

DISERTASI

**SISTEM MONITORING DAN PENGUKURAN ARUS BOCOR ISOLATOR
TEGANGAN TINGGI BERBASIS REAL-TIME**

***HIGH VOLTAGE INSULATOR LEAKAGE CURRENT MONITORING AND
MEASUREMENT SYSTEM BASED ON REAL-TIME***

Disusun dan Diajukan oleh

**TAMBI
D053 171 010**



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM STUDI S3 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

**SISTEM MONITORING DAN PENGUKURAN ARUS BOCOR ISOLATOR
TEGANGAN TINGGI BERBASIS REAL-TIME**

***HIGH VOLTAGE INSULATOR LEAKAGE CURRENT MONITORING AND
MEASUREMENT SYSTEM BASED ON REAL-TIME***

Disusun dan Diajukan oleh

**T A M B I
D053 171 010**



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM STUDI S3 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

HALAMAN JUDUL

SISTEM MONITORING DAN PENGUKURAN ARUS BOCOR ISOLATOR
TEGANGAN TINGGI BERBASIS REAL-TIME

*HIGH VOLTAGE INSULATOR LEAKAGE CURRENT MONITORING AND
MEASUREMENT SYSTEM BASED ON REAL-TIME*

Disertasi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor

Program Studi
S3 Teknik Elektro

Disusun dan Diajukan oleh

TAMBI

kepada

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM STUDI S3 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI


SISTEM MONITORING DAN PENGUKURAN ARUS BOCOR ISOLATOR TEGANGAN TINGGI BERBASIS REAL-TIME

Disusun dan diajukan oleh

TAMBI
D053171010

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Doktor Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 21 Oktober 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui
Promotor,


Prof. Dr. Ir. Salama Maniang, M.T.
NIP. 196212311990031024


Co. Promotor,


Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng., IPU
NIP. 197405301999031003


Co. Promotor,


Dr. Ikhlas Kitta, ST., MT
NIP. 197609142008011006

Ketua Program Studi,


Prof. Dr. Ir. H. Andani Achmad, M.T.
NIP. 196012311987031022

Dekan Fakultas Teknik,


Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.
NIP. 197309262000121002

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : T a m b i

Nomor Induk Mahasiswa : D053 171 010

Program Studi : S3 Teknik Elektro

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan dengan judul :

SISTEM MONITORING DAN PENGUKURAN ARUS BOCOR ISOLATOR TEGANGAN TINGGI BERBASIS REAL-TIME

Adalah karya tulis saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain, dimana disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, November 2022

Yang menyatakan,



T a m b i

PROMOTOR. CO. PROMOTOR DAN PENGUJI

- I. PROMOTOR : Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, MT.,IPM
- II. CO. PROMOTOR : Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng, IPU
- III. CO. PROMOTOR : Dr. Ikhlas Kitta, ST.,MT.
- IV. PENGUJI : Dr. Ir. Sri Mawar Said, MT.
- V. PENGUJI : Dr. Ir. Ingrid Nurtanio, MT
- VI. PENGUJI : Yusri Syam Akil, ST., MT., Ph. D
- VII. PENGUJI : Dr. Muh. Anshar, ST.,M.Sc., (Research) Ph.D
- VIII. PENGUJI EKSTERNAL : Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa Mulyana K, MT.

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya berupa nikmat kesehatan dan kekuatan sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan disertasi dengan “Sistem Monitoring dan Pengukuran Arus Bocor Isolator Tegangan Tinggi Berbasis Real-Time“, sebagai salah satu syarat penyelesaian Pendidikan pada Program Doktor di Departemen Teknik elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Banyak kendala yang dihadapi penulis selama dalam penelitian maupun dalam penyusunan disertasi ini. Alhamdulillah dengan izin Allah serta bantuan dari berbagai pihak, maka penelitian dan disertasi ini dapat diselesaikan dan dirampungkan. Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, MT. sebagai ketua komisi penasehat (promotor) sekaligus sebagai penilai disertasi, Bapak Prof. Dr. Eng Ir. Syafaruddin, ST.,M. Eng. IPU, dan Bapak Dr. Ir. Ikhlas Kitta, ST.,MT., sebagai anggota komisi penasehat (co-promotor) sekaligus sebagai penilai disertasi atas motivasi dan bimbingan yang diberikan sehingga penyusunan disertasi ini dapat terselesaikan. Melalui perantara beliau bertiga yang dibarengi kesabaran serta perhatiannya, telah memberikan pencerahan berupa saran maupun koreksi baik pada aspek penulisan, metodologi serta penyajian isi dari disertasi ini secara keseluruhan.

2. Ibu Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, MT., Ibu Dr. Ir. Ingrid Nurtanio, MT., Bapak Yusri Syam Akil, ST., MT., Ph.D, dan Bapak Dr. Muhammad Anshar, ST.,M.Sc., (Research) Ph.D. selaku komisi penguji. Terima kasih atas segala saran dan masukan, serta kesempatan meluangkan waktu mendiskusikan segala hal yang mejadi keterbatasan kami selama penyusunan disertasi ini.
3. Bapak Prof. Dr. Ir.Iwa Garniwa Mulyana K. MT, selaku komisi penguji eksternal yang telah meluangkan waktunya sebagai penguji dalam ujian pra-promosi dan promosi saya. Terima kasih atas arahan dan masukannya semoga dapat menambah pengetahuan pada bidang tegangan tinggi sekaligus menjadi inspirasi buat promovendus kedepannya.
4. Rektor Universitas Hasanuddin, Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., Dekan Fakultas Teknik Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Irsan Ramli, ST.,M.T., serta wakil dekan, Ketua Departemen Teknik Elektro, Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T., Ketua Program Studi S3 Teknik Elektro Bapak Prof. Dr. Ir. H. Andani Achmad, M.T., dan seluruh dosen Teknik Elektro yang telah memberikan kesempatan dan bekal kepada penulis berupa ilmu dan wawasan yang sangat berarti dalam menyelesaikan studi sampai pada penyelesaian disertasi ini. Kepada seluruh staf S3 Teknik Elektro yang telah memberikan layanan pada aspek administrasi selama penulis belajar di Teknik Elektro Universitas Hesamuddin.

5. Bapak Rektor Universitas Halu Oleo (UHO) Kendari yang telah berkenan memberikan izin kepada penulis untuk melanjutkan studi. Dekan beserta wakil dekan, rekan sejawat dan Dosen dan staf Fakultas Teknik UHO atas doa dan dukungannya selama ini.
6. Para sahabat, teman seangkatan maupun sesama mahasiswa S3 Teknik Elektro UNHAS yang tidak sempat saya sebut satu persatu. Terima kasih atas supportnya selama ini, semoga kebersamaan kita tetap terjalin dan terjaga.

Ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada orang tua tercinta Puang Bagga yang telah mendidik dan membesarkan kami dan teriring doa kepada Ibu Kandung saya Alm Sitti Halima serta mertua Alm. Auza Zain Kadu dan Alm Ariany semoga mendapat tempat yang layak disisinya.

Akhir kata penulis sangat berharap semoga penelitian ini dapat berkontribusi pada perkembangan ilmu dan teknologi di bidang Ketenagalistrikan khususnya teknologi monitoring Isolator Tegangan Tinggi di masa yang akan datang.

Makassar, Agustus 2022

T a m b i

ABSTRAK

T A M B I. *Sistem Monitoring dan Pengukuran Arus Bocor Isolator Tegangan Tinggi Berbasis Real-Time (Dibimbing oleh **Salama Manjang, Syafaruddin, dan Ikhlas Kitta**).*

Tujuan penelitian ini adalah merancang sistem monitoring isolator tegangan tinggi dan Monitoring iklim lingkungan untuk pengukuran arus bocor serta mengetahui pengaruh iklim lingkungan seperti suhu, kelembaban, UV, dan curah hujan terhadap arus bocor dengan analisa regresi statistik. Karakteristik arus bocor yang diperoleh berdasarkan hasil rekaman data harian selama 38 bulan atau setara dengan 27.360 jam sebagai acuan untuk mengetahui perilaku dan kinerja pada isolator polimer- SiR dan porselen. Sistem Monitoring dan pengukuran arus bocor isolator real-time menggunakan Mikrokontroler ATmega 2560 dengan software Arduino mega. Alat RCUs tersebut dipasang pada saluran transmisi maupun saluran distribusi untuk melakukan pengukuran, perekaman, dan penyimpanan arus bocor dan iklim lingkungan. Kemudian karakteristik dan kondisi isolator tersebut dapat dipantau pada layar monitor PC via wireless maupun via celluler berbasis IoT. Untuk keperluan informasi dari kondisi isolator maka dilakukan perancangan software dengan fitur Grafic User Interface (GUI) menggunakan program Java dengan aplikasi Eclipse. Ketika hari tanpa hujan, temperatur dan UV berkorelasi positif dengan arus bocor pada isolator polimer-SiR dengan koefisien determinasi R^2 adalah 0.61 dan 0,83, sedangkan pada isolator porselen hanya kelembaban yang berpengaruh terhadap arus bocor dengan koefisien determinasi R^2 0,77 dan 0,90 . Kemudian ketika terjadi hujan pada isolator polimer hanya UV yang berpengaruh terhadap nilai arus bocor dengan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,46, sedangkan pada isolator porselen hanya curah hujan yang berpengaruh dengan koefisien R^2 determinasi 0,31. Kemudian fenomena peningkatan arus bocor sesaat 33,4 mA pada isolator porselen jenis line post dan pada isolator porselen suspensi 9,06 mA serta pada isolator polimer jenis suspensi 3,87 mA, terjadi pada bulan November 2019 ketika terjadi hujan gerimis setelah kemarau dimana polutan pada permukaan isolator terakumulasi selama musim kemarau berdasarkan nilai ESDD dan NSDD yang telah diukur. Namun pada periode waktu berikutnya arus bocor kembali stabil tetapi tetap berfluktuasi.

Kata kunci: Arus Bocor, Monitoring, Karakteristik Isolator, Sistem Real-Time.

ABSTRACT

T A M B I. Monitoring Systems and Measurement Leakage Current of High Voltage Insulators Based Real-Time. (Supervised by Salama Manjang, Syafaruddin, and Ikhlas Kitta).

This study aims to design a high voltage insulator monitoring system and environmental climate monitoring for leakage current measurement and to determine the effect of environmental climates such as temperature, humidity, UV, and rainfall on leakage current by statistical regression analysis. Leakage current characteristics were obtained based on daily data recording for 38 months or equivalent to 27,360 hours as a reference to determine the behavior and performance of polymer-SiR and porcelain insulators. The real-time insulator leakage current monitoring and measurement system uses the ATmega 2560 Microcontroller with Arduino mega software. The RCUs are installed on transmission and distribution lines to measure, record, and store leakage currents and environmental climate. Then the characteristics and conditions of the insulator can be monitored on the PC monitor screen via wireless or IoT-based cell phones. For information on the shape of the insulator, a software design with a Graphic User Interface (GUI) feature is carried out using a Java program with the Eclipse application. On a rainy day, temperature and UV were positively correlated with leakage current on polymer-SiR insulators, with the coefficient of determination R^2 being 0.61 and 0.83. In contrast, in porcelain insulators, only humidity affected the leakage current with the coefficient of determination R^2 0.77 and 0,90 . Then when it rains on the polymer insulator, only UV affects the value of the leakage current with a coefficient of determination R^2 of 0.46. At the same time, on a porcelain insulator, only rainfall affects the coefficient of determination R^2 of 0.31. Then the phenomenon of an increase in the instantaneous leakage current of 33.4 mA on the line post porcelain insulator and 9.06 mA suspension porcelain insulator and the suspension type polymer insulator 3.87 mA, occurred in November 2019 when it was drizzling after the dry season where the pollutants in the surface of the insulator accumulates during the dry season based on the measured ESDD and NSDD values. However, the leakage current remains stable in the next period but fluctuates.

Keywords: Leakage Current, Monitoring, Insulator Characteristics, Real-Time System.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI... Error! Bookmark not defined.	
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI. Error! Bookmark not defined.	
PRAKATA.....	vi
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT.....	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xx
DAFTAR ARTI SIMBOL DAN SINGKATAN	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	5
1.3. Tujuan Penelitian.....	6
1.4. Manfaat Penelitian.....	7
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2.1. Pengantar.....	11
2.2. Teknologi Isolasi Luar Ruangan	12
2.2.1. Isolator Porselen	13
2.2.3. Isolator Polimer.....	15
2.3. Equivalent Salt Deposit Density (ESDD).....	20

2.4.	Non-Soluble Deposit Density (NSDD)	22
2.5.	Amplitudo Arus Bocor dan Resistansi Permukaan Isolator	23
2.6.	Tingkat Kontaminasi pada Isolator luar ruangan.....	26
2.7.	Sifat pembasahan dari Isolator Karet Silikon yang tercemar.....	29
2.7.1.	Kehilangan Hidrofobisitas.....	29
2.7.2.	Pemulihan Hidrofobisitas.....	30
2.8.	Penuaan Isolator Tegangan Tinggi.....	31
2.8.1.	Isolator Komposit	33
2.8.2.	Isolator non komposit.....	34
2.9.	Karakteristik Isolator	35
2.9.1.	Karakteristik Elektrik	35
2.9.2.	Karakteristik Mekanis	37
2.9.3.	Pendekatan teori untuk proses Flashover.....	38
2.10.	Aplikasi Mikrokontroler dalam Monitoring Isolator	41
2.10.1.	Mikrokontroler Arduino Mega2560.....	42
2.10.3.	Modul Sensor Tegangan	46
2.10.4.	Spark Gaps	47
2.10.5.	Rangkaian proteksi alat ukur	47
2.11.	Sistem Monitoring dan Identifikasi Isolator.....	51
2.11.1.	Monitoring dan Pengukuran Arus Bocor.....	52
2.11.2.	Pengukuran Sifat Hidrofobisitas	53
2.12.	Kerangka Konsep	55
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....		56
3.1.	Waktu dan Lokasi Penelitian	56
3.2.	Bahan Uji dan Alat Penelitian	56
3.3.	Rancangan dan Prosedur Penelitian	63
3.3.1.	Penelitian Tahap I	64

3.3.2. Penelitian Tahap II: Pembangunan Model Saluran Distribusi ...	64
3.3.3. Penelitian Tahap III: Desain Sistem Monitoring Isolator.....	66
3.3.4. Penelitian Tahap IV: Penerapan Alat Monitoring	77
3.4. Teknik Pengumpulan, Pengolahan, dan Validasi Data	82
3.4.1. Pengukuran dan Perekaman Data Arus Bocor Isolator.....	83
3.4.2. Pengukuran Equivalent Salt Defosit Density (ESDD) dan NSDD	83
3.4.3. Pengujian Sifat Hidrofobik	86
3.5. Jenis Penelitian	89
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	90
4.1. Hasil Perancangan Model Saluran Distribusi Primer.....	90
4.2. Hasil desain Sistem Monitoring Isolator dan Stasiun Cuaca	92
4.3. Monitoring dan Pengukuran Arus Bocor Isolator.....	97
4.3.1. Verifikasi dan Validasi Pengukuran Arus Bocor Isolator	97
4.3.2. Pengukuran Arus Bocor dan Data Lingkungan	99
4.3.3. Analisa Data Lingkungan dan Arus Bocor pada Hari tanpa hujan	101
4.3.4. Analisa Data Lingkungan dan Arus Bocor ketika terjadi Hujan	105
4.4. Analisa Equivalent Salt Defosit Density (ESDD) dan NSDD ...	109
4.5. Analisa Pengujian Sifat Hidrofobik.....	114
4.5.1. Nilai Sudut Kontak (Hidrofobik) pada Isolator Polimer	114
4.6. Kinerja Isolator Tegangan Tinggi luar Ruangan.....	119
4.6.1. Hubungan Antara Arus Bocor dengan Temperatur, UV, dan Kelembaban ketika Hari Tanpa Hujan	119
4.6.2. Hubungan Antara Arus Bocor dengan Temperatur, dan UV ketika Terjadi Hujan	122
4.6.3. Karakteristik Rekamaman Data Arus Bocor Tahun 2019.....	124

