

Mekanisme Respon Arus Bocor Isolator Luar Ruangan Di Bawah Pengaruh Iklim Tropis

Tambi¹, Wa Ode Zulkaida², Muhammad Nadzirin Anshari Nur³, Fachrur Razy Rahman⁴

^{1,2,3} Teknik Elektro, Universitas Haul Oleo, Kendari

⁴ Program Studi D3 Teknik Listrik dan Instalasi, Politeknik Industri Logam Morowali, Palu

Copresponder Author: Tambi

Email: gallatambi@gmail.com

Abstract — It is important to know the leakage current response mechanism in outdoor insulators when it rains after the dry season to predict the risk of flashover exposed to environmental pollution in aging insulators, so that it can be used as initial information by network maintenance operators to take action in the field. The main objective of this paper is to determine the effect of accumulated pollution and wetting on insulator surfaces on leakage currents at the beginning of the rainy season after the dry season based on real-time monitoring. Monitoring is carried out on polymer silicone rubber-SIR insulators and porcelain insulators installed on transmission towers or on distribution channels on days with drizzling rain and without rain on aging insulators. Based on the leakage current curve and statistical analysis results, drizzling rain during the day and night does not significantly affect the increase in leakage current in the polymer insulator, except when the temperature is above 35 °C, where the leakage current varies slightly over a wide range.

Keyword — Leakage Current, outdoor insulators, response mechanism.

I. PENDAHULUAN

Penggunaan Isolator pada sistem ketenagalistrikan yang umumnya berada di luar ruangan akan mengalami penuaan bahan isolasi sehingga akan menurunkan kinerja dari isolator itu sendiri. Isolator luar ruangan yang terpapar iklim lingkungan mengalami curah hujan, temperature, UV, dan kelembaban sehingga dengan mudah memperoleh polutan flashover dibawah surja petir dan switching. Isolasi Isolator yang menua akan mengalami degradasi sehingga resistansinya akan berkurang drastis yang menyebabkan peningkatan arus bocor sehingga dapat mempengaruhi kinerjanya dalam mengisolasi bagian yang bertegangan terhadap bagian yang tidak bertegangan pada tower transmisi [1]. Kondisi sistem tersebut akan terganggu jika tidak ditangani secara efektif dengan waktu nyata (*real-time*).

Flashover yang ditimbulkan oleh akumulasi polutan dan mengalami kontaminasi pada area yang luas adalah penyebab utama mengalirnya arus bocor dari permukaan isolator ke ground dari satu system jika tingkat insulasi isolator lebih rendah dari persyaratan terjadinya kontaminasi. Kontaminasi permukaan yang melekat pada isolator seperti debu, polusi udara, garam dan lumut dapat menyebabkan kerusakan isolasi [2] jika tidak dilakukan

pembersihan secara berkala. Oleh karena itu penting untuk mengetahui kondisi isolator yang terpasang di luar ruangan agar dilakukan pembersihan secara teratur untuk meningkatkan kinerja isolasinya. Pembersihan isolator mengacu pada panduan yang telah diberikan untuk isolasi luar ruangan dan sebagai pedoman untuk penyesuaian jarak rambat. Menurut [3] beberapa metode untuk pengukuran ESDD dan NSDD telah dikembangkan untuk klasifikasi derajat pencemaran dengan mengacu pada standar dan teknis seperti CIGRE [[4]], IEC 60815, dan IEC 60507. Tetapi penilaian tingkat kontaminasi dengan pengukuran ESDD dan NSDD punya kekurangan karena pengukurannya bukan dalam kondisi operasi secara riil time tetapi dilakukan dalam kondisi of line [5].

