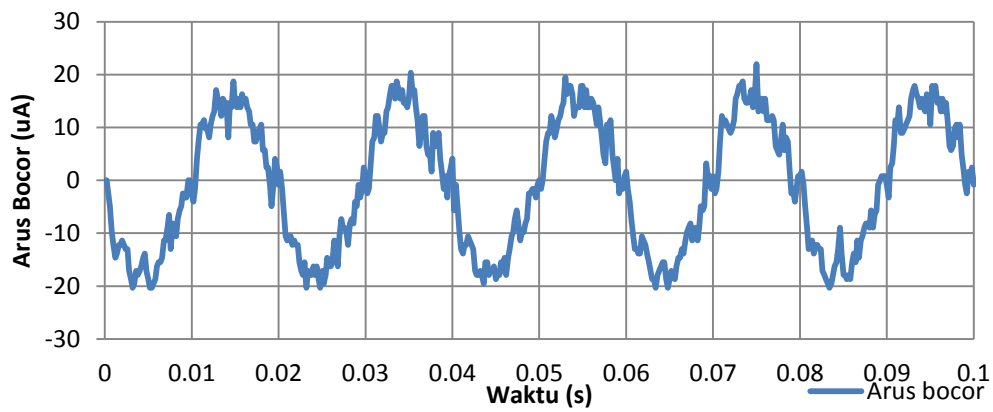
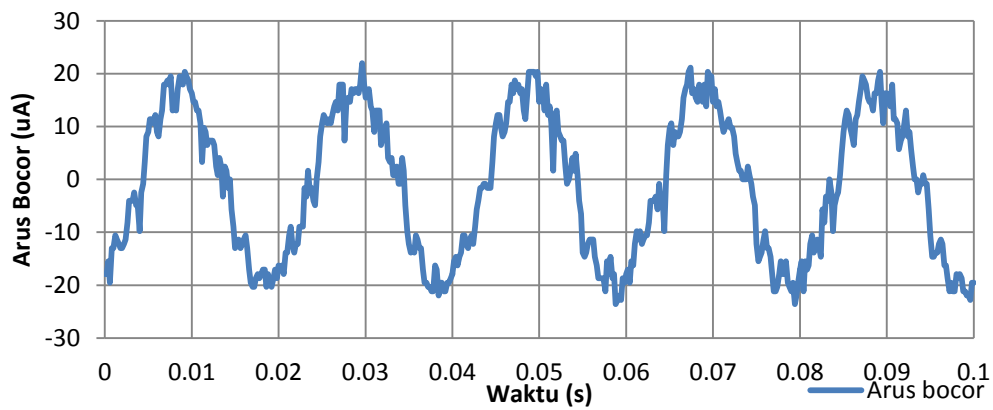
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

4.2 Pengukuran Arus Bocor Variasi Suhu

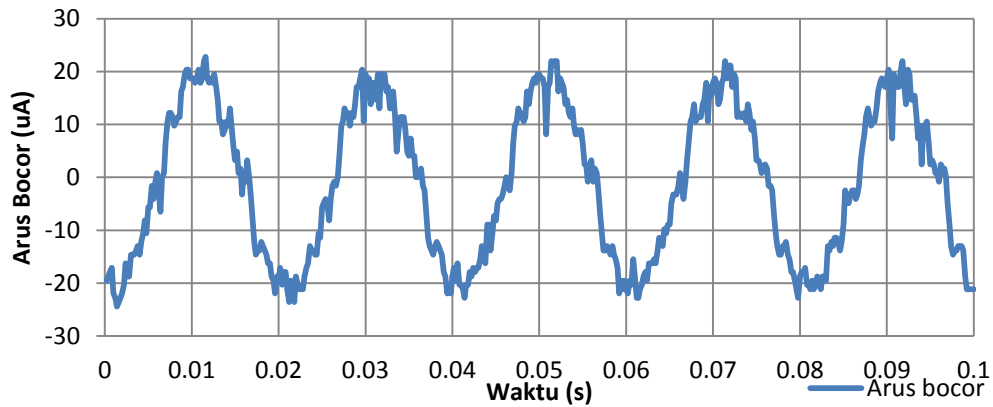
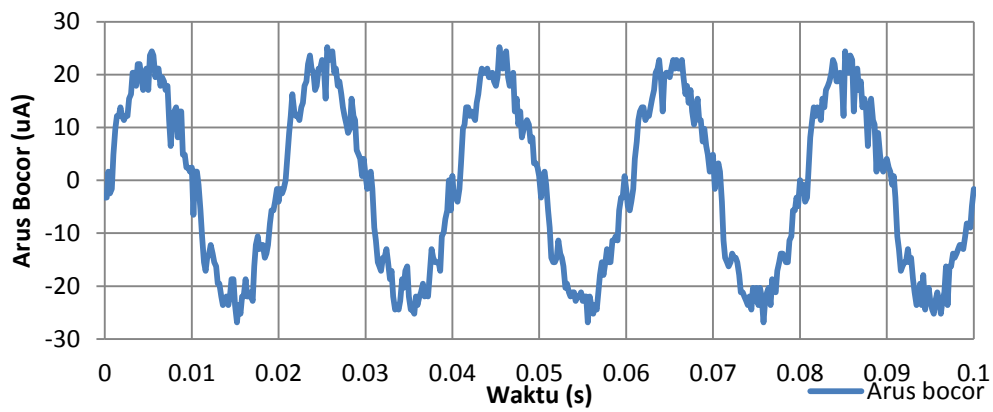
Pengukuran arus bocor dengan variasi suhu merepresentasikan kondisi perubahan suhu lingkungan di sekitar isolator tersebut. Pengukuran dilakukan dengan memvariasikan suhu pada *chamber* pengujian dari 25⁰C, 28⁰C, 31⁰C, 34⁰C, dan 37⁰C dan menjaga kelembaban udara agar tetap bernilai 60%. Pada pengukuran arus bocor variasi suhu ini menerapkan 3 variasi tegangan uji dengan nilai tegangan 11,547 kV - 10%, 11,547 kV, dan 11,547 kV + 5%, dimana nilai tersebut merupakan tegangan fasa - netral jaringan tegangan menengah 20 kV yaitu 11,547 kV dengan minimum -10% dan maksimum +5% sesuai dengan SPLN 1:1995 “Tegangan - Tegangan Standar”.

4.2.1 Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV - 10%

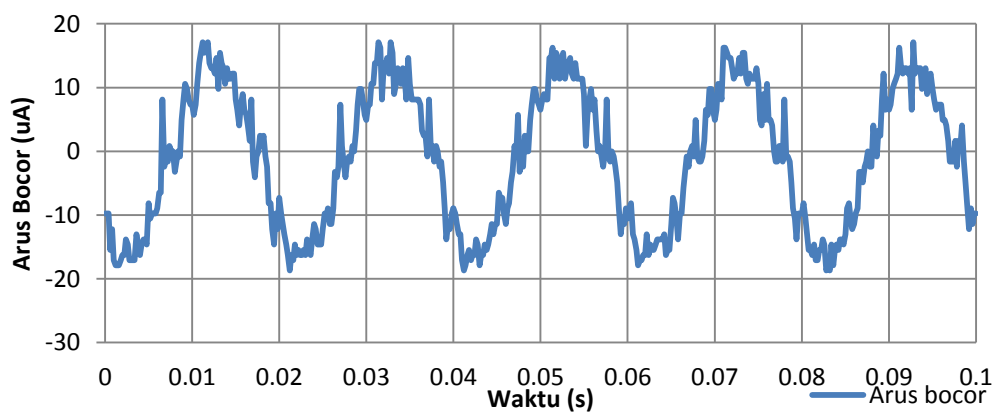
Hasil pengukuran gelombang arus bocor dan hasil pengolahan menggunakan osiloskop variasi suhu pada tegangan uji 11,547 kV - 10% dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5.

(a) Suhu uji 25°C (b) Suhu uji 28°C (c) Suhu uji 31°C

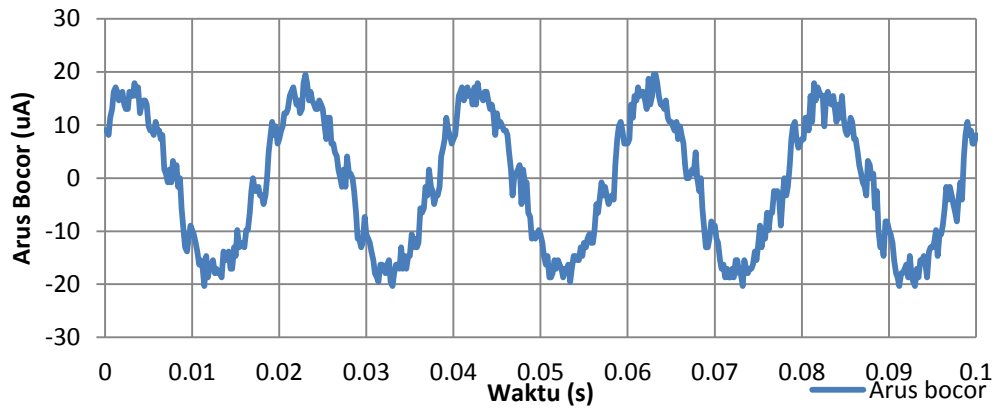
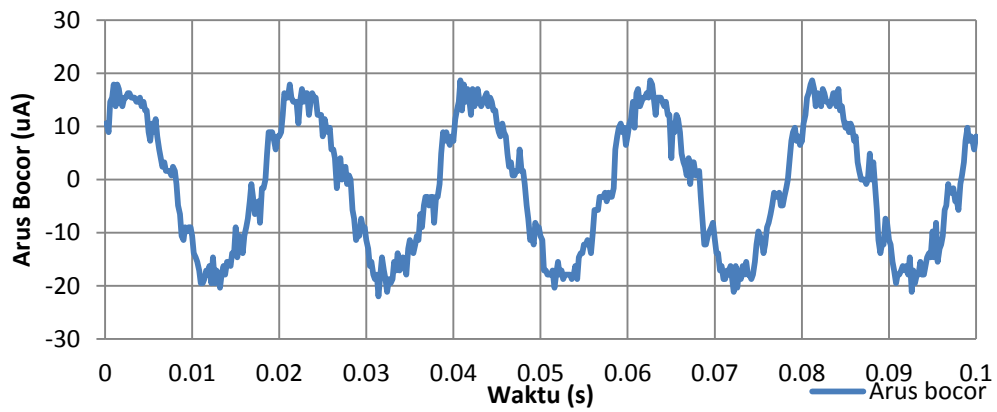
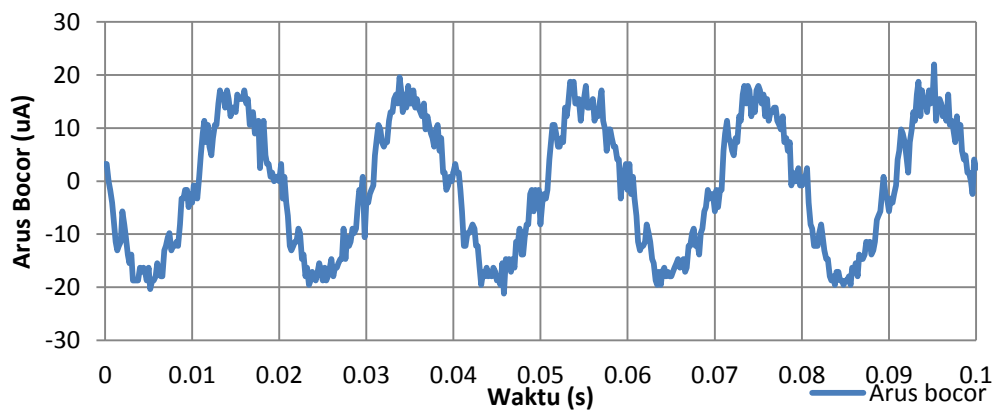
Gambar 4.4 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi suhu (a) 25°C , (b) 28°C , (c) 31°C , (d) 34°C , dan (e) 37°C

(d) Suhu uji 34°C (e) Suhu uji 37°C

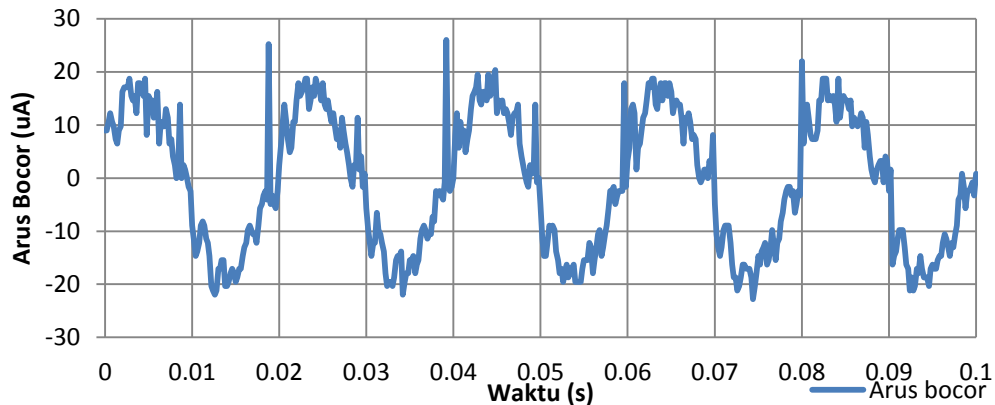
Gambar 4.4 Lanjutan

(a) Suhu uji 25°C

Gambar 4.5 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi suhu (a) 25°C , (b) 28°C , (c) 31°C , (d) 34°C , dan (e) 37°C

(b) Suhu uji 28°C (c) Suhu uji 31°C (d) Suhu uji 34°C

Gambar 4.5 Lanjutan

(e) Suhu uji 37⁰C

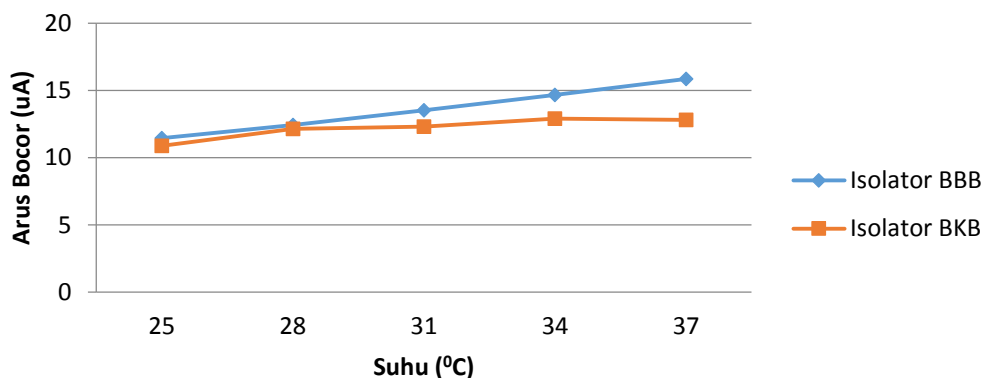
Gambar 4.5 Lanjutan

Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 merupakan salah satu hasil pengukuran gelombang arus bocor terhadap variasi suhu 25⁰C, 28⁰C, 31⁰C, 34⁰C, dan 37⁰C. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali setiap variasi tegangan dan diambil rata-ratanya. Data-data hasil pengukuran arus bocor pada isolator resin resin epoksi *filler* pasir silika dan Al₂O₃ (Aluminium oksida) ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data hasil pengukuran arus bocor variasi suhu

| Tipe Sirip | Suhu (⁰ C) | Nilai Arus Bocor (uA) | | | |
|------------|---------------------------|-----------------------|-------|-------|-----------|
| | | I | II | III | Rata-rata |
| BBB | 25 | 11,59 | 11,42 | 11,37 | 11,46 |
| | 27 | 12,24 | 12,46 | 12,57 | 12,42 |
| | 31 | 13,61 | 13,44 | 13,48 | 13,51 |
| | 34 | 14,34 | 15,01 | 14,61 | 14,65 |
| | 37 | 16,08 | 15,73 | 15,75 | 15,85 |
| BKB | 25 | 10,82 | 10,94 | 10,85 | 10,87 |
| | 27 | 12,13 | 12,21 | 12,11 | 12,15 |
| | 31 | 12,39 | 12,25 | 12,29 | 12,31 |
| | 34 | 12,12 | 13,71 | 12,86 | 12,90 |
| | 37 | 12,74 | 12,82 | 12,88 | 12,81 |

Berdasarkan data pada Tabel 4.2 dapat dibuat grafik pada Gambar 4.6.



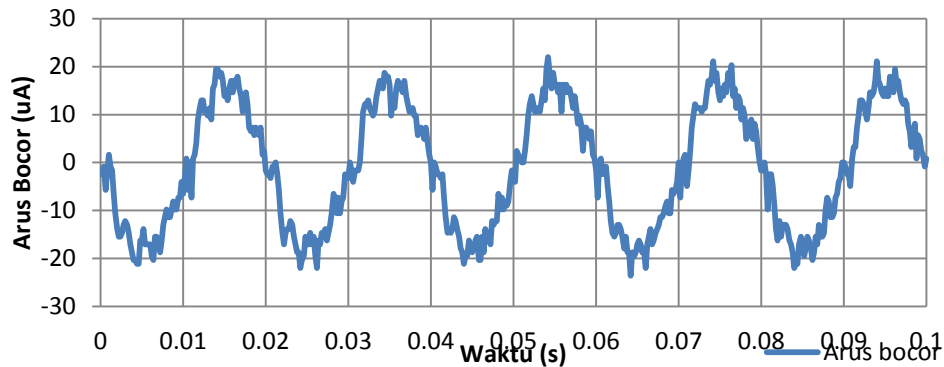
Gambar 4.6 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi suhu dengan tegangan uji 11,547 kV - 10%

Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 4.6, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat variasi suhu yang diterapkan pada isolator uji meningkat. Hal ini disebabkan ketika suhu yang diterapkan meningkat, maka suhu pada bahan isolator akan meningkat sehingga melepaskan elektron bebas yang terdapat di dalam bahan isolator, dimana elektron tersebut menjadi pembawa arus. Hal ini sesuai dengan referensi [23] dimana isolator memiliki koefisien temperatur negatif dimana tahanan isolasi menurun ketika kenaikan suhu dan menyebabkan arus bocor meningkat. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara suhu dan arus bocor berbanding lurus, semakin tinggi suhu yang diterapkan pada isolator maka arus bocor akan semakin meningkat.

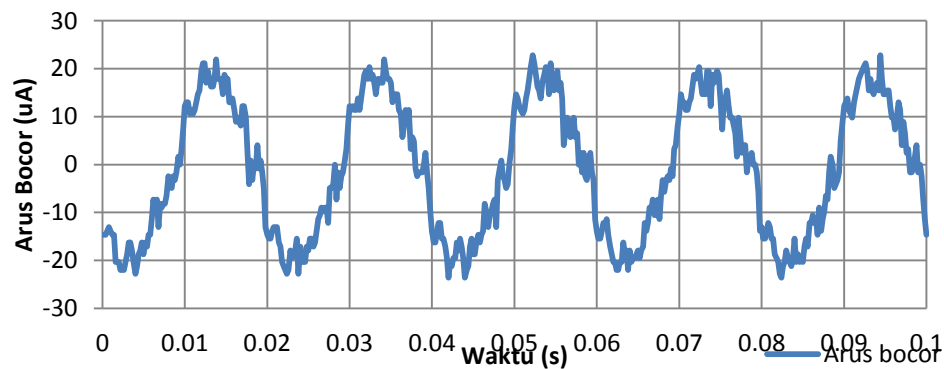
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

4.2.2 Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV

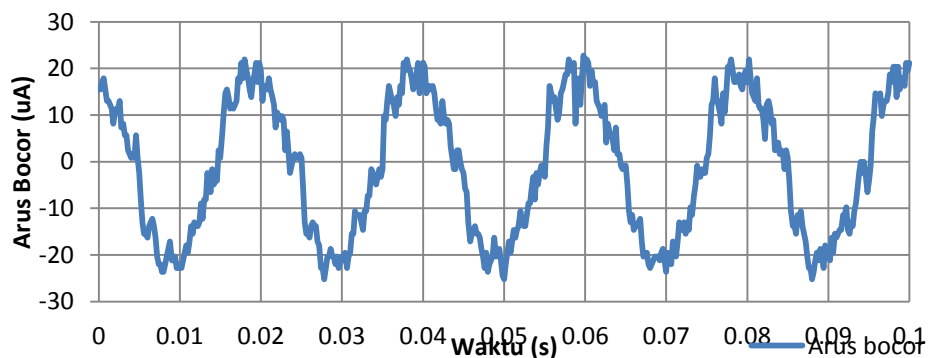
Hasil pengukuran gelombang arus bocor dan hasil pengolahan menggunakan osiloskop variasi suhu pada tegangan uji 11,547 kV dapat dilihat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.



(a) Suhu uji 25°C

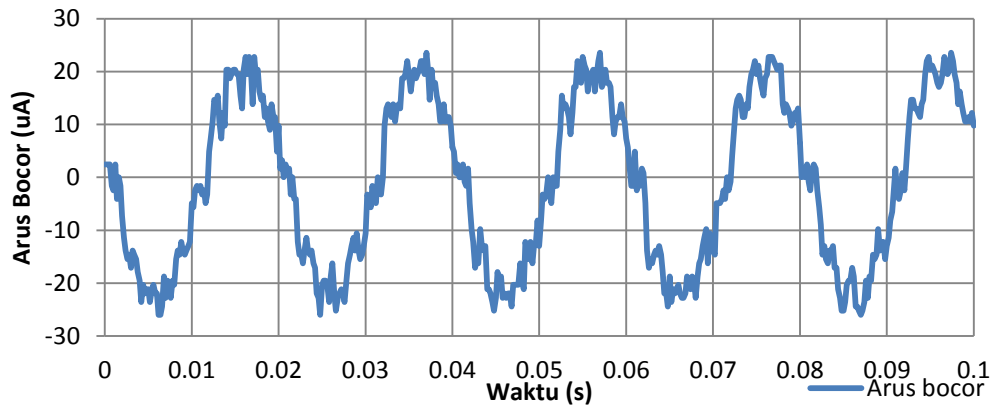
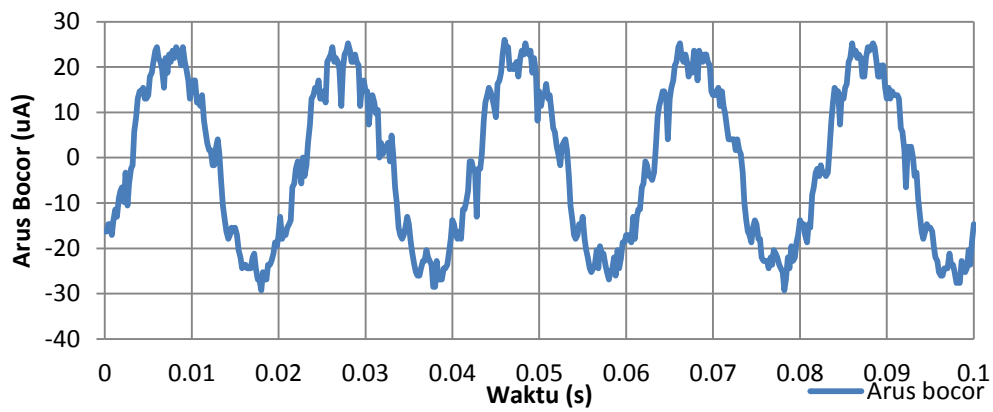


(b) Suhu uji 28°C

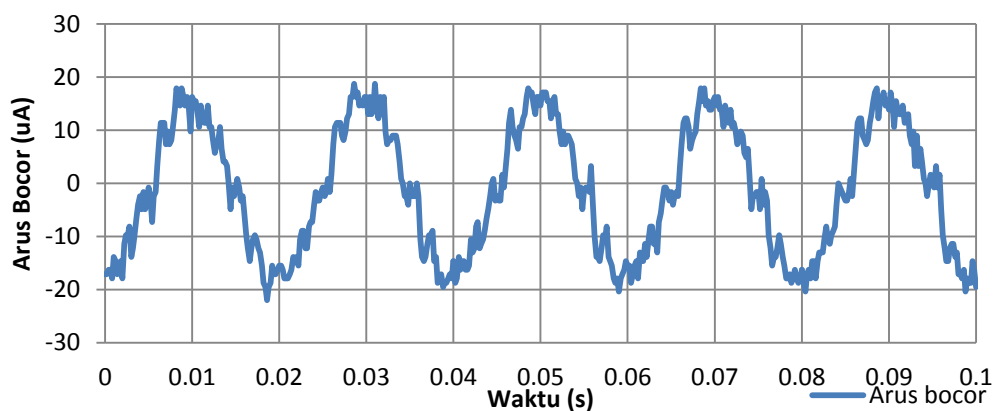


(c) Suhu uji 31°C

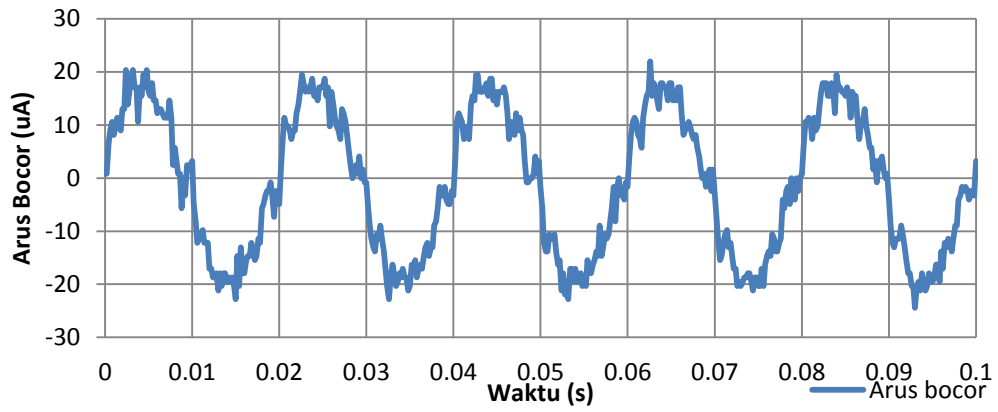
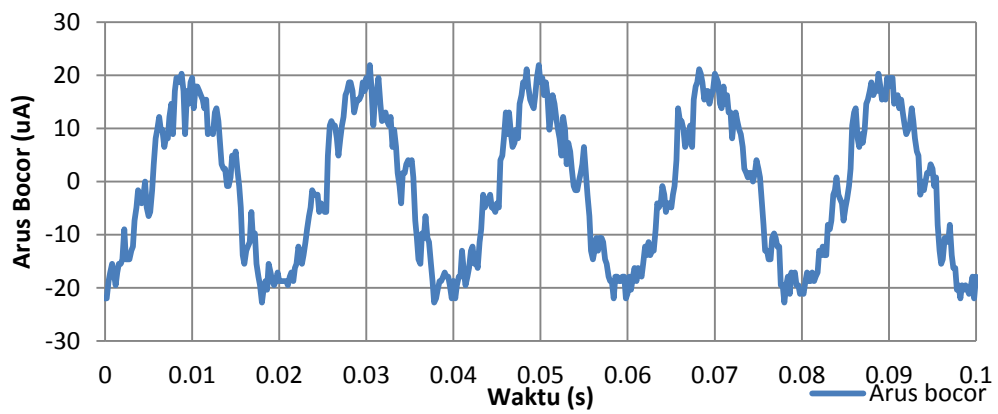
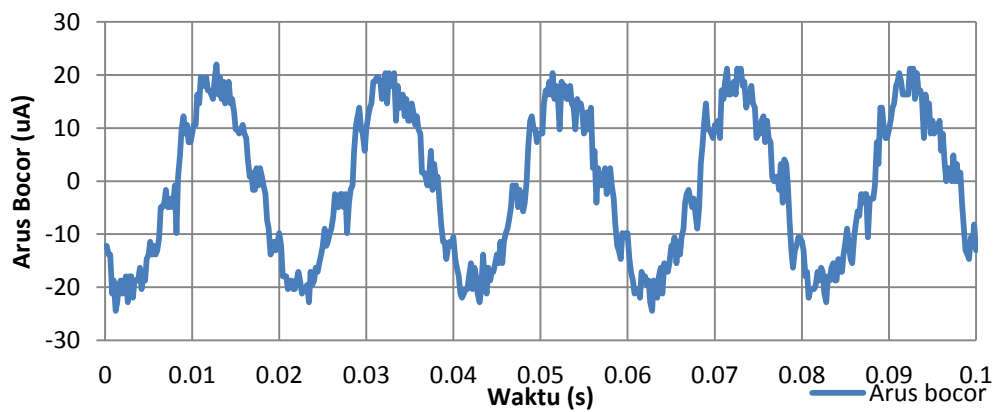
Gambar 4.7 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi suhu (a) 25°C, (b) 28°C, (c) 31°C, (d) 34°C, dan (e) 37°C