4.6.4. Nilai Maksimum Rekaman Data Iklim Lingkungan dan Data Arus Bocor.....	127
4.7. Analisa Real-Time Sistem Monitoring Isolator Tegangan Tinggi	135
BAB 4 KESIMPULAN DAN SARAN	138
5.1. KESIMPULAN	138
5.2. SARAN.....	140
DAFTAR PUSTAKA.....	142

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Standar Cap-Pin isolator porselen	14
Gambar 2. Isolator porselen type gelas.....	15
Gambar 3. Detail konstruksi isolator komposit.....	16
Gambar 4. Struktur kimia karet silikon.....	18
Gambar 5. Representasi visual dari lapisan polusi pada isolator.....	24
Gambar 6. Perkiraan kurva Z untuk tingkat keparahan	28
Gambar 7. Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja isolator	32
Gambar 8. Cangkang isolator yang retak dari penuaan	33
Gambar 9. Penuaan yang signifikan pada isolator polimer SiR	35
Gambar 10. (a) Skema polutan isolator; (b) Rangkaian equivalen.....	40
Gambar 11. Modul mikrokontroler Arduino Mega2560r	42
Gambar 12. Sensor arus tipe ACS712	45
Gambar 13. Karakteristik tegangan terhadap arus	46
Gambar 14. Modul sensor tegangan dan rangkaian koneksi Arduino.....	46
Gambar 15. Single line diagram rangkaian proteksi	48
Gambar 16. Diagram rangkaian detektor arus bocor AC	49
Gambar 17. Low-pass filter sumber tegangan terkontrol orde dua	50
Gambar 18. Ilustrasi sudut kontak pada permukaan isolator	54
Gambar 19. Kerangka konsep penelitian	55
Gambar 20. Profil isolator line-post ANSI 57-3	57
Gambar 21. Profil isolator suspensi ANSI 52-5	58
Gambar 22. Typikal dan spesifikasi isolator polimer.....	59
Gambar 23. Isolator polimer.....	60
Gambar 24. Tahapan penelitian	63
Gambar 25. Single line diagram model saluran distribusi untuk studi.....	65
Gambar 26. Blok diagram proses perancangan alat monitoring	66
Gambar 27. Diagram alir perancangan software	68
Gambar 28. Diagram alir perancangan sistem komunikasi data	69

Gambar 29. Blok diagram komunikasi data	70
Gambar 30. Sistem komunikasi I2C ke Mikrokontrolller	71
Gambar 31. Flow Chart perancangan software RCUs.....	75
Gambar 32. Skematik alat Monitoring cuaca	76
Gambar 33. Penempatan peralatan komponen dan alat monitoring.....	77
Gambar 34. Sampel uji isolator dan pemasangannya	79
Gambar 35. Pengukuran arus bocor dan iklim pada saluran distribusi	80
Gambar 36. Pengukuran arus bocor dan iklim pada saluran transmisi....	80
Gambar 37. Peralatan stasiun cuaca	82
Gambar 38. Metode pemisahan polutan pada permukaan isolator	85
Gambar 39. Karakteristik hidrofobik pada isolator polimer	87
Gambar 40. Diagram sistem komunikasi alat monitoring.....	93
Gambar 41. Skema dan single line diagram alat monitoring.....	94
Gambar 42. Blok diagram dan alat RCUs	95
Gambar 43. Sistem komunikasi Monitoring isolator real-time	96
Gambar 44. Nilai kalibrasi sensor arus.....	97
Gambar 45. Sebaran nilai arus bocor yang terdistribusi secara normal.	104
Gambar 46. Histogram hasil analisa statistik.....	105
Gambar 47. Histogram nilai ESDD dan NSDD pada lima isolator	113
Gambar 48. Histogram perubahan hidrofobik isolator polimer line-post	115
Gambar 49. Histogram perubahan sifat hidrofobik isolator polimer suspensi.....	117
Gambar 50. Rekaman data Monitoring; a) Arus bocor dan curah hujan; b) Kelembaban, c) Temperatur.....	120
Gambar 51. Kurva fitting non-linier suhu versus arus bocor; (a) 2 Desember, (b) 5 Desember, (c) 10 Desember 2020.....	120
Gambar 52. Kurva domain waktu arus bocor versus suhu; a) 2 Desember, b) 5 Desember, c) 10 Desember	121
Gambar 53. Kurva fitting non-linier kelembaban versus arus bocor; (a) 02 Desember, (b) 05 Desember, (c) 10 Desember 2020.....	122

Gambar 54. Kurva domain waktu arus bocor versus kelembaban relatif; (a) 02 Desember, (b) 05 Desember, (c) 10 Desember 2020.....	122
Gambar 55. Karakteristik arus bocor isolator terhadap curah hujan	123
Gambar 56. Karakteristik harian temperatur terhadap kelembaban.....	124
Gambar 57. Karakteristik harian arus bocor isolator polimer tipe suspensi terhadap temperatur.....	124
Gambar 58. Karakteristik harian arus bocor isolator polimer jenis line-post terhadap temperatur.....	125
Gambar 59. Karakteristik harian arus bocor isolator porselen jenis suspensi terhadap temperatur.....	125
Gambar 60. Karakteristik harian arus bocor isolator porselen jenis line- post terhadap temperatur	126
Gambar 61. Karakteristik harian arus bocor isolator polimer jenis line-post terhadap temperat.....	126
Gambar 62. Karakteristik harian arus bocor isolator terhadap UV	127
Gambar 63. Histogram arus bocor bulanan pada lima isolator 2019	130
Gambar 64. Histogram arus bocor bulanan pada lima isolator 2020	132
Gambar 65. Histogram arus bocor bulanan pada lima isolator 2021	134
Gambar 66. Rekaman data dan grafik monitoring 06 November 2019 ..	136
Gambar 67. Rekaman data dan grafik monitoring 07 November 2019 ..	137
Gambar 68. Rekaman data dan grafik hasil monitoring harian	137

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Jenis dan profil isolator.....	13
Tabel 2. Nilai faktor b untuk berbagai temperatur	21
Tabel 3. Jarak rambat yang direkomendasikan pada level intensitas polusi	26
Tabel 4. Level intensitas polusi berdasarkan nilai ESDD.....	28
Tabel 5. Parameter dasar sampel isolator.....	57
Tabel 6. Data teknis isolator polimer yang menua.....	58
Tabel 7. Spesifikasi teknis isolator polimer (belum terpakai)	59
Tabel 8. Spesifikasi alat monitoring dan komponennya.....	61
Tabel 9. Hasil pengukuran resistansi isolasi material penelitian	90
Tabel 10. Rating tegangan uji terhadap tegangan yang diterapkan.....	91
Tabel 11. Validasi dan nilai pengukuran rata-rata arus bocor dalam sehari	98
Tabel 12. Rekaman data pengukuran arus bocor pada hari tanpa hujan	99
Tabel 13. Hasil analisa data statistik pengaruh iklim lingkungan pada isolator polimer secara parsial.....	102
Tabel 14. Hasil analisa data statistik pengaruh iklim lingkungan pada isolator polimer secara simultan	102
Tabel 15. Hasil analisa data statistik pengaruh iklim lingkungan pada isolator porselen secara parsial.....	103
Tabel 16. Hasil analisa data statistik pengaruh iklim lingkungan pada isolator porselen secara simultan	103
Tabel 17. Rekaman data dan pengukuran arus bocor isolator ketika terjadi hujan	105
Tabel 18. Hasil analisa data statistik pengaruh iklim lingkungan pada isolator polimer secara parsial ketika terjadi hujan	107
Tabel 19. Hasil analisa data statistik pengaruh iklim lingkungan pada isolator polimer secara simultan ketika terjadi hujan	108

Tabel 20. Hasil analisa data statistik pengaruh iklim lingkungan pada isolator porselen secara parsial ketika terjadi hujan	109
Tabel 21. Hasil analisa data statistik pengaruh iklim lingkungan pada isolator porselen secara simultan ketika terjadi hujan.....	109
Tabel 22. Hasil pengukuran dan analisa ESDD isolator polimer tipe A..	110
Tabel 23. Hasil pengukuran dan analisa ESDD isolator polimer tipe B..	111
Tabel 24. Hasil pengukuran dan analisa ESDD isolator porselen tipe C	111
Tabel 25. Pengukuran dan analisa ESDD isolator porselen tipe D	112
Tabel 26. Hasil pengukuran dan analisa ESDD isolator polimer tipe E..	113
Tabel 27. Rekaman data arus bocor isolator dan iklim lingkungan 2019	128
Tabel 28. Rekaman data arus bocor isolator dan iklim lingkungan 2020	131
Tabel 29. Rekaman data arus bocor isolator dan iklim lingkungan 2021	133

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 : Single line diagram Perancangan Alat monitoring dan stasiun cuaca	149
Lampiran 2 : Kode Main System Monitoring dan Identifikasi.....	151
Lampiran 3 : Rekaman data hasil pemonantauan.....	169
Lampiran 4 : Analisa Statistik pada Isolator Polymer dan Porselen pada Hari tanpa Hujan.....	329
Lampiran 5 : Analisa Statistik pada Isolator Polymer dan Porselen pada Hari tanpa Hujan.....	337
Lampiran 6 : Perhitungan ESDD dan NSDD.....	343

DAFTAR ARTI SIMBOL DAN SINGKATAN

Simbol/Singkatan	Arti dan Keterangan
HTM	Hidrofobik Transfer Material
SiR	Silicon Rubber
Ep	Epoxy
EPDM	Ethylene propylene diene monimer
EVA	ethylene vinyl acetate
EPM	Ethylene propylene monomer
EPR	Ethylene propylene rubber
HTV	High temperature vulcanized
ESDD	Equivalent salt deposit density
NSDD	Non Soluble deposit density
θ°	
Sa	Salinitas
T	Temperatur
RH	Relative Humidity, kelembaban
k_t	Konstanta temperatur
α_{20}	Konduktivitas larutan pada suhu 20°C
SCD	Specific creepage distance, jarak ramban spesifik
R_{pol}	Resistansi lapisan permukaan isolator dari polutan
ρ_{pol}	Resistivitas volume lapisan polutan
σ	konduktivitas volume lapisan polusi isolator

σ_s	Konduktivitas permukaan polusi isolator
V_c	Tegangan flashover kritis
IEC	International Electrotechnical Commission
LA	Lightning Arrester
FCO	Fuse Cut out
RTC	Real time clock
ADC	Analog digital converter
LC	Leakage current
UV	Ultra violet
RMS	Root means square
ANOVA	Analisis variant

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penyaluran energi listrik dari pusat pembangkitan yang ditransmisikan dan didistribusi ke pelanggan paling ekonomis dicapai oleh saluran udara, dan ini akan menjadi metode penyaluran yang disukai saat ini dan periode tahun kedepannya. Saluran transmisi dan distribusi harus mampu menyalurkan energi secara andal terkait dengan kualitas daya, kontinuitas, dan efisiensi serta ketersediaan. Salah satu komponen penting yang mempengaruhi kriteria ini adalah sistem isolasi.

Material isolasi tegangan tinggi bahan keramik seperti porselin dan kaca merupakan bahan pilihan historis isolasi luar ruangan yang memiliki waktu kerja yang lama. Namun selama beberapa dekade terakhir, jenis isolator alternatif yang dibuat dari bahan polimer, juga dikenal sebagai isolator komposit telah muncul, sebagai alternatif porselen dan kaca untuk aplikasi saluran udara. Kedua Isolator luar ruangan ini dalam layanannya akan mengalami degradasi atau pemburukan isolasi akibat terpaan iklim lingkungan.

Indonesia sebagai salah satu negara yang beriklim tropis basah atau daerah yang ditandai dengan kelembaban udara yang relatif tinggi (pada umumnya di atas 90%), curah hujan yang tinggi dengan rata-rata 227 mm dan jumlah hari hujan berkisar 144 hari per tahun, temperatur tahunan rata-

rata di atas 18°C (dan dapat mencapai 38°C) pada musim kemarau (ICCSR, 2010). Monitoring isolator yang terpolusi pada saluran transmisi dan distribusi terletak pada area Makassar yang mengalami musim hujan pada bulan November sampai bulan April dan musim kemarau pada bulan Mei sampai Oktober. Pergantian musim dari musim kemarau ke musim hujan atau sebaliknya untuk setiap daerah tentu mempunyai karakteristik dan perilaku yang berbeda pula. Pergantian musim yang terjadi pada setiap tahunnya pada daerah tropis akan berdampak pada kinerja isolator saluran udara tegangan tinggi yang terpasang di luar ruangan.

Isolator sebagai peralatan pemisah bagian-bagian yang bertegangan dengan yang tidak bertegangan serta penahan dan penopang kawat saluran merupakan salah satu komponen peralatan tegangan tinggi yang memegang peranan penting dalam penyaluran energi listrik ke konsumen. Isolator pasangan luar akan mengalami *flashover* yang terutama disebabkan oleh adanya kontaminan pada permukaan isolator. Kontaminan kering tidak konduktif, tetapi setelah mereka menjadi basah seperti dalam kasus kelembaban relatif yang tinggi, kabut, embun dan hujan, sifat dielektrik turun secara dramatis dan mereka membentuk lapisan konduktor pada permukaan isolator. Akibatnya, arus bocor mengalir melalui film konduksi dan panas yang hilang menguap di daerah uap air dengan kepadatan arus tinggi dan membentuk pita kering (Sherif M. Elbadri, 1987b).

Penumpukan kontaminasi permukaan pada isolator dapat menyebabkan peningkatan kebocoran arus dan peluahan sebagian yang mungkin akhirnya menghasilkan *flashover* (H. Berahim, K.T. Sirait, F. Soesianto, 2003). Apabila kondisi tersebut berlanjut dalam waktu yang relatif lama, maka isolator akan mengalami *flashover* total sehingga akan terjadi degradasi yang akan berakibat pada menurunnya kinerja dari isolator tersebut. Kinerja isolator akan berkurang seiring dengan umur pemakaian dan seringnya terjadi *flashover* yang diakibatkan oleh kontaminan. Selain itu, terpaan iklim tropis secara simultan pada isolator baik polimer *Silicon Rubber* (SiR) maupun jenis isolator lainnya

?menunjukkan penurunan kualitas isolasi akibat pengaruh iklim misalnya temperatur, sinar ultraviolet, kelembaban, hujan dan pengaruh kontaminan pada bagian permukaan isolator, akhirnya akan terbentuk penjejak listrik pada permukaan isolator. Peristiwa ini akan menurunkan unjuk kerja isolator, dan pada akhirnya dapat terjadi loncatan listrik karena permukaan isolator tidak lagi mampu berfungsi sebagai isolasi (H. Berahim, K.T. Sirait, F. Soesianto, 2003).