Kemudian hubungan antara arus bocor dan akumulasi polusi, tegangan operasi, pembasahan serta jenis dan geometri isolator telah diusulkan untuk berbagai hubungan kuantitatif dengan metode matematis untuk menganalisis bentuk gelombang arus bocor [6]. Pemanfaatan dari pemrosesan dan analisis sinyal untuk mengevaluasi data yang lebih baik dalam hal domain waktu, domain frekuensi, fase dan energi juga telah dilakukan. Namun hal ini belum ditemukan parameter arus bocor yang paling dekat hubungannya dengan akumulasi dan pembasahan polusi serta mengarakterisasinya ketika hujan gerimis setelah musim kemarau yang menyebabkan arus akan melintasi permukaan isolator. Oleh karena itu, makalah ini menghadirkan pemantauan kondisi isolator riil time ketika terjadi pembasahan akibat hujan gerimis setelah kemarau serta dilakukan analisis statistic terhadap karakteristik dari mekanisme mengalirnya arus dan pulsa arus bocor akibat pembasahan serta memperhitungkan pengaruh suhu lingkungan, ultraviolet UV, dan kelembaban.

II. PEMANTAUAN ARUS BOCOR SECARA RIIL TIME

Pemantauan isolator luar ruangan dilakukan untuk pengukuran dan perekaman arus bocor yang selama dalam layanannya terpapar polutan atmosfer yang terakumulasi selama periode waktu lama. Arus bocor yang melewati

permukaan isolator akan menimbulkan rugi daya pada system tenaga listrik yang akan terkumuasi secara bersamaan dengan rugi daya yang disebabkan oleh ketidakseimbangan beban. Selain itu dengan pengukuran dan pemantauan arus bocor maka status kondisi isolator dapat diketahui sebagai upaya prefentif untuk mengurangi gangguan system yang disebabkan oleh flashover polusi. Hal ini penting dilakukan untuk menjaga suplai energi listrik ke konsumen tetap stabil.

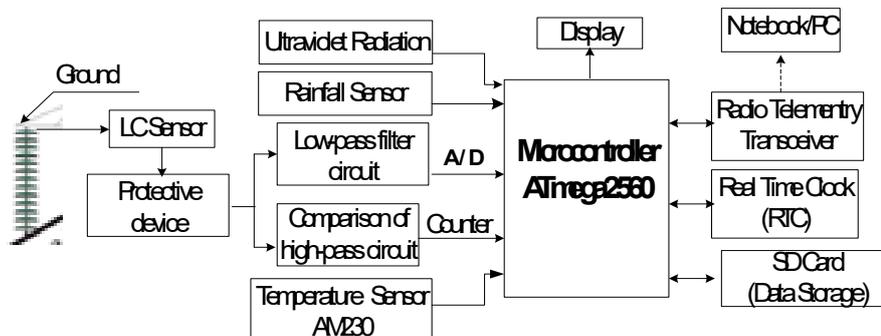
Akumulasi polutan basah yang menempel pada permukaan isolator akan menjadi konduktif karena suhu panas yang ditimbulkan oleh temperature lingkungan serta pembebanan isolator akibat tekanan listrik dan mekanik [7]. Hujan gerimis setelah musim kemarau yang membasahi permukaan isolator pada siang hari berpotensi menimbulkan peningkatan dan fluktuasi arus bocor yang akan mengarah pada flashover polusi jika isolator tersebut mengalami berbagai macam polutan. Ketika terjadi hujan gerimis, serta adanya efek temperature lingkungan dan pembebanan kawat konduktor tegangan tinggi, maka arus bocor akan mengalir melintasi permukaan isolator ketika daerah kering mulai muncul dengan kerapatan arus bocor paling tinggi. Jika daerah kering gagal menahan tegangan yang lebih tinggi maka akan terjadi fenomena seperti pelepasan percikan, busur kecil dan munculnya pulsa arus bocor.

Untuk keperluan penelitian, beberapa metode pengukuran arus bocor tegangan tinggi pada saluran transmisi maupun pada saluran distribusi digunakan untuk menganalisa respon arus bocor isolator dengan kekurangan dan kelebihan masing-masing. Dalam paper [8], metode untuk sistem monitoring on-line jarak jauh jelaskan bahwa ada 2 metode yang biasa digunakan dalam pemantauan arus bocor yaitu metode system aquisasi data (DAS) dan processing data. Menurut Li, Bo Wang, Xiujie Nian, Liu dalam referensi [8] bahwa metode yang paling efektif untuk pemantauan isolator tegangan tinggi adalah pemantauan on-line arus bocor dan arus pulsa secara bersamaan dengan mengadopsi metode sebelumnya, namun pengujiannya belum diungkap secara menyeluruh pada kondisi riil di lapangan. Deteksi dan monitoring saluran transmisi dan distribusi