(d) Suhu uji 34°C (e) Suhu uji 37°C

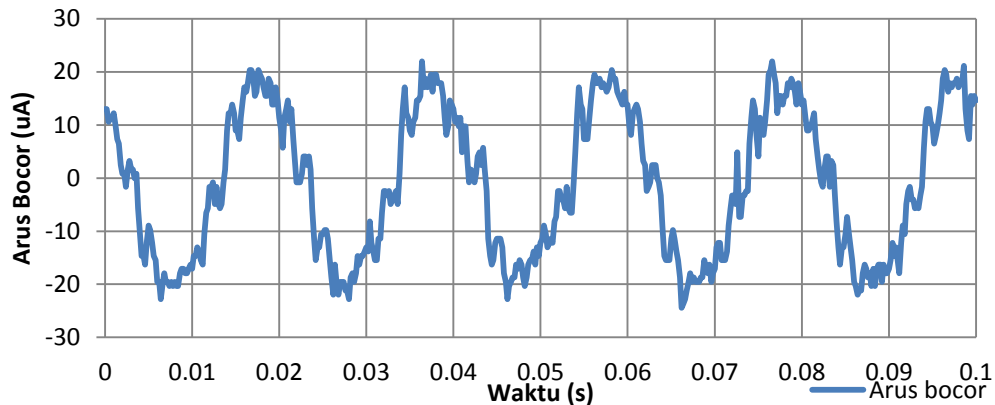
Gambar 4.7 Lanjutan

(a) Suhu uji 25°C

Gambar 4.8 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi suhu (a) 25°C , (b) 28°C , (c) 31°C , (d) 34°C , dan (e) 37°C

(b) Suhu uji 28°C (c) Suhu uji 31°C (d) Suhu uji 34°C

Gambar 4.8 Lanjutan



(e) Suhu uji 37°C

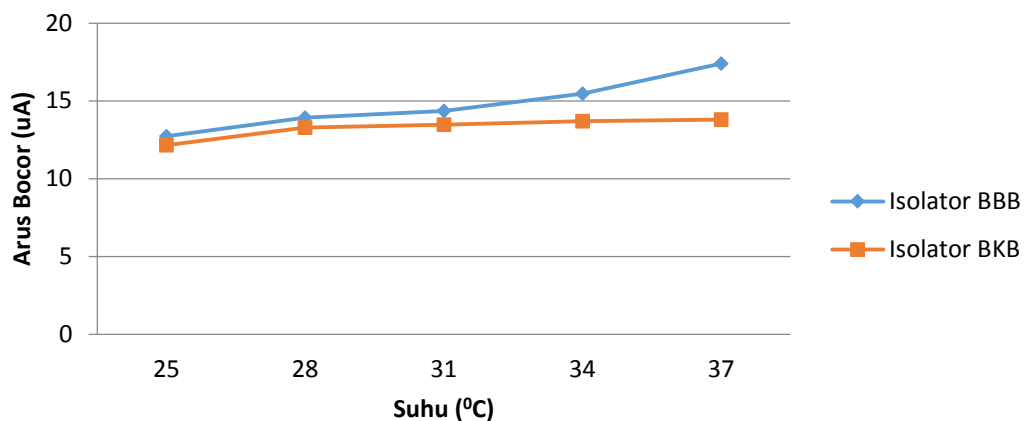
Gambar 4.8 Lanjutan

Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 merupakan salah satu hasil pengukuran gelombang arus bocor terhadap variasi suhu 25°C, 28°C, 31°C, 34°C, dan 37°C. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali setiap variasi tegangan dan diambil rata-ratanya. Data-data hasil pengukuran arus bocor pada isolator resin epoksi *filler* pasir silika dan Al₂O₃ (Aluminium oksida) ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data hasil pengukuran arus bocor variasi suhu

| Tipe Sirip | Suhu (°C) | Nilai Arus Bocor (uA) | | | |
|------------|--------------|-----------------------|-------|-------|-----------|
| | | I | II | III | Rata-rata |
| BBB | 25 | 12,70 | 12,80 | 12,67 | 12,73 |
| | 27 | 13,98 | 13,87 | 13,88 | 13,91 |
| | 31 | 14,74 | 14,25 | 14,08 | 14,36 |
| | 34 | 15,57 | 15,59 | 15,23 | 15,46 |
| | 37 | 17,46 | 17,48 | 17,25 | 17,40 |
| BKB | 25 | 12,06 | 12,28 | 12,10 | 12,15 |
| | 27 | 13,28 | 13,31 | 13,28 | 13,29 |
| | 31 | 13,60 | 13,42 | 13,37 | 13,46 |
| | 34 | 13,68 | 13,66 | 13,72 | 13,69 |
| | 37 | 13,66 | 13,74 | 13,97 | 13,79 |

Berdasarkan data pada Tabel 4.3 dapat dibuat grafik pada Gambar 4.9.



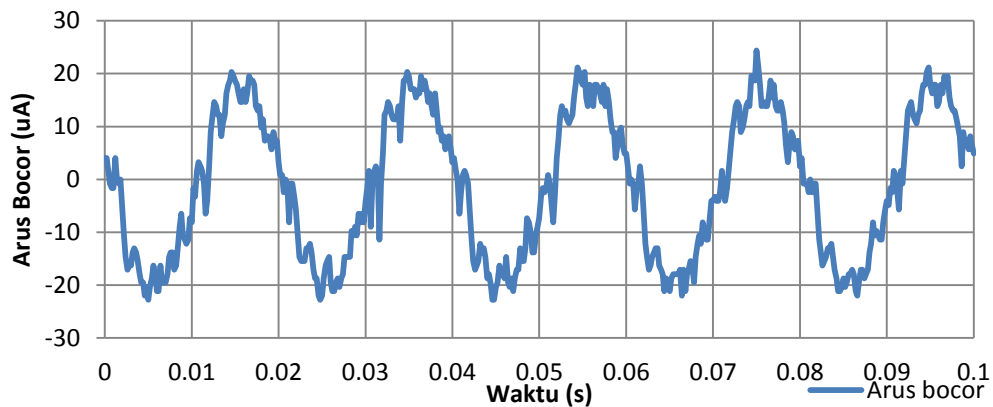
Gambar 4.9 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi suhu dengan tegangan uji 11,547 kV

Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 4.9, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat variasi suhu yang diterapkan pada isolator uji meningkat. Hal ini disebabkan ketika suhu yang diterapkan meningkat, maka suhu pada bahan isolator akan meningkat sehingga melepaskan elektron bebas yang terdapat di dalam bahan isolator, dimana elektron tersebut menjadi pembawa arus. Hal ini sesuai dengan referensi [23] dimana isolator memiliki koefisien temperatur negatif dimana tahanan isolasi menurun ketika kenaikan suhu dan menyebabkan arus bocor meningkat. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara suhu dan arus bocor berbanding lurus, semakin tinggi suhu yang diterapkan pada isolator maka arus bocor akan semakin meningkat.

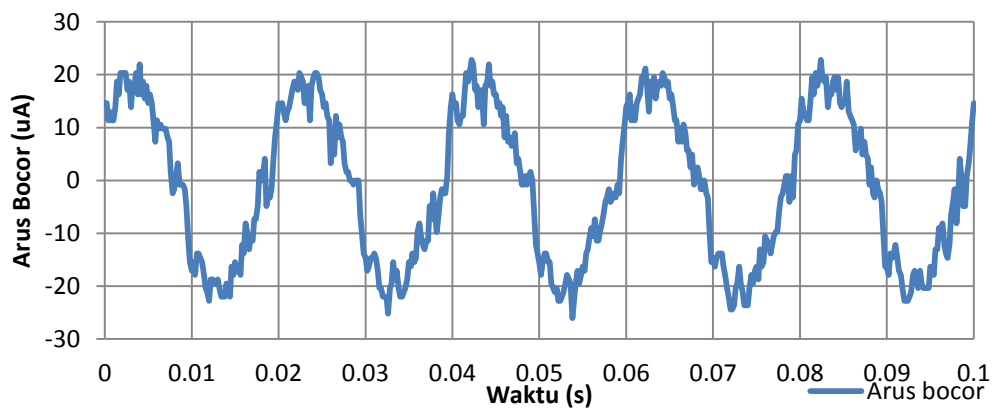
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

4.2.3 Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV + 5%

Hasil pengukuran gelombang arus bocor dan hasil pengolahan menggunakan osiloskop variasi suhu pada tegangan uji 11,547 kV + 5% dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11.

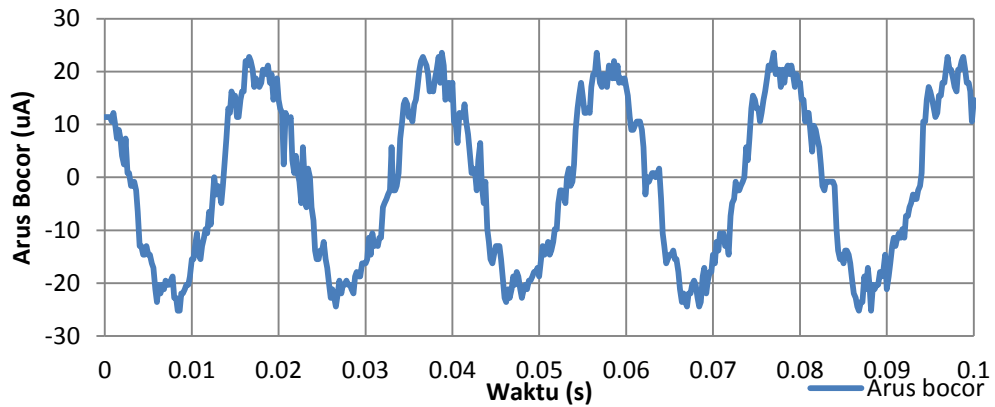
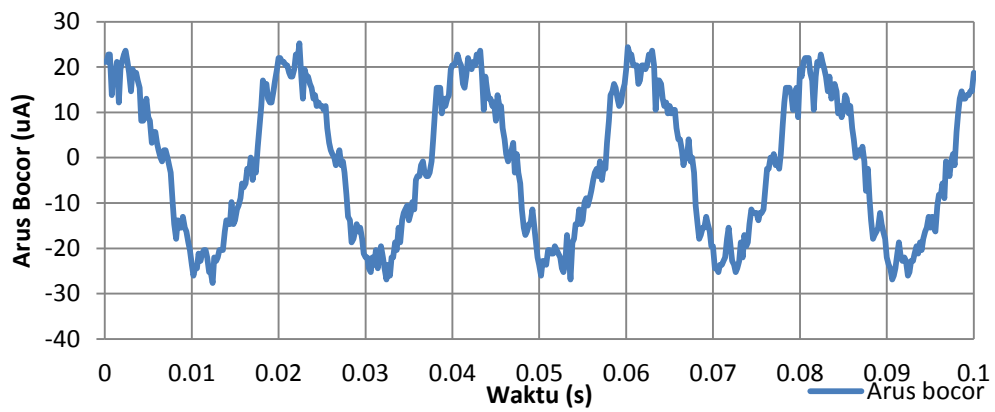
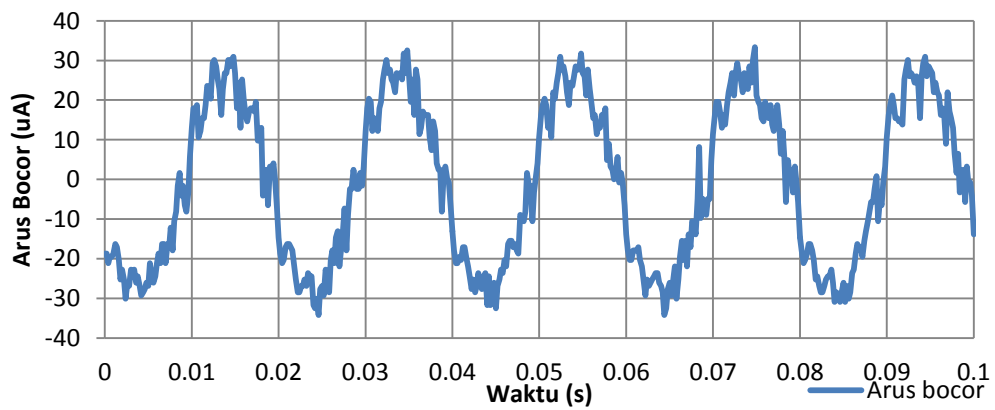


(a) Suhu uji 25⁰C

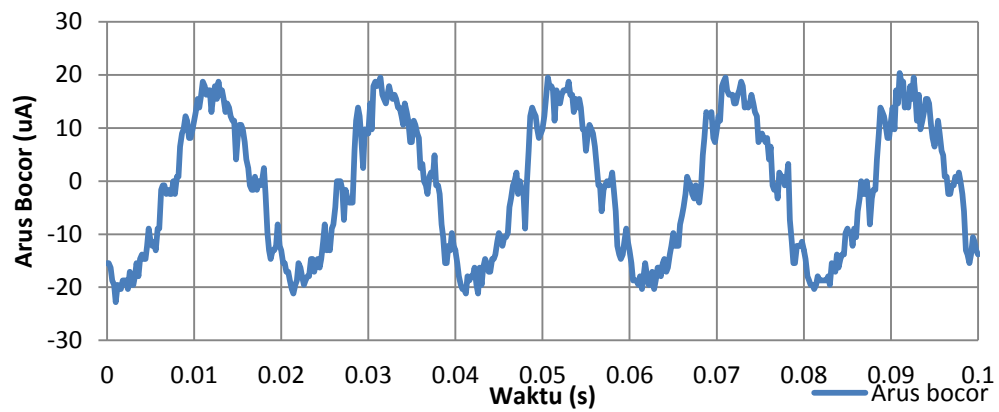
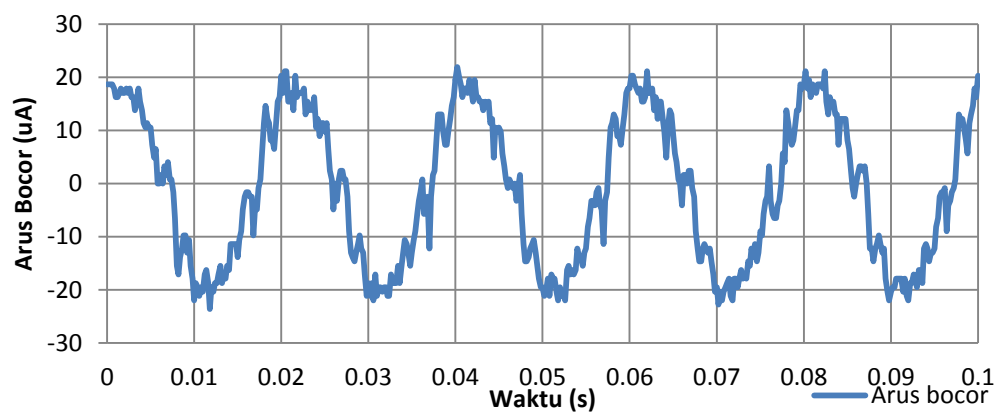
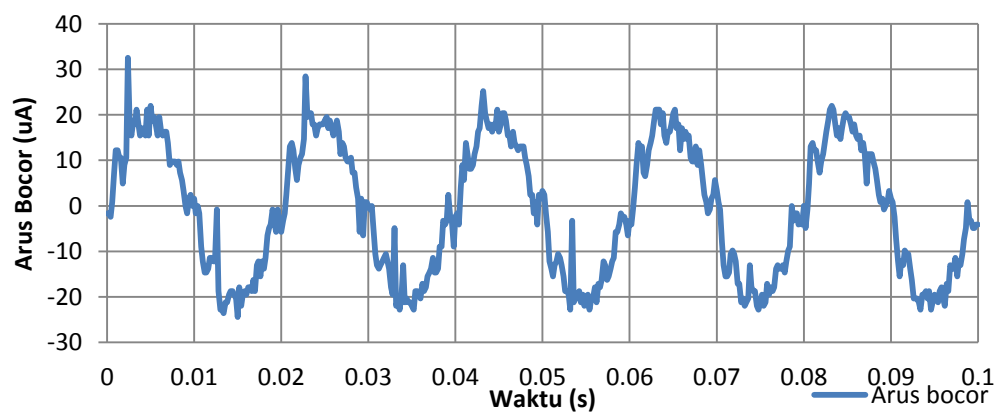


(b) Suhu uji 28⁰ C

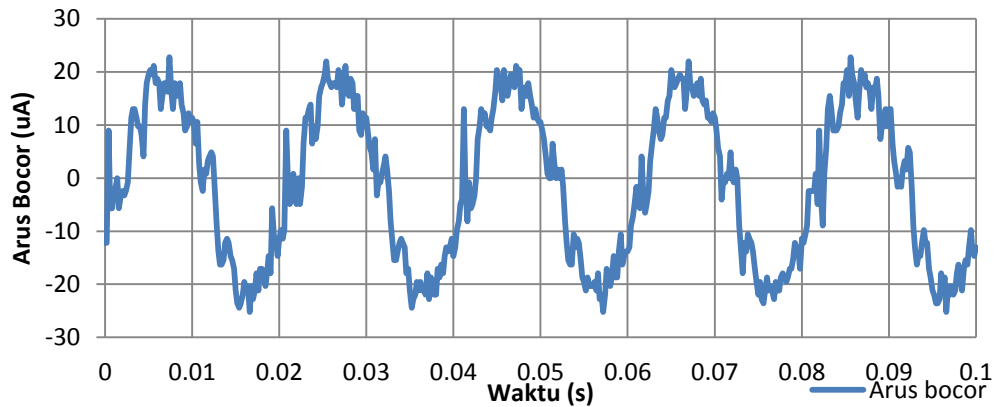
Gambar 4.10 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi suhu (a) 25⁰C, (b) 28⁰C, (c) 31⁰C, (d) 34⁰C, dan (e) 37⁰C

(c) Suhu uji 31°C (d) Suhu uji 34°C (e) Suhu uji 37°C

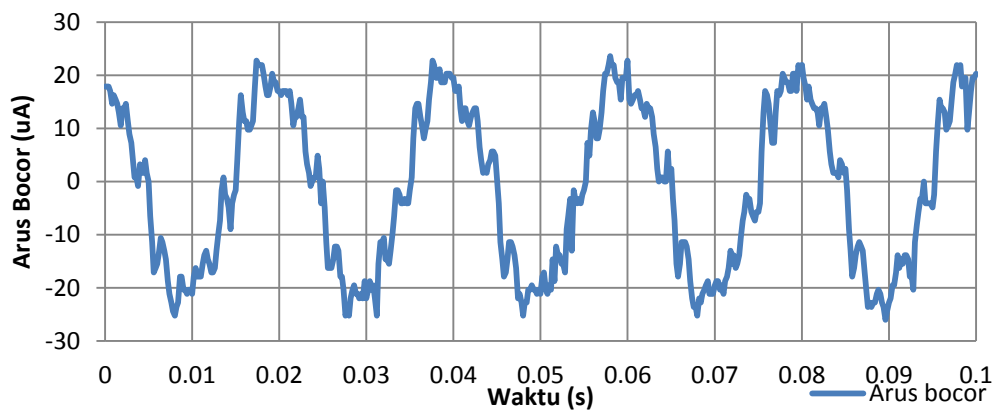
Gambar 4.10 Lanjutan

(a) Suhu uji 25°C (b) Suhu uji 28°C (c) Suhu uji 31°C

Gambar 4.11 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi suhu (a) 25°C , (b) 28°C , (c) 31°C , (d) 34°C , dan (e) 37°C



(d) Suhu uji 34°C



(e) Suhu uji 37°C

Gambar 4.11 Lanjutan

Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 merupakan salah satu hasil pengukuran gelombang arus bocor terhadap variasi suhu 25°C, 28°C, 31°C, 34°C, dan 37°C. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali setiap variasi tegangan dan diambil rata-ratanya. Data-data hasil pengukuran arus bocor pada isolator resin epoksi *filler* pasir silika dan Al₂O₃ (Aluminium oksida) ditunjukkan pada Tabel 4.4.

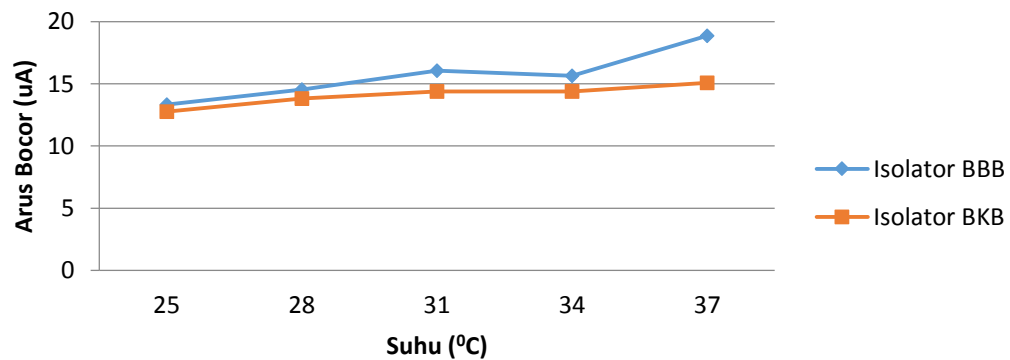
Tabel 4.4 Data hasil pengukuran arus bocor variasi suhu

| Tipe Sirip | Suhu (°C) | Nilai Arus Bocor (uA) | | | |
|------------|--------------|-----------------------|-------|-------|-----------|
| | | I | II | III | Rata-rata |
| BBB | 25 | 13,47 | 13,37 | 13,17 | 13,34 |

Tabel 4.4 Lanjutan

| Tipe Sirip | Suhu (°C) | Nilai Arus Bocor (uA) | | | |
|------------|-----------|-----------------------|-------|-------|-----------|
| | | I | II | III | Rata-rata |
| BBB | 27 | 14,37 | 14,60 | 14,64 | 14,54 |
| | 31 | 15,24 | 17,39 | 15,52 | 16,05 |
| | 34 | 15,97 | 15,45 | 15,54 | 15,65 |
| | 37 | 20,06 | 18,52 | 18,00 | 18,86 |
| BKB | 25 | 12,81 | 12,65 | 12,81 | 12,75 |
| | 27 | 13,84 | 13,93 | 13,68 | 13,82 |
| | 31 | 14,32 | 14,47 | 14,37 | 14,38 |
| | 34 | 14,42 | 14,47 | 14,25 | 14,38 |
| | 37 | 15,20 | 15,70 | 14,32 | 15,07 |

Berdasarkan data pada Tabel 4.4 dapat dibuat grafik pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi suhu dengan tegangan uji 11,547 kV + 5%

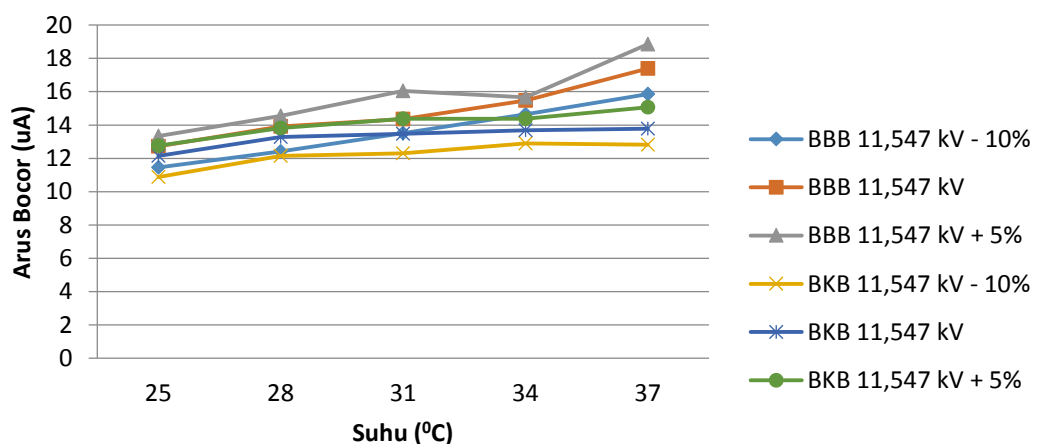
Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 4.12, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat variasi suhu yang diterapkan pada isolator uji meningkat. Hal ini disebabkan ketika suhu yang diterapkan meningkat, maka suhu pada bahan isolator akan meningkat sehingga melepaskan elektron bebas yang terdapat di dalam bahan isolator, dimana elektron tersebut menjadi pembawa arus.

Hal ini sesuai dengan referensi [23] dimana isolator memiliki koefisien temperatur negatif dimana tahanan isolasi menurun ketika kenaikan suhu dan menyebabkan arus bocor meningkat. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara suhu dan arus bocor berbanding lurus, semakin tinggi suhu yang diterapkan pada isolator maka arus bocor akan semakin meningkat.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

4.2.4 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Bocor Variasi Suhu

Dari hasil pengukuran arus bocor variasi suhu, data pada Tabel 4.2, Tabel 4.3, dan Tabel 4.4 dapat dibuat grafik perbandingan seperti pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Grafik perbandingan arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi suhu

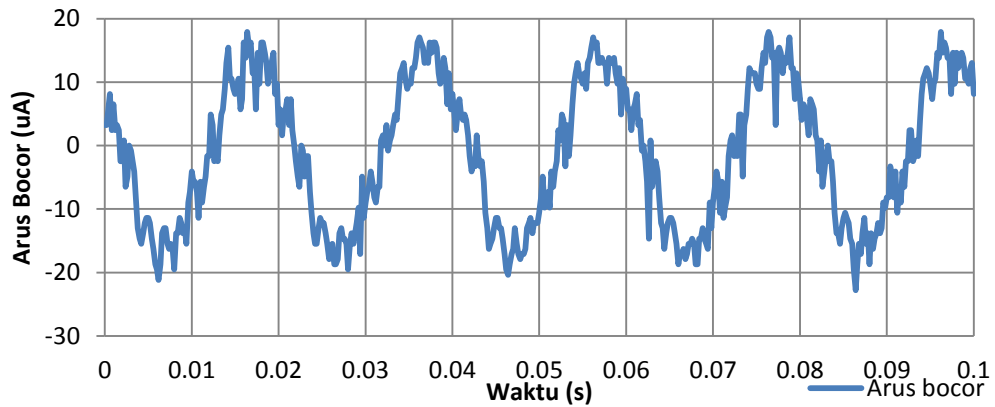
Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 4.13, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat tegangan uji yang diberikan pada isolator uji juga meningkat. Hal ini disebabkan ketika tegangan yang diterapkan pada bahan isolator meningkat, pelepasan muatan yang terjadi pada permukaan isolator akan semakin besar. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara tegangan dan arus bocor pada variasi suhu berbanding lurus, semakin besar tegangan yang diterapkan pada isolator maka arus bocor yang dihasilkan akan semakin besar.

4.3 Pengukuran Arus Bocor Variasi Kelembaban Udara

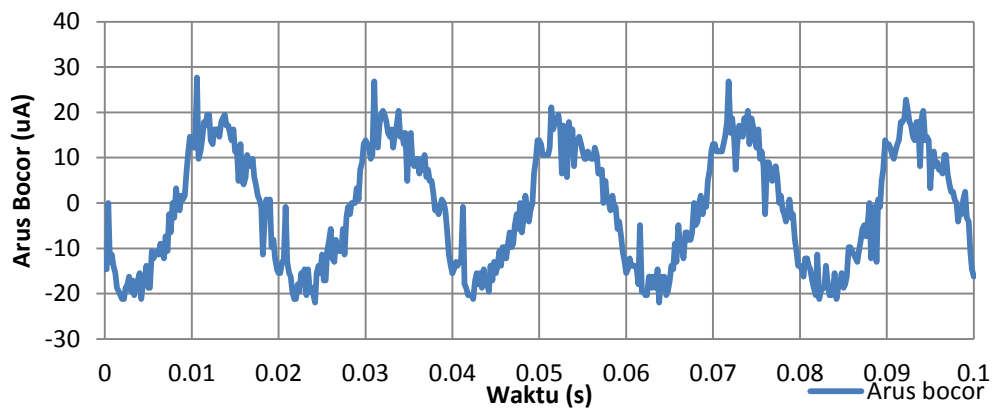
Pengukuran arus bocor dengan variasi kelembaban udara merepresentasikan kondisi perubahan kelembaban udara lingkungan di sekitar isolator tersebut. Pengukuran dilakukan dengan memvariasikan kelembaban udara pada *chamber* pengujian dari 60%, 70%, 80%, 90%, dan 100% dan menjaga suhu agar tetap bernilai 25⁰C. Pada pengukuran arus bocor variasi kelembaban udara ini menerapkan 3 variasi tegangan uji dengan nilai tegangan 11,547 kV - 10%, 11,547 kV, dan 11,547 kV + 5%, dimana nilai tersebut merupakan tegangan fasa - netral jaringan tegangan menengah 20 kV yaitu 11,547 kV dengan minimum -10% dan maksimum +5% sesuai dengan SPLN 1:1995 “Tegangan - Tegangan Standar”.