Penggunaan isolator pasangan luar sebagai peralatan tegangan tinggi yang rentang terhadap pengaruh iklim tropis, maka perlu dilakukan Monitoring secara real-time terhadap arus bocor. Oleh karena pentingnya masalah tersebut maka beberapa penelitian pun telah dilakukan dengan berbagai metode baik uji laboratorium maupun uji lapangan, bahkan diberbagai negara telah membentuk lembaga penelitian listrik untuk

membantu perusahaan listrik dalam menangani permasalahan kelistrikan khususnya monitoring kinerja isolator luar ruangan. Seperti lembaga penelitian di Meksiko telah memiliki 44 sistem Monitoring arus bocor yang dipasang pada beberapa saluran transmisi (Montoya, Ramirez, and Hernandez, 2008). Sistem Monitoring tersebut telah memberikan perspektif yang jauh lebih luas pada berbagai kinerja insulator luar untuk berbagai zona polusi, dan besaran arus bocor kritis untuk berbagai profil insulator.

Penelitian tentang arus bocor telah banyak dilakukan baik isolator komposit, *Hydrophobic Transfer Material* (HTM) maupun isolator non-komposit (Non-HTM), tetapi sampai sekarang implementasi lapangan masih terbatas, terutama di Indonesia. Efek dari iklim tropis dan tingkat polusi yang tinggi masih harus terus dikaji pada kinerja isolator tegangan tinggi, terutama pengaruh kelembaban disertai suhu yang tinggi. Kinerja polusi sangat ditentukan oleh iklim untuk tiap zona polusi, sehingga makalah ini ditulis untuk penelitian kinerja isolator tegangan tinggi pada iklim tropis. Ketika intensitas hujan masih kurang yang diawali dengan gerimis maka polutan berat yang menempel pada isolator belum bisa tercuci bersih. Menurut Ramirez and Montoya (2012), profil isolator mempengaruhi akumulasi polutan, yang menentukan kinerja polusinya, dan kontrol arus bocor oleh desain isolator sangat tergantung pada tipe polutan. Selain itu, dengan mengetahui nilai arus bocor isolator yang cenderung mengarah pada terjadinya *flashover* maka pemeliharaan preventif dapat dijadwalkan ketika tingkat kritis arus dicapai pada isolator yang tercemar

sehingga *flashover* total dapat diantisipasi untuk meminimalkan pemadaman sistem.

Penelitian pada disertasi ini menyajikan efek penuaan alami pada kinerja isolator tegangan tinggi di luar ruangan dengan berbagai jenis bahan isolasi untuk mengevaluasi kinerja kontaminasi mereka di bawah tekanan listrik dalam kondisi terpolusi. Selain Monitoring dan identifikasi, isolator juga akan diamati pengaruh ESDD, humidity, temperatur, sinar ultraviolet, dan curah hujan terhadap arus bocor secara real-time. Metode eksperimental dilakukan dengan menempatkan alat pemantau *Remote Control Unit System* (RCUs) pada saluran distribusi primer 20 kV di luar ruangan untuk perekaman tegangan tembus, permukaan arus bocor, temperatur, humiditi, UV, dan curah hujan di luar gedung laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Hasanuddin di Makassar, Indonesia.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan maka untuk melakukan Monitoring real-time terhadap penggunaan isolator pasangan luar yang terpasang pada saluran transmisi maupun pada saluran distribusi maka perlu dibuat rumusan masalah.

1. Bagaimana membuat model sistem saluran distribusi dengan tetap mengacu pada standar International Electrotechnical Commission (IEC) dan Standar Nasional Indonesia (SNI).

2. Bagaimana merancang alat monitoring yang dapat digunakan untuk keperluan Monitoring dan pengukuran arus bocor secara real-time pada isolator polimer-SiR dan porselen.
3. Bagaimana penerapan alat monitoring hasil desain untuk pengukuran arus bocor isolator polimer dan porselen berdasarkan sistem monitoring real-time.
4. Bagaimana melakukan analisis pada isolator polimer dan porselen terhadap polutan pada permukaan isolator berdasarkan pengukuran ESDD dan NSDD.
5. Bagaimana pengaruh iklim lingkungan tropis terhadap arus bocor isolator berdasarkan karakteristik isolator polimer dan porselen dengan analisis statistik menggunakan regresi berganda.

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan sebelumnya maka ada beberapa tujuan yang harus tercapai dalam penelitian ini berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan.

1. Merancang model saluran distribusi sebagai media monitoring dan identifikasi isolator tegangan tinggi berdasarkan IEC D3.027-2, SNI IEC 60502-1.
2. Untuk merancang alat monitoring yang dapat digunakan untuk keperluan Monitoring dan pengukuran arus bocor secara real-time pada pada isolator polimer-SiR dan porselen.

3. Penerapan alat monitoring untuk pengukuran arus bocor isolator polimer dan porselen berdasarkan sistem monitoring real-time.
4. Untuk melakukan identifikasi pada isolator polimer terhadap sifat hidrofobik serta pengukuran ESDD dan NSDD.
5. Melakukan analisis pengaruh iklim lingkungan tropis terhadap arus bocor isolator berdasarkan karakteristik isolator polimer dan porselen dengan analisis statistik menggunakan regresi berganda.

1.4. Manfaat Penelitian

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah serta tujuan, maka manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Hasil perancangan alat dapat digunakan untuk pengukuran arus bocor isolator untuk membedakan perilaku dari isolator polimer-SiR dengan isolator porselen terhadap pengaruh lingkungan.
2. Sebagai salah satu referensi PT. PLN (Persero) bagi para operator pemeliharaan jaringan dalam memantau pemeliharaan kondisi isolator dalam memperoleh informasi awal terhadap tingkat gangguan isolator yang mengalami kontaminan baik gangguan secara fisik maupun kimiawi yang dapat menyebabkan menurunnya kinerja isolator secara *real-time*.
3. Dapat meningkatkan keandalan sistem sehingga kontinuitas penyaluran energi listrik ke konsumen tidak terganggu.

4. Dengan adanya monitoring dan identifikasi *real-time* maka pemeliharaan dan perbaikan isolator akan terjadwal sesuai schedule sehingga umur peralatan (life time) isolator dapat tercapai.
5. Menjadi bahan kajian dan perbandingan bagi peneliti-peneliti berikutnya dengan metode yang berbeda.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan membangun model saluran distribusi sebagai tempat pengujian terhadap sampel uji isolator tegangan tinggi. Model saluran distribusi dan alat monitoring tersebut merupakan bagian dari sistem monitoring yang dirancang dalam penelitian ini untuk melakukan Monitoring dan pengukuran arus bocor isolator. Pembuatan sistem monitoring merupakan perancangan sistem pengukuran arus bocor isolator luar ruangan dan parameter lingkungan secara real-time. Hasil pembuatan alat tersebut akan digunakan untuk keperluan penelitian kinerja isolator tegangan tinggi di bawah pengaruh iklim tropis.

Membangun perangkat IoT untuk memantau arus bocor isolator dan parameter lingkungan secara real-time menggunakan sensor arus dan tegangan, sensor curah hujan, sensor temperature, sensor UV, sensor kelembaban, Arduino Mega2560 sebagai pengontrol, ESP 8266 sebagai perangkat yang mengirimkan data ke internet dan data akan diterima dalam aplikasi selluler. Selanjutnya, pengujian alat hasil desain dilakukan untuk

keperluan verifikasi dan validasi dengan menempatkan alat tersebut pada saluran transmisi maupun distribusi.

Penerapan alat monitoring terhadap isolator tegangan tinggi pada saluran transmisi dan distribusi terhadap kinerja isolator polimer-SiR dan porselen pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui pengaruh iklim lingkungan terhadap arus bocor pada lima tipe isolator. Selain itu, alat hasil desain juga dapat digunakan untuk pengukuran arus bocor untuk semua jenis isolator termasuk isolator keramik atau kaca. Monitoring dilakukan mulai Juni 2019 sampai sekarang. Data yang diperoleh selama Monitoring dianalisis dengan statistik menggunakan SPSS untuk mengetahui pengaruh iklim lingkungan terhadap arus bocor yang mengalir pada permukaan isolator. Selain itu, pengukuran dan analisis ESDD dan NSDD juga dilakukan untuk mengetahui konsentrasi polutan yang menempel pada permukaan isolator serta pengukuran hidrofobisitas untuk mengidentifikasi permukaan isolator terhadap besarnya sudut kontak. Kemudian kurva arus bocor harian dan kondisi isolator juga dapat diakses dan ditampilkan bersama parameter lingkungan setiap 5 menit secara real-time.

1.6. Kebaruan Penelitian (Novelty)

Sistem monitoring dan pengukuran arus bocor yang telah dibangun dengan kombinasi berbagai komponen serta modifikasi dari berbagai fitur yang di rancang untuk keperluan pemeliharaan dan perbaikan isolator oleh pihak penyedia energi listrik. Jadwal pemeliharaan dapat di schedule berdasarkan hasil monitoring dan pengukran arus bocor sehingga umur

peralatan (life time) isolator dapat tercapai. Perancangan model tempat penelitian, perancangan alat monitoring, pengujian sampel pada 5 tipe isolator, dan analisa pengaruh iklim lingkungan terhadap arus bocor isolator merupakan satu kesatuan dari sistem monitoring untuk penelitian kinerja isolator tegangan tinggi. Kemudian dengan alat tersebut maka Monitoring dan pengukuran arus bocor pada kondisi lingkungan terpolusi dapat dilakukan untuk memberikan informasi tentang kondisi isolator luar ruangan secara real-time. Para operator jaringan dapat mengakses data arus bocor dan kondisi isolator melalui aplikasi website yang dapat diakses via internet.

Dari beberapa model dan pengukuran arus bocor berdasarkan monitoring isolator serta prosedur yang telah dirancang dalam satu sistem yang terdiri dari beberapa komponen, maka dari hasil penelitian tersebut telah diaplikasikan pada sistem tenaga listrik selama 38 bulan atau setara dengan 27.360 jam, sehingga syarat dari suatu kebaruan (*Novelty*) dapat dihasilkan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengantar

Untuk memenuhi permintaan energi yang meningkat, utilitas tenaga listrik yang andal diperlukan untuk mentransmisikan daya dari lokasi pembangkit ke pusat beban, biasanya jarak yang jauh dengan level tegangan yang terus ditingkatkan untuk meningkatkan efisiensi pengoperasian saluran sistem tenaga listrik AC. Sistem transmisi daya listrik dalam layanannya terpapar pada berbagai kondisi abnormal. *Flashover* dan pemadaman adalah penyebab paling sering terjadi, karena sambaran petir dan switching serta pengurangan kekuatan listrik isolasi luar karena kondisi lingkungan dan kontaminasi permukaan isolator. Deposit partikel yang larut pada permukaan basah isolator yang telah dibuat konduktif adalah bentuk pelepasan dari kontaminasi *flashover*, di mana zat kelembaban dan kontaminan adalah komponen penting untuk *flashover*. Penyebab utama biasanya dipasok oleh alam dalam bentuk kabut atau embun, umumnya dengan proses pembasahan yang lambat. Tingkat kontaminan dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori polusi pesisir atau laut, industri dan gurun (Looms, 1998b).

Isolator tegangan tinggi digunakan pada saluran dan gardu transmisi secara luas dan membentuk sebuah komponen penting dalam sistem jaringan tenaga listrik. Karena pentingnya isolator dalam penyaluran daya




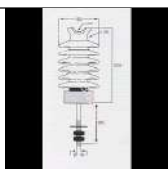



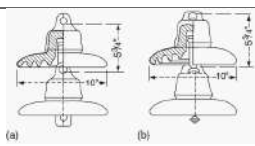

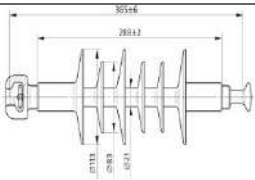

listrik maka penelitian telah banyak dilakukan terhadap kinerja isolator. Berbagai studi mengungkapkan bahwa pada umumnya kegagalan isolator yang menyebabkan kerugian besar adalah akibat dua aspek yaitu aspek permukaan (*surface*) yang menyebabkan munculnya arus bocor permukaan dan aspek ruah (*bulk*) dengan menurunnya sifat dielektrik (ϵ_r dan $\tan \delta$) yang membuat isolator mudah pecah (*breakdown*) akibat sambaran petir atau *switching*. Aspek ruah isolator berbahan keramik dan gelas stabil terhadap penuaan, tetapi permukaannya mudah dibasahi (*wettability*) oleh kabut, embun atau hujan karena memiliki energi permukaan yang tinggi (Manjang Salama, 2010).

2.2. Teknologi Isolasi Luar Ruangan

Teknologi isolasi luar ruangan diharapkan menghasilkan produk yang lebih unggul dibandingkan pendahulunya, sehingga keberhasilan setiap teknologi baru diharapkan tidak hanya keunggulan teknologi, tetapi keandalan dan kinerja yang baik adalah prasyarat penting dari suatu produk. Sampai saat ini, ada 3 (tiga) jenis isolator yang digunakan pada sistem tenaga, yaitu porselen, gelas dan polimer. Pemakaiannya di lapangan ditentukan oleh kondisi iklim serta lingkungan, mekanik, dan ekonomi yang berbeda. Insulator porselen dan kaca digolongkan sebagai isolator keramik, dan isolator polimer sebagai *Non-Ceramic Insulator* (NCI) atau komposit. Sedangkan menurut cara penggunaannya insulator tegangan tinggi diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu jenis pasak, suspensi, dan string isolator. Penggunaan dari jenis isolator tersebut

berdasarkan spesifikasi dan profilnya seperti diperlihatkan pada Tabel 1. Isolator suspense/string isolator umumnya digunakan pada saluran udara untuk mendukung konduktor dari tower saluran transmisi, sedangkan isolator *pin-post* umumnya digunakan di gardu induk.

Tabel 1. Jenis dan profil isolator

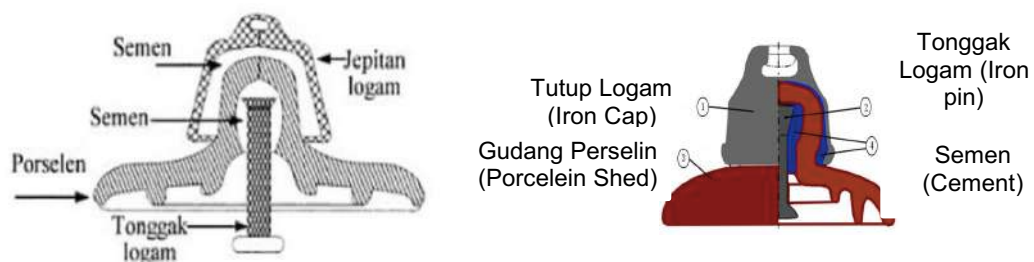
Jenis Isolator	Profil	
Isolator Perselein (Non-Composit)		
Piring/String Isolator		
Post Isolator		
Pin-Post Isolator		
Isolator Kaca		
String Isolator		
Isolator Komposit (Polimer)		
Suspensi/String		
<i>Pin-post</i>		

2.2.1. Isolator Porselen

Porselen telah mendominasi sebagai bahan isolator sejak awal sistem tenaga listrik. Bahan anorganik ini menunjukkan ikatan elektrostatik antar

molekul yang kuat di antara komponen-komponennya. Material isolator ini dalam penggunaannya telah terbukti menunjukkan umur panjang dengan kelebihan serta keterbatasannya telah dipahami dengan baik. Insulator porselen adalah teknologi yang mapan karena memiliki kinerja mekanik tinggi dengan stabilitas yang tinggi (Chrzan, 2010), dan (Kumara and Fernando, 2020), sehingga layanannya menunjukkan ketahanan terhadap degradasi oleh aktivitas pelepasan permukaan, namun isolator ini rentang terhadap iklim lingkungan terutama kelembaban yang tinggi. Menurut Wang et al. (2019), kelembaban yang tinggi berkorelasi positif dengan arus bocor ketika beroperasi dalam kondisi basah dan terkontaminasi karena permukaan hidrofilik yang melekat dari bahan anorganik (Lambeth P, 1983). Apabila fenomena tersebut tidak terkontrol maka dapat menyebabkan *flashover* (Looms, 1998a) dan (Mackevich and Shah, 1997). Gambar 1 menunjukkan bentuk khas penutup isolator dan pin porselen, dengan komponen-komponen penting, cangkang porselen mengkilap untuk membentuk permukaan yang halus dan tutup dan pin baja galvanis, semuanya disatukan dengan semen. Isolator ini digabungkan secara seri untuk mendapatkan serangkaian jarak rambat yang diperlukan untuk tegangan sistem tertentu.