menggunakan teknologi LED/POF yang diterapkan untuk sensor arus bocor juga telah dilakukan oleh [9], namun masih perlu transformasi data menjadi informasi tentang status isolator. Kemudian dari beberapa penelitian, direkomendasikan bahwa arus bocor digunakan untuk memantau kondisi isolator luar [10], [11] dan prediksi kontaminasi flashover [12] dan [13]. Peneliti juga telah melakukan pencatatan arus bocor, penghitungan lonjakan, dan pengukuran muatan sebagai metode evaluasi dan pemantauan isolator luar ruangan [14] dan [17].

Oleh karena itu dalam paper ini akan diteliti mekanisme respon arus bocor terhadap isolator polimer type suspensi dan isolator porcelain type string luar ruangan pada daerah tropis yang hanya mempunyai dua musim yaitu musim hujan dan musim kemarau. Kinerja isolator luar ruangan sangat rentang dipengaruhi oleh iklim lingkungan terutama di negara Indonesia. Sementara penelitian tentang kinerja isolator tegangan tinggi dari aspek monitoring arus bocor masih perlu mendapat perhatian khusus terutama penyelidikan mekanisme respon arus bocor terhadap perubahan iklim di daerah tropis sehingga penting untuk dilakukan. Isolator luar ruangan yang terpasang pada tower transmisi dan distribusi penting untuk diadakan pemantauan agar diperoleh informasi tentang kondisi isolator setiap saat atau riil time. Kondisi isolator dapat diperoleh dari pengukuran arus bocor melalui monitoring yang dilakukan, namun hal tersebut bias dilakukan dengan peralatan yang memadai, handal, tahan terhadap pengaruh cuaca ekstrim seperti di Indonesia.

Untuk keperluan penelitian tersebut maka sistem pemantauan isolator riil time luar ruangan yang baru untuk perekaman arus bocor dan polusi telah dikembangkan. Alat hasil desain telah digunakan dalam pemantauan isolator tegangan tinggi luar ruangan seperti yang dijelaskan dalam paper [15]. Pengembangan perangkat yang ditingkatkan untuk pemantauan riil time yang akan mengumpulkan sinyal arus bocor dalam jumlah besar terhadap waktu sekaligus mampu melakukan semua analisis statistik yang diperlukan juga telah dilakukan pengujian terus menerus di laboratorium tegangan tinggi.



Gambar 1. Blok diagram sistem pengukuran arus bocor isolator

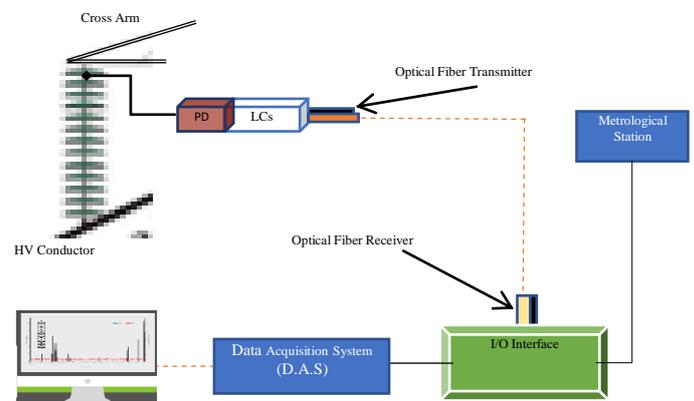
Verifikasi dan validasi terhadap tools hasil desain juga telah dilakukan agar diperoleh hasil pengukuran yang akurat. Sistem perekaman dan pencatatan arus bocor dan parameter lingkungan menggunakan RCU yang terdiri dari komponen filter, mikrokontroler untuk mengontrol sistem dan memproses data yang diperoleh yang dilengkapi dengan Real Time Clock (RTC), converter A/D, sd card, lima sensor arus bocor dan sensor tegangan. Alat tersebut dilengkapi dengan perangkat proteksi berupa filter RL untuk perlindungan sinyal dan perangkat perlindungan berupa spark gap 230 Volt jika terjadi flashover dan switching seperti ditunjukkan pada gambar 1.