4.3.1 Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV - 10%

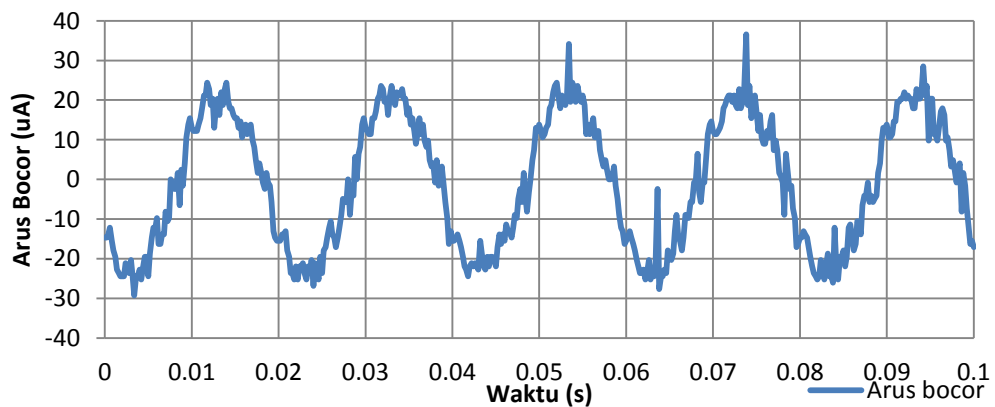
Hasil pengukuran gelombang arus bocor dan hasil pengolahan menggunakan osiloskop variasi kelembaban udara pada tegangan uji 11,547 kV - 10% dapat dilihat pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.15. Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 merupakan salah satu hasil pengukuran gelombang arus bocor terhadap variasi kelembaban udara 60%, 70%, 80%, 90%, dan 100%. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali setiap variasi tegangan dan diambil rata-ratanya. Data-data hasil pengukuran arus bocor pada isolator isolator resin epoksi *filler* pasir silika dan Al₂O₃ (Aluminium oksida) ditunjukkan pada Tabel 4.5.



(a) Kelembaban udara 60%

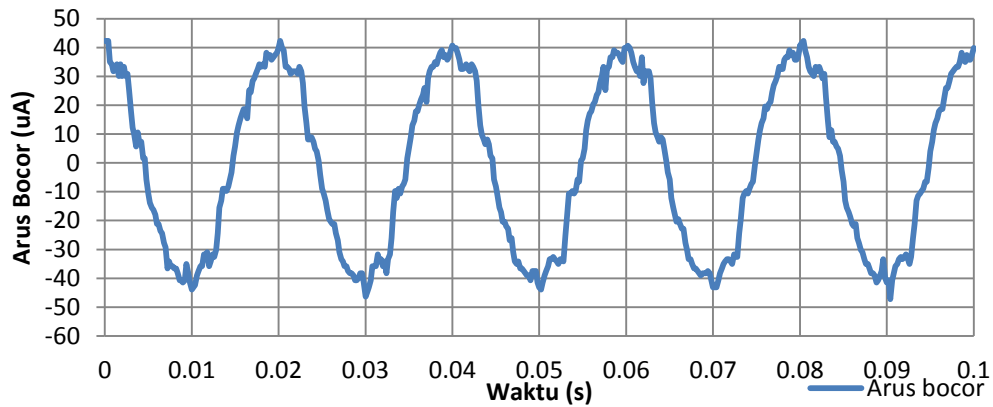


(b) Kelembaban udara 70%

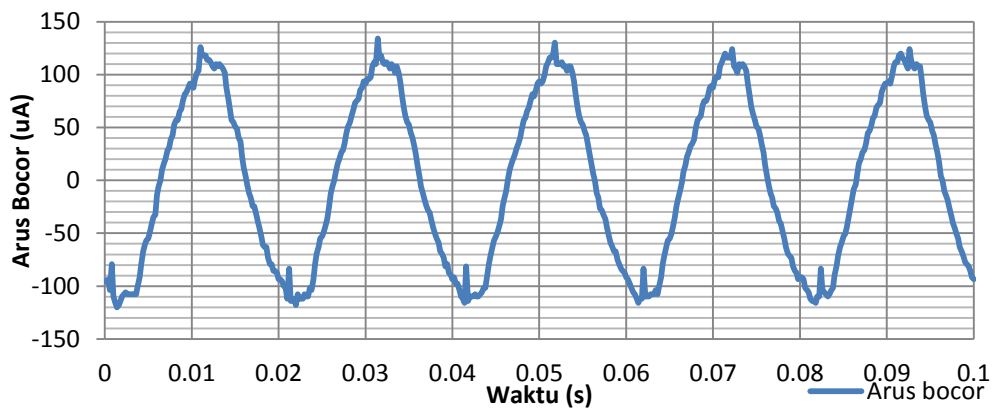


(c) Kelembaban udara 80%

Gambar 4.14 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi kelembaban udara (a) 60%, (b) 70%, (c) 80%, (d) 90%, dan (e) 100%

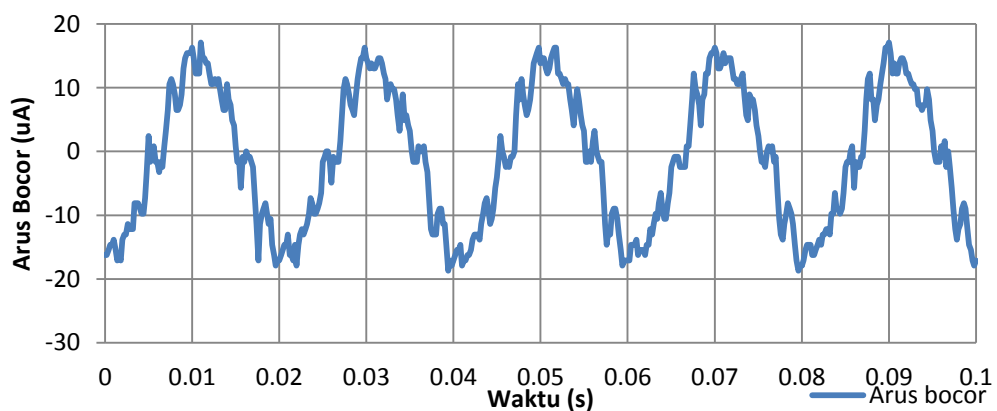


(d) Kelembaban udara 90%



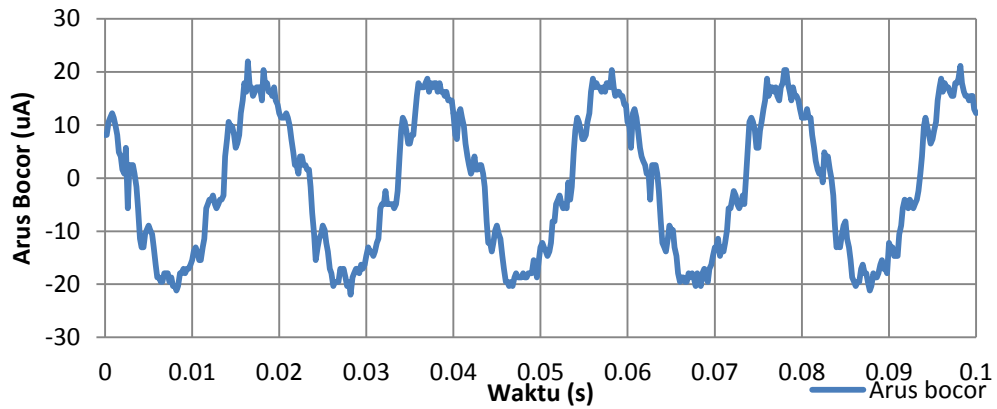
(e) Kelembaban udara 100%

Gambar 4.14 Lanjutan

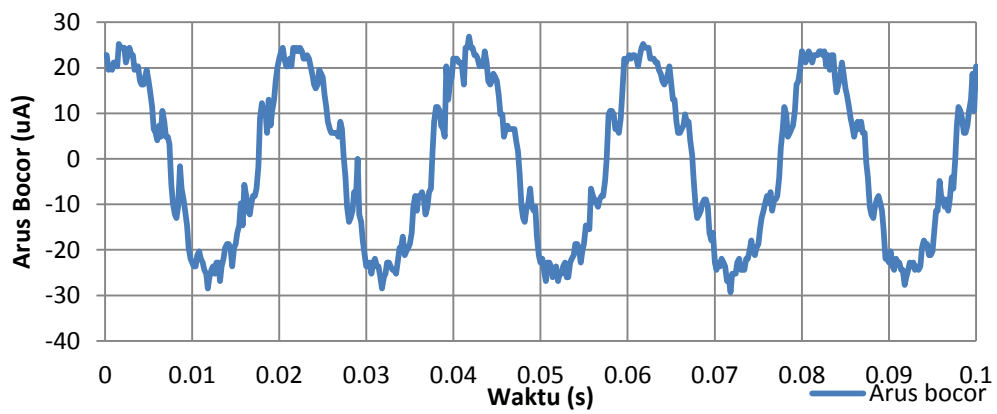


(a) Kelembaban udara 60%

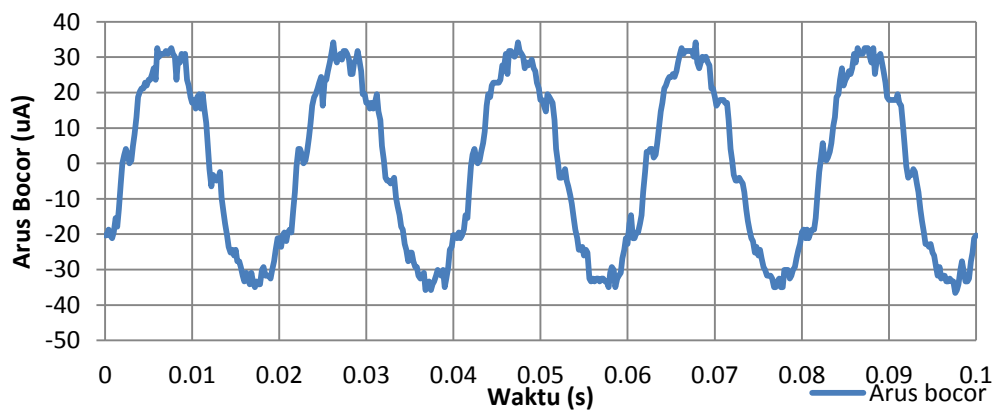
Gambar 4.15 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi kelembaban udara (a) 60%, (b) 70%, (c) 80%, (d) 90%, dan (e) 100%



(b) Kelembaban udara 70%

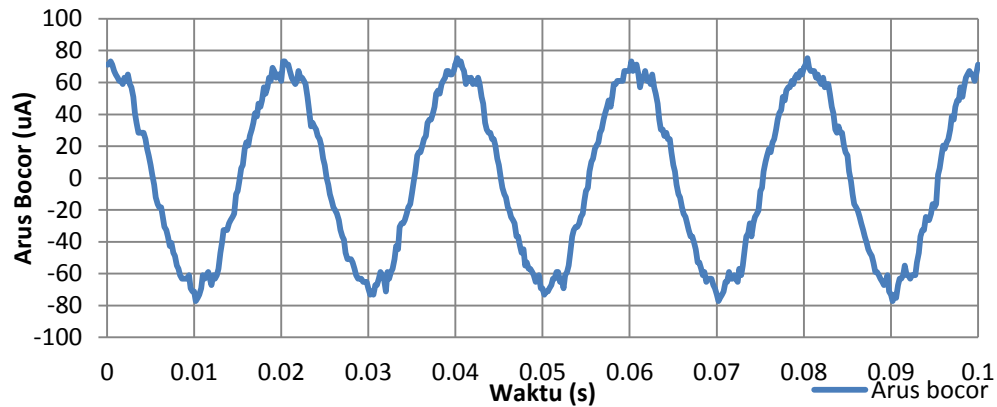


(c) Kelembaban udara 80%



(d) Kelembaban udara 90%

Gambar 4.15 Lanjutan



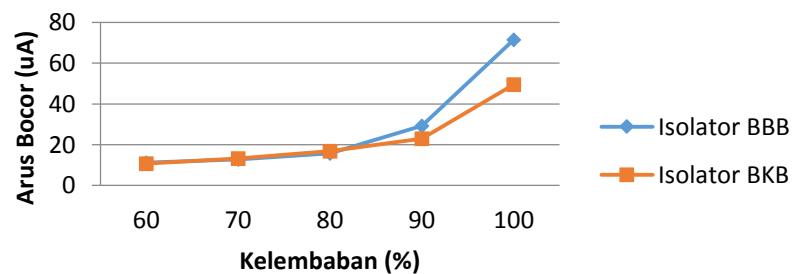
(e) Kelembaban udara 100%

Gambar 4.15 Lanjutan

Tabel 4.5 Data hasil pengukuran arus bocor variasi kelembaban udara

| Tipe Sirip | Kelembaban (%) | Nilai Arus Bocor (uA) | | | |
|------------|----------------|-----------------------|-------|-------|-----------|
| | | I | II | III | Rata-rata |
| BBB | 60 | 11,21 | 11,34 | 11,25 | 11,27 |
| | 70 | 13,02 | 12,73 | 12,79 | 12,84 |
| | 80 | 16,26 | 15,42 | 15,41 | 15,70 |
| | 90 | 29,34 | 30,41 | 28,16 | 29,31 |
| | 100 | 80,42 | 69,14 | 64,95 | 71,51 |
| BKB | 60 | 10,80 | 10,59 | 10,76 | 10,72 |
| | 70 | 13,31 | 13,11 | 13,32 | 13,25 |
| | 80 | 17,62 | 16,71 | 16,37 | 16,90 |
| | 90 | 23,65 | 22,80 | 22,33 | 22,93 |
| | 100 | 50,30 | 49,88 | 48,17 | 49,45 |

Berdasarkan data pada Tabel 4.5 dapat dibuat grafik pada Gambar 4.16.



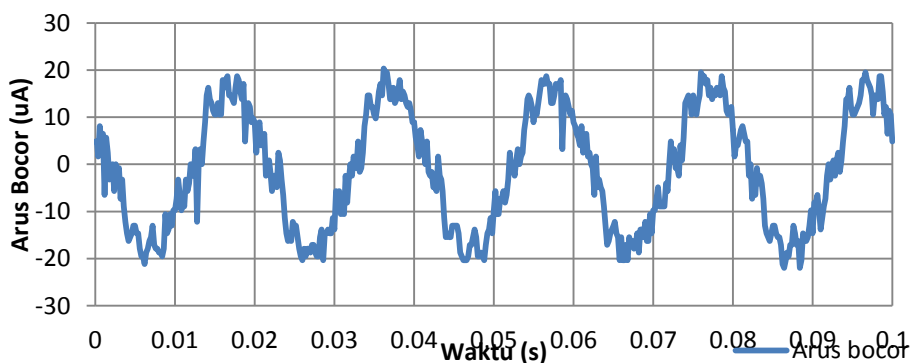
Gambar 4.16 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi kelembaban udara dengan tegangan uji 11,547 kV - 10%

Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 4.16, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat variasi kelembaban udara yang diterapkan pada isolator uji meningkat. Hal ini disebabkan ketika kelembaban udara yang diterapkan meningkat, maka lebih banyak uap air diserap oleh permukaan isolator dan meningkatkan konduktivitas permukaan isolator, sehingga arus akan lebih mudah mengalir. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara kelembaban udara dan arus bocor berbanding lurus, semakin tinggi kelembaban udara yang diterapkan pada isolator maka arus bocor akan semakin meningkat.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.16 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

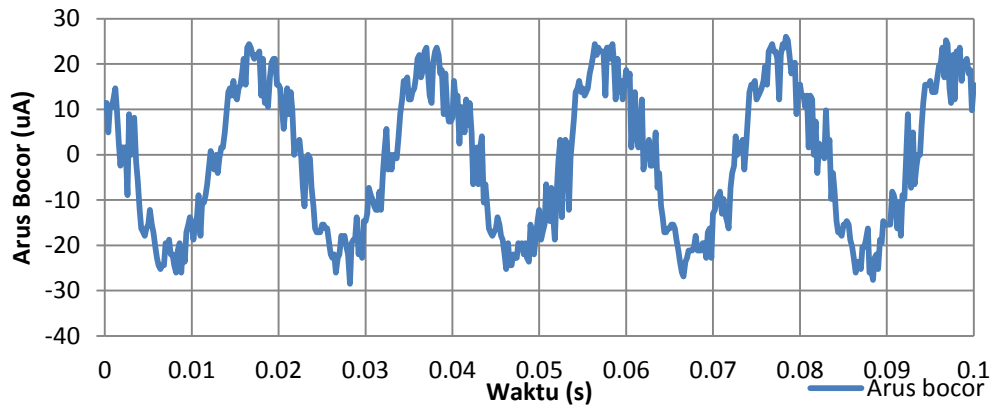
4.3.2 Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV

Hasil pengukuran gelombang arus bocor dan hasil pengolahan menggunakan osiloskop variasi kelembaban udara pada tegangan uji 11,547 kV dapat dilihat pada Gambar 4.17 dan Gambar 4.18.

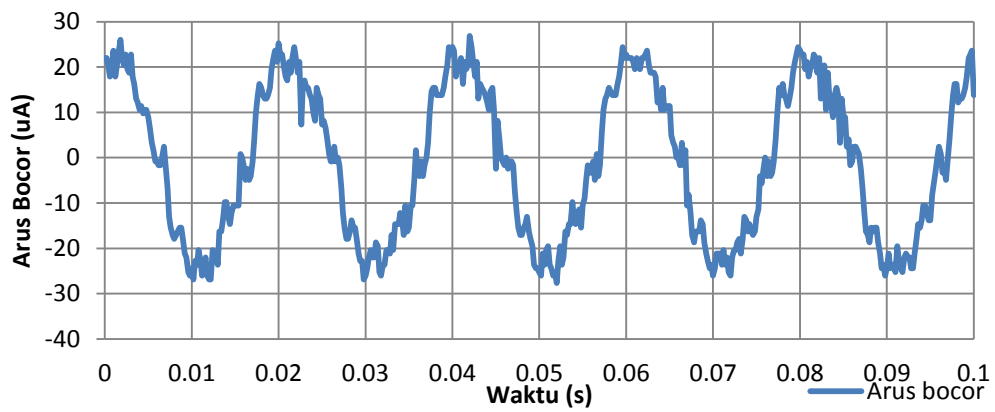


(a) Kelembaban udara 60%

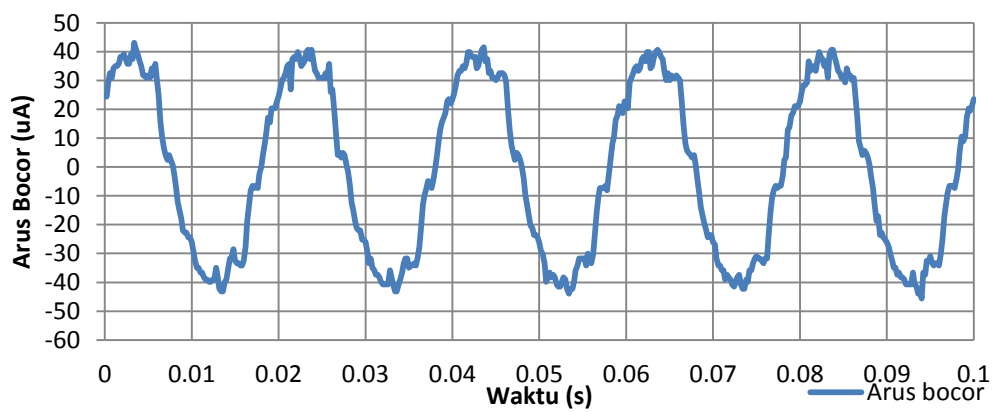
Gambar 4.17 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi kelembaban udara (a) 60%, (b) 70%, (c) 80%, (d) 90%, dan (e) 100%



(b) Kelembaban udara 70%

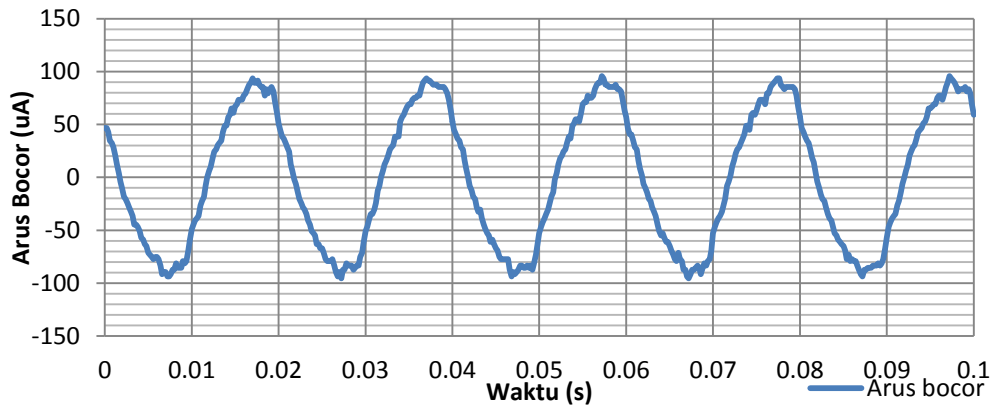


(c) Kelembaban udara 80%



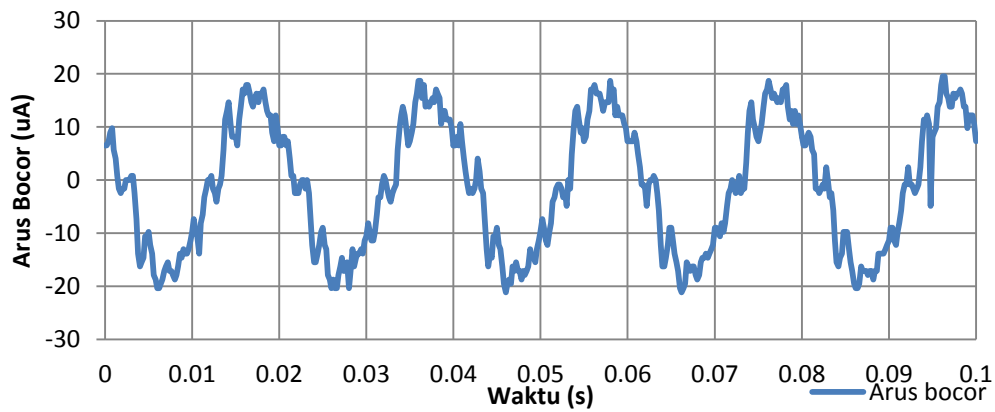
(d) Kelembaban udara 90%

Gambar 4.17 Lanjutan

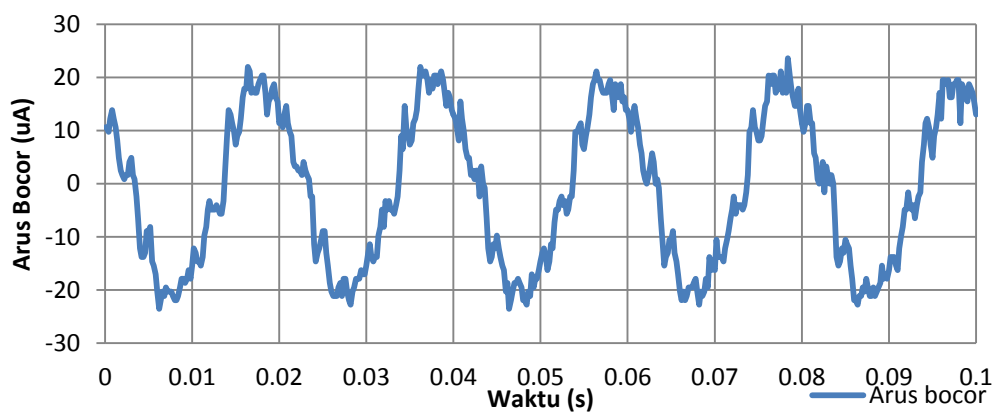


(e) Kelembaban udara 100%

Gambar 4.17 Lanjutan

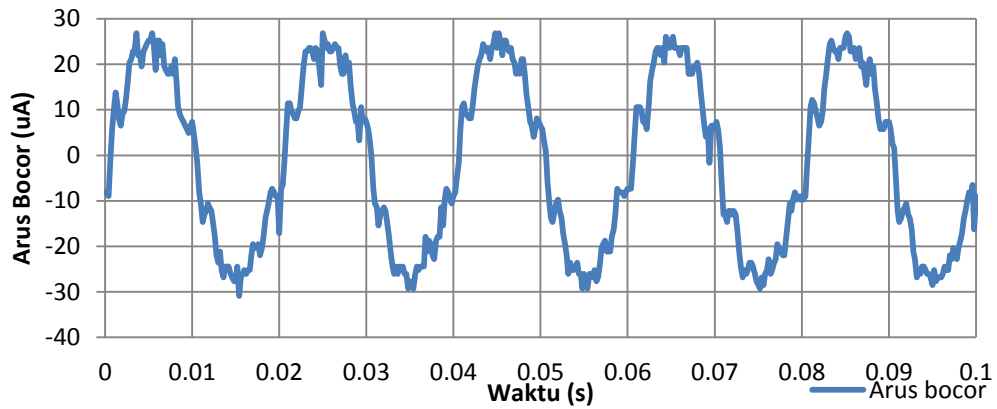


(a) Kelembaban udara 60%

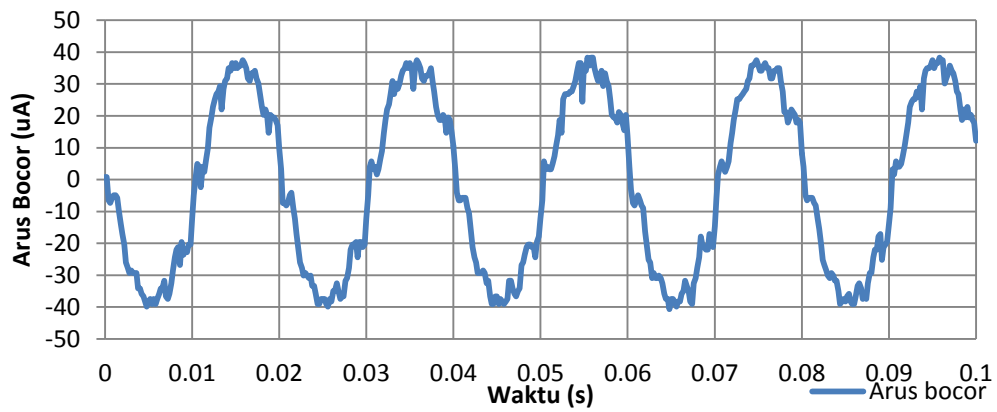


(b) Kelembaban udara 70%

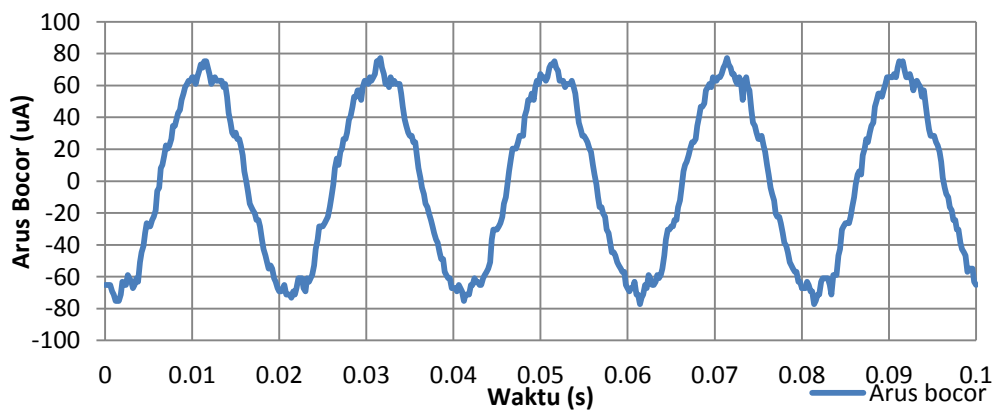
Gambar 4.18 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi kelembaban udara (a) 60%, (b) 70%, (c) 80%, (d) 90%, dan (e) 100%