Berasarkan fungsi dan aplikasi dari isolator pada sistem tenaga listrik, maka secara umum isolator porselen terdiri dari isolator pin-post dan isolator suspensi.



Gambar 1. Standar Cap-Pin isolator porselen

2.2.2. Isolator Gelas / Kaca

Penggunaan Isolator gelas/kaca sebagai isolator luar pada saluran transmisi dan distribusi telah dipelajari sejak 1947 oleh Forrest, Clark, Moran, Cherney, dan Lambeth sebagaimana dirinci dalam (Basu, Mukherjee, and Lele, 1974). Insulator ini memiliki permukaan yang memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan isolator porselin (Looms, 1998a). Bahan kaca yang ditambahkan dengan oksida semikonduktor memberikan resistivitas permukaan yang tinggi sampai beberapa megaohms sehingga dipastikan terjadi pemanasan permukaan untuk mencegah akumulasi dan kondensasi kelembaban. Namun, kaca memiliki titik leleh yang lebih rendah daripada porselen, membuatnya lebih rentan terhadap erosi permukaan karena panas yang dihasilkan oleh pelepasan permukaan (Lambeth FJ, 1971) dan (Mccarthy, 1976). Konstruksi dan bagian-bagian dari isolator kaca diperlihatkan pada Gambar 2.



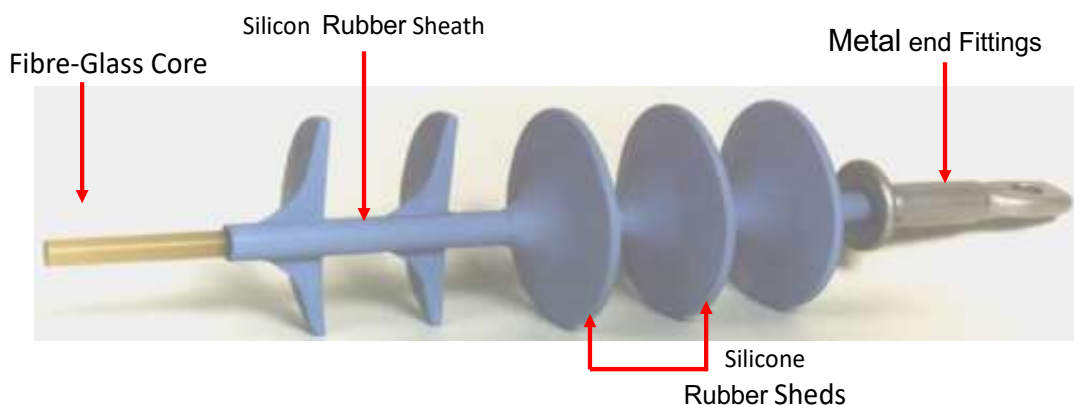
Gambar 2. Isolator porselen type gelas

2.2.3. Isolator Polimer

Isolator polimer pertama kali diperkenalkan pada tahun 1940-an untuk aplikasi dalam ruangan (Hall, 1993). Penggunaan isolator polimer secara komersial pada jaringan transmisi baru dimulai sejak tahun 1970-an dengan

formulasi bahan dan teknologi fabrikasi yang terus ditingkatkan (Li, Yu, and Feng, 2016) dan (Mackevich and Chang, 1997).

Beberapa faktor yang berpengaruh terhadap performa material isolasi polimer adalah cacat (*defect*). Cacat itu dapat timbul dalam bentuk void, ketidakh murnian (*impurities*), dan tonjolan (*protrusion*) pada permukaan (*interface*) antara lapisan semikonduktor atau konduktor dengan isolasi polimer sehingga dapat meningkatkan tekanan (*stress*) medan listrik yang tinggi pada bagian yang cacat tersebut dalam aplikasinya. Tekanan (*stress*) listrik yang terus menerus akan menyebabkan penuaan (*ageing*) isolasi polimer dan pada cacat tersebut akan tumbuh *electrical treeing* yang disertai dengan munculnya peristiwa *partial discharge* (PD) dalam material isolasi polimer yang merupakan awal terjadinya *breakdown* (Manjang Salama, 2010).



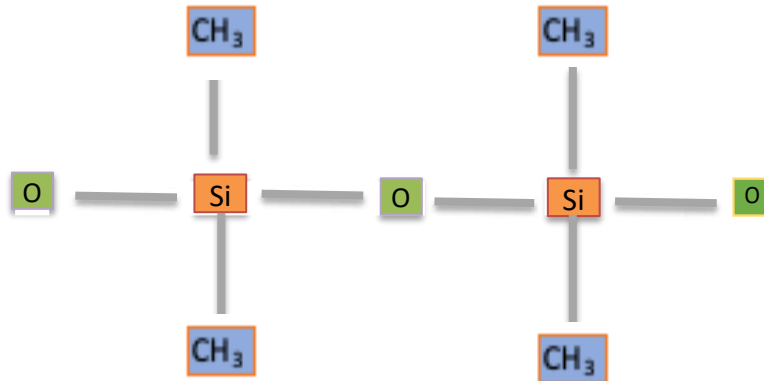
Gambar 3. Detail konstruksi isolator komposit

Sampai saat ini bahan isolasi polimer yang digunakan untuk rumah dari isolator polimer adalah resin epoksi, karet etilena-propilen dan SiR (Cherney, 1996), masing-masing berfungsi untuk melindungi inti isolator dari kerusakan yang mungkin terjadi dari kondisi lingkungan atau dari aktivitas listrik pada permukaan isolator (arus bocor, pelepasan busur listrik). Penggunaan *Epoxy* (EP), *ethylene propylene Diene Monomer* (EPDM), *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA), dan karet silikon, *silicone rubber* (SiR) sebagai dasar polimer telah menunjukkan kinerja yang baik. *Monomer etilena-propilena* (EPM), *Monomer Etilena Propilena Diena* (EPDM), dan ko-polimer silikon adalah merupakan jenis karet *Etilena-Propilena* (EPR) yang diminati sebagai isolator luar tegangan tinggi.

Karet silikon merupakan bahan polimer dengan kekuatan antarmolekul rendah karena kelompok non-polar simetris yang melekat pada tulang punggung atau ikatan rantai polimer (Lenick, 1999). Gaya antar molekul yang rendah mengakibatkan berkurangnya energi permukaan bahan polimer. Dengan menggunakan bahan dengan energi bebas permukaan yang rendah, secara substansial daya rekat antara polutan dan bahan berkurang sehingga isolator karet silikon sangat cocok untuk aplikasi luar ruangan (Hillborg, H., and Gedded, 1999).

Karet silikon yang digunakan dalam rekayasa tegangan tinggi pada dasarnya didasarkan pada tulang punggung (*backbone*) yang terdiri dari atom Si dan O bergantian dengan dua gugus metil (CH₃) yang melekat pada setiap atom Si seperti yang terlihat pada Gambar 4. Karena ikatan yang

kuat dan fleksibel antara tulang punggung dan gugus, tulang punggung ikatan siloksan $\text{Si}(\text{CH}_3)_2$ memberikan ketahanan yang tinggi terhadap oksidasi dan degradasi termal (J. Kim, 1999).



Gambar 4. Struktur kimia karet silikon

Karet silikon mempunyai kinerja pada suhu tinggi dan ketahanan yang sangat baik terhadap ozon dan UV serta sifat listrik yang baik. Sifat-sifat ini disebabkan oleh struktur polimer yang terdiri dari rantai atom silikon dan oksigen bolak-balik dengan ikatan tunggal dan gugus samping metil, vinil, dan senyawa lainnya. Ikatan Si-O-Si dari rantai polimer sangat stabil sehingga menjadikan karet silikon mempunyai kinerja yang baik pada suhu tinggi serta stabil pada sinar ultraviolet, UV (Walter Noll, 1968). Karet silikon juga bersifat hidrofobik atau anti air, sifat yang dapat meningkatkan kinerja listrik isolasi luar ruang (R. S. Gorur, 1991).

Selain itu, senyawa karet silikon yaitu SiR telah terbukti menjadi bahan polimer yang paling diandalkan untuk sistem isolasi listrik luar ruangan (Swift, D., Haddad, A., and Warne, 2004). Hal ini disebabkan oleh

fleksibilitas dalam desain produk isolator karet silikon untuk mengontrol arus bocor dengan spesifikasi jarak rambat yang sesuai, dan meminimalkan akumulasi permukaan kontaminan di udara (Looms, 1998b). Insulator komposit SiR dengan gudang karet silikon vulkanisir suhu tinggi, *High Temperature Vulcanized* (HTV) memiliki kinerja anti-polusi yang baik karena hidrofobisitas dan transfer hidrofobiknya. Hidrofobisitas adalah sifat fisik suatu molekul yang menolak air pada permukaan hidrofobik akan menunjukkan sudut kontak yang tinggi. Selain itu, ketika permukaan karet silikon tertutup oleh kotoran, butiran-butiran kecil di dalamnya akan berpindah ke permukaan lapisan kontaminasi untuk menjaga hidrofobisitas permukaan karet silikon, namun menurut (Zhijin, Tian, and Xingliang, 2019) dan (Rajini and Udayakumar, 2009) isolator polimer SiR di bawah pengaruh lingkungan luar ketika beroperasi, sifat dan kinerjanya akan berkurang.

2.2.3.1. Faktor Kontaminasi pada Isolator SiR

Isolator tegangan tinggi luar ruangan terkena berbagai jenis polusi (Lambeth, Eng, and Eng, 1971). Sifat pencemar dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu larut (*conducting*) dan tidak larut (*inert*). Kontaminan terlarut dinyatakan dalam *Equivalent Salt Deposit Density* (ESDD) dan kontaminan yang tidak larut dikuantifikasi dalam istilah *Non-Soluble Deposit Density* (NSDD), yang berkorelasi dengan mg kaolin per satuan luas permukaan isolator (mg/cm^2).

2.3. *Equivalent Salt Deposit Density (ESDD)*

Nilai ESDD didefinisikan sebagai jumlah ekuivalen deposit NaCl, dalam mg /cm², pada luas permukaan isolator yang memiliki konduktivitas listrik yang sama dengan deposit aktual yang dilarutkan dalam jumlah air yang sama. Teknik ESDD melibatkan pencucian kontaminan dari permukaan isolator dengan air suling dan mengukur konduktivitas larutan yang diperoleh.

Untuk mengukur bobot dari polutan yang menempel pada permukaan isolator, maka dibutuhkan suatu pengukuran bobot polusi. Berdasarkan IEC 60815 (2008) ketebalan lapisan kontaminan pada permukaan isolator ditentukan oleh ESDD, dalam mg/cm². Presentasi nilai ESDD mempengaruhi tingkat salinitas yang diperoleh, Jika metode ESDD ini dipakai pada polusi alami, maka secara definisi ESDD adalah jumlah Natrium Clorida (NaCl) yang diendapkan di atas permukaan isolator yang akan menghasilkan konduktivitas yang sama pada polusi alami.

Alat ukur konduktivitas digunakan untuk mengukur setiap larutan garam dari sampel isolator yang terpolusi alami, kemudian dihitung nilai konduktivitas dari larutan pencuci, pada saat yang sama suhu juga dicatat sesuai literatur (IEC 60507, 2013), konduktivitas pada suhu yang berbeda dikonversi menjadi 20°C, yang ditunjukkan pada persamaan (2.1) berikut:

$$\alpha_{20} = \alpha_t \cdot [1 - k_t(t_s - 20)] \quad (2.1)$$

Di mana:

α_{20} : konduktivitas larutan pada temperatur 20°C

t_s : temperature larutan, °C

α_t : konduktivitas larutan pada temperatur θ °C

k_t : konstanta temperature pada temeperatur θ °C

Konstanta temperatur dihitung menggunakan persamaan:

$$k_t = -3200 \cdot 10^{-8} \cdot t_s^3 + 1.032 \cdot 10^{-5} \cdot t_s^2 - 8.272 \cdot 10^{-4} \cdot t_s + 3.544 \cdot 10^{-2} \quad (2.2)$$

Berdasarkan IEC 60815 konstanta temperatur k_t diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.2).

Nilai konduktivitas larutan pada temperatur 20°C juga dapat dihitung dengan persamaan (2.3) berikut:

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b (\theta - 20)] \quad (2.3)$$

Di mana:

σ_{20} : konduktivitas larutan pada suhu 20°C

σ_{θ} : konduktivitas larutan pada temperatur θ °C

b : faktor koreksi (tabel 2)

θ : temperature larutan, °C

Nilai b seperti pada Table 2. berikut:

Tabel 2. Nilai faktor b untuk berbagai temperatur

Temp.(°C)	Nilai b
10	0,02817
15	0,02518
20	0,02278
25	0,02077
30	0,00915

Salinitas, S_a (kg /m³), dari larutan pada 20°C diberikan sebagai:

$$S_a = (5.7 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_{20})^{1.03} \quad (2.4)$$

Sehingga ESDD dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$ESDD = \frac{S_a \cdot V_d}{A_{ins}} \quad (2.5)$$

Di mana:

ESDD : Equivalent Salt Deposit Density, ESDD (mg/cm³)

V_d : Volume air suling yang digunakan (cm³)

A_{ins} : Luas isolator yang dicuci (cm²).

Untuk memperhitungkan pengaruh kontaminan yang tidak larut, NSDD maka tingkat intensitas polutan harus ditingkatkan satu tingkat jika nilai NSDD terukur di atas 2 mg/cm².

2.4. Non-Soluble Deposit Density (NSDD)

NSDD didefinisikan sebagai endapan polusi inert yang tidak larut per sentimeter persegi (mg/cm²) permukaan isolator. Pengukuran NSDD biasanya dilakukan dengan menggunakan larutan air pencuci yang diperoleh dari pengukuran ESDD. Cairan disaring melalui kertas saring yang telah dikeringkan, dibersihkan dan ditimbang dari grade GF/A 1,6 m atau serupa, dan kertas saring yang terkontaminasi kemudian dikeringkan dan ditimbang.