Untuk komunikasi data hasil monitoring yang telah diolah oleh mikrokontroler server dengan computer pusat maka digunakan wireless untuk pengiriman dan penerimaan sinyal. Alat monitoring hasil desain ini telah dipasang dan diuji coba pada saluran distribusi dan transmisi untuk pemantauan real – time.

Penerapan dari implementasi alat tersebut telah memberikan informasi penting bagi kondisi system tenaga listrik yang berkelanjutan dalam kondisi operasi khususnya pemantauan isolator polimer dan porcelain terhadap flashover polusi.

Untuk keperluan penelitian tersebut maka sistem pemantauan isolator riil time luar ruangan yang baru untuk perekaman arus bocor dan polusi telah dikembangkan. Alat hasil desain telah digunakan dalam pemantauan isolator tegangan tinggi luar ruangan seperti yang dijelaskan dalam paper [15]. Pengembangan perangkat yang ditingkatkan untuk pemantauan riil time yang akan mengumpulkan sinyal arus bocor dalam jumlah besar terhadap waktu sekaligus mampu melakukan semua analisis statistik yang diperlukan juga telah dilakukan pengujian terus menerus di laboratorium tegangan tinggi. Verifikasi dan validasi terhadap tools hasil desain juga telah dilakukan agar diperoleh hasil pengukuran yang akurat. Sistem perekaman dan pencatatan arus bocor dan parameter lingkungan menggunakan rcus yang terdiri dari komponen filter, mikrokontroler untuk mengontrol sistem dan memproses data yang diperoleh yang dilengkapi dengan real time clock (rtc), converter a/d, sd card, lima sensor arus bocor dan sensor tegangan. Alat tersebut dilengkapi dengan perangkat proteksi berupa filter rl untuk perlindungan sinyal dan perangkat perlindungan berupa spark gap 230 volt jika terjadi flashover dan switching seperti ditunjukkan pada gambar 1. Untuk komunikasi data hasil monitoring yang telah diolah oleh mikrokontroler server dengan computer pusat maka digunakan wireless untuk pengiriman dan penerimaan sinyal. Alat monitoring hasil desain ini telah dipasang dan diuji coba pada saluran distribusi dan transmisi untuk pemantauan real – time.

Penerapan dari implementasi alat tersebut telah memberikan informasi penting bagi kondisi system tenaga listrik yang berkelanjutan dalam kondisi operasi khususnya pemantauan isolator polimer dan porcelain terhadap flashover polusi. Skema pengukuran dan pemantauan arus bocor isolator untuk model komunikasi antara rcus dengan computer pusat serta stasiun cuaca ditunjukkan pada gambar 2. Perangkat proteksi (pd) yang dipasang sebelum sensor arus pada lengan tower transmisi untuk melindungi perangkat dari tegangan lebih karena switching dan flashover serta sebagai filter sinyal audio dan sinyal tegangan yang berfrekuensi tinggi.

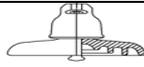


Gambar 2. Skema sistem pengukuran arus bocor, fasilitas penyimpanan dan pemrosesan data.

Sensor arus bocor dan arus pulsa dipasang pada sisi isolator terhadap ground dengan perangkat proteksi sebagai filter yang dirancang untuk melindungi RCU dari tegangan lebih yang ditimbulkan oleh flashover, surja petir, dan switching. Optical fiber transmitter mengirimkan sinyal arus bocor dan pulsa arus bocor melalui kabel optical fiber cable ke perangkat optical fiber receiver untuk diolah dalam bentuk A/D oleh hasil rancangan GUI. Data arus bocor dan pulsa arus bocor serta data kelembaban, suhu, ultraviolet, dan intensitas hujan dikemas dalam satu big data yang dapat dikirim ke computer pusat atau dapat diakses via android. Komunikasi antara system akuisisi data (D.A.S) dengan PC menggunakan wireless telemetry sedangkan komunikasi via android menggunakan jaringan GPRS. System akuisisi data menggunakan mikrokontroler untuk perekaman, penyimpanan, dan pemrosesan sinyal.