(c) Kelembaban udara 80%



(d) Kelembaban udara 90%



(e) Kelembaban udara 100%

Gambar 4.18 Lanjutan

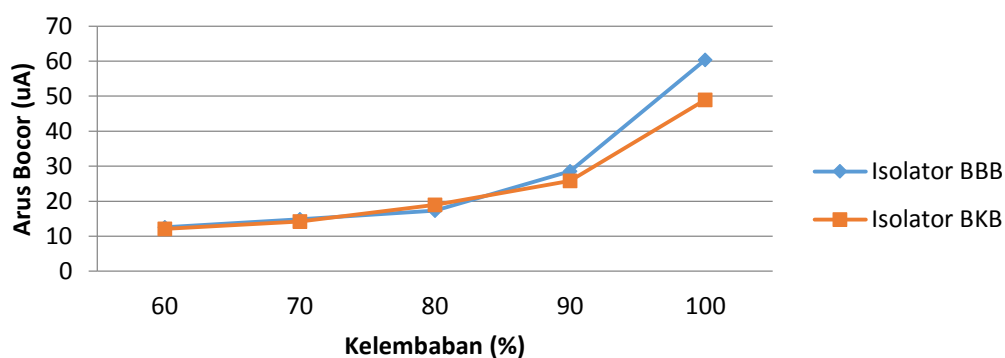
Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 merupakan salah satu hasil pengukuran gelombang arus bocor terhadap variasi kelembaban udara 60%, 70%, 80%, 90%,

dan 100%. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali setiap variasi tegangan dan diambil rata-ratanya. Data-data hasil pengukuran arus bocor pada isolator isolator resin epoksi *filler* pasir silika dan Al₂O₃ (Aluminium oksida) ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Data hasil pengukuran arus bocor variasi kelembaban udara

| Tipe Sirip | Kelembaban (%) | Nilai Arus Bocor (uA) | | | |
|------------|----------------|-----------------------|-------|-------|-----------|
| | | I | II | III | Rata-rata |
| BBB | 60 | 12,49 | 12,81 | 12,37 | 12,56 |
| | 70 | 15,79 | 14,42 | 14,22 | 14,81 |
| | 80 | 16,61 | 16,37 | 18,93 | 17,30 |
| | 90 | 29,43 | 26,93 | 29,26 | 28,54 |
| | 100 | 63,88 | 59,67 | 57,56 | 60,37 |
| BKB | 60 | 12,09 | 12,15 | 12,11 | 12,12 |
| | 70 | 14,23 | 14,25 | 14,13 | 14,20 |
| | 80 | 18,70 | 19,00 | 19,18 | 18,96 |
| | 90 | 26,95 | 25,10 | 25,37 | 25,81 |
| | 100 | 50,95 | 48,93 | 46,84 | 48,90 |

Berdasarkan data pada Tabel 4.6 dapat dibuat grafik pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi kelembaban udara dengan tegangan uji 11,547 kV

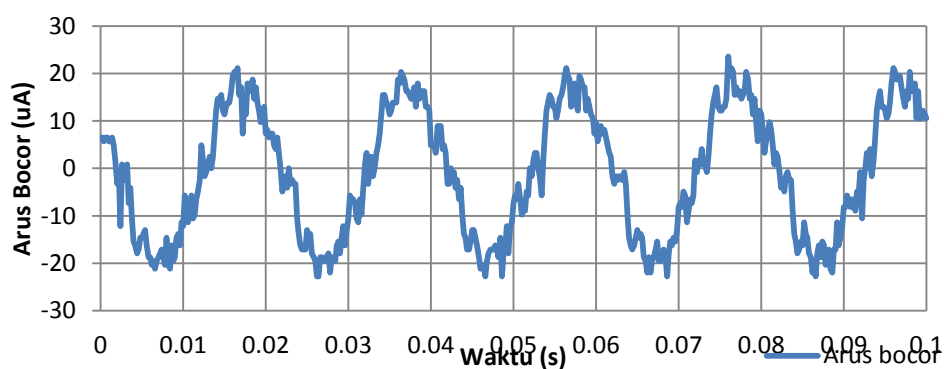
Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 4.19, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat variasi kelembaban udara yang diterapkan

pada isolator uji meningkat. Hal ini disebabkan ketika kelembaban udara yang diterapkan meningkat, maka lebih banyak uap air diserap oleh permukaan isolator dan meningkatkan konduktivitas permukaan isolator, sehingga arus akan lebih mudah mengalir. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara kelembaban udara dan arus bocor berbanding lurus, semakin tinggi kelembaban udara yang diterapkan pada isolator maka arus bocor akan semakin meningkat.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.19 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

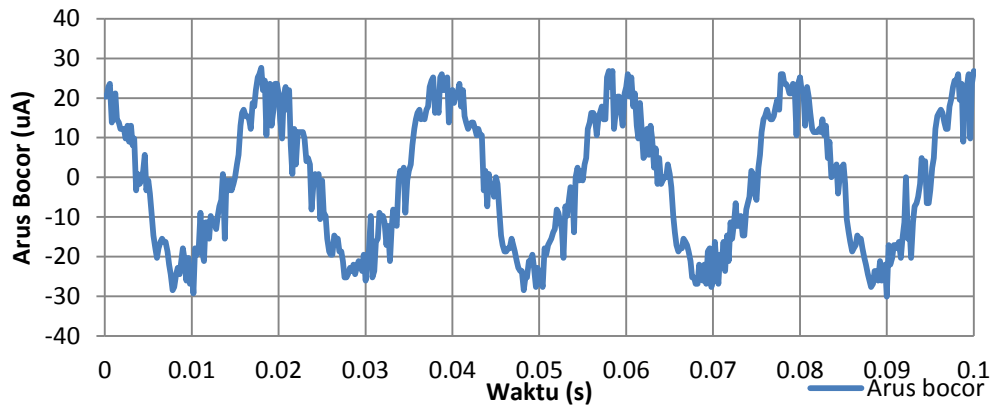
4.3.3 Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV + 5%

Hasil pengukuran gelombang arus bocor dan hasil pengolahan menggunakan osiloskop variasi kelembaban udara pada tegangan uji 11,547 kV + 5% dapat dilihat pada Gambar 4.20 dan Gambar 4.21.

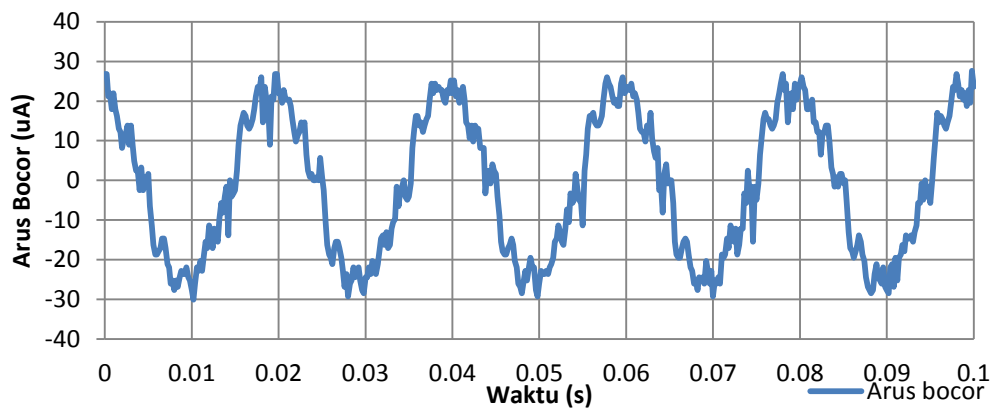


(a) Kelembaban udara 60%

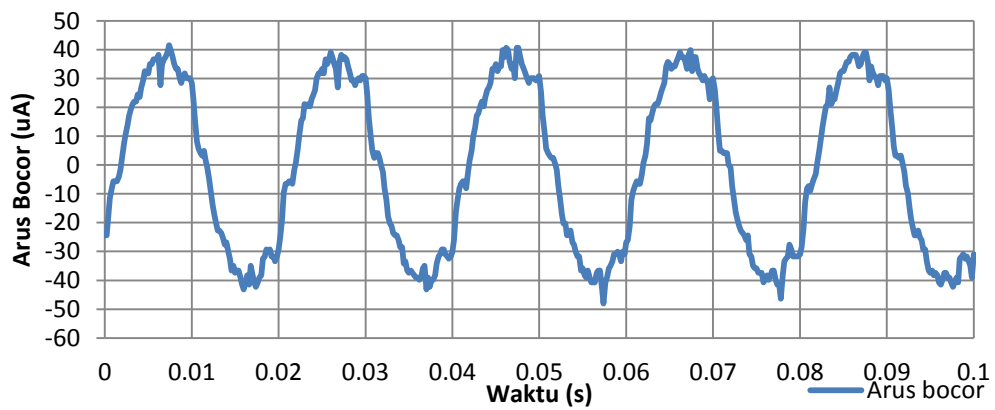
Gambar 4.20 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BBB variasi kelembaban udara (a) 60%, (b) 70%, (c) 80%, (d) 90%, dan (e) 100%



(b) Kelembaban udara 70%

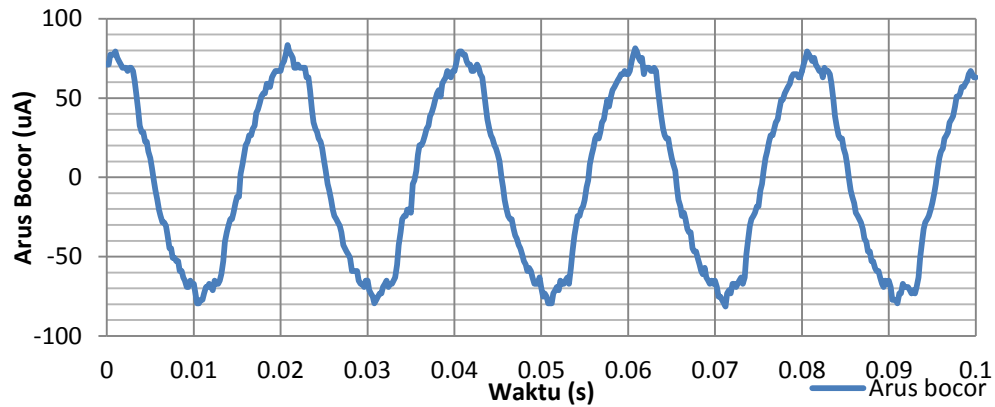


(c) Kelembaban udara 80%



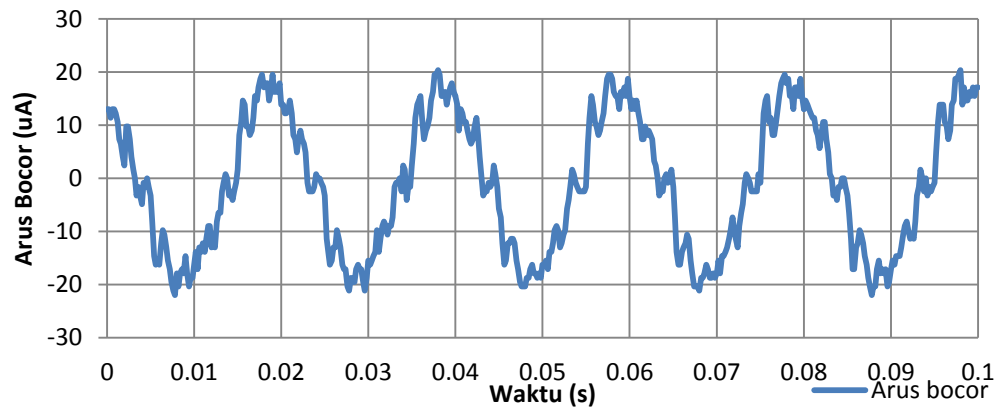
(d) Kelembaban udara 90%

Gambar 4.20 Lanjutan

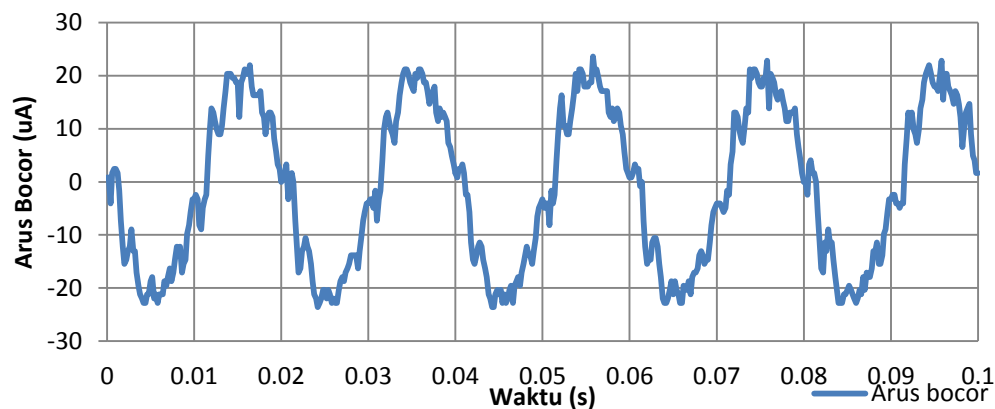


(e) Kelembaban udara 100%

Gambar 4.20 Lanjutan

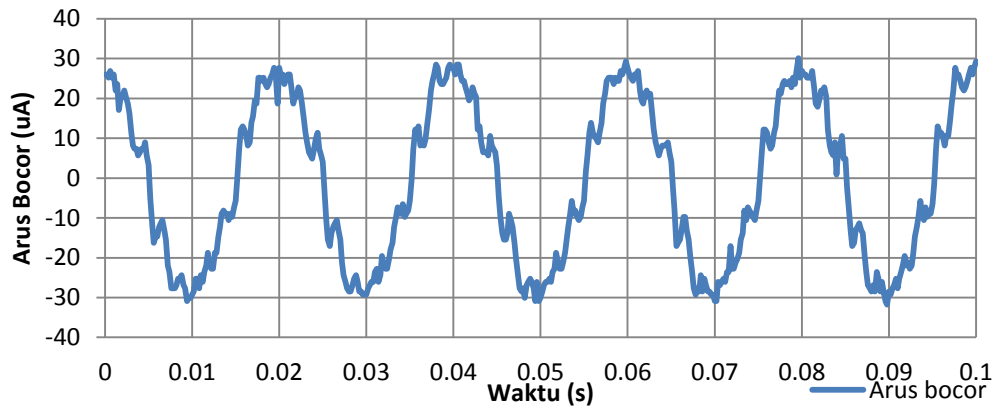


(a) Kelembaban udara 60%

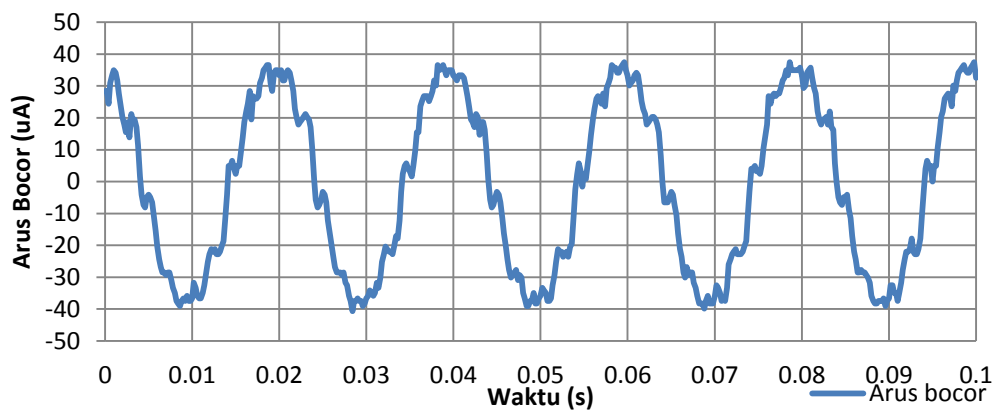


(b) Kelembaban udara 70%

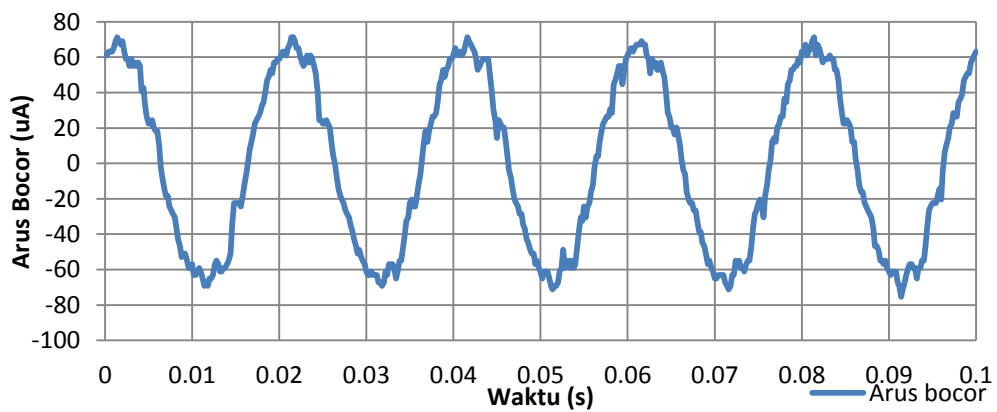
Gambar 4.21 Gelombang arus bocor isolator tipe sirip BKB variasi kelembaban udara (a) 60%, (b) 70%, (c) 80%, (d) 90%, dan (e) 100%



(c) Kelembaban udara 80%



(d) Kelembaban udara 90%



(e) Kelembaban udara 100%

Gambar 4.21 Lanjutan

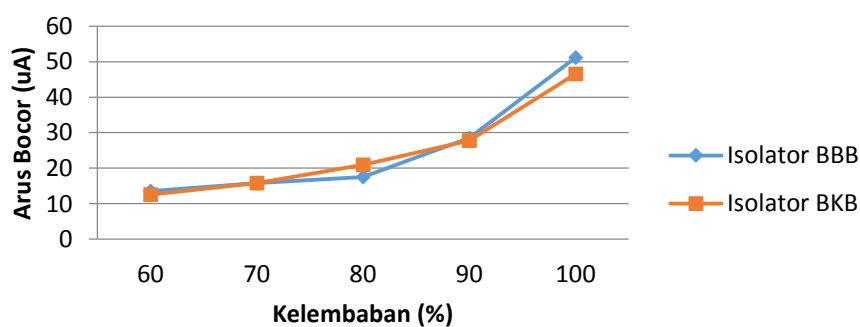
Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 merupakan salah satu hasil pengukuran gelombang arus bocor terhadap variasi kelembaban udara 60%, 70%, 80%, 90%,

dan 100%. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali setiap variasi tegangan dan diambil rata-ratanya. Data-data hasil pengukuran arus bocor pada isolator isolator resin epoksi *filler* pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium oksida) ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Data hasil pengukuran arus bocor variasi kelembaban udara

| Tipe Sirip | Kelembaban (%) | Nilai Arus Bocor (uA) | | | |
|------------|----------------|-----------------------|-------|-------|-----------|
| | | I | II | III | Rata-rata |
| BBB | 60 | 13,21 | 14,07 | 13,28 | 13,52 |
| | 70 | 16,72 | 15,37 | 15,40 | 15,83 |
| | 80 | 17,69 | 17,46 | 17,29 | 17,48 |
| | 90 | 28,86 | 29,15 | 27,49 | 28,50 |
| | 100 | 54,17 | 50,90 | 48,32 | 51,13 |
| BKB | 60 | 12,67 | 12,56 | 12,48 | 12,57 |
| | 70 | 14,83 | 14,99 | 17,53 | 15,79 |
| | 80 | 19,99 | 19,49 | 23,47 | 20,99 |
| | 90 | 26,56 | 26,21 | 30,67 | 27,82 |
| | 100 | 48,12 | 46,68 | 44,77 | 46,52 |

Berdasarkan data pada Tabel 4.7 dapat dibuat grafik pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi kelembaban udara dengan tegangan uji 11,547 kV + 5%

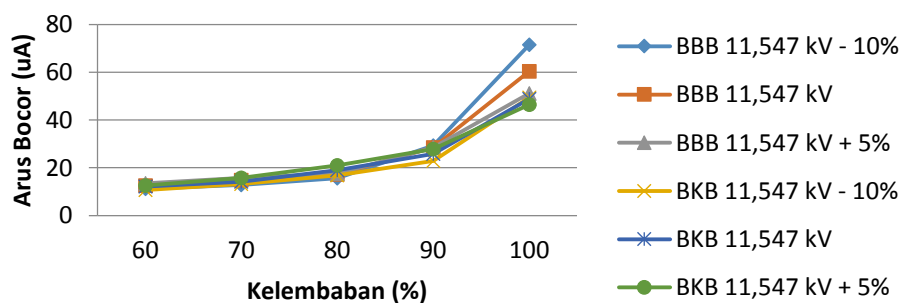
Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 4.22, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat variasi kelembaban udara yang diterapkan

pada isolator uji meningkat. Hal ini disebabkan ketika kelembaban udara yang diterapkan meningkat, maka lebih banyak uap air diserap oleh permukaan isolator dan meningkatkan konduktivitas permukaan isolator, sehingga arus akan lebih mudah mengalir. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara kelembaban udara dan arus bocor berbanding lurus, semakin tinggi kelembaban udara yang diterapkan pada isolator maka arus bocor akan semakin meningkat.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.22 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

4.3.4 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Bocor Variasi Kelembaban Udara

Dari hasil pengukuran arus bocor variasi suhu, data pada Tabel 4.5, Tabel 4.6, dan Tabel 4.7 dapat dibuat grafik perbandingan seperti pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Grafik perbandingan arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi kelembaban udara

Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 4.23, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat tegangan uji yang diberikan pada isolator uji

juga meningkat. Hal ini disebabkan ketika tegangan yang diterapkan pada bahan isolator meningkat, pelepasan muatan yang terjadi pada permukaan isolator akan semakin besar. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara tegangan dan arus bocor pada variasi kelembaban udara berbanding lurus, semakin besar tegangan yang diterapkan pada isolator maka arus bocor yang dihasilkan akan semakin besar. Pada kelembaban udara 100%, nilai arus bocor naik secara drastis dikarenakan uap air di dalam *chamber* pengujian terlalu jenuh (*over saturated*). Hasilnya, lebih banyak uap air yang diserap oleh permukaan isolator sehingga konduktivitas permukaan dan arus bocor meningkat drastis.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan pada Tugas Akhir ini, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Ukuran sirip isolator mempengaruhi nilai arus bocor yang mengalir pada isolator.
2. Nilai arus bocor bahan isolator polimer resin epoksi *filler* pasir silika dan Al_2O_3 (aluminium oksida) mengalami peningkatan untuk setiap kenaikan variasi tegangan pengujian yang diterapkan pada isolator.
3. Nilai arus bocor bahan isolator polimer resin epoksi *filler* pasir silika dan Al_2O_3 (aluminium oksida) mengalami peningkatan untuk setiap kenaikan variasi suhu yang diterapkan pada isolator.
4. Nilai arus bocor bahan isolator polimer resin epoksi *filler* pasir silika dan Al_2O_3 (aluminium oksida) mengalami peningkatan untuk setiap kenaikan variasi kelembaban udara yang diterapkan pada isolator.
5. Nilai arus bocor bahan isolator polimer resin epoksi *filler* pasir silika dan Al_2O_3 (aluminium oksida) naik secara drastis pada variasi kelembaban udara 100%. Hal ini dikarenakan uap air di dalam *chamber* pengujian terlalu jenuh (*over saturated*) sehingga lebih banyak uap air yang diserap oleh permukaan isolator dan konduktivitas permukaan meningkat.
6. Nilai arus bocor pada isolator tipe sirip BKB lebih rendah dibandingkan dengan isolator tipe sirip BBB pada semua variasi tegangan, variasi suhu, dan variasi kelembaban udara.

5.2 Saran

Saran yang dapat penulis berikan dalam Tugas Akhir ini antara lain sebagai berikut :

1. Studi lebih lanjut bisa dilakukan dengan memperbaiki metode pembuatan isolator agar lebih baik dan efisien.
2. Studi lebih lanjut bisa dikembangkan dengan memberikan variasi pengujian hujan buatan, variasi pengujian kabut garam (*salt fog*), dan pengaruh sinar ultra violet (UV) pada bahan isolator polimer resin epoksi untuk merepresentasikan kondisi isolator yang dipasang di lapangan.
3. Studi lebih lanjut bisa dikembangkan dengan melakukan pengujian tegangan tembus isolator, tangen delta, dan kekuatan mekanis dari isolator polimer resin epoksi *filler* pasir silika dan Al_2O_3 (aluminium oksida).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tobing, Bonggas L, *Peralatan Tegangan Tinggi*, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
- [2] Dissado, L.A., Fothergill J.C., *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, Peter Peregrinus Ltd, London, 1992.
- [3] Steven, Rudy S., *Pengaruh Polutan Terhadap Tahanan Permukaan Isolator Epoxy Resin*, Skripsi, Universitas Indonesia, Depok, 2008.
- [4] Haryono, T, CH. Sri Kristiningsih, *Pengaruh Suhu Terhadap Kinerja Material Isolasi Epoksi Resin Dalam Kondisi Bersih*, Seminar Nasional & Workshop Tegangan Tinggi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2002.
- [5] Syakur, Abdul, Hamzah, Berahim, Rochmadi, Tumiran, *Leakage Current Monitoring for Silane Epoxy Resin Insulator under Tropical Climate Conditions*, IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, 2012.
- [6] Mustamin, Manjang, Salama, *Karakteristik Isolator Polimer Tegangan Tinggi Di Bawah Penuaan Tekanan Iklim Tropis Buatan yang Dipercepat*, Universitas Hasanuddin, Makassar, 2010.
- [7] Mukti Ali, Muhamad, Nugroho, Agung, Syakur, Abdul, *Pembuatan dan Analisis Pengaruh Kondisi Permukaan Terhadap Unjuk Kerja Isolator Polimer 20 kV Tipe Sirip Tak Seragam dengan Variasi Tegangan Uji*, Universitas Diponegoro, Semarang, 2017.
- [8] Arismunandar, A., *Teknik Tegangan Tinggi*, Pradnya Paramita, Jakarta, 2001.
- [9] Syakur, Abdul, *Teori dan Hasil Eksperimen Partial Discharge Pada Bahan isolasi*, BP UNDIP, Semarang, 2009.
- [10] SPLN 10-3B. *Tingkat Intensitas Polusi Sehubungan Dengan Pedoman Pemilihan Isolator*. Perusahaan Listrik Negara, 1993
- [11] Purwantara, Suhadi, *Studi Temperatur Udara Terkini di Wilayah di Jawa Tengah dan DIY*, Jurnal INFORMASI, No. 2, XXXVVII, 2011.