Nilai NSDD dihitung menggunakan persamaan:

$$NSDD = \frac{M_2 - M_1}{A} \quad (2.6)$$

Di mana :

M_1 : berat kertas saring kering tanpa kontaminasi (bersih), mg/cm²

M_2 : berat kertas saring kering terkontaminasi, mg/cm²

A : luas permukaan isolator, cm²

2.5. Amplitudo Arus Bocor dan Resistansi Permukaan Isolator

Arus bocor sebagai salah satu parameter utama untuk pengukuran kinerja isolator luar ruangan telah dilakukan oleh para peneliti, baik uji laboratorium maupun uji lapangan. Besaran arus bocor dipengaruhi oleh faktor lingkungan (ESDD, NSDD, kelembaban, temperatur, UV, curah hujan, dan angin), tegangan sistem, profil isolator, dan mekanik serta penuaan. Arus bocor isolator yang mendekati nilai ambang tertentu dapat menimbulkan flashover. Untuk penilaian kinerja isolator luar terhadap kemungkinan terjadinya *flashover* akibat polutan, maka amplitudo arus bocor maksimum dari setengah siklus dapat ditentukan (I_{max}) dengan menggunakan persamaan (2.7) berikut:

$$I_{max} = \left[\frac{S_{CD}}{15.32} \right]^2 \quad (2.7)$$

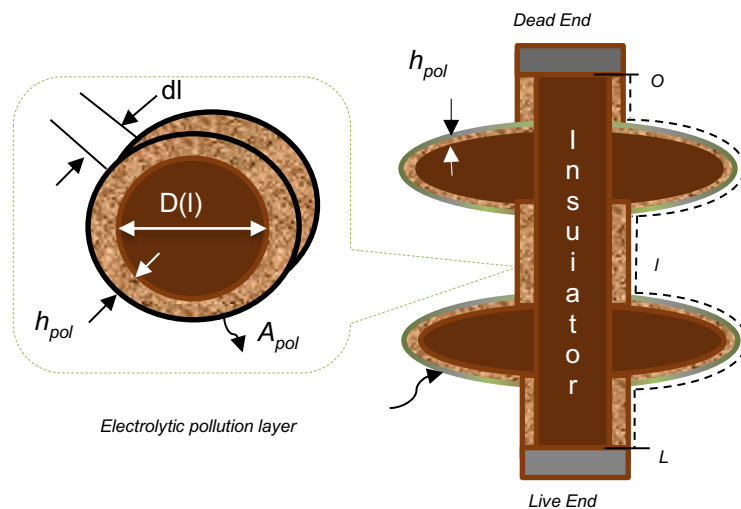
dengan S_{CD} adalah jarak rambat spesifik, yang diberikan oleh:

$$S_{CD} = \frac{L_{CD}}{V_m} \quad (2.8)$$

Dimana, L_{CD} merupakan jarak rambat total insulator, (mm) dan V_m adalah tegangan maksimum sistem phase ke phase, (kV_{rms}). Hambatan lapisan permukaan pada isolator merupakan faktor utama yang menentukan besarnya arus bocor dan juga merupakan faktor yang menyebabkan terjadi

flashover atau tidak. Untuk menentukan resistansi lapisan permukaan untuk lapisan polusi pada isolator yang direpresentasikan secara visual pada Gambar 5, maka sepanjang jalur rambat isolator L_{CD} lapisan polusi elektrolitik permukaan terbagi menjadi beberapa bagian kecil (Δl), dapat dihitung dengan persamaan,

$$R = \rho \frac{L_{CD}}{A} \quad (2.9)$$



Gambar 5. Representasi visual dari lapisan polusi pada isolator

Dengan resistansi polutan $dR_{pol.}$ dari bagian incremental diberikan oleh,

$$dR_{pol.} = \frac{\rho_{pol} \cdot dl}{A_{pol}} \quad (2.10)$$

Substitusi $A_{pol} = \pi \cdot D(l)h_{pol}$ ke persamaan (2.10) dan kedua sisi diintegrasikan, sehingga diperoleh,

$$R_{pol} = \frac{\rho_{pol}}{h_{pol}} \int_0^L \frac{1}{\pi \cdot D(l)} dl \quad (2.11)$$

Jika $\sigma = 1/\rho_{pol}$ dan $\sigma_s = \sigma \cdot h_{pol}$, maka persamaan (2.11) menjadi,

$$R_{pol} = \frac{1}{\sigma_s} \int_0^L \frac{1}{\pi \cdot D(l)} dl \quad (2.12)$$

Di mana, R_{pol} adalah resistansi lapisan permukaan dari polutan ($M\Omega$), ρ_{pol} adalah resistivitas volume lapisan polusi elektrolitik ($M\Omega \cdot mm$), A_{pol} adalah luas penampang lapisan polusi pada posisi l (mm^2), $D(l)$ adalah diameter isolator pada posisi l sepanjang jalur rambat isolator (mm), σ adalah konduktivitas volume lapisan polusi isolator ($\mu S/mm$), dan σ_s merupakan konduktivitas permukaan polusi isolator (μS).

Untuk prediksi tegangan *flashover* kritis yang disebabkan resistansi permukaan isolator (R_{pol}) mencapai nilai kritis minimum karena penuaan atau pengaruh iklim lingkungan, maka formula yang diusulkan dan dimodifikasi oleh Holtzhausen (JP Holtzhausen, 1977), ditunjukkan sebagai,

$$V_c = k_1 \cdot 10^{-3} \cdot \left[\frac{R_c \cdot 10^6}{L_{CD}} \right]^{k_2} \cdot L_{CD} \quad (2.13)$$

Di mana, V_c merupakan tegangan flashover kritis (kV), $R_c = R_{pol}$ adalah nilai resistansi kritis isolator, ($M\Omega$), dan nilai $k_1 = 7,6$ dan $k_2 = 0,35$. Jarak rambat minimum yang akan diberikan dihitung dengan menggunakan persamaan (2.13), dimana jarak rambat spesifik yang direkomendasikan untuk berbagai kelas keparahan polusi suatu lokasi diberikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Jarak rambat yang direkomendasikan pada level intensitas polusi

Tingkat intensitas polusi		Jarak rambat spesifik minimum (mm/kV)		
		AC		DC
		$V_{m(pp)}$	$V_m/\sqrt{3}$	
I	Ringan	28	16	20
II	Sedang	35	20	24
III	Berat	43	25	31
IV	Sangat berat	54	31	38

Sebagai aturan praktis, tegangan penahan udara meningkat sebesar 0,2% untuk setiap kenaikan 1 g/m^3 dalam kelembaban absolut. Dengan demikian harus dipahami bahwa kelembaban yang tinggi tidak memiliki efek merugikan langsung pada tegangan ketahanan isolator, tetapi hasil pembasahan kontaminan pada permukaan isolator yang dapat menyebabkan *flashover* polusi.

2.6. Tingkat Kontaminasi pada Isolator luar ruangan

Tingkat polusi atau kontaminasi pada permukaan isolator tegangan tinggi luar ruangan merupakan keseimbangan antara proses akumulasi dan proses pembersihan, di mana perubahan tingkat polusi yang paling signifikan terjadi pada permukaan isolator selama periode kering. Hujan dan angin secara alami efektif menghilangkan polusi dari permukaan isolator. Disisi lain, angin juga diidentifikasi sebagai faktor penting dalam proses akumulasi polusi, terutama di terowongan angin dan di dekat laut

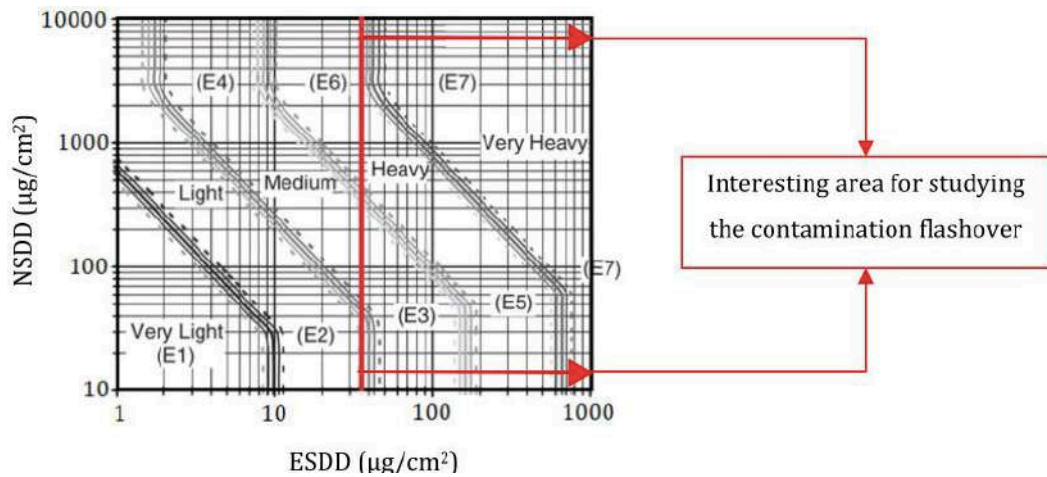
(Looms, 1998a). Pada prinsipnya tingkat pencemaran yang terakumulasi pada permukaan isolator bergantung pada:

- Konsentrasi (g/m^3) polutan di udara.
- Laju aliran (m/det) partikel udara yang mengelilingi permukaan isolator.
- Orientasi isolator relatif terhadap semburan hujan dan aliran angin di sekitar permukaan isolator.
- Keadaan permukaan isolator, ditinjau dari jenis dan kondisinya.

Dalam Gugus Tugas CIGRE 33.04.01 (CIGRE Taskforce 33.04.01 2000) , type polusi didefinisikan sebagai berikut:

- Lingkungan laut, di mana kedekatan laut memperkenalkan Na, Cl, Mg, K dan garam laut lainnya ke atmosfer.
- Lingkungan industri termasuk sumber polusi terlarut dari pabrik baja, kilang atau sumber debu inert seperti tambang dan pabrik semen
- Lingkungan pertanian termasuk polutan dari pupuk yang sangat larut serta debu dan sekam yang tidak larut/soluble.
- Lingkungan gurun memperkenalkan polutan seperti pasir lembam serta garam di beberapa daerah.

Menurut IEC 60815-1,(2018), nilai $0,01 \text{ mg/cm}^2$ dianggap ringan, sedangkan nilai di atas $0,4 \text{ mg/cm}^2$ sangat berat. Gambar 6 menunjukkan klasifikasi tingkat densitas deposit garam setara (ESDD) serta non-soluble deposit density (NSDD) dalam hal tingkat keparahan polusi.



Gambar 6. Perkiraan kurva Z untuk tingkat keparahan

Gorur dkk (2005) telah menetapkan bahwa wilayah yang diminati untuk tujuan mempelajari *flashover* kontaminasi adalah antara tingkat kontaminasi sedang dan sangat tinggi yaitu tingkat ESDD 0,1-0,5 mg/cm² (IEC 60815-1, 2018). Tabel 4 mendefinisikan berbagai tingkat polusi berdasarkan kisaran kepadatan deposit garam yang setara.

Tabel 4. Level intensitas polusi berdasarkan nilai ESDD

Tingkat intensitas polusi		Indeks endapan permukaan, ESDD (mg/cm ²)
I	Ringan	< 0,06
II	Sedang	0,06 – 0,12
II	Berat	> 0,12 – 0,24
IV	Sangat Berat	> 0,24

2.7. Sifat pembasahan dari Isolator Karet Silikon yang tercemar

Proses pembasahan yang paling signifikan dari lapisan polusi dapat diklasifikasikan seperti yang dijelaskan dalam (Leclerc, M., Bouchard, R., Gervais, Y., and Mukhedkar, 1982) dengan klasifikasi berikut:

- Kondensasi yang terjadi ketika suhu permukaan isolator turun di bawah titik embun, seringkali terjadi dini hari.
- Pengendapan melalui kabut, berkabut, dan hujan.

Menurut para peneliti (Leclerc, M., Bouchard, R., Gervais, Y., and Mukhedkar, 1982) menemukan bahwa, proses pembasahan dipengaruhi perbedaan antara permukaan isolator dan suhu lingkungan. Laju pembasahan dari isolator karet silikon ditentukan sebagai fungsi dari perbedaan suhu, dan juga oleh sifat-sifat permukaan di mana komposisi kimianya dan kekasaran merupakan faktor yang sangat berpengaruh. Faktor-faktor ini secara dinamis berubah-ubah yang mengakibatkan pengurangan atau hilangnya hidrofobisitas permukaan saat mengalami kondisi iklim yang ekstrim.

2.7.1. Kehilangan Hidrofobisitas

Hidrofobisitas adalah fitur dinamis yang dapat hilang selama pelayanan tetapi juga dapat dipulihkan jika waktu pemulihan yang cukup dari tegangan listrik diberikan (Reynders, 1999). Permukaan hidrofobisitas akan pulih setelah 10-12 jam kering dan periode bebas dari flashover (Maadjoudj, Mekhaldi, and Teguar 2018). Menurut Fong (2002) dan (Sherif

M. Elbadri, 1987a) bahwa SiR dapat tetap hidrofobik setelah sembilan tahun terpapar lingkungan pantai yang terkontaminasi di Anneberg, Swedia. Hasil lapangan ini didukung oleh uji laboratorium yang dilakukan oleh Gorur dan Thallam (Ching et al., 2019), di mana karet silikon dan EPR terkena UV buatan dan suhu yang lebih tinggi 550°C selama 6.000 jam. Setelah pemaparan, sampel karet silikon bersifat hidrofobik tanpa perubahan yang terlihat, sedangkan sampel EPR dapat dibasahi sepenuhnya dan menunjukkan degradasi yang terlihat oleh retakan permukaan.

Namun, karet silikon dapat kehilangan sifat hidrofobiknya jika terkena pelepasan permukaan. Gorur dkk. (Gorur, R.S.E.A. Chemey, 1988) menunjukkan bahwa sampel SiR yang terkena tegangan tinggi (10 sampai 20 kV/mm) dalam kabut garam 250 μ S/cm menjadi basah setelah sekitar 60 sampai 70 jam. Bukti yang dipublikasikan tentang hilangnya hidrofobitas karet silikon dalam situasi praktis tidak tersedia secara luas. Beberapa contoh dapat ditemukan oleh (Vlastds, 1994). Sebuah isolator SiR yang terpapar polusi garam yang berlebihan di Anneberg Swedia menunjukkan peningkatan arus bocor; ini ditafsirkan sebagai akibat hilangnya sebagian hidrofobitas.