Sistem monitoring arus bocor (LCMs) adalah model monitoring on line untuk pemantauan isolator tegangan tinggi luar ruangan yang telah terpasang pada tower transmisi ataupun pada saluran distribusi. Spesifikasi masing – masing isolator sebagai sampel uji yang terpasang pada lengan tower uji ditampilkan pada table 1.

TABEL I
PARAMETER TEKNIS DARI TEST ISOLATOR

Material Insulator	Main Dimension and Parameter			Configuration
	H	D	L	
Porcelain	155	255	305	
	Number of Unit = 2 unit			
Polymeric SIR	400	115/83	590	

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Mekanisme respon arus bocor isolator tegangan tinggi ketika awal musim hujan terjadi akan dianalisis berdasarkan hasil pemantauan secara on line. Efek pembasahan karena hujan gerimis dengan temperature lingkungan yang tinggi dan pengaruh kelembaban karena kabut atau embun pada malam hari akan dijelaskan berdasarkan kurva hasil pemantauan selama satu bulan. Musim kemarau dan musim hujan yang terjadi dalam setahun pada iklim tropis seperti di Indonesia mengalami siklus musiman dan merupakan salah satu faktor gangguan non teknis terhadap kelangsungan suplai energi listrik ke konsumen. Dampak komponen lingkungan seperti suhu, kelembaban ketika awal musim hujan dimana intensitas hujan masih rendah akan dianalisis berdasarkan karakteristik arus bocor. Akumulasi polutan selama musim kemarau pada permukaan isolator juga dianalisa dengan melakukan pengukuran *Equivalent Salt Deposit Density*, ESDD dan *Non-Soluble Deposit Density*, NSDD.

A. Analisa *Equivalent Salt Defosit Density*, ESDD dan *Non-Soluble Defosit Density*, NSDD.

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

$$ESDD_{Rata} = (ESDD_t \times A_t + ESDD_b \times A_b) \tag{2}$$

$$ESDD = \frac{S_a \cdot V_d}{A_{ins}} \tag{3}$$

Dimana:

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

V_d : Volume air suling yang digunakan (cm³);

A_{isolator} : Luas isolator yang dicuci (cm²);

dan

$$NSDD = \frac{M_2 - M_1}{A} \tag{4}$$

Dimana:

M₁ : berat kertas saring kering tanpa kontaminasi (bersih), mg/cm²

M₂ : berat kertas saring kering terkontaminasi, mg/cm²

A: luas permukaan isolator, cm²

Metode yang digunakan untuk pengambilan polutan pada permukaan isolator adalah dengan metode swab, dimana metode ini cocok untuk pengambilan polutan pada isolator yang terpasang di lapangan tanpa melepaskannya. Hasil pengukuran dan analisa ESDD masing-masing pada kedua isolator tersebut disajikan dalam tabel berikut ini. Hasil pengukuran ESDD yang diperoleh pada isolator polimer jenis suspensi terhadap polutan yang menempel pada permukaan isolator adalah 0,041 mg/cm² seperti yang ditunjukkan pada tabel. 2, nilai ESDD rata-rata berkisar antara 0,0025 mg/cm² sampai 0,086 mg/cm².

TABEL 2. HASIL PENGUKURAN DAN ANALISA ESDD ISOLATOR POLIMER

Sirip	α_{20} (S/m)	ESDD _t (mg/cm ²)	ESDD _b (mg/cm ²)	ESDD _{rata-rata} (mg/cm ²)	ESDD _{isolator} (mg/cm ²)	Level Polusi
1	0.00441	0.0173	0.0235	0.0204	0,041	Ringan
2	0.00490	0.0021	0.0029	0.0025		
3	0.00482	0.0030	0.0142	0,0086		
4	0.00502	0.0023	0.0034	0,0028		
5	0.00494	0.0021	0.0034	0,0034		
6	0.00524	0.0028	0.0029	0,0029		