- [12] Berahim, Hamzah., *Metodologi untuk Mengkaji Kinerja Isolasi Polimer Resin Epoksi Silane Sebagai Material Isolator Tegangan Tinggi di Daerah Tropis*, Disertasi S-3 Fakultas Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2005.
- [13] Nurimam, Asep, *Pengaruh Poli(Amino Amid) Terhadap Kekuatan Tarik dan Stabilitas Termal Polimer Blend Epoksi/Poli(Amino Amid)*, Tesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2012.
- [14] Rahmawati, Risa S, *Struktur Padatan Silikon Dioksida*, Makalah jurusan Pengajaran Kimia Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- [15] Syakur, Abdul, Rochmadi, Berahim, Hamzah, Tumiran, *Mekanisme Degradasi Permukaan dan Penentuan Tracking Index Bahan Resin Epoksi Silane Silica*. Conference on Information Technology and Electrical Engineering (CITEE). Yogyakarta. 2013; 1.
- [16] K. Davis, 2010, *Material Review: Alumina (Al₂O₃)*, School of Doctoral Studies (European Union) Journal, Belgium.
- [17] Tobing, Bonggas L, *Dasar-dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*, Penerbit Erlangga, Jakarta, 2012.
- [18] Karady George G, Fellow, *Flashover Mechanism of Silicone Rubber Insulators used for Outdoor Insulation – I*, Arizona state University, Arizona, 1995.
- [19] Amin, Muhammad, Salman Amin, dan Muhammad Ali, *Monitoring Of Leakage Current For Composite Insulator And Electrical Devices*, UET Taxilla, Pakistan.,2007.
- [20] IEC 60950-1. *Information Technology Equipment - Safety*. International Electrotechnical Commission, 2005.
- [21] IEC 60479-1. *Effect of Current on Human Beings and Livestock*. International Electrotechnical Commission, 2005.
- [22] Susilawati, Dyah Ika, *Analisa Arus Bocor Permukaan Sampel Bahan Isolasi resin Epoksi Silane Menggunakan Metode Pengukuran Inclined-Plane tracking Dengan Polutan Pantai Parangtritis*, Skripsi, Universitas Diponegoro, Semarang, 2010.
- [23] E. Coates. *Resistors & Circuits Module 1*, 2015. [Online]. Alamat : http://www.learnabout-electronics.org/Resistors/resistors_01a.php. [Diakses : 11 Desember 2018].

BIODATA



Nama : Gangsar Zaenurohman
NIM : 21060114120013
Konsentrasi : Teknik Tenaga Listrik
Tempat/Tgl. Lahir : Purbalingga, 19 November 1995
Alamat : RT 02/09, Desa Penaruban,
Kaligondang, Purbalingga
No. HP : +62-85716369919
Alamat e-mail : gangsarzaenurohman@gmail.com
Nama Orang Tua : Samingin
Alamat Orang Tua : RT 02/09, Desa Penaruban,
Kaligondang, Purbalingga
IP Kumulatif : 3,54

Pengalaman dan prestasi yang pernah diraih:

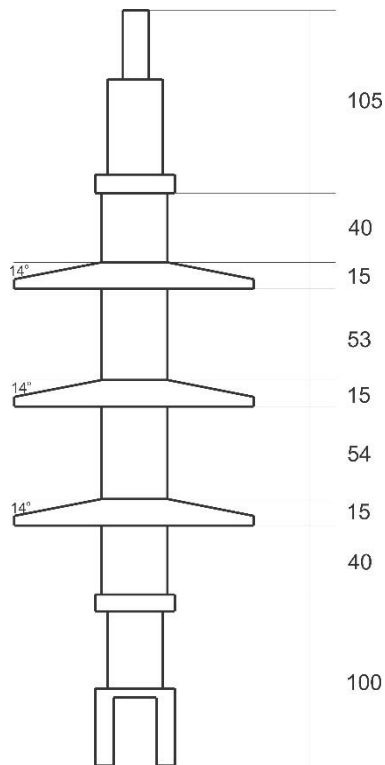
1. Staff Departemen Minat dan Bakat Himpunan Mahasiswa Elektro (HME) Universitas Diponegoro Tahun 2015
2. Staff Bidang Minat, Bakat, dan Kegemaran Himpunan Mahasiswa Elektro (HME) Universitas Diponegoro Tahun 2016
3. Staff Divisi Laboratorium BPPTL Universitas Diponegoro Tahun 2017
4. Kerja Praktek PT. PLN (Persero) Rayon Purbalingga 2017

Semarang, Desember 2018

Gangsar Zaenurohman

2106011412013

LAMPIRAN A
ISOLATOR UJI, PARAMETER GEOMETRIS DAN
SPESIFIKASI



Gambar Isolator

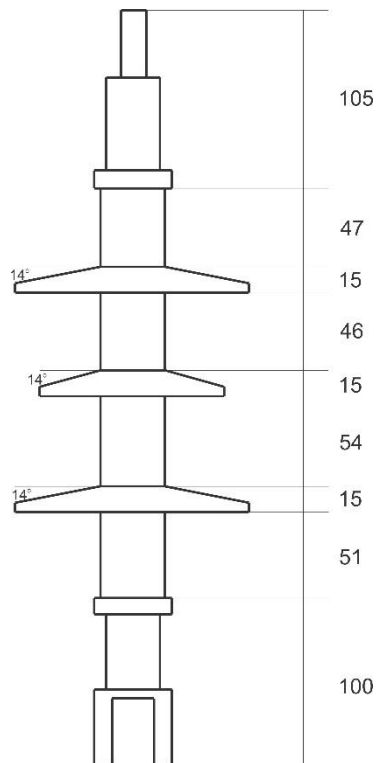
Catatan: Gambar sketsa isolator dalam satuan mm.

Tabel parameter geometris isolator

| | |
|---|---------------|
| Jarak minimum antar sirip (c) | 52 mm |
| Perbandingan antar spasi dengan rentangan sirip (S/P) | 1.14 |
| Perbandingan antara jarak rambat dengan jarak bebas (I_d/d) | 2.67 |
| Kemiringan sirip ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) | 14°, 14°, 14° |

Spesifikasi isolator uji

| | |
|-------------------------------------|---|
| Tipe | : BBB |
| Bahan | : Resin epoksi silane silika aluminium oksida |
| Dimensi, Panjang tanpa fitting (mm) | : 232 |
| Panjang dengan fitting (mm) | : 482 |
| Diameter (mm) | : 139 |
| Berat Isolator (gr) | : 988 |
| Jarak Flashover (mm) | : 350 |
| Jarak lintasan Arus Bocor (mm) | : 494 |



Gambar Isolator

Catatan: Gambar sketsa isolator dalam satuan mm.

Tabel parameter geometris isolator

| | |
|---|---------------|
| Jarak minimum antar sirip (c) | 110 mm |
| Perbandingan antar spasi dengan rentangan sirip (S/P) | 2.26 |
| Perbandingan antara jarak rambat dengan jarak bebas (I_{d1}/d_1 & I_{d2}/d_2) | 2.27 & 2.25 |
| Sirip berselang-seling (P_1-P_2) | 15 mm |
| Kemiringan sirip ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) | 14°, 14°, 14° |

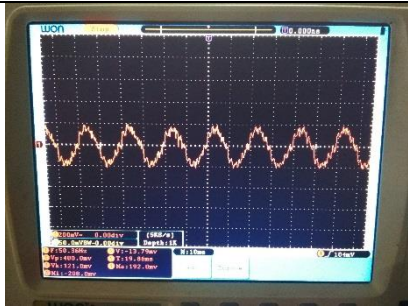
Spesifikasi isolator uji

| | |
|-------------------------------------|---|
| Tipe | : BKB |
| Bahan | : Resin epoksi silane silika aluminium oksida |
| Dimensi, Panjang tanpa fitting (mm) | : 243 |
| Panjang dengan fitting (mm) | : 493 |
| Diameter (mm) | : 139 |
| Berat Isolator (gr) | : 950 |
| Jarak Flashover (mm) | : 353 |
| Jarak lintasan Arus Bocor (mm) | : 459 |

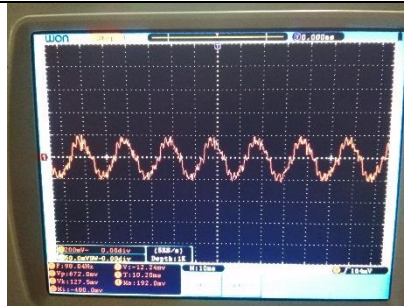
LAMPIRAN B
GELOMBANG TEGANGAN HASIL
PENGUKURAN

1. Pengujian Arus Bocor Variasi Tegangan Isolator Tipe Sirip BBB

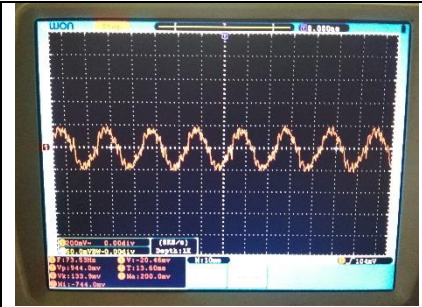
Tegangan Uji 11 KV



Data 1

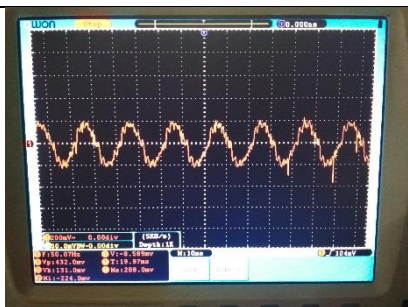


Data 2

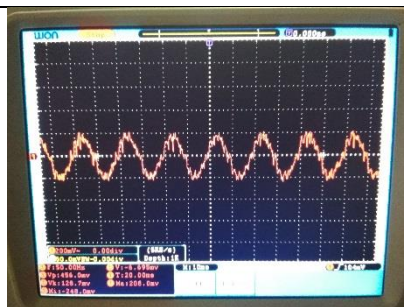


Data 3

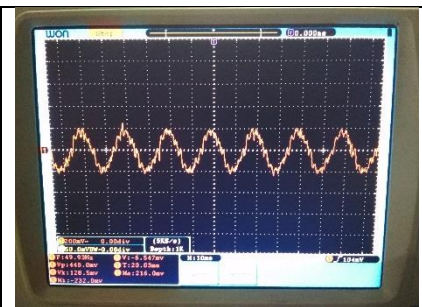
Tegangan Uji 12 KV



Data 1

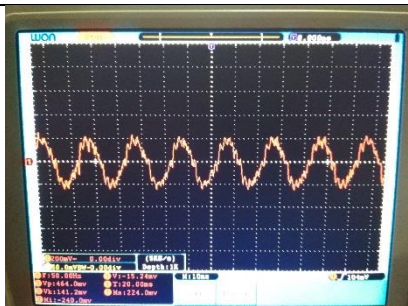


Data 2

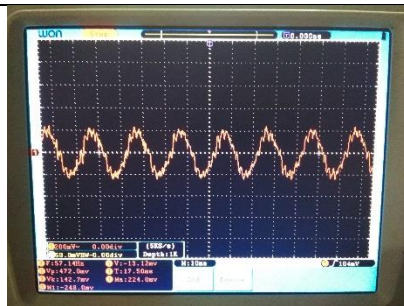


Data 3

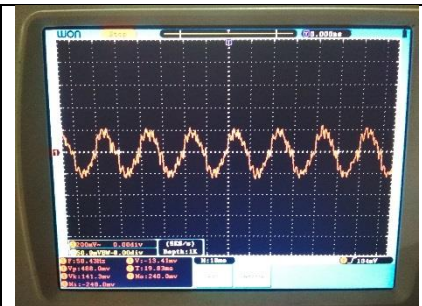
Tegangan Uji 13 KV



Data 1

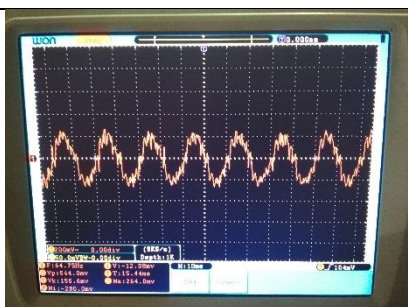


Data 2

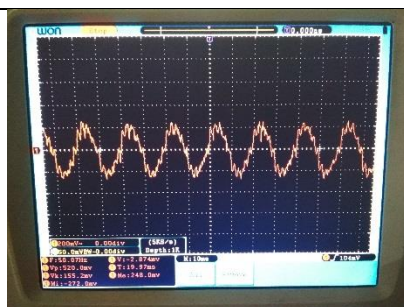


Data 3

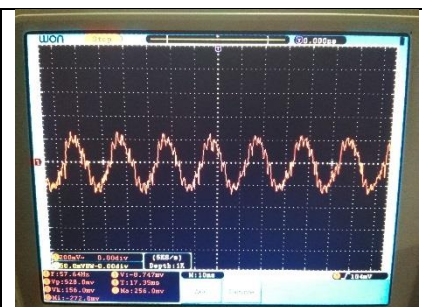
Tegangan Uji 14 KV



Data 1

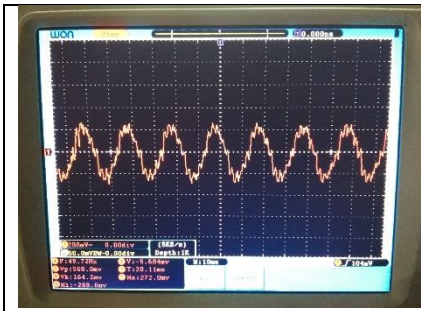


Data 2

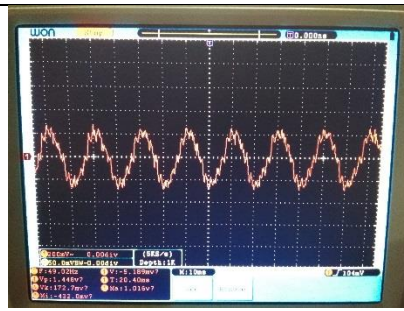


Data 3

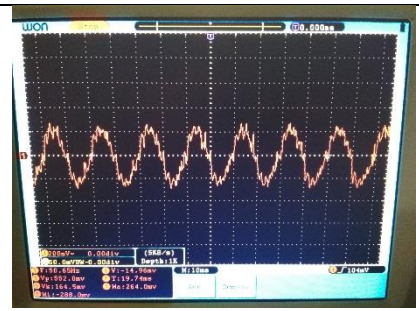
Tegangan Uji 15 KV



Data 1



Data 2

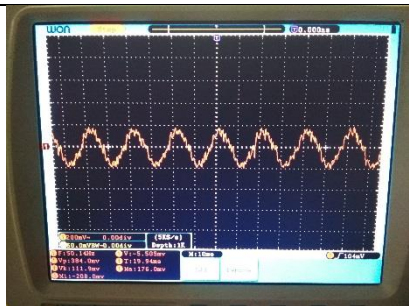


Data 3

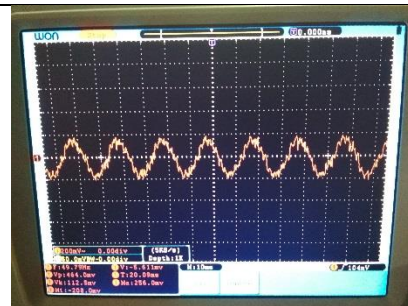
2. Pengujian Arus Bocor Variasi Suhu Isolator Tipe Sirip BBB

a. Tegangan Uji 11,547 kV - 10%

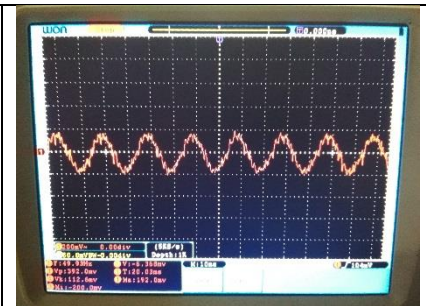
Suhu 25⁰C



Data 1

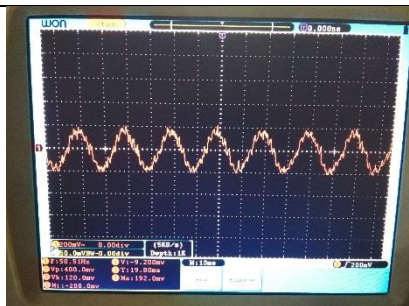


Data 2

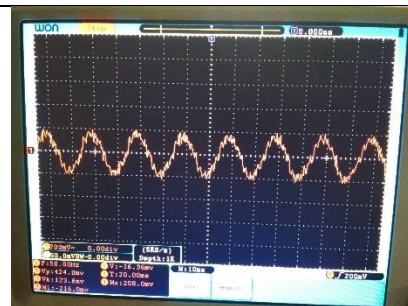


Data 3

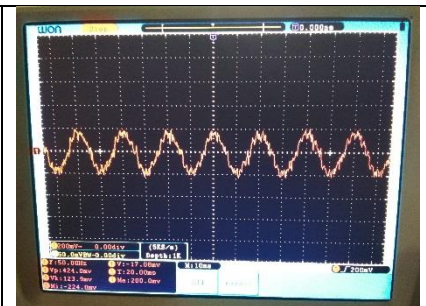
Suhu 28⁰C



Data 1

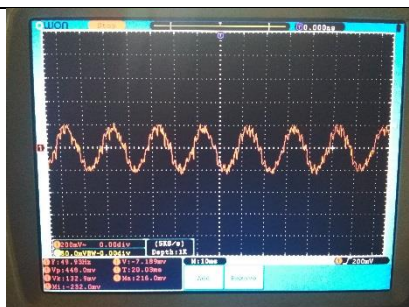


Data 2

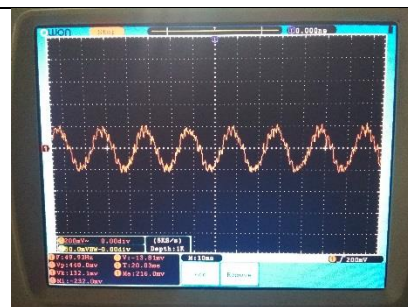


Data 3

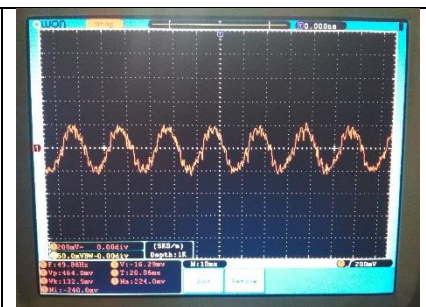
Suhu 31⁰C



Data 1

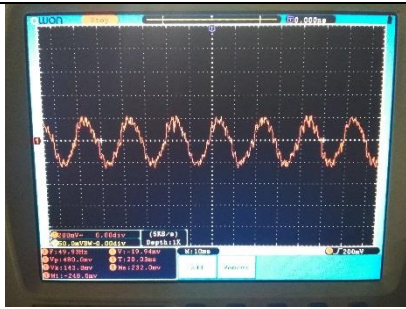


Data 2

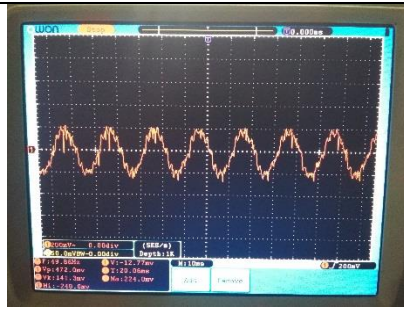


Data 3

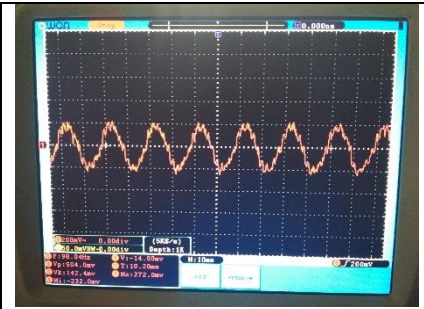
Suhu 31°C



Data 1

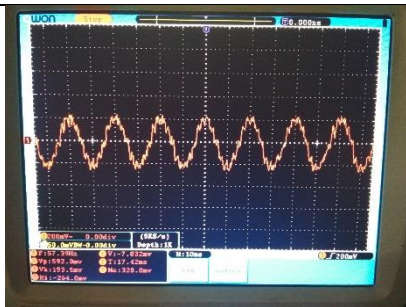


Data 2

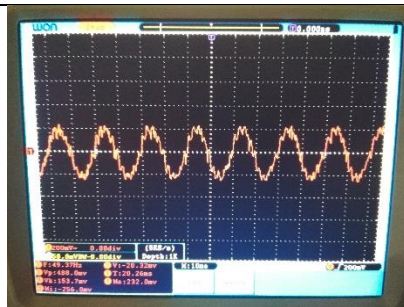


Data 3

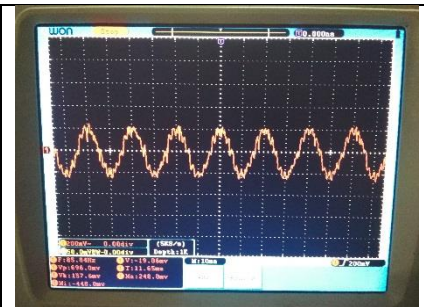
Suhu 34°C



Data 1

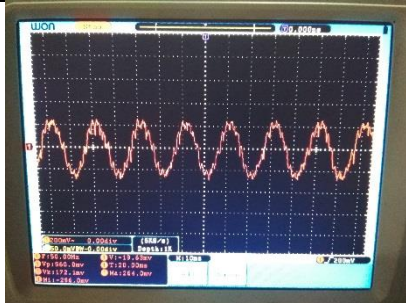


Data 2

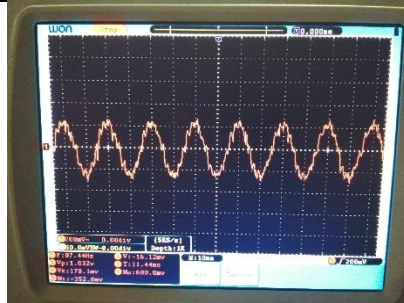


Data 3

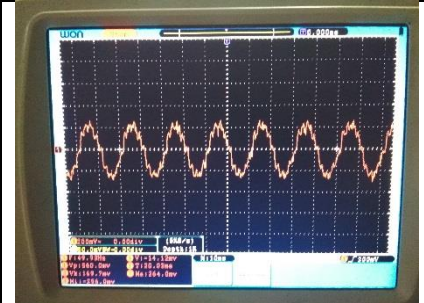
Suhu 37°C



Data 1



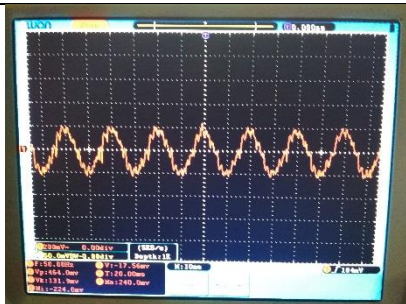
Data 2



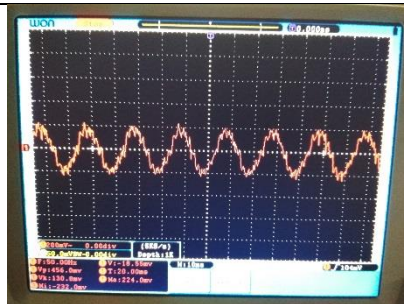
Data 3

c. Tegangan Uji 11,547 kV + 5%

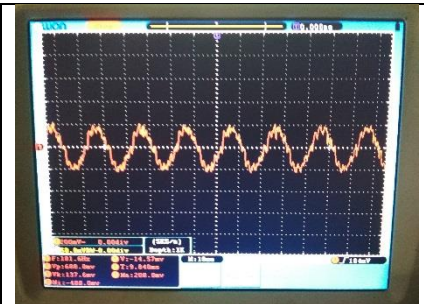
Suhu 25°C



Data 1

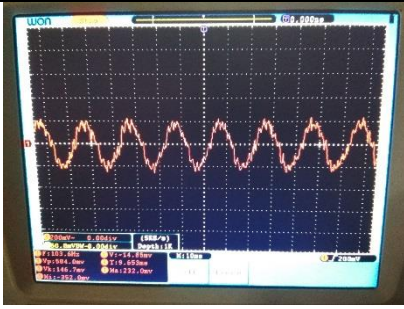


Data 2

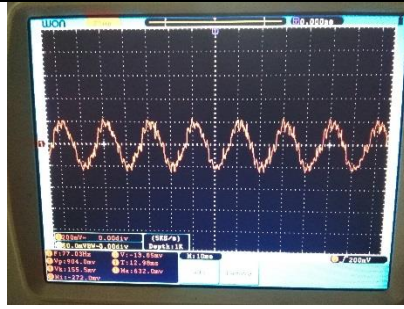


Data 3

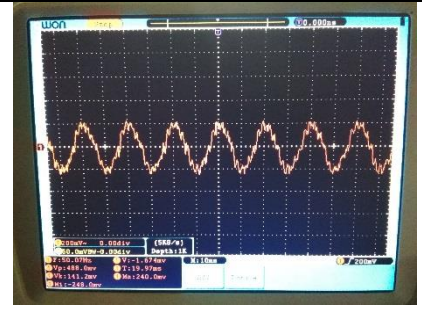
Suhu 28°C



Data 1

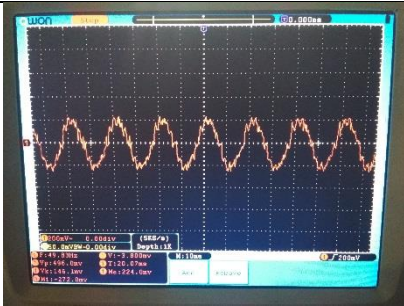


Data 2

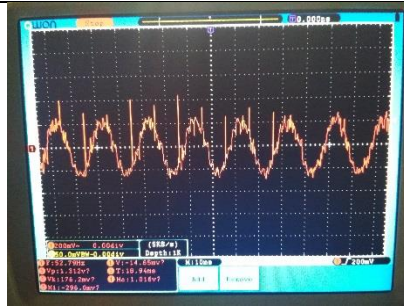


Data 3

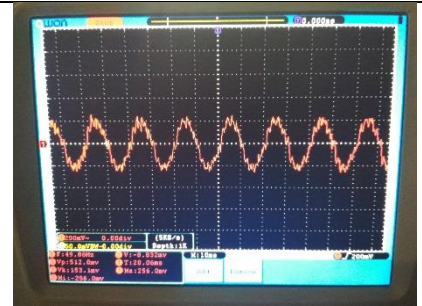
Suhu 31°C



Data 1

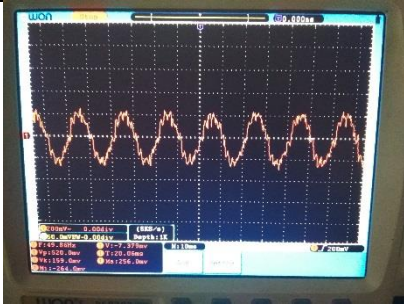


Data 2

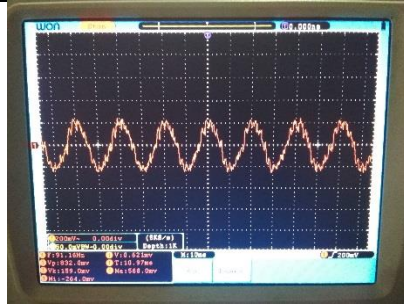


Data 3

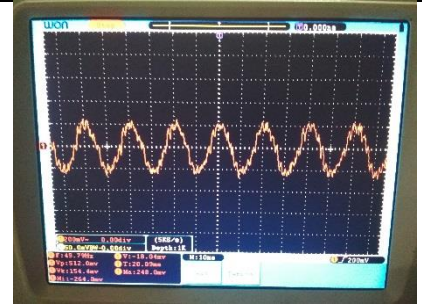
Suhu 34°C



Data 1

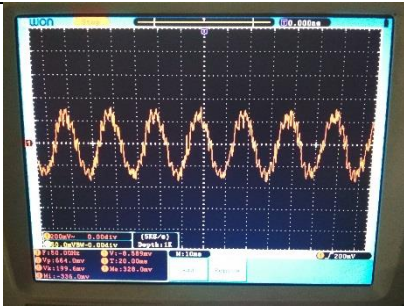


Data 2

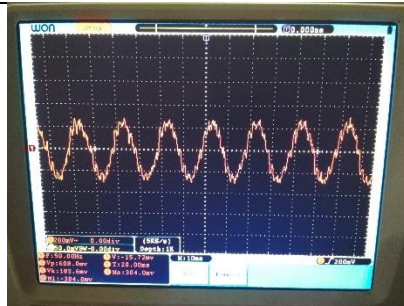


Data 3

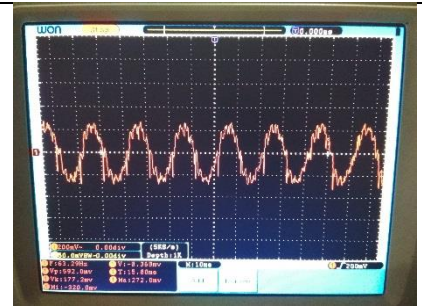
Suhu 37°C



Data 1



Data 2

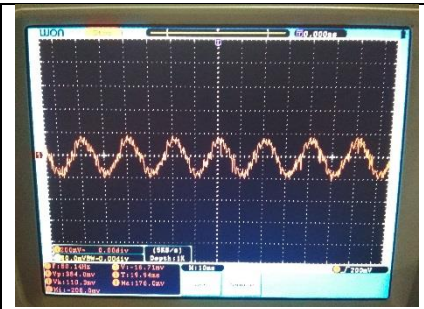
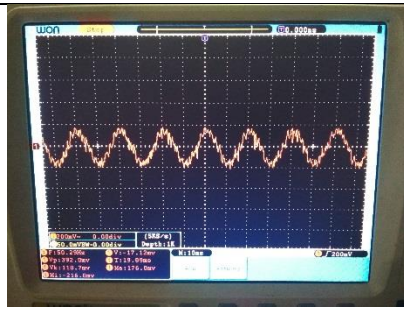
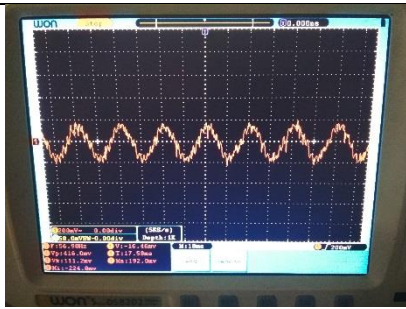