2.7.2. Pemulihan Hidrofobitas

Berdasarkan penemuan oleh Ravindranath Srinivasan Gorur (1986), Ali and Hackam (2009), Dqghu et al.,(2017), Chang and Gorur (1994) dan Bär and Bärsch (2015) ditemukan bahwa bahan karet silikon mampu

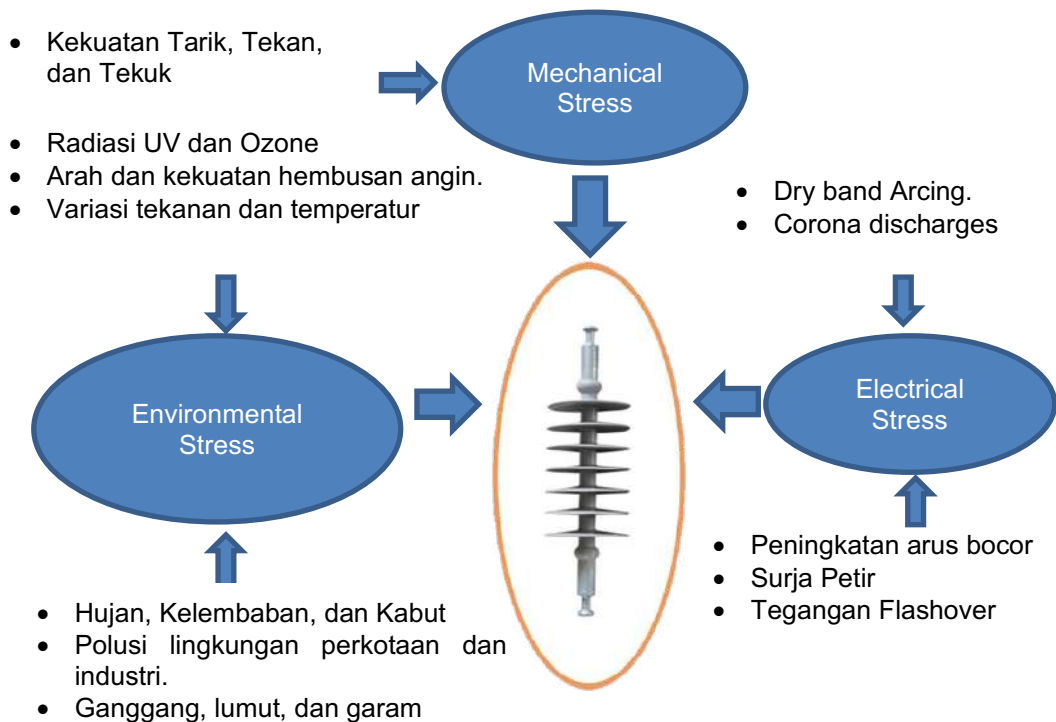
memulihkan hidrofobisitas setelah kerusakan dari pelepasan permukaan, dan mentransfer hidrofobisitas ke partikel polusi di permukaannya. Sifat-sifat ini sangat bermanfaat karena memungkinkan isolator yang rusak oleh cuaca buruk dan kondisi polusi untuk memulihkan sifat listriknya. Pemulihan hidrofobisitas permukaan disebabkan oleh difusi polimer berat molekul rendah dari curah ke permukaan (Gorur, R., Cherney, E., 1988), (R S Gorur, Chang, dan Park, 1990), dan (Zhu *et al.*, 2018). Berat molekul silikon yang rendah juga dapat membungkus polusi permukaan sehingga membuatnya menjadi hidrofobik (Bär dan Bärsch, 2015). Silikon LMW didefinisikan oleh (R S Gorur, Chang, dan Park, 1990) sebagai fragmen silikon dengan berat molekul kurang dari 1,000 gram. Sebuah proses pemulihan hidrofobisitas kepentingan sekunder adalah karena rotasi tulang punggung silikon yang mereorientasi gugus metil hidrofobik ke permukaan (J.W. Gang dan R.S.Gorur, 1992).

2.8. Penuaan Isolator Tegangan Tinggi

Isolator tegangan tinggi dalam layanannya mengalami penuaan yang prosesnya sangat rumit karena respon gabungan dari masing-masing komponen isolator terhadap tegangan, mekanis dan lingkungan. Secara visual, beberapa efek penuaan dapat diamati tetapi untuk evaluasi yang meyakinkan biasanya tes diagnostic sangat diperlukan (Cherney *et al.*, 2014). Dalam paper (Jonscher dan Isnins, 1996) dan (Wakhidin dan Samples, 2018) bahwa tekanan penuaan lingkungan, seperti kelembaban, variasi suhu, dan radiasi ultraviolet, serta tekanan elektrik dan mekanis dari

konduktor mempengaruhi kinerja isolator polimer melalui pengaruhnya terhadap kondisi permukaan isolator, dimana bahan polimer kehilangan hidrofobitasnya sampai taraf tertentu setelah terkena penuaan lingkungan. Begitu juga tanda-tanda pelepasan intensif pita kering juga ditemukan pada isolator porselen yang diuji. Namun, peran mereka dalam kinerja isolator belum jelas, dan diperlukan lebih banyak studi untuk menjelaskannya (Fernando and Gubanski, 2000).

Proses penuaan pada isolator komposit diakibatkan oleh banyak faktor penuaan. Faktor utama yang menyebabkan degradasi isolator polimer adalah tekanan lingkungan, listrik, dan mekanik, ilustrasinya ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja isolator

2.8.1. Isolator Komposit

Mekanisme penuaan isolator porselin telah dijelaskan secara rinci dalam (Cherney *et al.*, 2014), sehingga untuk memahami mekanisme dari penuaan tersebut, maka tinjauan singkat ini penting untuk disajikan (Mousalreza Faramarzi Palangar and Mohammad Mirzaie, 2016).

Berdasarkan pengamatan dan pengalaman lapangan dari beberapa isolator porselen bahwa cangkang dielektrik menjadi retak setelah bertahun-tahun dalam layanan yang disebabkan oleh ekspansi semen yang lambat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8 (Cherney *et al.*, 2014) dan (Cherney and Hydro, 1983). Pembasahan baik dari hujan atau kelembaban yang tinggi yang diserap oleh semen dapat mempercepat proses pemuaihan, terutama pada ujung string isolator sehingga lebih cenderung mengalami keretakan.

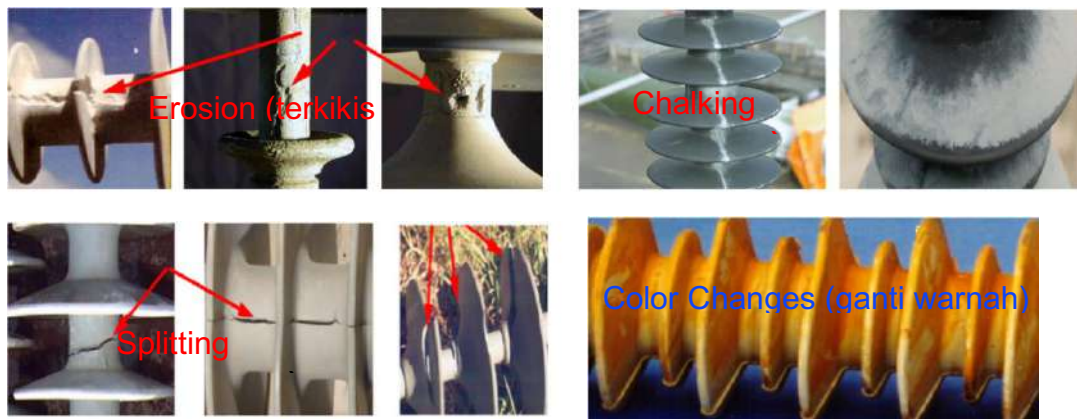


Gambar 8. Cangkang isolator yang retak dari penuaan

2.8.2. Isolator non komposit

Perubahan komposisi kimia karet silikon dari sebagian besar polimer oleh difusi berat molekul rendah, *low molecular weight* (LMW) akan membentuk lapisan kontaminasi melalui proses difusi yang diendapkan. Pemulihan hidrofobitas oleh proses difusi dari rantai polimer LMW memungkinkan isolator tetap bersifat hidrofobik (J. W. Chang and R. S. Goru, 1994) dan mengurangi konduktivitas permukaan basah (B. Du and Xu, 2014).

Bahan polimer telah terbukti mengalami penurunan (degradasi) kinerja listrik dengan cepat akibat penuaan karena hilangnya sifat hidrofobik dari material SiR secara bertahap seiring waktu. Isolator polimer luar ruangan yang mengalami penuaan akibat terpapar iklim lingkungan seperti kelembaban, suhu, UV dan tegangan listrik akan berdampak pada kinerja jangka panjang (Verma, Reddy, and Chakraborty, 2018). Menurut literature (Cherney, 1981) bahwa isolator polimer dalam layanan selama 18 bulan mengalami degradasi permukaan yang mengakibatkan penurunan tegangan flashover sekitar 25% dan 30% berdasarkan pemanfaatan lapisan polusi Kaolin dan garam secara artifisial. Kemudian oleh (Sherif M. Elbadri, 1987b) juga menemukan penurunan kinerja flashover akibat penuaan isolator polimer. Efek pelapukan dapat menurunkan kinerja polusi dari isolator polimer sehingga kinerja akan lebih buruk dari isolator porcelain. Penuaan yang signifikan pada isolator polimer SiR diperlihatkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Penuaan yang signifikan pada isolator polimer SiR

2.9. Karakteristik Isolator

2.9.1. Karakteristik Elektrik

Semua isolator dirancang dengan tegangan tembus listriknya jauh lebih tinggi dari tegangan *flashover*nya. Kekuatan dielektrik dan nilai tegangan yang dapat dipikul isolator tanpa terjadi lewat denyar dapat diperkirakan dari tiga karakteristik dasar isolator, yaitu tegangan *flashover* bolak balik pada keadaan kering, tegangan *flashover* bolak balik pada keadaan basah, dan karakteristik tegangan waktu yang diperoleh dari tegangan surja standar (Ivran, 2000).

Tegangan *flashover* bolak-balik digunakan untuk memperkirakan kekuatan dielektrik isolator jika memikul tegangan lebih internal. Sedangkan karakteristik tegangan-waktu digunakan untuk memperkirakan kekuatan dielektrik isolator jika memikul tegangan lebih surja akibat sambaran petir pada jaringan.

Tegangan *flashover* pada keadaan permukaan isolator kering dan bersih dinyatakan pada keadaan standar. Menurut *Japanese Industrial Standard (JIS) C3801* dan *Japanese Electrotechnical committee (JEC)* standar 106, keadaan Standar adalah tekanan barometer 760 mm Hg (1013 mbar), suhu sekeliling 20°C, dan kelembaban mutlak 11 g/m³.

Oleh karena tegangan *flashover* selalu dipengaruhi oleh keadaan udara, maka untuk dapat membandingkan pengujian dengan tabel standar yang ada diperlukan persamaan untuk verifikasi hasil. Hal ini diperlukan agar dapat diketahui apakah spesimen yang diuji memenuhi syarat atau tidak.

Persamaan yang digunakan untuk verifikasi tegangan saat pengujian (V) terhadap tekanan udara dan suhu adalah:

$$V = \delta \cdot V_s \quad (2.14)$$

dengan:

V_s : tegangan *flashover* isolator pada keadaan standar

V : tegangan *flashover* isolator pada saat pengujian

δ : faktor koreksi udara

$$\delta = \frac{b}{760} \times \frac{273 + 20}{273 + T} \quad (2.15)$$

Dimana:

T : suhu sekeliling pada saat pengujian, °C

b : tekanan udara pada saat pengujian ,mmHg

Jika V_S adalah tegangan *flashover* isolator pada keadaan udara standar dan kelembaban 11 g/m^3 , maka tegangan *flashover* isolator pada sembarang suhu, tekanan dan kelembaban udara dapat ditentukan sebagai berikut:

$$V = \frac{\delta V_s}{k_h} \quad (2.16)$$

Di mana k_h adalah faktor koreksi kelembaban udara

Untuk hubungan tegangan *flashover* terhadap arus bocor, maka digunakan persamaan:

$$V = I \cdot R \quad (2.17)$$

Hubungan antara kelembaban (k_h) terhadap arus bocor (I) bisa diketahui dengan cara memasukkan persamaan (2.16) kedalam persamaan (2.17) maka diperoleh:

$$R = \frac{\delta V_s}{I \cdot k_h} \quad (2.18)$$

2.9.2. Karakteristik Mekanis

Karakteristik mekanis suatu isolator ditandai dengan kekuatan mekanisnya, yaitu beban mekanis terendah yang menyebabkan isolator tersebut rusak. Kekuatan mekanis ini ditentukan dengan membebani isolator dengan beban yang bertambah secara bertahap hingga isolator terlihat rusak.

2.9.3. Pendekatan teori untuk proses Flashover

Salah satu teori paling awal pada mekanisme *flashover* dari permukaan insulator yang terkontaminasi basah diusulkan oleh Obenaus (Obenaus 1958). Rangkaian ekuivalen dari proses flashover isolator yang tercemar dimodelkan sebagai dua impedansi yaitu saluran busur dan lapisan kontaminasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 10. Tegangan yang diberikan pada isolator yang terkontaminasi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V_s = V_{arc} + V_p = R_{arc}I_{arc} + R_p I_{arc} = I_{arc}(R_{arc} + R_p) \quad (2.19)$$

Resistansi busur dan lapisan polusi dalam per satuan Panjang dituliskan sebagai berikut:

$$r_{arc} = R_{arc}/x \quad (2.20)$$

$$r_p = R_p/(L - x) \quad (2.21)$$

Gradien listrik yang membujur dari saluran busur dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$E_{arc} = \frac{V_{arc}}{x} = \frac{R_{arc}I_{arc}}{x} = \frac{A}{I_{arc}^n} \quad (2.22)$$

Resistansi busur pada persamaan (2.22) dapat dituliskan menjadi:

$$R_{arc} = \frac{xA}{I_{arc}^{(n+1)}} \quad (2.23)$$

Dengan menggabungkan (2.19), (2.21), dan (2.23), maka tegangan yang diterapkan pada isolator tercemar adalah:

$$V_s = xAI_{arc}^{-n} + r_p(L - x)I_{arc} \quad (2.24)$$

Kondisi kritis untuk perambatan busur berdasarkan [] adalah $r_{arc} = r_p$, sehingga jika persamaan (2.20) dan (2.21) disubstitusi ke $r_{arc} = r_p$, maka diperoleh:

$$\frac{R_{arc}}{x} = \frac{R_p}{(L - x)} \quad (2.25)$$

Setelah pengaturan persamaan (2.19) dan (2.25), maka tegangan kritis dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_{kri} = \left(R_{arc} + \frac{R_{arc}(L - x)}{x} \right) = \frac{L}{x} R_{arc} I_{kri} \quad (2.26)$$

dimana V_{cri} dan I_{cri} adalah arus busur dan tegangan yang terapkan dalam kasus critical, sehingga dengan menggabungkan persamaan (2.23) dengan (2.25), diperoleh:

$$\frac{R_p}{(L - X)} I_{kri} = \frac{A}{I_{cri}^n} \quad (2.27)$$

Penyederhanan persamaan (2.27) memberikan solusi:

$$I_{kri}^{n+1} = \frac{A(L - x)}{R_p} \quad (2.28)$$

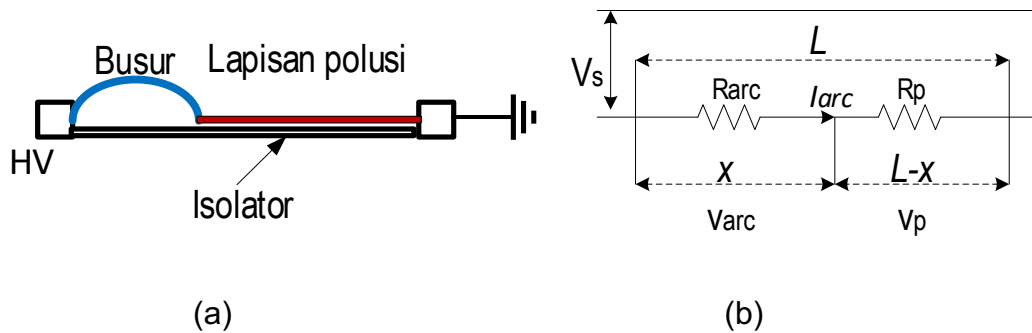
jadi arus kritisnya adalah:

$$I_{kri} = A^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{(L - x)^{\frac{1}{n+1}}}{R_p} \right) = \left(\frac{A}{R_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.29)$$

Jika arus kritis I_{cri} pada persamaan (2.29) dan dengan menggunakan persamaan (2.25) dan (2.27), maka berdasarkan (Salem, Abd Rahman, and Al-Ameri, 2022) diperoleh tegangan flashover sebagai berikut:

$$V_{kri} = \frac{L}{x} \frac{R_p x}{(L-x)} A^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{(L-x)}{R_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} = LA^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{R_p}{(L-x)} \right)^{\frac{n}{n+1}}$$

$$= LA^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.30)$$



Gambar 10. (a) Skema polutan isolator; (b) Rangkaian equivalen

Panjang busur kritis diperoleh dengan defferial tegangan V_{cri} kritis terhadap arus kritis I_{cri}

$$x_{kritis} = \frac{L}{\left[1 + \frac{nA}{r_p I_{acr}^{n+1}} \right]} \quad (2.31)$$

Panjang busur kritis (x_{cri}) diperoleh dengan menggabungkan persamaan (2.29) dengan (2,31), adalah:

$$x_{kritis} = \frac{L}{n+1} \quad (2.32)$$

Di mana:

A : Panjang busur kritis atau jarak minimum busur untuk memulai flashover.