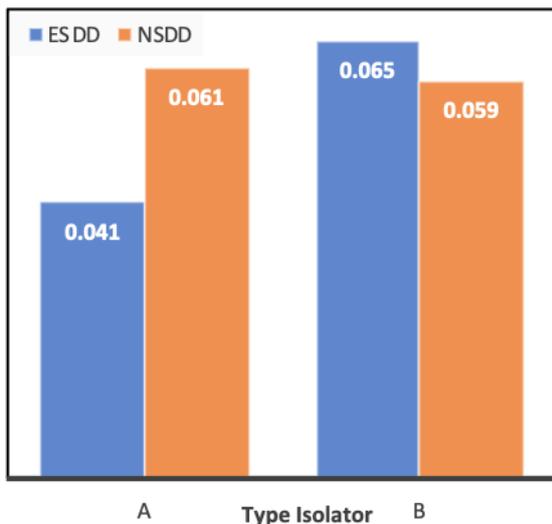
TABEL III. HASIL PENGUKURAN DAN ANALISA ESDD ISOLATOR PORSELIN

Disk	α_{20} S/m	ESDD _t (mg/cm ²)	ESDD _b (mg/cm ²)	ESDD _{rata-rata} (mg/cm ²)	ESDD _{isolator} (mg/cm ²)	Level Polusi
1	0,00539	0,018519	0,0235727	0,0429	0,065	Ringan
2	0,00559	0,017402	0,0259078	0,0216		

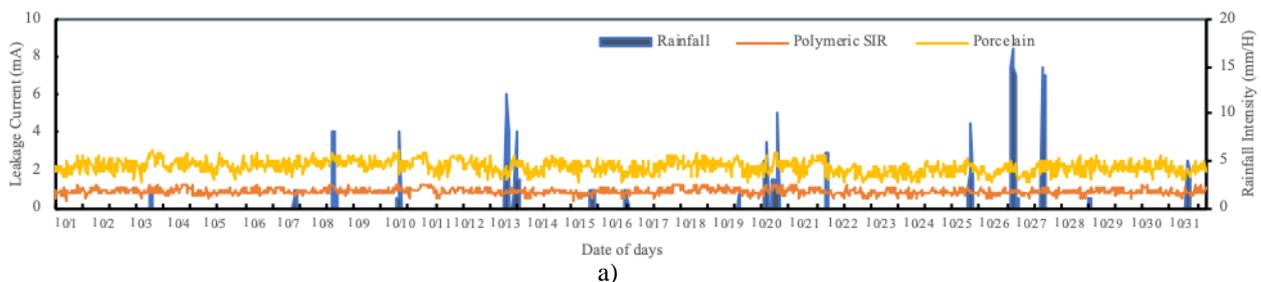
Berdasarkan IEC 60815 diperoleh tingkat intensitas polusi ringan pada isolator polimer jenis suspensi. Hasil pengukuran dan analisa ESDD masing-masing pada kedua isolator tersebut disajikan dalam tabel II.

Pada isolator porselen sampel uji isolator yang digunakan terdiri dari 2 disk dimana tegangan kerja untuk tiap disk adalah 11 kv sehingga dalam penelitian ini ada 2 disk (pin) yang digunakan untuk tegangan 20 kv. Hasil perhitungannya seperti juga pada isolator polimer, hasil pengukuran ESDD yang diperoleh pada isolator porselen jenis suspensi terhadap polutan yang menempel pada permukaan isolator 0,065 mg/cm² dimana perhitungan telah dilakukan dengan cara memisahkan polutan untuk setiap disk isolator dengan ESDD rata-rata berkisar antara 0,0216 mg/cm² sampai 0,0429 mg/cm².

Kemudian perbandingan nilai ESDD dan NSDD seperti pada gambar 3, dimana nilai ESDD pada iolator polimer (tipe A) lebih rendah dari pada nilai NSDD sedangkan pada isolator porselen (tipe B) ESDD lebih besar dari pada NSDD. Namun secara umum dari hasil pengukuran dan analisa jumlah polutan yang menempel pada permukaan isolator porselen lebih besar dari isolator polimer seperti yang ditampilkan pada gambar 3.