Data 3

3. Pengujian Arus Bocor Variasi Kelembaban Udara Tipe Sirip BBB

a. Tegangan Uji 11,547 kV - 10%

Kelembaban Udara 60%

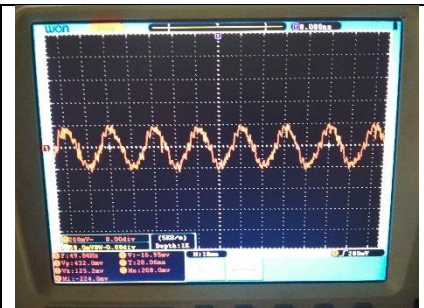
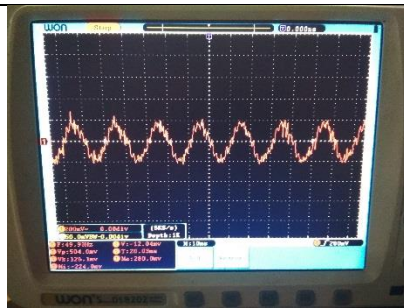
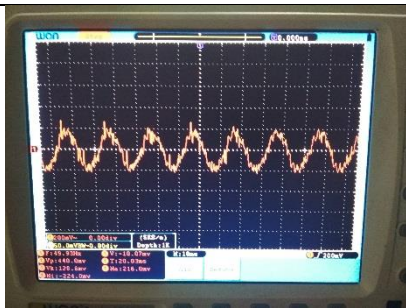


Data 1

Data 2

Data 3

Kelembaban Udara 70%

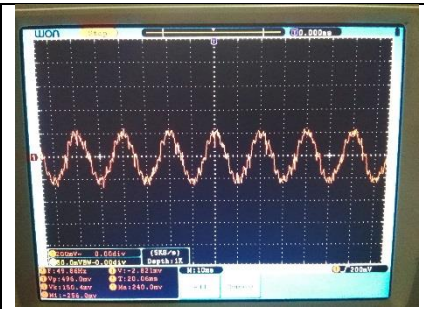
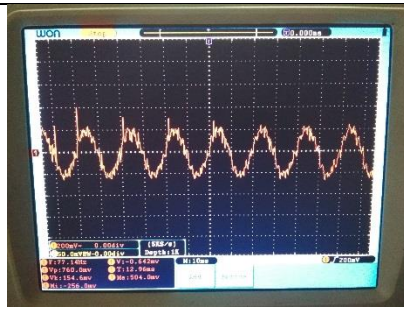
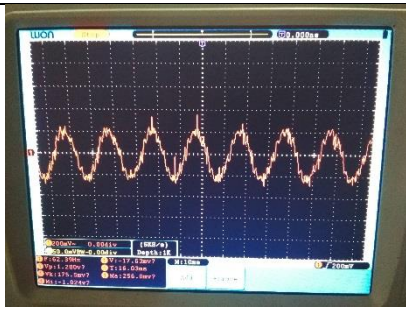


Data 1

Data 2

Data 3

Kelembaban Udara 80%

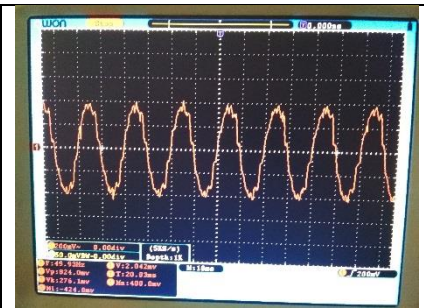
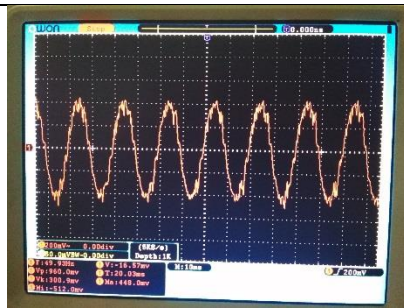
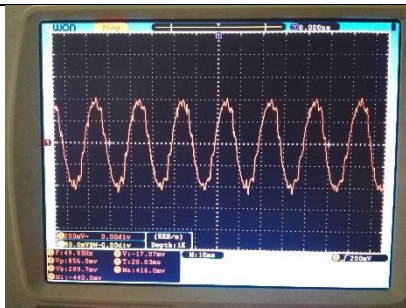


Data 1

Data 2

Data 3

Kelembaban Udara 90%

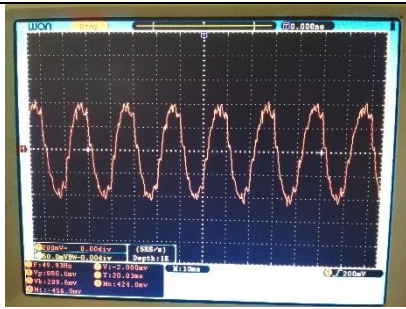


Data 1

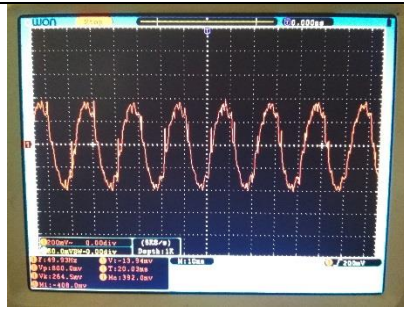
Data 2

Data 3

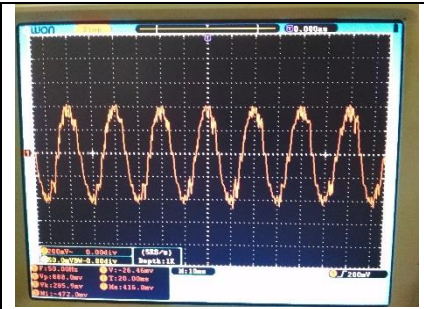
Kelembaban Udara 90%



Data 1

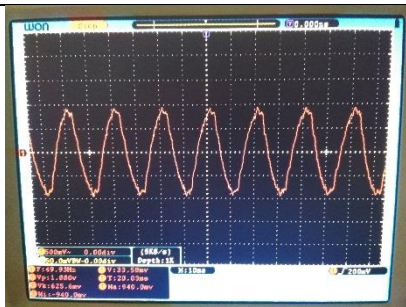


Data 2

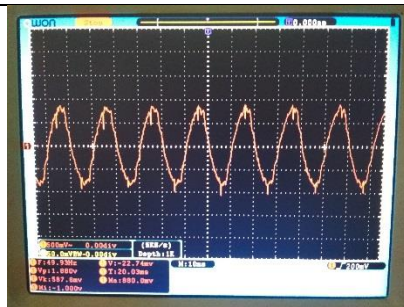


Data 3

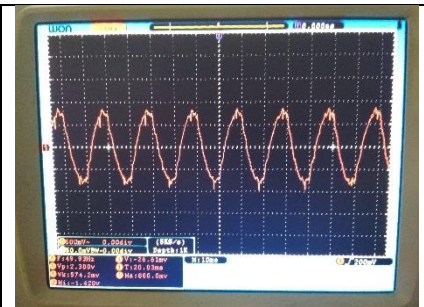
Kelembaban Udara 1000%



Data 1



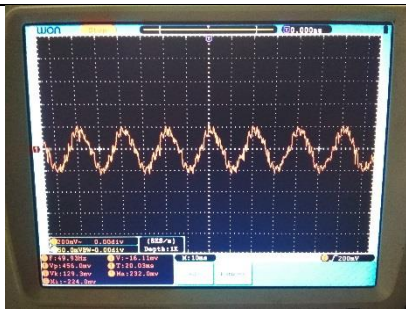
Data 2



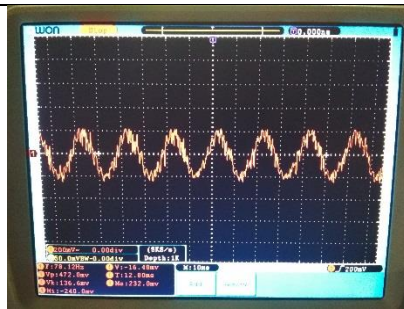
Data 3

c. Tegangan Uji 11,547 kV + 5%

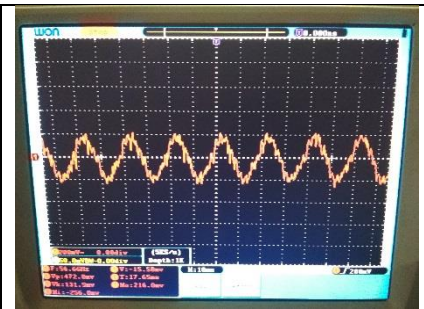
Kelembaban Udara 60%



Data 1

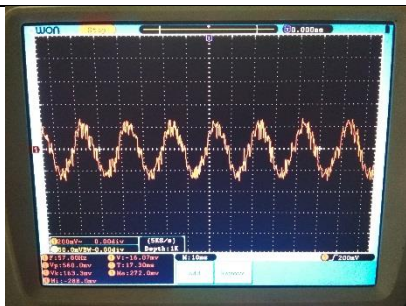


Data 2

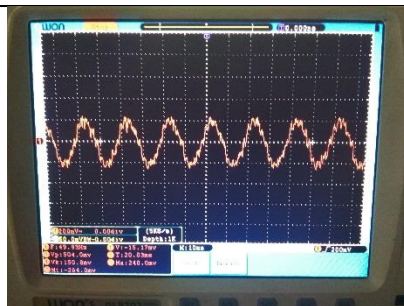


Data 3

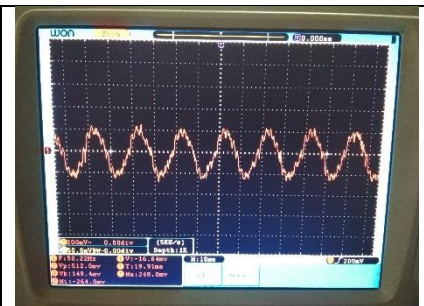
Kelembaban Udara 70%



Data 1

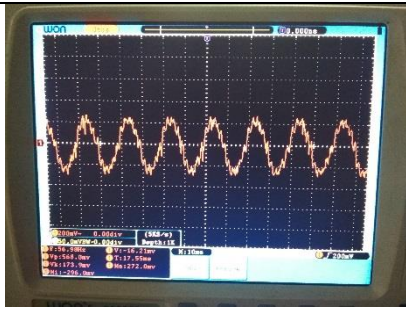


Data 2

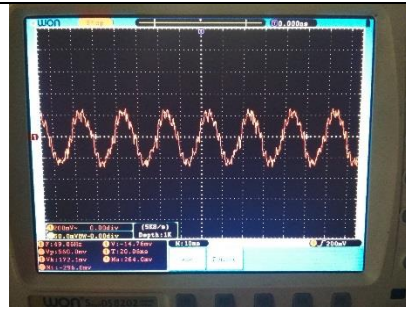


Data 3

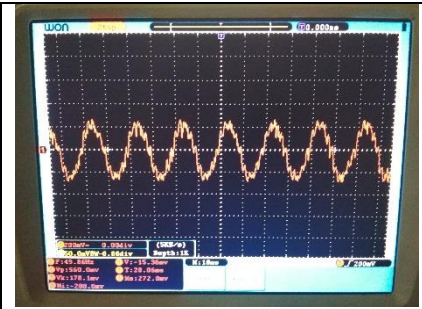
Kelembaban Udara 80%



Data 1

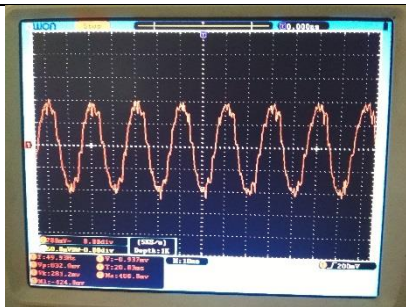


Data 2

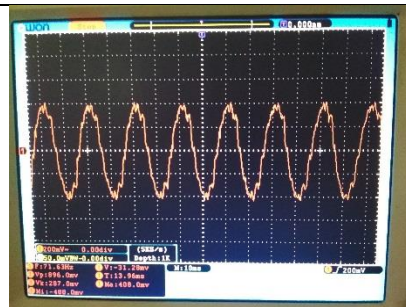


Data 3

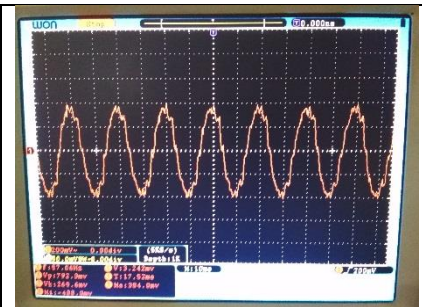
Kelembaban Udara 90%



Data 1

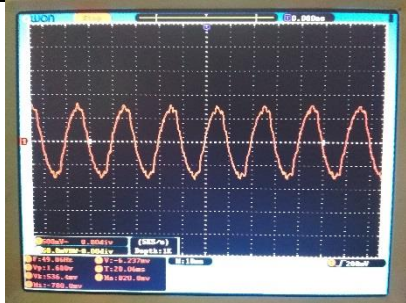


Data 2

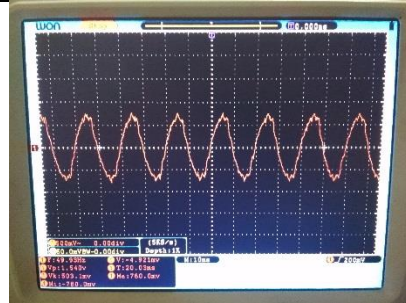


Data 3

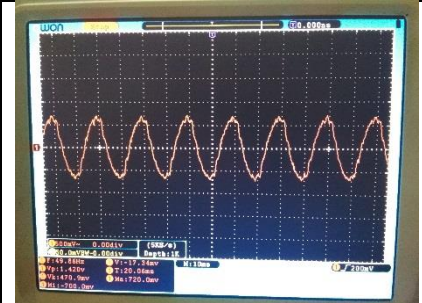
Kelembaban Udara 100%



Data 1



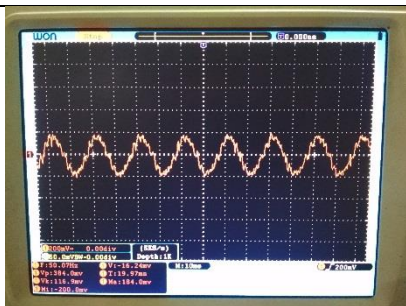
Data 2



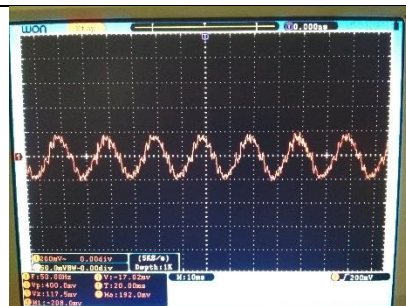
Data 3

4. Pengujian Arus Bocor Variasi Tegangan Isolator Tipe Sirip BKB

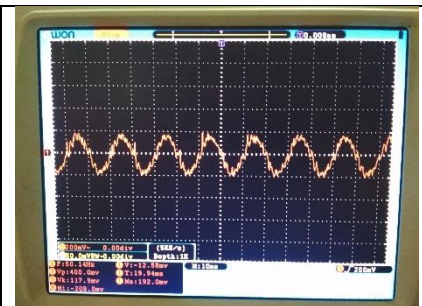
Tegangan Uji 11 KV



Data 1

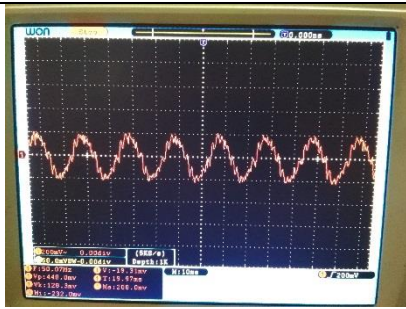


Data 2

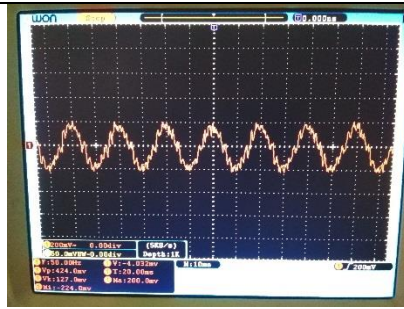


Data 3

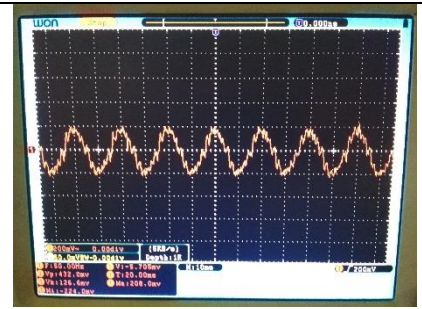
Tegangan Uji 12 KV



Data 1

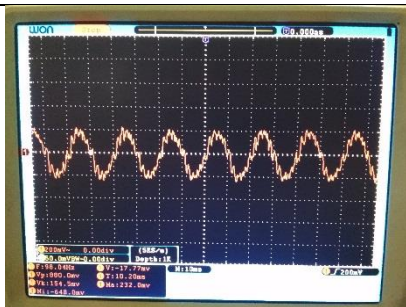


Data 2

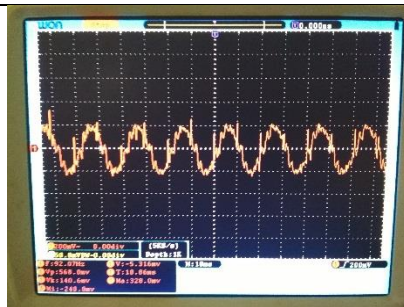


Data 3

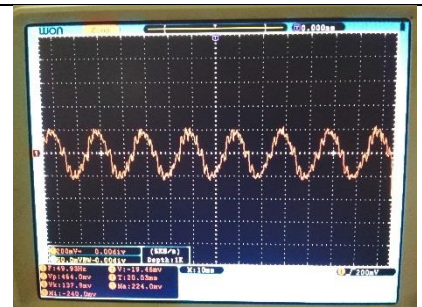
Tegangan Uji 13 KV



Data 1

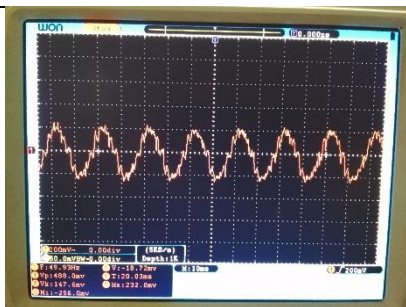


Data 2

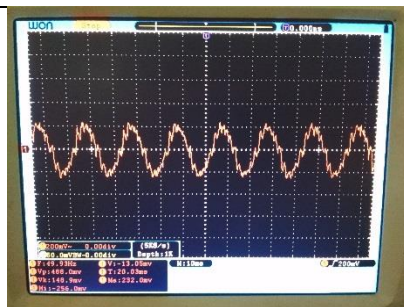


Data 3

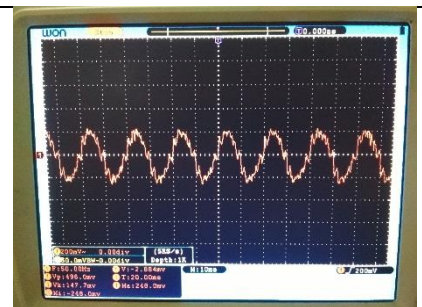
Tegangan Uji 14 KV



Data 1

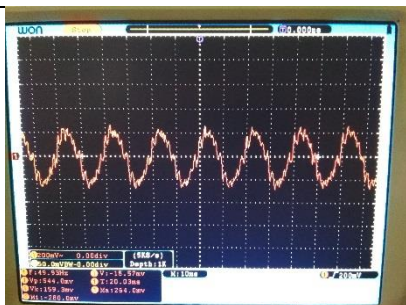


Data 2

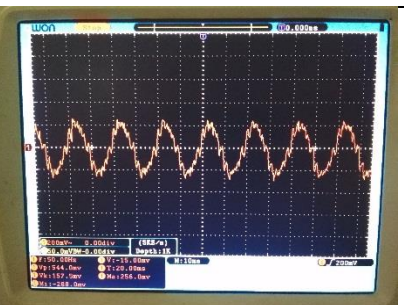


Data 3

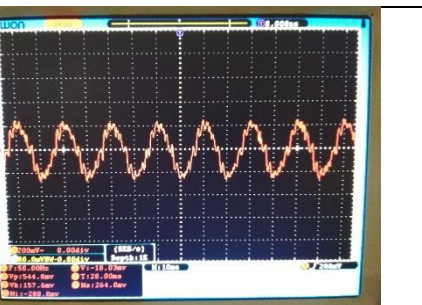
Tegangan Uji 15 KV



Data 1



Data 2

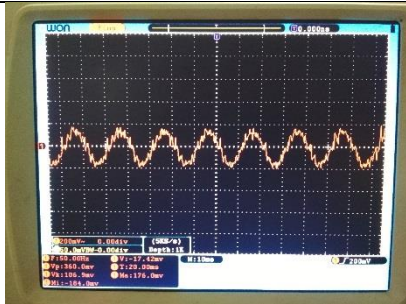


Data 3

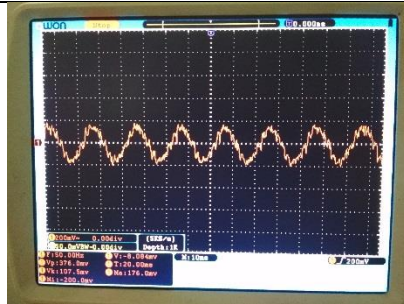
5. Pengujian Arus Bocor Variasi Suhu Isolator Tipe Sirip BKB