V_{kri} : Tegangan kritis, yaitu tegangan minimum yang diperlukan untuk flashover.

I_{kri} : Arus kritis, yaitu arus minimum yang diperlukan untuk flashover yang terjadi.

Ada empat tahap dari pengendapan kontaminasi hingga terjadi flashover, yaitu pengendapan kontaminasi dan pembersihan alami, tingkat pembasahan, pembentukan daerah kering dan busur listrik serta perilaku flashover.

2.10. Aplikasi Mikrokontroler dalam Monitoring Isolator

Mikrokontroler merupakan sistem komputer yang mempunyai satu atau beberapa tugas yang sangat spesifik. Elemen mikrokontroler tersebut diantaranya adalah pemroses (processor), memori, input dan output. Mikrokontroler sebagai unit prosesor yang akan terintegrasi ke sensor dan komponen elektronika yang digunakan sebagai pembaca inputan dari sensor kemudian dimonitor baik secara manual dan digital.

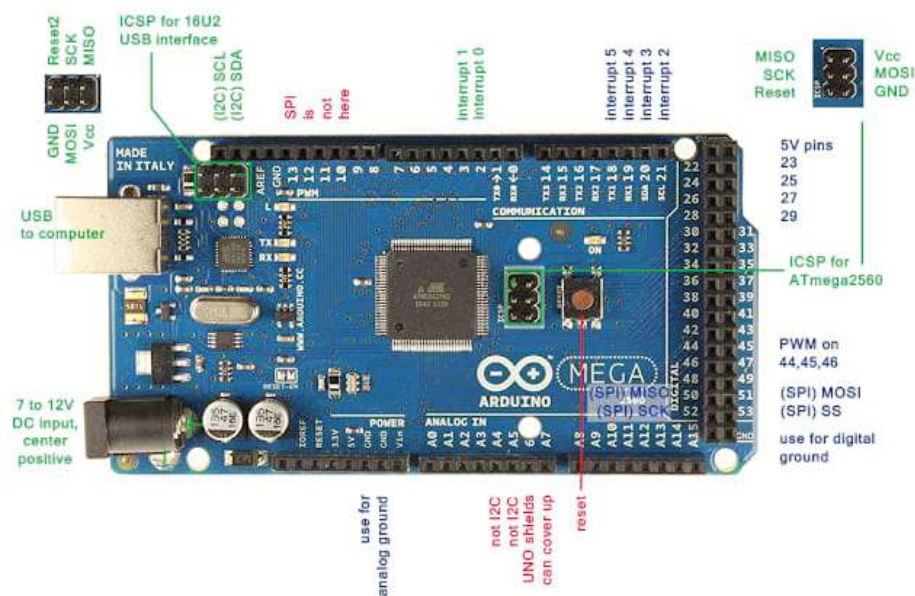
Pemakaian mikrokontroler sebagai alat control telah banyak digunakan untuk monitoring dan pengukuran arus bocor. (Ajeng et al. 2018), merancang monitoring Energi Listrik Menggunakan Sms Berbasis Mikrokontroler Atmega328 yang dapat mengukur dan memantau pemakaian energi listrik real-time.

Untuk sistem monitoring isolator, penggunaan mikrokontroler STM32FM103 ARM Cortex oleh Zou Tingtao (Zuo et al. 2012) merancang sistem Monitoring on-line untuk arus bocor isolator, (Sérgio C. Oliveira, Fontana, and do Monte de Melo Cavalcanti, 2009) melaporkan perilaku

real-time dari arus bocor yang mengalir pada senar isolator tipe kaca dari menara gardu induk 230 kV selama pencucian.

2.10.1. Mikrokontroler Arduino Mega2560

Arduino Mega2560 adalah salah satu tipe mikrokontroler dari Arduino yang merupakan papan mikrokontroler berbasis ATmega2560 yang memiliki total 54 pin digital input / output, terbagi menjadi 15 pin bisa dipakai untuk output PWM, 16 pin dipakai untuk input analog, kemudian 4 pin dipakai untuk port serial hardware atau UART. Tipikal dari mikrokontroler Mega2560 diperlihatkan pada Gambar 11 (Atmel et al. 2015).



Gambar 11. Modul mikrokontroler Arduino Mega2560r

Berikut beberapa komponen lain yang terdapat pada Mikrokontroler Arduino Mega2560, serta beberapa fungsi dari masing masing komponen, sehingga dapat mendukung semua aktivitas pada Mikrokontroler Arduino Mega2560.

Pin daya Mikrokontroler Arduino Mega2560 sebagai berikut:

1. VIN merupakan Tegangan Input ke papan Arduino yang sekarang menggunakan sumber daya eksternal (berlawanan dengan 5 volt dari koneksi USB atau sumber listrik yang diatur lainnya). Kita juga bisa mendapatkan power voltase melalui pin ini, atau bisa mensuplai voltase melalui sumber listrik, silahkan melalui pin ini.
2. 5V adalah daya yang diatur dan digunakan untuk power atau menyalakan mikrokontroler dan komponen lainnya pada papan board. Power ini bisa diperoleh juga dari VIN melalui regulator on-board, atau bisa juga disediakan dari supply USB atau supply 5 Volt yang lainnya.
3. 3V3 adalah Supply power 3,3 volt yang dikeluarkan dari regulator on-board. Power Maksimumnya adalah sekitar 50 mA.
4. GND. atau grounding adalah Pin sebagai grounding yang terhubung ke tanah.

2.10.1.1. Memory

Arduino ATmega2560 memiliki 256 KB flash memory untuk menyimpan kode (yang 8 KB digunakan untuk bootloader), 8 KB SRAM dan 4 KB EEPROM (yang dapat dibaca dan ditulis dengan perpustakaan EEPROM). Masing-masing dari 54 digital pin pada Arduino Mega dapat digunakan sebagai input atau output, menggunakan fungsi `pinMode()` , `digitalWrite()` , dan `digitalRead()`. Arduino Mega beroperasi pada tegangan 5 volt. Setiap pin dapat memberikan atau menerima arus maksimum 40 mA dan memiliki

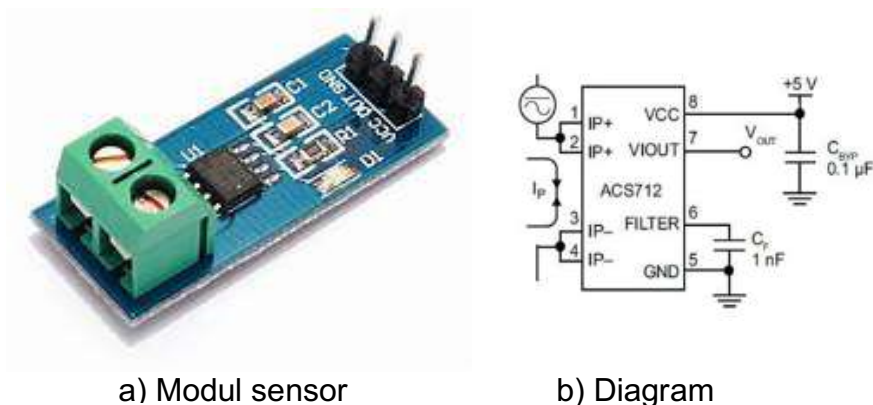
resistor pull-up internal (yang terputus secara default) sebesar 20-50 kOhms. Selain itu, beberapa pin memiliki fungsi khusus, antara lain (Atmel et al. 2015):

- a. Serial: 0 (RX) dan 1 (TX); Serial 1: 19 (RX) dan 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) dan 16 (TX); Serial 3 : 15 (RX) dan 14 (TX). Digunakan untuk menerima (RX) dan mengirimkan (TX) data serial TTL. Pins 0 dan 1 juga terhubung ke pin chip ATmega16U2 Serial USB-to-TTL.
- b. Eksternal Interupsi : Pin 2 (interrupt 0), pin 3 (interrupt 1), pin 18 (interrupt 5), pin 19 (interrupt 4), pin 20 (interrupt 3), dan pin 21 (interrupt 2). Pin ini dapat dikonfigurasi untuk memicu sebuah interupsi pada nilai yang rendah, meningkat atau menurun, atau perubah nilai.
- c. SPI : Pin 50 (MISO), pin 51 (MOSI), pin 52 (SCK), pin 53 (SS). Pin ini mendukung komunikasi SPI menggunakan perpustakaan SPI. Pin SPI juga terhubung dengan header ICSP, yang secara fisik kompatibel dengan Arduino Uno, Arduino Duemilanove dan Arduino Diecimila.
- d. LED : Pin 13. Tersedia secara built-in pada papan Arduino ATmega2560. LED terhubung ke pin digital 13. Ketika pin diset bernilai HIGH, maka LED menyala (ON), dan ketika pin diset bernilai LOW, maka LED padam (OFF).
- e. TWI : Pin 20 (SDA) dan pin 21 (SCL). Yang mendukung komunikasi TWI menggunakan perpustakaan Wire. Perhatikan bahwa pin ini

tidak di lokasi yang sama dengan pin TWI pada Arduino Duemilanove atau Arduino Diecimila.

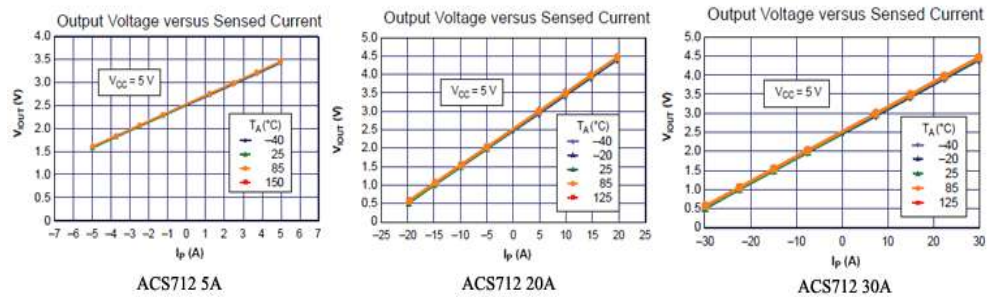
2.10.2. Sensor Arus

Sensor Arus ACS712 merupakan suatu IC terpaket yang mana berguna sebagai sensor arus menggantikan transformator arus yang relatif besar dalam hal ukuran. Pada prinsipnya ACS712 sama dengan sensor efek hall lainnya yaitu dengan memanfaatkan medan magnetik disekitar arus kemudian dikonversi menjadi tegangan yang linier dengan perubahan arus. Nilai variabel dari sensor ini merupakan input untuk mikrokontroler yang kemudian diolah. Keluaran dari sensor ini masih berupa sinyal tegangan AC, agar dapat diolah oleh mikrokontroler maka sinyal tegangan AC ini di searahkan oleh rangkaian penyearah. Gambar 12 merupakan gambar sensor arus.



Gambar 12. Sensor arus tipe ACS712

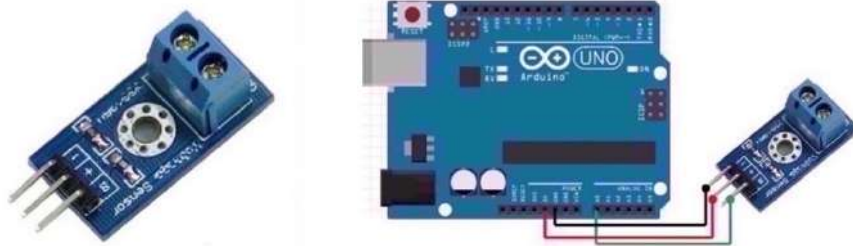
Karakteristik tegangan output terhadap arus pada temperatur yang berbeda untuk setiap tipe dari sensor arus ACS712 diperlihatkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Karakteristik tegangan terhadap arus

2.10.3. Modul Sensor Tegangan

Prinsip kerja modul sensor tegangan yaitu didasarkan pada prinsip penekanan resistansi, dan dapat membuat tegangan input berkurang hingga 5 kali dari tegangan asli. Bentuk modul sensor tegangan seperti ditunjukkan pada gambar 14 berikut:



Gambar 14. Modul sensor tegangan dan rangkaian koneksi Arduino

Spesifikasi:

- Variasi Tegangan masukan: DC 0-25 V
- Deteksi tegangan dengan jangkauan: DC 0.02445 V - 25 V
- Tegangan resolusi analog: 0,00489 V
- Tegangan DC masukan antarmuka: terminal positif dengan VCC, negatif dengan GND

- Output Interface: "+" Koneksi 5 / 3.3V, "-" terhubung GND, "s" terhubung Arduino pin A0
- DC antarmuka masukan: red terminal positif dengan VCC, negatif dengan GND.

Prinsip kerja modul sensor tegangan ini dapat membuat tegangan input mengurangi 5 kali dari tegangan asli. Sehingga, sensor hanya mampu membaca tegangan maksimal 25 V bila diinginkan Arduino analog input dengan tegangan 5 V, dan jika untuk tegangan 3,3 V, tegangan input harus tidak lebih dari 16.5 V. Pada dasarnya pembacaan sensor hanya dirubah dalam bentuk bilangan dari 0 sampai 1023, karena chip Arduino AVR memiliki 10 bit, jadi resolusi simulasi modul 0,00489 V yaitu dari (5 V / 1023), dan tegangan input dari modul ini harus lebih dari 0,00489 V x 5 = 0,02445 V. Sehingga dapat dirumuskan seperti persamaan (2.33) berikut:

$$\text{Tegangan Pengukuran (V)} = ((V_{out} \times 0,00489 \times 5)) \quad (2.33)$$

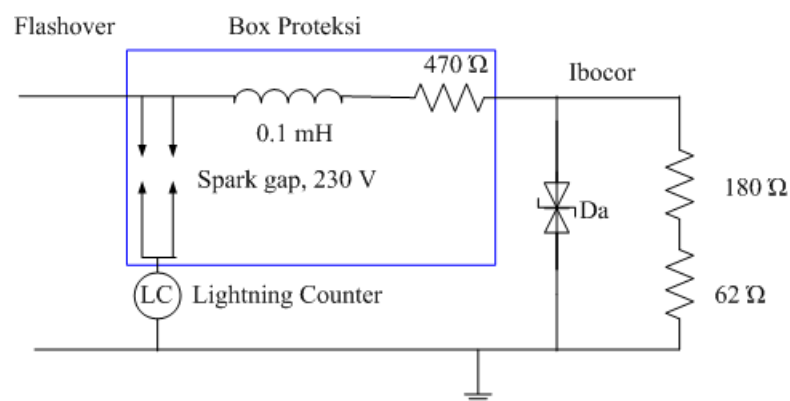
Modul tegangan ini disusun secara parallel terhadap beban.

2.10.4. Spark Gabs

Spark gap adalah suatu alat yang dipasang pada suatu instalasi listrik yang berfungsi untuk melindungi berbagai peralatan listrik yang ada pada instalasi tersebut, saat terjadi lonjakan tegangan (Over voltage) yang melebihi batas toleransi yang diperbolehkan.