Gambar 3 – Histogram ESDD dan NSDD isolator polimer dan isolator porselen

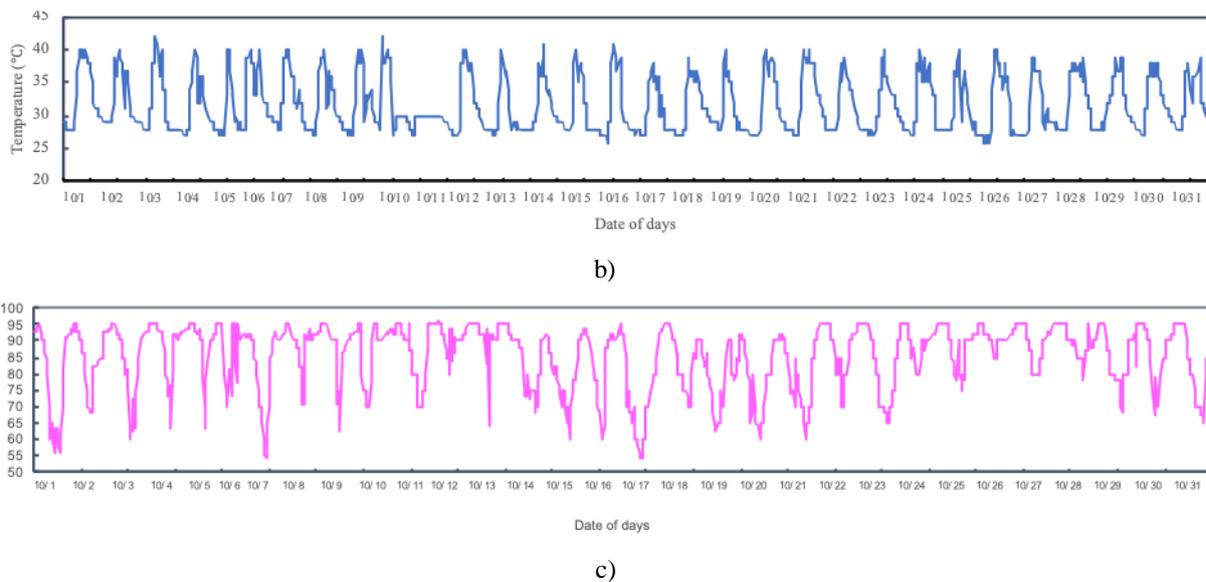


B. Arus Bocor di Awal Musim Hujan

Untuk mempelajari hubungan antara arus bocor isolator dengan suhu dan kelembaban lingkungan pada awal musim hujan di daerah tropis, maka karakteristik arus bocor terhadap intensitas hujan, kelembaban dan suhu lingkungan pada bulan Oktober 2020 diperlihatkan pada gambar 4. Dari hasil pemantauan rekaman arus bocor isolator polymer dan porcelain jenis suspensi selain suhu dan kelembaban juga ditentukan oleh waktu pembasahan permukaan isolator seperti pada gambar 4a, dimana arus bocor akan berfluktuasi selama hujan gerimis dan kembali pada nilai arus bocor yang proporsional setelah terjadi hujan dengan intensitas tinggi pada sore hari. Hal ini disebabkan karena dengan intensitas hujan yang tinggi maka terjadi pembersihan polutan yang menempel pada permukaan isolator. Kemudian gambar 4b dan 4c masing -masing menunjukkan kurva temperature dan kelembaban yang saling berlawanan antara keduanya dimana fluktuasi juga sangat teratur dimana variasi hariannya menunjukkan kurva yang berubah secara teratur terhadap waktu.

Efek kelembaban terhadap fluktuasi arus bocor dalam makalah ini tetap diperhitungkan terutama pada malam hari, dimana kelembaban berkontribusi terhadap fluktuasi arus bocor pada malam hari. Namun jika terjadi hujan dengan intensitas di bawah 1 mm/H pada siang hari dengan temperature tinggi, maka efek pembasahan permukaan isolator yang terpolusi akan berubah menjadi kering dalam waktu singkat sehingga akan mengakibatkan mengalirnya arus pada permukaan isolator pada kisaran yang bervariasi dengan cepat.

Awal musim hujan adalah hari hari pada bulan Oktober yang dianalisis sebagai acuan untuk mengetahui efek dari pembasahan karena hujan gerimis pada siang dan sore hari yang diekstrak dimana kisaran komponen harmonic pertama arus bocor. Berdasarkan hasil rekaman data arus bocor dan analisa statistic dari hasil pemantauan riil time kisaran dan fluktuasi arus bocor dari kedua isolator tersebut telah dipahami dengan baik bahwa kinerja keduanya sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan.