a. Tegangan Uji 11,547 kV - 10%

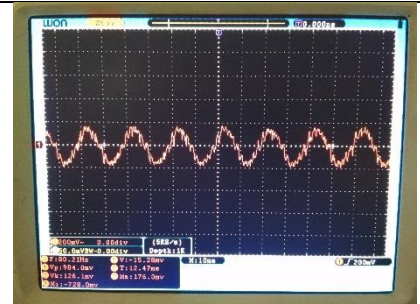
Suhu 25°C



Data 1

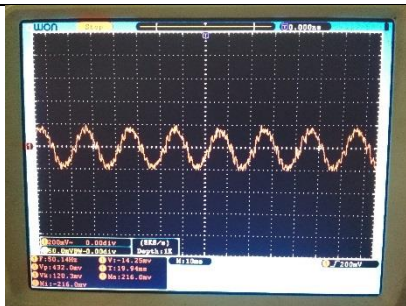


Data 2

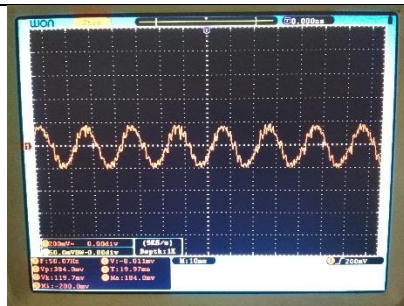


Data 3

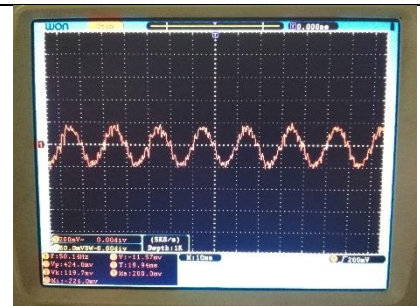
Suhu 28°C



Data 1

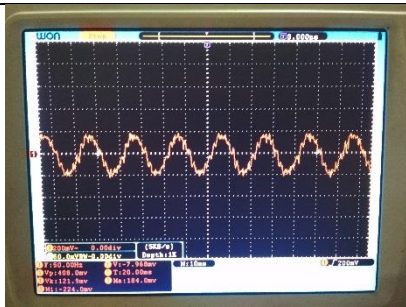


Data 2

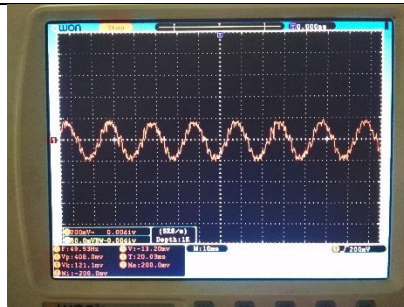


Data 3

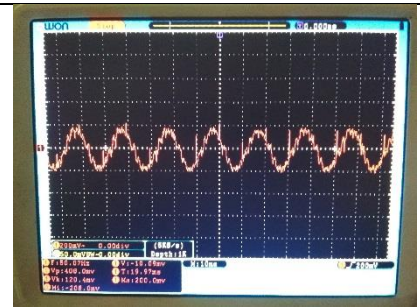
Suhu 31°C



Data 1

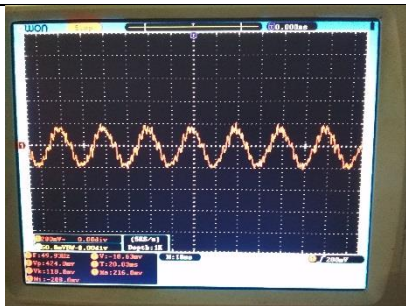


Data 2

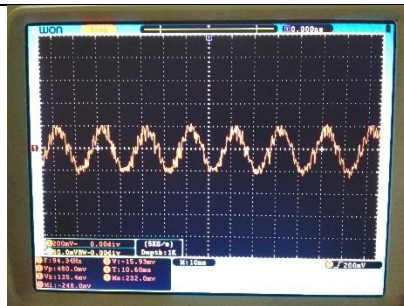


Data 3

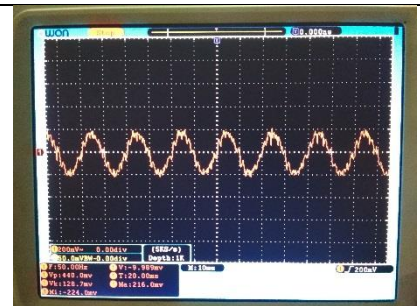
Suhu 34°C



Data 1

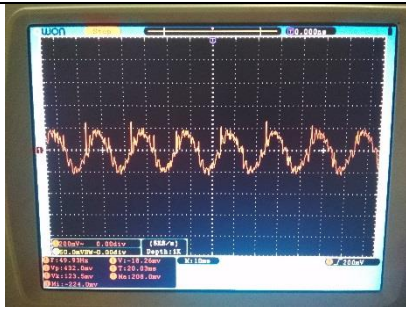


Data 2

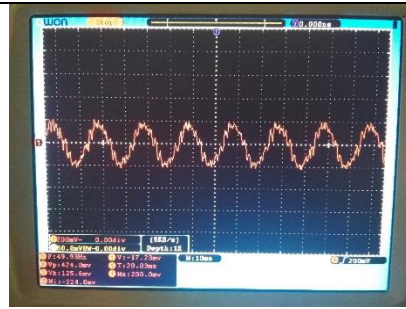


Data 3

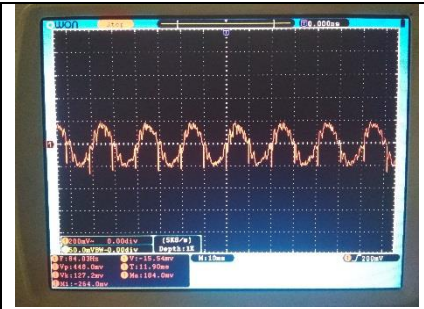
Suhu 37°C



Data 1



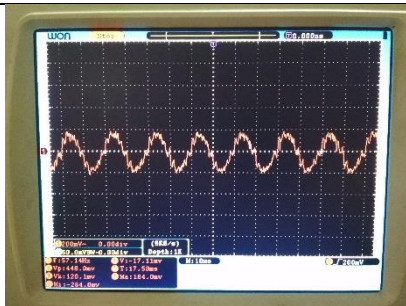
Data 2



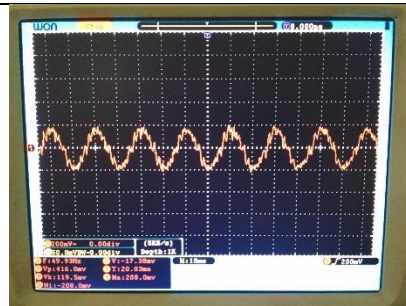
Data 3

b. Tegangan Uji 11,547 kV

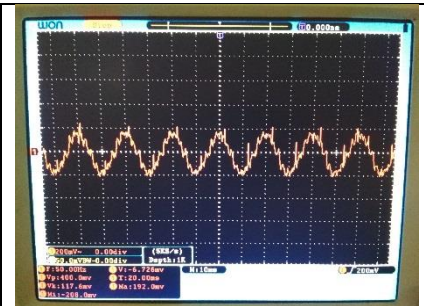
Suhu 25°C



Data 1

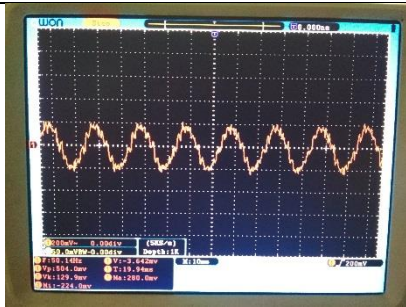


Data 2

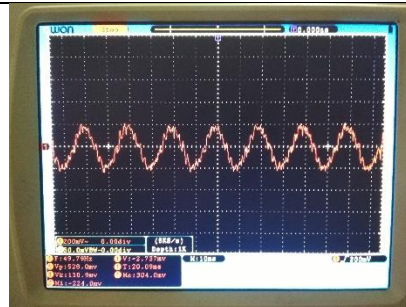


Data 3

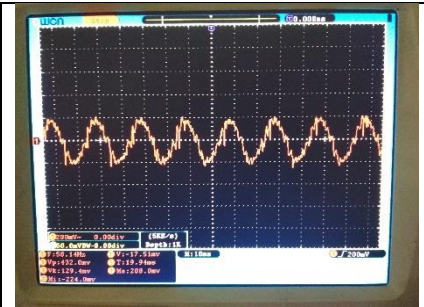
Suhu 28°C



Data 1

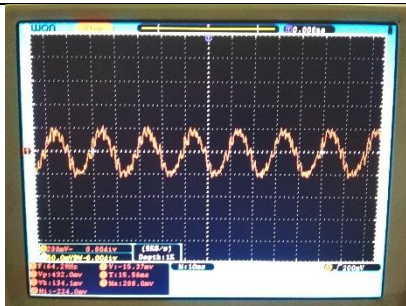


Data 2

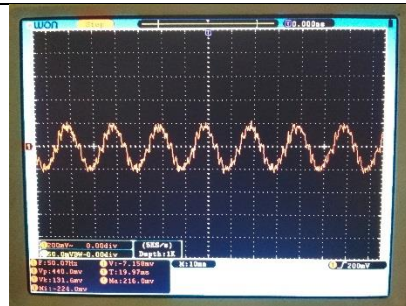


Data 3

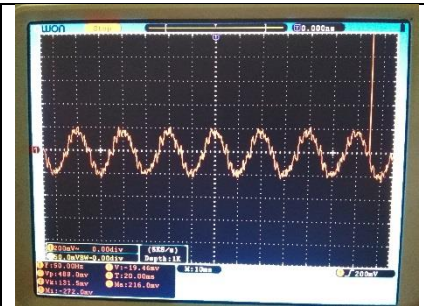
Suhu 31°C



Data 1

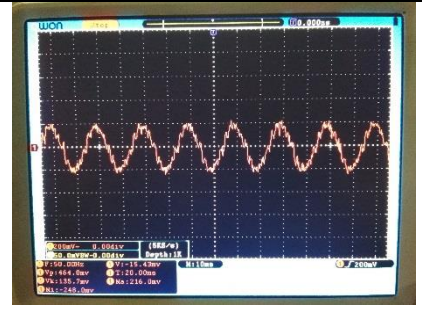
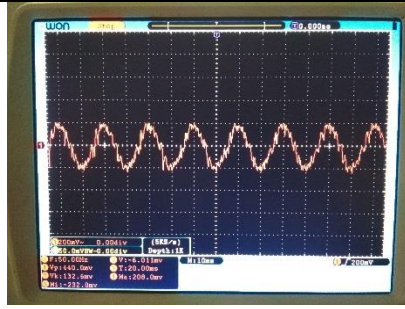
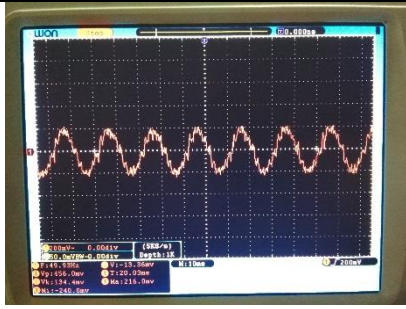


Data 2



Data 3

Suhu 34°C

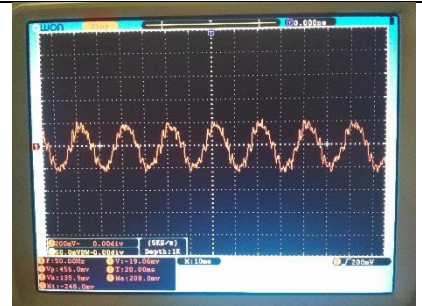
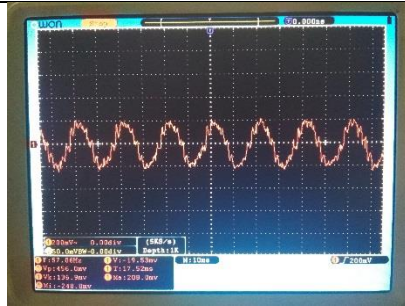
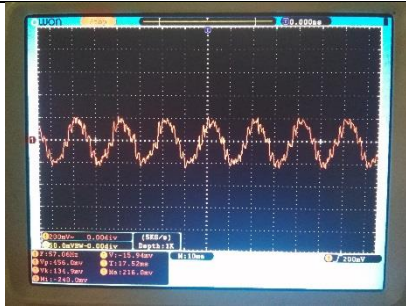


Data 1

Data 2

Data 3

Suhu 37°C



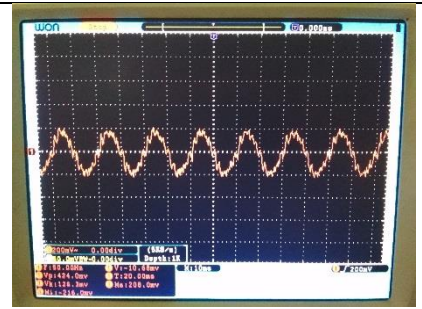
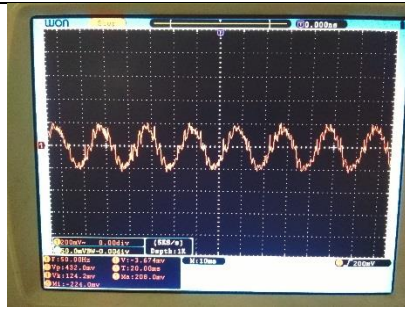
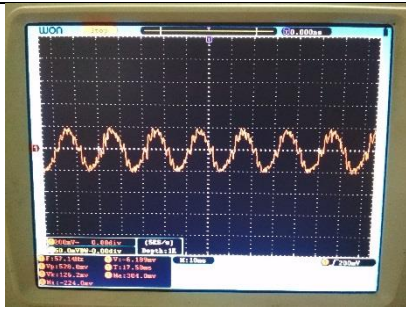
Data 1

Data 2

Data 3

c. Tegangan Uji 11,547 kV + 5%

Suhu 25°C

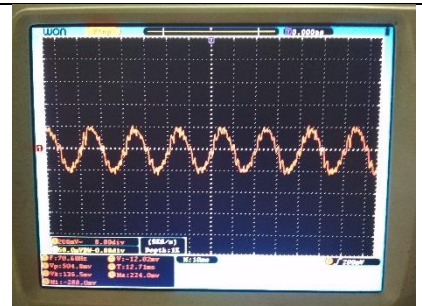
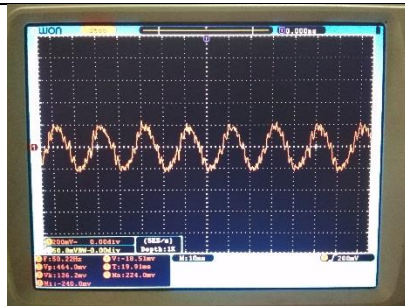
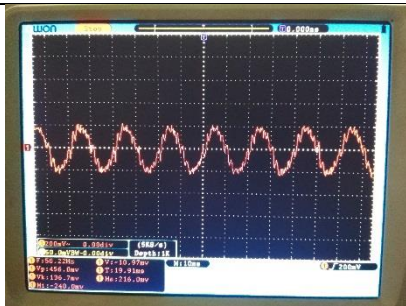


Data 1

Data 2

Data 3

Suhu 28°C

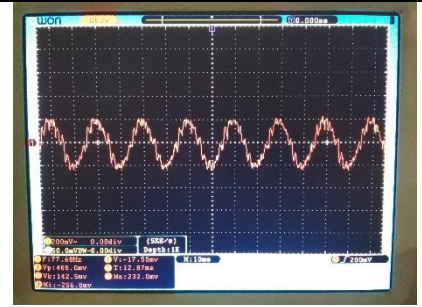
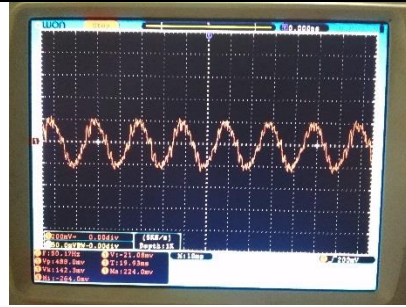
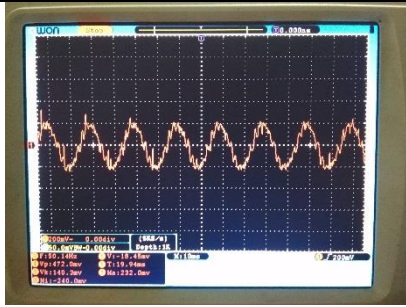


Data 1

Data 2

Data 3

Suhu 31°C

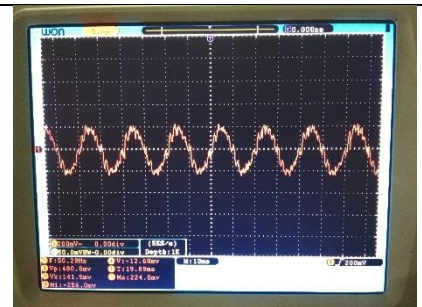
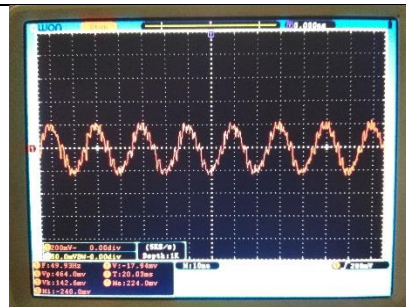
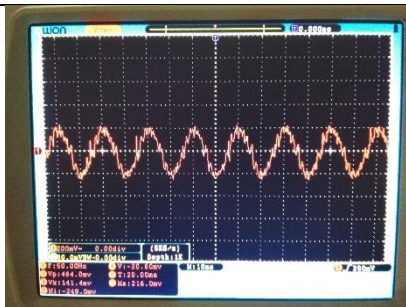


Data 1

Data 2

Data 3

Suhu 34°C

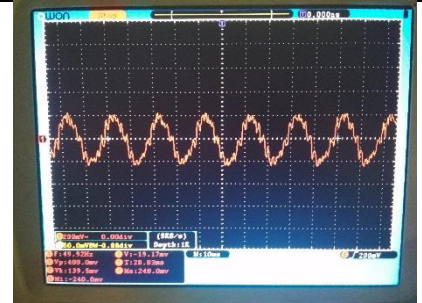
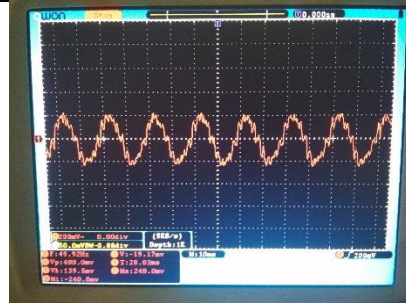
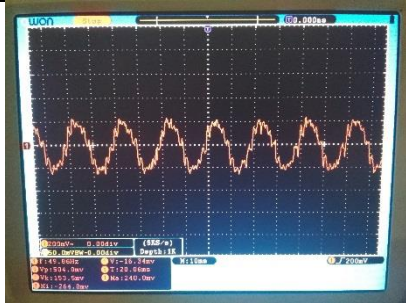


Data 1

Data 2

Data 3

Suhu 37°C



Data 1

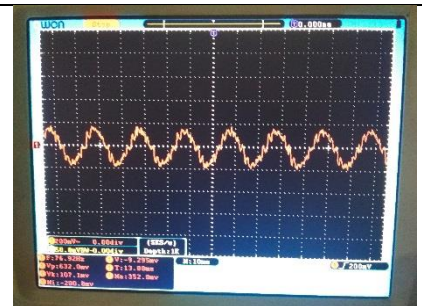
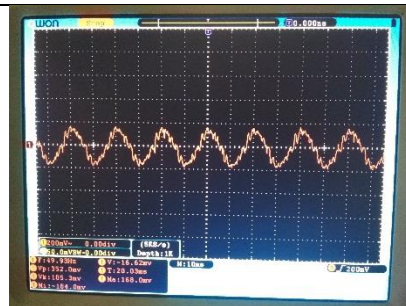
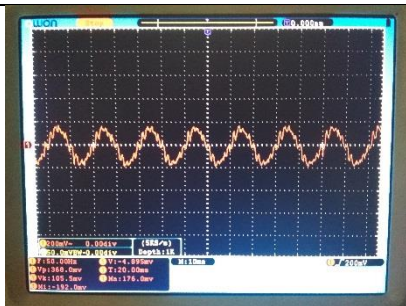
Data 2

Data 3

6. Pengujian Arus Bocor Variasi Kelembaban Udara Tipe Sirip BKB

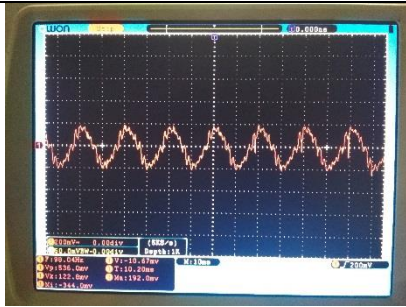
a. Tegangan Uji 11,547 kV - 10%

Kelembaban Udara 60%

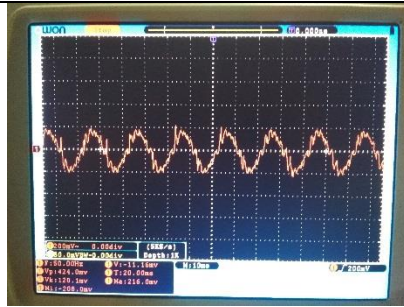


b. Tegangan Uji 11,547 kV

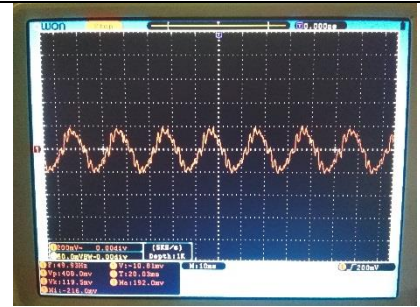
Kelembaban Udara 60%



Data 1

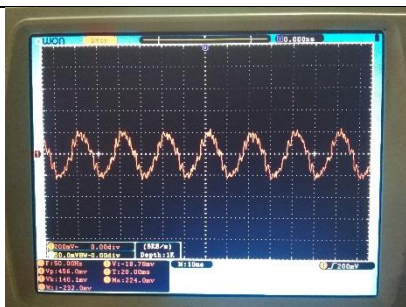


Data 2

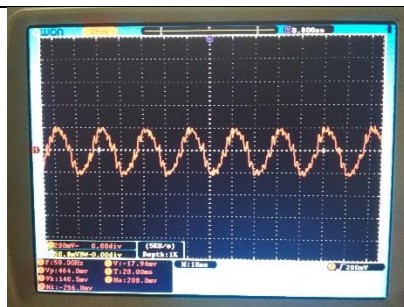


Data 3

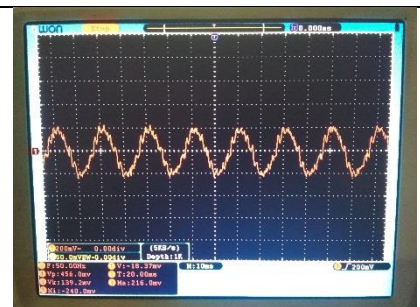
Kelembaban Udara 70%



Data 1



Data 2

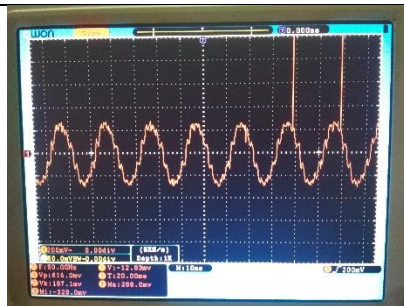


Data 3

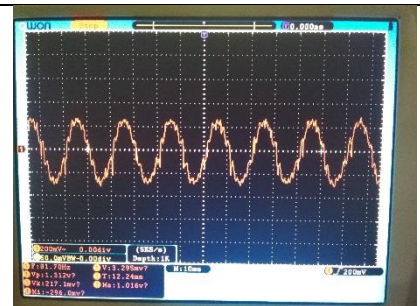
Kelembaban Udara 80%



Data 1

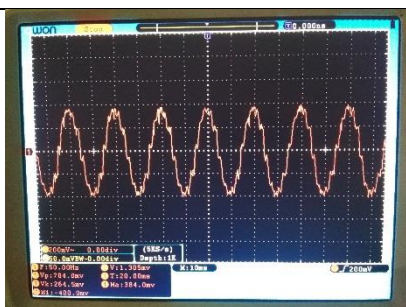


Data 2

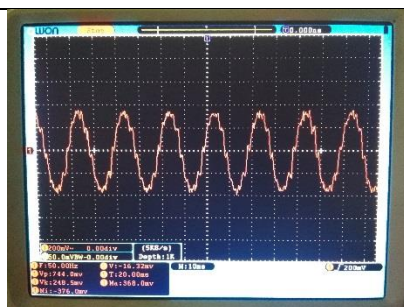


Data 3

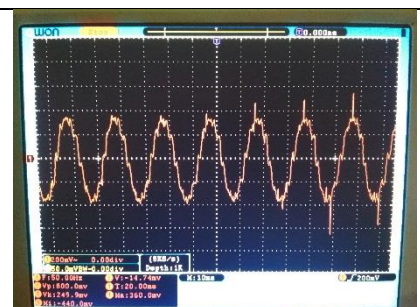
Kelembaban Udara 90%



Data 1

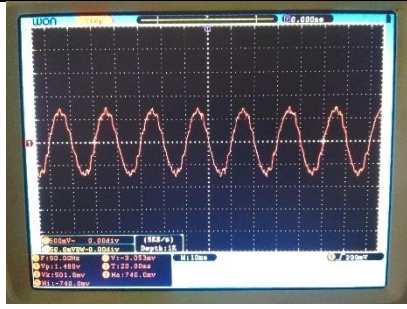


Data 2

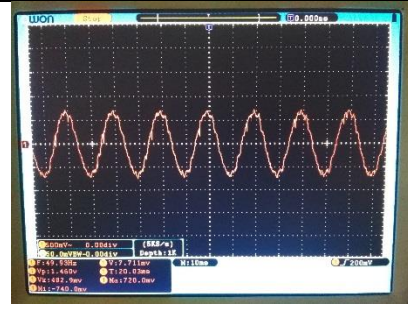


Data 3

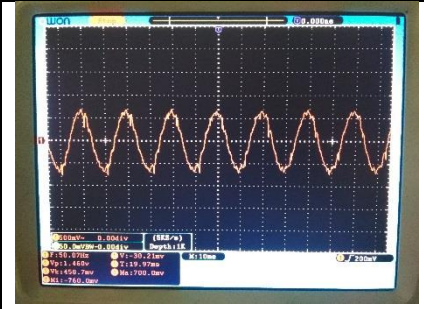
Kelembaban Udara 1000%



Data 1



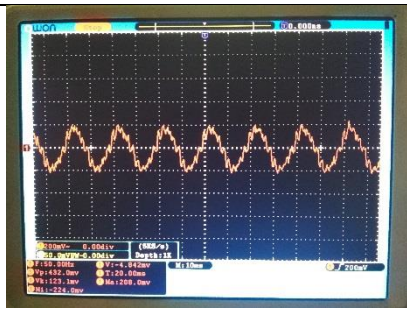
Data 2



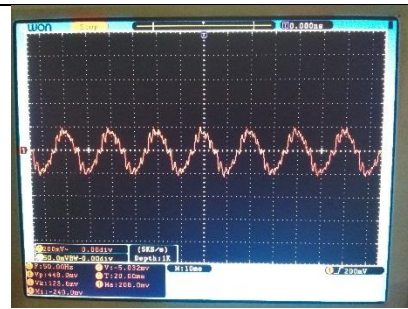
Data 3

c. Tegangan Uji 11,547 kV + 5%

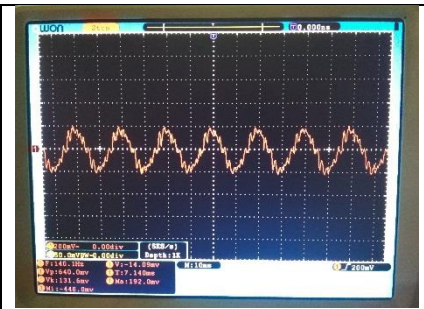
Kelembaban Udara 60%



Data 1

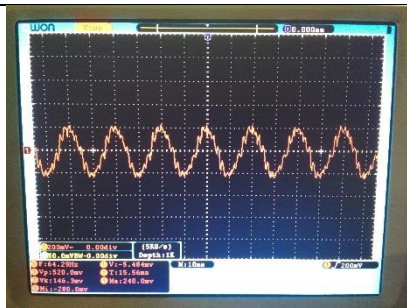


Data 2

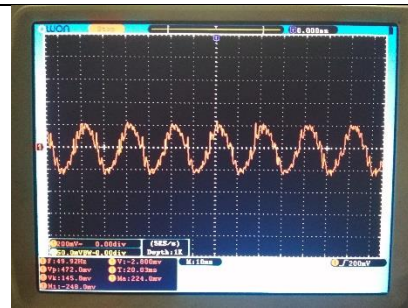


Data 3

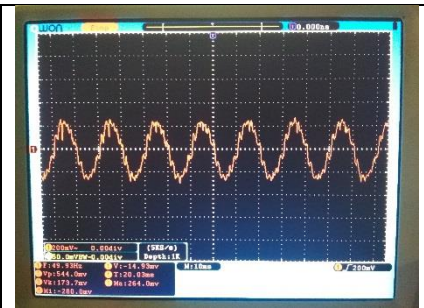
Kelembaban Udara 70%



Data 1

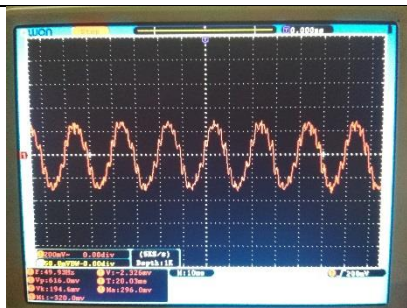


Data 2

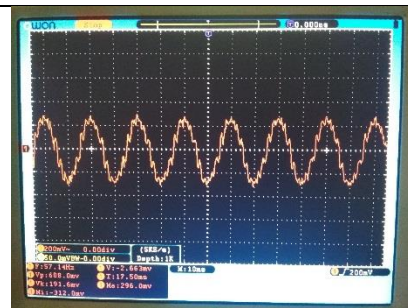


Data 3

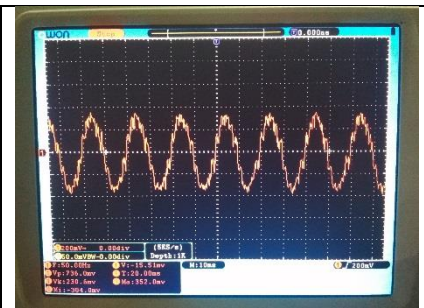
Kelembaban Udara 80%



Data 1



Data 2



Data 3

Kelembaban Udara 90%

LAMPIRAN C
MAKALAH TUGAS AKHIR

PEMBUATAN DAN ANALISIS KARAKTERISTIK ARUS BOCOR ISOLATOR POLIMER RESIN EPOKSI 20 KV DENGAN *FILLER* PASIR SILIKA DAN Al_2O_3 (ALUMINIUM OKSIDA) PADA KONDISI IKLIM TROPIS BUATAN

Gangsar Zaenurohman^{*}), Abdul Syakur dan Hermawan

Program Studi Sarjana Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*}E-mail: gangsarzaenurohman@gmail.com

Abstrak

Meningkatnya pertumbuhan penduduk dan industri harus disertai dengan suplai energi listrik yang memadai dan distribusi listrik yang handal. Salah satu komponen untuk menunjang kehandalan adalah isolator. Isolator berfungsi untuk mengisolir suatu konduktor bertegangan dengan kerangka penyangga sehingga tidak ada arus listrik mengalir. Salah satu bahan isolator adalah resin epoksi. Isolator resin epoksi memiliki kelebihan dibandingkan dengan porselen dan gelas, yaitu memiliki bobot yang lebih ringan. Isolator jenis ini tergolong baru, sehingga untuk meningkatkan performa isolator adalah dengan menambahkan bahan pengisi. Isolator ini merupakan isolator pasangan luar dimana kinerja isolator dipengaruhi oleh kondisi lingkungan sekitar. Wilayah Indonesia memiliki iklim tropis yang mana isolator terpengaruh oleh kondisi lingkungan ini. Pada penelitian ini, dipaparkan pengaruh suhu dan kelembaban udara terhadap nilai arus bocor isolator 20 kV bahan resin epoksi dengan pengisi pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium Oksida) tipe sirip BBB dan BKB. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan suhu dan kelembaban udara mempengaruhi nilai arus bocor. Pada variasi suhu, nilai arus bocor meningkat seiring dengan kenaikan suhu. Untuk variasi kelembaban udara, nilai arus bocor juga meningkat seiring dengan kenaikan kelembaban udara. Namun pada variasi kelembaban udara 100%, nilai arus bocor meningkat sangat drastis karena uap air di dalam chamber pengujian terlalu jenuh.

Kata kunci: isolator, resin epoksi, pasir silika, Al_2O_3 , iklim tropis, suhu, kelembaban udara, arus bocor

Abstract

Increase of the citizen population and industry must be accompanied by adequate electricity supply and reliable electrical energy distribution. One component to support reliability an insulator. The insulator serve to isolate a conductor with a support frame so that no electric current flows. One of the insulator materials is epoxy resin. Insulators with epoxy resin have advantages compared to porcelain and glass, which has lighter weight. This type of insulator is still relatively new, so to improve the performance of the insulator is to add fillers. This insulator is an outdoor insulator where the performance of the insulator influenced by the surrounding environment. Indonesia has a tropical climate where insulators are directly exposed to these environmental conditions. In this study, the effect of temperature and air humidity against the value of leakage current for 20 kV epoxy resin insulator with silica sand and Al_2O_3 (Aluminium Oxide) as fillers with BBB and BKB fin type. The results show that changes in temperature and air humidity affect the value of the leakage current. At variations in temperature, the value of the leakage current increases with increasing temperature. For variations in air humidity, the value of leakage currents also increases with increasing air humidity. But in a variation of 100% air humidity, the value of the leakage current increases very dramatically because the water vapor in the test chamber is too saturated.