2.10.5. Rangkaian proteksi alat ukur

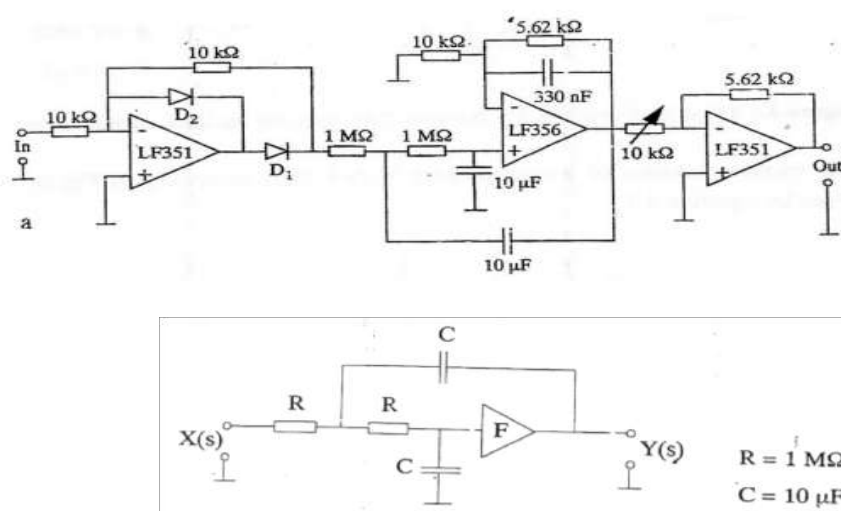
Sistem pengukuran arus bocor isolator tegangan tinggi luar ruangan rentang terhadap tegangan lebih yang disebabkan oleh *flashover*, surja hubung, dan switching. Sistem pengukuran dilindungi oleh sirkuit hibrid dasar yang menggabungkan dua celah percikan paralel-coupled, impedansi seri dan dua dioda *avalanche* (Torbjorn Sorqvist, 1997). Gambar 15 menunjukkan diagram skematik dari perlindungan rangkaian. Kotak perlindungan, yang terletak di masing-masing menara, berisi dua celah percikan paralel-coupled, induktor dan resistor. Tegangan penembakan DC nominal dari celah percikan adalah 230 V. Ini menunjukkan induktor dan resistor memberikan tegangan besar di celah percikan. Selama flashover tegangan cukup besar untuk celah percikan api yang kemudian celah percikan bekerja untuk menutup arus jauh dari dioda avalanche. Dioda avalanche melindungi tahanan pengukuran dan meter arus sedangkan celah percikan dan resistor melindungi dioda *avalanche*. Di luar kotak dan penangkal petir (lightning counter) dihubungkan secara seri dengan celah percikan (spark gap).



Gambar 15. Single line diagram rangkaian proteksi

Dua komponen arus bocor secara otomatis didaftarkan oleh sistem pengukuran, yaitu komponen arus searah dan nilai puncak. Selanjutnya masing-masing disebut sebagai arus bocor dasar dan puncak. Arus dasar berhubungan dengan tegangan lebih dari dua resistor pengukur R1 dan R2 sedangkan arus tertinggi berhubungan dengan tegangan di resistor R2 ohm. Kemudian, kurva arus bocor dasar sama dengan waktu yang sama dengan komponen langsung dan arus bocor puncak setara dengan nilai maksimum periode setengah gelombang negatif dari arus bocor, berturut-turut.

Pertama, komponen arus langsung dari arus bocor, yaitu arus dasar, diperoleh dengan melewati low-pass sinyal input. Meter arus dasar terdiri dari rangkaian-rangkaian terpadu; tahap masukan pembalik, filter *Butterworth low-pass* orde kedua dan tahap keluaran pembalik.



Gambar 16. Diagram rangkaian detektor arus bocor AC

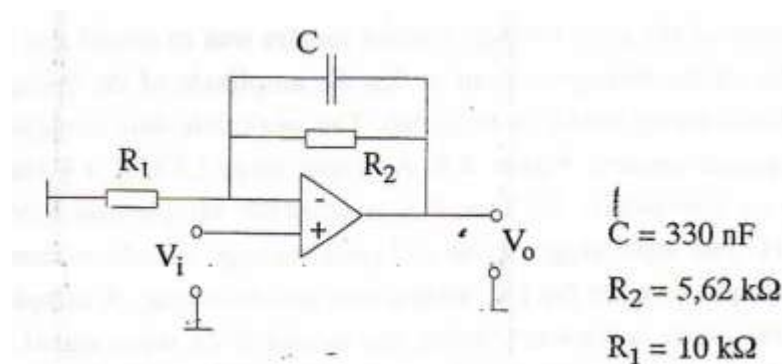
Tahap input dari pengukur arus dasar AC adalah penyearah setengah gelombang yang menghasilkan replika gelombang arah terbalik dari sinyal input.

Untuk sinyal input negatif output dari LF351 adalah positif, bias maju D1 dan menutup loop umpan balik negatif melalui 10 kilo ohm. Untuk sinyal input positif, output amplifier negatif dan D1 mati. Sebaliknya D2 menyala, menerapkan umpan balik negatif ke titik penjumlahan menjepit output opamp menjadi sekitar -0,6 V.

Bentuk dasar dari filter low-pass orde kedua diberikan oleh persamaan (2.34):

$$H(s) = F \cdot \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\alpha\omega_0s + \omega_0^2} \quad (2.34)$$

Filter low-pass yang digunakan dalam detektor arus bocor dasar adalah *voltage-controlled Voltage Source* (VCVS) non inverting orde kedua seperti yang ditampilkan oleh gambar 17. berikut .



Gambar 17. Low-pass filter sumber tegangan terkontrol orde dua

Fungsi transfer untuk filter VCVS orde dua seperti pada gambar 17 memberikan persamaan (2.35)

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = F \cdot \frac{\frac{1}{RC^2}}{s^2 + \left(\frac{3-F}{RC}\right) \cdot s + \frac{1}{RC^2}} \quad (2.35)$$

Dengan menyamakan persamaan 2.34 dan 2.35. Ini jelas bahwa

$$\omega_0^2 = \frac{1}{\left(\frac{1}{RC}\right)^2} \implies \omega_0 = \frac{1}{RC} \quad (2.36)$$

dan

$$2\alpha\omega_0^2 s = \frac{3-F}{RC} \quad (2.37)$$

2.11. Sistem Monitoring dan Identifikasi Isolator

Sistem monitoring adalah aktifitas yang ditujukan untuk memberikan informasi tentang sebab dan akibat dari suatu peralatan listrik yang sedang beroperasi. Monitoring diperlukan agar gangguan awal dapat segera diketahui dan dapat dilakukan tindakan pencucian, perbaikan maupun pergantian isolator sehingga mengurangi risiko yang lebih besar. Sistem monitoring kinerja isolator pasangan luar untuk mengetahui karakteristik arus bocor akibat pengaruh iklim telah banyak dilakukan, diantaranya penelitian yang dilaporkan oleh (Lv et al., 2016) dan (Oliveira *et al.*, 2009). Dari hasil monitoring arus bocor secara real-time, maka dilakukan identifikasi terhadap parameter isolator baik secara fisik maupun secara visualisasi dengan mengacu pada sistem pengukuran IEC 60587, IEC 60060, dan IEC 60815 (Equipments, 1973).

Monitoring kondisi isolator tegangan tinggi pada sistem tenaga bertujuan menyediakan alat diagnostic untuk membantu perusahaan penyedia tenaga listrik dalam mengambil keputusan tentang praktik pemeliharaan, penggantian, dan desain. Saat ini, teknik penilaian kondisi yang paling realistis adalah pengukuran arus bocor, inspeksi visual, dan evaluasi hidrofobisitas.

2.11.1. Monitoring dan Pengukuran Arus Bocor

Monitoring dan pengukuran arus bocor (LC) telah digunakan dalam berbagai macam eksperimen mulai dari uji lapangan skala penuh hingga uji ruang kabut garam skala kecil (Chrzan, 2010). Pengembangan sistem pengukuran tegangan tembus untuk standarisasi pengukuran arus bocor isolator tegangan tinggi oleh (R. Hadi Sardjono, Ahnan Ma'ruf 2012) diperoleh bahwa kualitas suatu isolator porselen berdasarkan tegangan tembus ketika kering dan basah masing-masing 94% dan 42%.

Monitoring dan pengukuran arus bocor insulator bukan masalah baru bagi personel perusahaan listrik. Hingga saat ini, Komisi Federal de Electricidad (Lembaga Penelitian Listrik Meksiko) telah memiliki 44 sistem Monitoring arus bocor yang dipasang pada beberapa saluran transmisi maupun saluran distribusi (Montoya, Ramirez, and Hernandez, 2008), (Werneck et al. 2015), (Wang et al. 2019), dan (Ghosh, Chatterjee, and Chakravorti 2016).

Sistem Monitoring tersebut telah memberikan prespektif yang jauh lebih luas pada berbagai kinerja isolator luar untuk berbagai zona polusi,

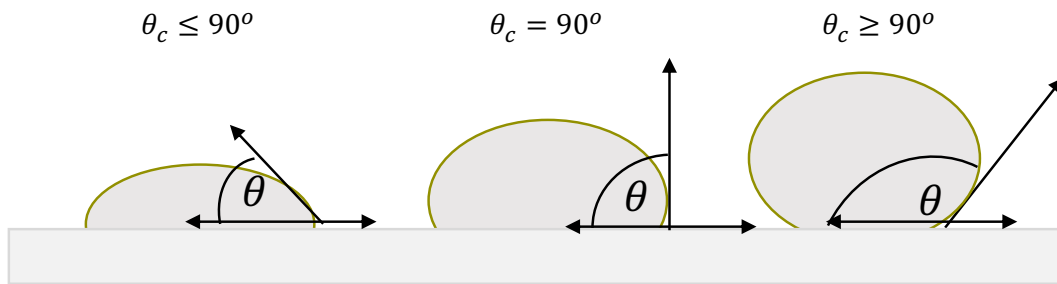
dan besaran arus bocor kritis untuk berbagai profil insulator telah ditentukan berdasarkan uji laboratorium (B. X. Du *et al.*, 2009).

2.11.2. Pengukuran Sifat Hidrofobisitas

Sifat hidrofobik dari bahan isolasi sangat penting ketika berbicara tentang kinerja operasi peralatan listrik. Pada permukaan hidrofobik tidak akan terbentuk lapisan air yang akan menghasilkan arus bocor yang rendah antara tegangan tinggi dan elektroda arde.

Permukaan hidrofobik didefinisikan sebagai permukaan yang tidak mudah dibasahi karena tolakan lapisan air, dimana air di permukaan tidak membentuk film kontinu, tetapi membentuk tetesan individu. Menurut Blackmore and Birtwhistle (1997) dan Rowland *et al.* (2007), permukaan karet silikon lebih hidrofobik daripada isolator konvensional, untuk SiR yang baru kira-kira 100° sedangkan untuk kaca dan porselen masing-masing adalah 44° dan 47° .

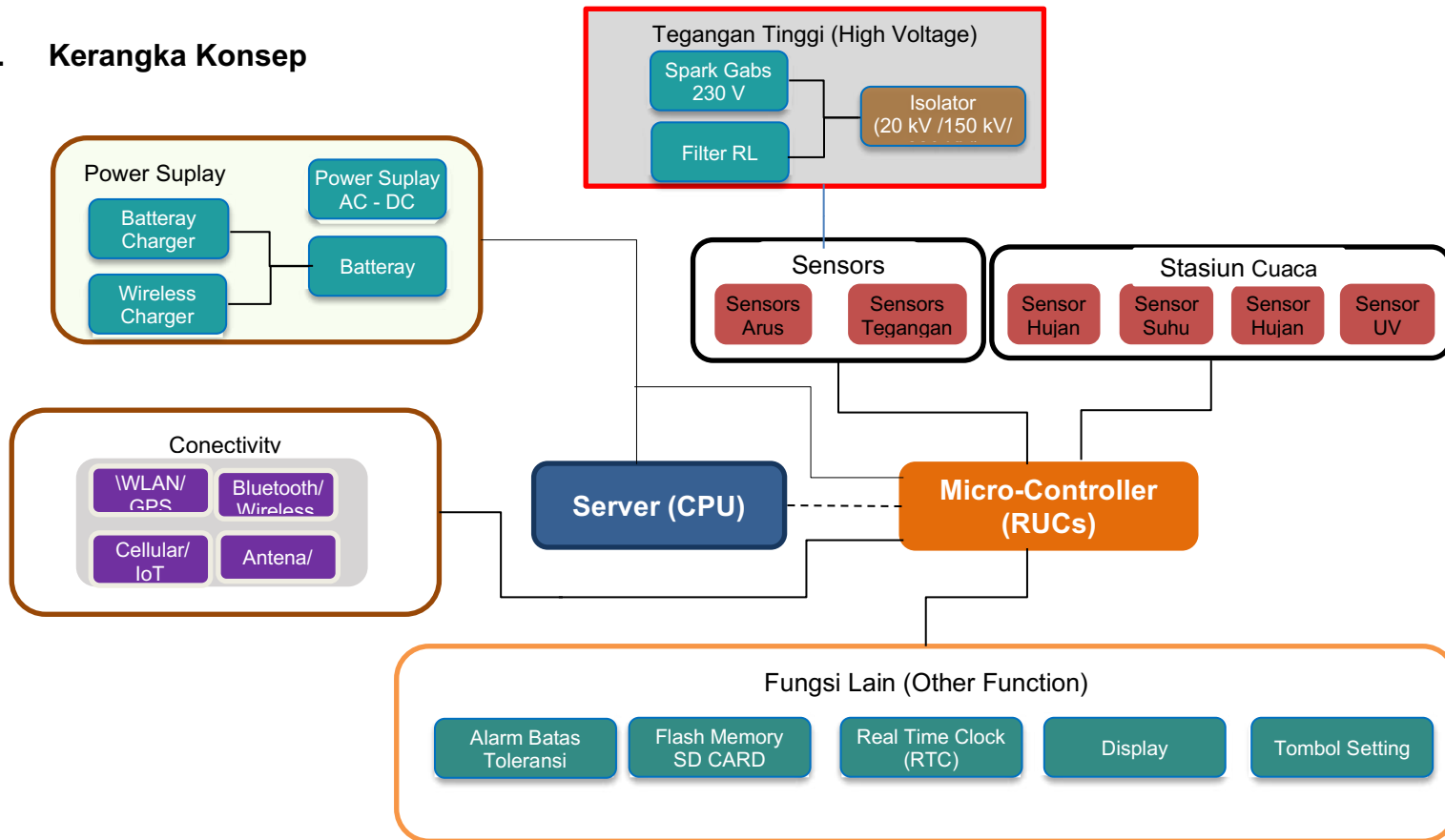
Cara paling sederhana untuk mengukur hidrofobisitas adalah dengan mengukur sudut kontak statis (θ_c) dari tetesan air. Gambar 18 mengilustrasikan perilaku tetesan air pada permukaan hidrofilik dan hidrofobik. Sudut kontak $\theta_c \leq 90^\circ$ menunjukkan bahwa permukaan bersifat hidrofilik; sedangkan sudut kontak $\theta_c \geq 90^\circ$ menunjukkan bahwa permukaan bersifat hidrofobik (Yuan and Lee 2013).



Gambar 18. Ilustrasi sudut kontak pada permukaan isolator

Sifat hidrofobik pada suatu permukaan isolator mempengaruhi besar sudut kontak air pada permukaan isolator. Sifat hidrofobik berguna agar permukaan isolator tetap memiliki konduktivitas yang rendah, sehingga nilai arus bocor yang mengalir relatif lebih kecil. Besar sudut kontak yang terbentuk mempengaruhi besar arus bocor dan medan listrik pada permukaan isolator.

2.12. Kerangka Konsep



Gambar 19. Kerangka konsep penelitian