Keywords: insulator, epoxy resin, silica sand, Al_2O_3 , tropical climate, temperature, air humidity, leakage current

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Seiring meningkatnya pertumbuhan penduduk dan industri di Indonesia harus disertai dengan peningkatan sarana dan prasarana suplai energi listrik yang memadai. Energi listrik yang disediakan oleh produsen diharapkan dapat memenuhi

tingkat kebutuhan energi listrik yang akan semakin meningkat di masa mendatang dan tetap kontinyu dalam kondisi apapun serta meminimalisir gangguan yang terjadi. Untuk menunjang kehandalan sistem distribusi energi listrik ini diperlukan kinerja isolator yang mumpuni.

Isolator berfungsi untuk mengisolir suatu konduktor bertegangan dengan kerangka penyangga yang dikembumikan sehingga tidak ada arus listrik mengalir dari konduktor tersebut ke tanah[1]. Bahan isolator yang umum digunakan adalah bahan porselen dan kaca. Saat ini, isolator dengan bahan polimer mulai banyak digunakan. Isolator polimer mulai dikembangkan pada tahun 1963 dan ditingkatkan hingga saat ini. Isolator polimer dikenal juga dengan sebutan isolator non-keramik atau isolator komposit[2]. Isolator polimer memiliki kelebihan dibandingkan dengan isolator porselen dan gelas, yaitu lebih ringan, sifat rugi dielektrik yang lebih kecil, resistivitas volume yang lebih tinggi, proses produksi relatif lebih cepat, dan biaya produksi yang lebih murah[3].

Penggunaan isolator polimer untuk pasangan luar akan mengalami pengaruh simultan dari terpaan iklim dan cuaca yang terjadi. Indonesia yang terletak pada garis katulistiwa merupakan wilayah beriklim tropis dimana rata-rata lama penyinaran matahari sekitar 12 jam dan memiliki kelembaban udara yang tinggi. Kontaminasi pada permukaan isolator menjadi masalah besar terhadap kinerja isolator pasangan luar. Pada daerah pantai dan industri terdapat kontaminan garam, debu, dan bahan kimia yang dapat menempel pada permukaan isolator sehingga menyebabkan kristalisasi yang berakibat bertambahnya kekasaran permukaan material isolasi. Pada kondisi lingkungan dengan polusi dan kelembaban tinggi, lapisan polutan yang menempel pada permukaan terjadi pembasahan menyebabkan arus bocor mengalir sehingga terjadi pemanasan polutan pada lapisan. Lapisan polutan yang menempel pada permukaan isolator dapat membentuk pita kering (*dry band*) akibat dialiri arus bocor yang terus menerus. Kondisi ini pada tegangan tertentu dapat menyebabkan pelepasan muatan melintasi pita kering. Busur pelepasan muatan dapat memanjang sehingga terjadi flashover yang melalui seluruh permukaan isolator[4]. Untuk mengevaluasi ketahanan jangka panjang dari rancangan isolator resin epoksi pasangan luar, diperlukan penelitian mengenai parameter listrik dari isolator, yaitu arus bocor. Faktor utama yang mempengaruhi performa material isolasi polimer adalah sifat menolak air atau hidrofobik.

Pada tugas akhir ini dilakukan pembuatan dan analisis isolator resin epoksi dengan bahan pengisi pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium Oksida). Material uji yang digunakan dalam tugas akhir adalah resin epoksi yang dibentuk dari *bisphenol A - epichlorohydrin* (DGEBA) dan *polyaminoamide* yang dicampur dengan silane, pasir silika, dan Al_2O_3 . Untuk komposisi sampel uji yaitu 35% DGEBA, 35% *Polyaminoamide*, 15% Silane, 7,5% pasir silika, dan 7,5% Al_2O_3 . Dengan tipe sirip isolator yaitu tipe sirip besar-besar-besar (BBB) dan tipe sirip besar-kecil-besar (BKB) dengan jumlah sirip tiga buah. Pengujian yang dilakukan adalah arus bocor dengan pengaruh variasi tegangan uji, variasi suhu udara dan variasi kelembaban udara.

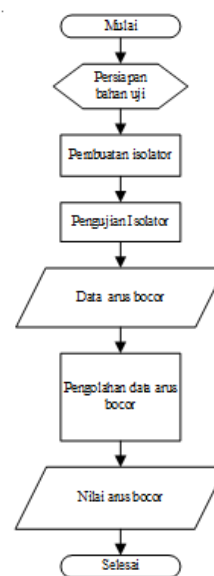
1.2. Tujuan

Adapun tujuan utama dari pembuatan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui cara pembuatan isolator.
2. Melakukan pengukuran untuk memperoleh karakteristik arus bocor bahan isolator polimer resin epoksi pengisi pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium Oksida) pada variasi tegangan, suhu dan kelembaban udara.
3. Mengetahui perbedaan karakteristik arus bocor pada isolator polimer resin epoksi pengisi pasir silika dan Al_2O_3 (Aluminium Oksida) tipe sirip besar-besar-besar (BBB) dan tipe sirip besar-kecil-besar (BKB).

2. Metode

Berikut disajikan diagram alir penelitian yang digunakan dalam penelitian ini



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.1. Pembuatan Isolator

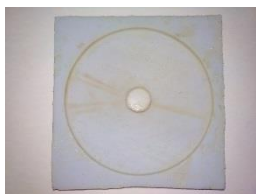
2.1.1 Alat dan Bahan

- | | | |
|----------------------|-------------------|---------------|
| 1. Resin Epoksi A | 9. Catalyst | 17. Plastisin |
| 2. Hardener B | 10. Gelas ukur | 18. Gunting |
| 3. Pasir silika | 11. Pengaduk kaca | 19. Gergaji |
| 4. Aluminium oksida | 12. Kayu | 20. Amplas |
| 5. Silane | 13. Kaca | 21. Penggaris |
| 6. Pipa PVC | 14. Selotip | 22. Spidol |
| 7. Fitting aluminium | 15. Gelas plastik | 23. Timbangan |
| 8. Silicone rubber | 16. Mika | |

2.1.2 Langkah Pembuatan

1. Pembuatan cetakan

- Membuat model sela dan sirip isolator
- Menghaluskan model sela dan sirip isolator dengan amplas
- Menyiapkan cetakan kaca dan melapisinya dengan selotip
- Menyiapkan *Silicone Rubber* RTV-52 dan *Catalyst* dan mencampurkan kedua bahan tersebut sesuai kebutuhan.
- Menuangkan campuran ke dalam cetakan kaca dan mendiamkan selama 1x24 jam
- Melepaskan *silicone rubber* yang sudah mengeras dari cetakan dan lepaskan model sela dan sirip isolator dari *silicone rubber*



Gambar 2. Cetakan sirip besar isolator

2. Pembuatan alat

Bahan dasar material isolator yang digunakan adalah polimer resin epoksi dengan *Diglycidyl Ether of Bisphenol A* (DGEBA) dan *Polyaminoamide* sebagai bahan pengeras serta silane dengan pengisi pasir silika dan Al_2O_3 (aluminium oksida) dengan komposisi RTV23 (DGEBA 35 %, *Polyaminoamide* 35%, Silane 15%, Pasir silika 7,5%, dan Al_2O_3 7,5%)

- Menyiapkan cetakan sirip besar isolator yang telah dibuat dan melapisi permukaan cetakan menggunakan mika
- Menyiapkan 49 gram resin epoksi, 49 gram *hardener*, 21 gram silane, 10,5 gram pasir silika, dan 10,5 gram aluminium oksida
- Mencampurkan resin epoksi, silane, pasir silika, dan aluminium oksida pada gelas plastik
- Menambahkan *hardener*
- Menuangkan campuran ke dalam cetakan dan mendiamkan selama 2 x 24 jam



Gambar 3. Proses pengeringan isolator

- Membuka cetakan



Gambar 4. Proses pembukaan cetakan

- Membubut alat sesuai dengan desain

3. Penyatuan alat

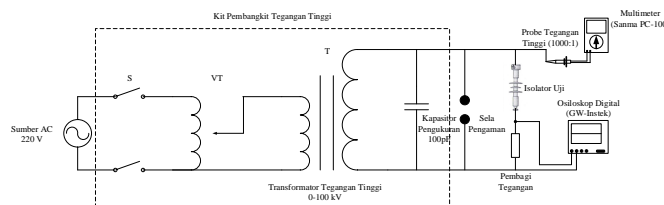
- Menyiapkan 2 inti, 5 sirip besar, 1 sirip kecil, 8 sela 5 cm, dan 2 pasang *fitting* aluminium
- Menyiapkan perekat yang dibuat dari campuran resin epoksi dan *hardener*
- Merekatkan sirip pada inti menggunakan perekat yang telah dibuat
- Mengulagi langkah 2 untuk sirip dan sambungan
- Merekatkan aluminium pada bagian ujung-ujung inti menggunakan perekat tersebut
- Mendiamkan selama 1 x 24 jam agar perekat tersebut mengering



(a) Isolator BBB (b) Isolator BKB
Gambar 5 Isolator Uji

2.2. Peralatan Pengujian Arus Bocor

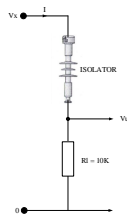
Untuk memperoleh data karakteristik arus bocor dari masing-masing sampel, maka dilakukan pengujian arus bocor dengan rangkaian pengujian sesuai yang ditunjukkan oleh Gambar 6.



Gambar 6. Rangkaian pengujian arus bocor

Pengamatan arus bocor ini memerlukan osiloskop sebagai alat bantu. Input tegangan yang masuk ke dalam osiloskop harus sesuai dengan karakteristik kemampuan osiloskop tersebut. Piranti pengamanan dan perlindungan bagi osiloskop diperlukan untuk membatasi

tegangan besar yang masuk ke dalam osiloskop dengan cara memasang rangkaian pembagi tegangan.



Gambar 7. Rangkaian pembagi tegangan

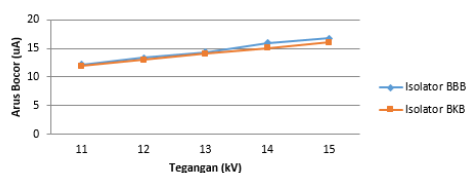
Pada Gambar 7 terdapat dua buah tahanan, yaitu isolator yang berfungsi sebagai resistor tegangan tinggi (R_h) dan resistor batu 10 K Ω 10W sebagai resistor tegangan rendah (R_l). V_u merupakan tegangan keluaran yang terbaca pada osiloskop dan I merupakan arus bocor yang mengalir pada isolator. Nilai arus bocor yang mengalir dapat dicari menggunakan Persamaan 1.

$$I = \frac{V_u}{10K} \quad (1)$$

3. Hasil dan Analisis

3.1. Pengukuran Arus Bocor Variasi Tegangan

Pengukuran arus bocor dengan variasi tegangan merepresentasikan kondisi perubahan tegangan yang dipikul oleh isolator pada jaringan distribusi tegangan menengah 20 kV. Pengukuran dilakukan dengan 5 kali variasi tegangan yaitu 11 kV, 12 kV, 13 kV, 14 kV, dan 15 kV. Pengukuran dilakukan dengan mengatur *chamber* pengujian dengan suhu 25°C dan kelembaban udara 60%. Grafik perbandingan nilai arus bocor rata-rata terhadap variasi tegangan adalah sebagai berikut :



Gambar 8. Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi tegangan

Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 8, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat tegangan uji yang diberikan pada isolator uji juga meningkat. Hal ini disebabkan ketika tegangan yang diterapkan pada bahan isolator meningkat, pelepasan muatan yang terjadi pada permukaan isolator akan semakin besar. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara tegangan dan arus bocor berbanding lurus, semakin besar tegangan yang diterapkan pada isolator maka arus bocor yang dihasilkan akan semakin besar.

Berdasarkan grafik pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih

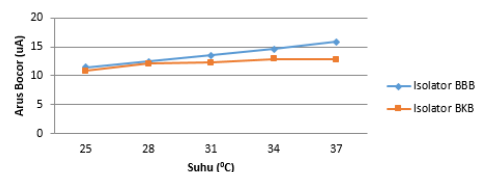
besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

3.2. Pengukuran Arus Bocor Variasi Suhu

Pengukuran arus bocor dengan variasi suhu merepresentasikan kondisi perubahan suhu lingkungan di sekitar isolator tersebut. Pengukuran dilakukan dengan memvariasikan suhu pada *chamber* pengujian dari 25°C, 28°C, 31°C, 34°C, dan 37°C dan menjaga kelembaban udara agar tetap bernilai 60%. Pada pengukuran arus bocor variasi suhu ini menerapkan 3 variasi tegangan uji dengan nilai tegangan 11,547 kV - 10%, 11,547 kV, dan 11,547 kV + 5%, dimana nilai tersebut merupakan tegangan fasa - netral jaringan tegangan menengah 20 kV yaitu 11,547 kV dengan minimum -10% dan maksimum +5% sesuai dengan SPLN 1:1995 “Tegangan - Tegangan Standar”.

3.2.1 Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV - 10%

Grafik perbandingan nilai arus bocor rata-rata terhadap variasi suhu dengan tegangan uji 11,547 kV - 10% adalah sebagai berikut :



Gambar 9. Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi suhu dengan tegangan uji 11,547 kV - 10%

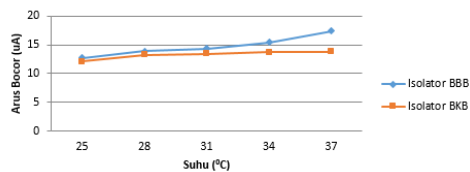
Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 9, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat variasi suhu yang diterapkan pada isolator uji meningkat. Hal ini disebabkan ketika suhu yang diterapkan meningkat, maka suhu pada bahan isolator akan meningkat sehingga melepaskan elektron bebas yang terdapat di dalam bahan isolator, dimana elektron tersebut menjadi pembawa arus. Hal ini sesuai dengan referensi [12] dimana isolator memiliki koefisien temperatur negatif dimana tahanan isolasi menurun ketika kenaikan suhu dan menyebabkan arus bocor meningkat. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara suhu dan arus bocor

berbanding lurus, semakin tinggi suhu yang diterapkan pada isolator maka arus bocor akan semakin meningkat.

Berdasarkan grafik pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

3.2.2 Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV

Grafik perbandingan nilai arus bocor rata-rata terhadap variasi suhu dengan tegangan uji 11,547 kV adalah sebagai berikut :



Gambar 10. Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi suhu dengan tegangan uji 11,547 kV

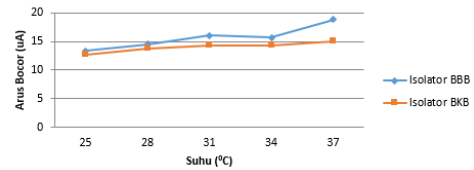
Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 10, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat variasi suhu yang diterapkan pada isolator uji meningkat. Hal ini disebabkan ketika suhu yang diterapkan meningkat, maka suhu pada bahan isolator akan meningkat sehingga melepaskan elektron bebas yang terdapat di dalam bahan isolator, dimana elektron tersebut menjadi pembawa arus. Hal ini sesuai dengan referensi [12] dimana isolator memiliki koefisien temperatur negatif dimana tahanan isolasi menurun ketika kenaikan suhu dan menyebabkan arus bocor meningkat. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara suhu dan arus bocor berbanding lurus, semakin tinggi suhu yang diterapkan pada isolator maka arus bocor akan semakin meningkat.

Berdasarkan grafik pada Gambar 10 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator

tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

3.2.3 Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV + 5%

Grafik perbandingan nilai arus bocor rata-rata terhadap variasi suhu dengan tegangan uji 11,547 kV + 5% adalah sebagai berikut :



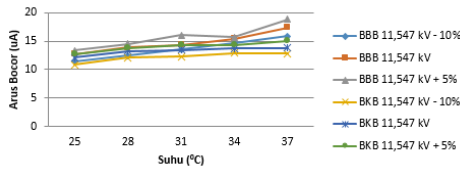
Gambar 11. Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi suhu dengan tegangan uji 11,547 kV + 5%

Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 11, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat variasi suhu yang diterapkan pada isolator uji meningkat. Hal ini disebabkan ketika suhu yang diterapkan meningkat, maka suhu pada bahan isolator akan meningkat sehingga melepaskan elektron bebas yang terdapat di dalam bahan isolator, dimana elektron tersebut menjadi pembawa arus. Hal ini sesuai dengan referensi [12] dimana isolator memiliki koefisien temperatur negatif dimana tahanan isolasi menurun ketika kenaikan suhu dan menyebabkan arus bocor meningkat. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara suhu dan arus bocor berbanding lurus, semakin tinggi suhu yang diterapkan pada isolator maka arus bocor akan semakin meningkat.

Berdasarkan grafik pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

3.2.4 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Bocor Variasi Suhu

Grafik perbandingan hasil pengukuran arus bocor variasi suhu adalah sebagai berikut :



Gambar 12. Grafik perbandingan arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi suhu

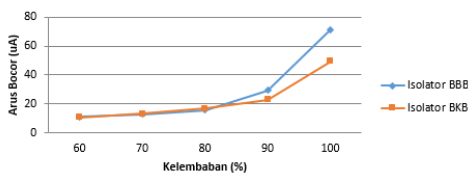
Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 12, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat tegangan uji yang diberikan pada isolator uji juga meningkat. Hal ini disebabkan ketika tegangan yang diterapkan pada bahan isolator meningkat, pelepasan muatan yang terjadi pada permukaan isolator akan semakin besar. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara tegangan dan arus bocor pada variasi suhu berbanding lurus, semakin besar tegangan yang diterapkan pada isolator maka arus bocor yang dihasilkan akan semakin besar.

3.3. Pengukuran Arus Bocor Variasi Kelembaban Udara

Pengukuran arus bocor dengan variasi kelembaban udara merepresentasikan kondisi perubahan kelembaban udara lingkungan di sekitar isolator tersebut. Pengukuran dilakukan dengan memvariasikan kelembaban udara pada *chamber* pengujian dari 60%, 70%, 80%, 90%, dan 100% dan menjaga suhu agar tetap bernilai 25°C. Pada pengukuran arus bocor variasi kelembaban udara ini menerapkan 3 variasi tegangan uji dengan nilai tegangan 11,547 kV - 10%, 11,547 kV, dan 11,547 kV + 5%, dimana nilai tersebut merupakan tegangan fasa - netral jaringan tegangan menengah 20 kV yaitu 11,547 kV dengan minimum -10% dan maksimum +5% sesuai dengan SPLN 1:1995 "Tegangan - Tegangan Standar".

3.3.1 Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV - 10%

Grafik perbandingan nilai arus bocor rata-rata terhadap variasi kelembaban udara dengan tegangan uji 11,547 kV - 10% adalah sebagai berikut :



Gambar 13. Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi kelembaban udara dengan tegangan uji 11,547 kV - 10%

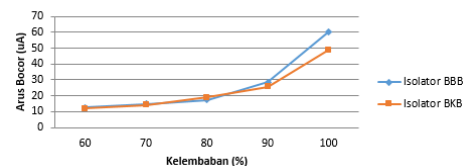
Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 13, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat variasi kelembaban udara yang diterapkan pada isolator uji meningkat. Hal ini disebabkan ketika kelembaban udara

yang diterapkan meningkat, maka lebih banyak uap air diserap oleh permukaan isolator dan meningkatkan konduktivitas permukaan isolator, sehingga arus akan lebih mudah mengalir. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara kelembaban udara dan arus bocor berbanding lurus, semakin tinggi kelembaban udara yang diterapkan pada isolator maka arus bocor akan semakin meningkat.

Berdasarkan grafik pada Gambar 13 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

3.3.2 Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV

Grafik perbandingan nilai arus bocor rata-rata terhadap variasi kelembaban udara dengan tegangan uji 11,547 kV adalah sebagai berikut :



Gambar 14. Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi kelembaban udara dengan tegangan uji 11,547 kV

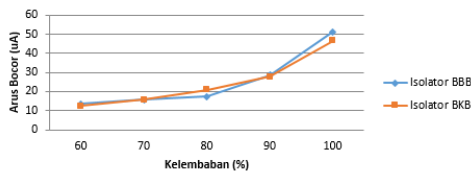
Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 14, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat variasi kelembaban udara yang diterapkan pada isolator uji meningkat. Hal ini disebabkan ketika kelembaban udara yang diterapkan meningkat, maka lebih banyak uap air diserap oleh permukaan isolator dan meningkatkan konduktivitas permukaan isolator, sehingga arus akan lebih mudah mengalir. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara kelembaban udara dan arus bocor berbanding lurus, semakin tinggi kelembaban udara yang diterapkan pada isolator maka arus bocor akan semakin meningkat.

Berdasarkan grafik pada Gambar 14 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB

dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

3.3.3 Pengukuran Arus Bocor Tegangan Uji 11,547 kV + 5%

Grafik perbandingan nilai arus bocor rata-rata terhadap variasi kelembaban udara dengan tegangan uji 11,547 kV + 5% adalah sebagai berikut :



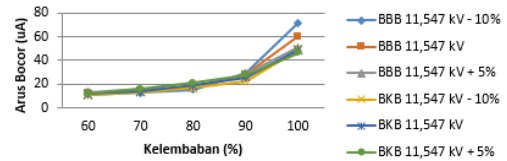
Gambar 15. Grafik nilai arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi kelembaban udara dengan tegangan uji 11,547 kV + 5%

Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 15, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat variasi kelembaban udara yang diterapkan pada isolator uji meningkat. Hal ini disebabkan ketika kelembaban udara yang diterapkan meningkat, maka lebih banyak uap air diserap oleh permukaan isolator dan meningkatkan konduktivitas permukaan isolator, sehingga arus akan lebih mudah mengalir. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara kelembaban udara dan arus bocor berbanding lurus, semakin tinggi kelembaban udara yang diterapkan pada isolator maka arus bocor akan semakin meningkat.

Berdasarkan grafik pada Gambar 15 dapat dilihat bahwa nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih besar dari nilai arus bocor rata-rata isolator tipe sirip BKB. Seharusnya nilai arus bocor rata-rata pada isolator tipe sirip BBB lebih kecil dibandingkan tipe sirip BKB dikarenakan isolator tipe sirip BBB memiliki jarak lintasan atau rayap (*leakage or creepage distance*) lebih panjang, yaitu sebesar 494 mm, dibandingkan dengan isolator tipe sirip BKB, yaitu sebesar 459 mm, sehingga resistansi permukaan isolator yang dilalui arus bocor lebih besar. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat bagian antara sela dan sirip isolator tipe BBB tidak menempel secara merata sehingga tidak semua arus mengalir melewati permukaan isolator.

3.3.4 Perbandingan Hasil Pengukuran Arus Bocor Variasi Kelembaban Udara

Grafik perbandingan hasil pengukuran arus bocor variasi kelembaban udara adalah sebagai berikut :



Gambar 16. Grafik perbandingan arus bocor rata-rata isolator terhadap variasi kelembaban udara

Berdasarkan data arus bocor yang ditunjukkan pada Gambar 16, terlihat bahwa nilai arus bocor meningkat saat tegangan uji yang diberikan pada isolator uji juga meningkat. Hal ini disebabkan ketika tegangan yang diterapkan pada bahan isolator meningkat, pelepasan muatan yang terjadi pada permukaan isolator akan semakin besar. Dapat disimpulkan bahwa hubungan antara tegangan dan arus bocor pada variasi kelembaban udara berbanding lurus, semakin besar tegangan yang diterapkan pada isolator maka arus bocor yang dihasilkan akan semakin besar. Pada kelembaban udara 100%, nilai arus bocor naik secara drastis dikarenakan uap air di dalam *chamber* pengujian terlalu jenuh (*over saturated*). Hasilnya, lebih banyak uap air yang diserap oleh permukaan isolator sehingga konduktivitas permukaan dan arus bocor meningkat drastis.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Ukuran sirip isolator mempengaruhi nilai arus bocor yang mengalir pada isolator.
2. Nilai arus bocor bahan isolator polimer resin epoksi filler pasir silika dan Al₂O₃ (aluminium oksida) mengalami peningkatan untuk setiap kenaikan variasi tegangan pengujian yang diterapkan pada isolator.
3. Nilai arus bocor bahan isolator polimer resin epoksi filler pasir silika dan Al₂O₃ (aluminium oksida) mengalami peningkatan untuk setiap kenaikan variasi suhu yang diterapkan pada isolator.
4. Nilai arus bocor bahan isolator polimer resin epoksi filler pasir silika dan Al₂O₃ (aluminium oksida) mengalami peningkatan untuk setiap kenaikan variasi kelembaban udara yang diterapkan pada isolator.
5. Nilai arus bocor bahan isolator polimer resin epoksi filler pasir silika dan Al₂O₃ (aluminium oksida) naik secara drastis pada variasi kelembaban udara 100%. Hal ini dikarenakan uap air di dalam *chamber* pengujian terlalu jenuh (*over saturated*) sehingga lebih banyak uap air yang diserap oleh permukaan isolator dan konduktivitas permukaan meningkat.
6. Nilai arus bocor pada isolator tipe sirip BKB lebih rendah dibandingkan dengan isolator tipe

sirip BBB pada semua variasi tegangan, variasi suhu, dan variasi kelembaban udara.

Referensi

- [1] Tobing, Bonggas L., *Peralatan Tegangan Tinggi*, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
- [2] Dissado, L.A., Fothergill J.C., *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, Peter Peregrinus Ltd, London, 1992.
- [3] Steven, Rudy S., *Pengaruh Polutan Terhadap Tahanan Permukaan Isolator Epoxy Resin*, Skripsi, Universitas Indonesia, Depok, 2008.
- [4] Haryono, T, CH. Sri Kristiningsih, *Pengaruh Suhu Terhadap Kinerja Material Isolasi Epoksi Resin Dalam Kondisi Bersih*, Seminar Nasional & Workshop Tegangan Tinggi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2002.
- [5] Syakur, Abdul, Hamzah, Berahim, Rochmadi, Tumiran, *Leakage Current Monitoring for Silane Epoxy Resin Insulator under Tropical Climate Conditions*, IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, 2012.
- [6] Mustamin, Manjang, Salama, *Karakteristik Isolator Polimer Tegangan Tinggi Di Bawah Penuaan Tekanan Iklim Tropis Buatan yang Dipercepat*, Universitas Hasanuddin, Makassar, 2010.
- [7] Mukti Ali, Muhamad, Nugroho, Agung, Syakur, Abdul, *Pembuatan dan Analisis Pengaruh Kondisi Permukaan Terhadap Unjuk Kerja Isolator Polimer 20 kV Tipe Sirip Tak Seragam dengan Variasi Tegangan Uji*, Universitas Diponegoro, Semarang, 2017.
- [8] Arismunandar, A., *Teknik Tegangan Tinggi*, Pradnya Paramita, Jakarta, 2001.
- [9] Syakur, Abdul, *Teori dan Hasil Eksperimen Partial Discharge Pada Bahan isolasi*, BP UNDIP, Semarang, 2009.
- [10] SPLN 10-3B. *Tingkat Intensitas Polusi Sehubungan Dengan Pedoman Pemilihan Isolator*. Perusahaan Listrik Negara, 1993
- [11] Syakur, Abdul, Rochmadi, Berahim, Hamzah, Tumiran, *Mekanisme Degradasi Permukaan dan Penentuan Tracking Index Bahan Resin Epoksi Silane Silica*.
- [12] E. Coates. *Resistors & Circuits Module 1*, 2015. [Online]. Alamat : http://www.learnabout-electronics.org/Resistors/resistors_01a.php. [Diakses : 11 Desember 2018].

Biodata



Gangsar Zaenurohman lahir di Semarang, 19 November 1995. Riwayat pendidikan SD N 1 Pendaruban, SMP N 1 Purbalingga, SMA N 1 Purbalingga, dan sekarang sedang menempuh pendidikan di Program Studi Sarjana Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro angkatan 2014 konsentrasi Teknik Tenaga Listrik

Saya menyatakan bahwa segala informasi yang tersedia di makalah ini adalah benar, merupakan hasil karya sendiri, bebas dari plagiat, dan semua karya orang lain telah dikutip dengan benar.

Gangsar Zaenurohman
21060114120013

Pengesahan

Telah disetujui untuk diajukan pada seminar Tugas Akhir.

Semarang, Desember 2018

Pembimbing 1,

Pembimbing 2

Dr. Abdul Syakur, S.T., M.T.
NIP 197204221999031004

Dr. Ir. Hermawan, DEA
NIP 196002231986021001