Gambar 4. Karakteristik hasil rekaman data dari pemantauan riil time arus bocor dan parameter lingkungan pada bulan Oktober 2020. (a) Arus bocor dan intensitas hujan. (b) Temperature. (c) Kelembaban.

VII. KESIMPULAN

Berdasarkan pengukuran arus bocor dari hasil pemantauan dan analisis statistik terhadap kedua isolator menunjukkan bahwa respon arus bocor pada awal musim hujan setelah kemarau terhadap iklim lingkungan tropis mengalami fluktuasi dengan peningkatan yang terarur sebelum terjadi pembersihan polutan pada permukaan isolator ketika terjadi hujan dengan intensitas di atas 10 mm/H. Berdasarkan kurva arus bocor dan hasil analisa statistic hujan gerimis pada siang hari maupun malam hari tidak secara signifikan mempengaruhi peningkatan arus bocor pada isolator polimer, terkecuali ketika temperature di atas 35 °C, dimana arus bocor sedikit bervariasi pada rentang yang luas..

UCAPAN TERIMA KASIH

Studi ini dilaksanakan atas dukungan dari PT. PLN Wilayah Sultanbatara selaku penyedia energi listrik dengan memberikan bantuan peralatan untuk keperluan penelitian serta ucapan terima kasih kepada Kepala Laboratorium Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin untuk melakukan pengujian dan validasi terhadap alat monitoring ini.

DAFTAR ACUAN

- [1] M. M. Werneck, D. M. Dos Santos, C. C. De Carvalho, F. V. B. De Nazaré, and R. C. D. S. B. Allil, "Power Transmission Insulators," *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 3, pp. 1338–1346, 2015.
- [2] R. Sundararajan and I. S. Gorur, "Role of Non-soluble Contaminants on the Flashover Voltage of Porcelain Insulators," vol. 3, no. 1, 1996.
- [3] L. H. Meyer *et al.*, "A Study of the Correlation of Leakage Current, Humidity and Temperature of 25 kV Insulators in Urban and Rural Areas," pp. 398–402, 2011.
- [4] CIGRE WG D1-14, "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, Paris, France, 1991, vol. 63.," vol. 63, 1991.
- [5] N. A. Kazuhiko Takasu, Takatoshi Shindo, "Natural contamination test of insulators with DC voltage energization at inland areas - Power Delivery, IEEE Transactions on," vol. 3, no. 4, pp. 1847–1853, 1988.
- [6] I. Ramirez and G. Montoya, "Measurement of Leakage Current," vol. 28, no. 4, pp. 29–34, 2012.
- [7] B. Du and H. Xu, "Effects of thermal conductivity on dc resistance to erosion of silicone rubber/BN nanocomposites," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 2, pp. 511–518, 2014.
- [8] B. Li, X. Wang, and L. Nian, "Remote online monitoring system for suspension insulator strings," *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 4, pp. 2738–2742, 2006.
- [9] M. M. Werneck *et al.*, "Detection and monitoring of leakage currents in distribution line insulators," *Conf. Rec. - IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, pp. 468–472, 2014.
- [10] S. Kumagai and N. Yoshimura, "Leakage current characterization for estimating the conditions of ceramic and polymeric insulating surfaces," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 11, no. 4, pp. 681–690, 2004.

- [11] S. Shihab, V. Melik, L. Zhou, G. Melik, and N. Alame, "On-line pollution leakage current monitoring system," pp. 538–541, 2002.
- [12] A. A. Salem *et al.*, "A New Flashover Prediction on Outdoor Polluted Insulator Using Leakage Current Harmonic Components," *2018 IEEE 7th Int. Conf. Power Energy, PECon 2018*, pp. 413–418, 2018.
- [13] D. Maadjoudj, A. Mekhaldi, and M. Tegar, "Flashover Process and Leakage Current Characteristics of Insulator Model under Desert Pollution," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 25, pp. 2296–2304, 2018.
- [14] S. Kumara and M. Fernando, "Performance of outdoor insulators in tropical conditions of Sri Lanka," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 36, no. 4, pp. 26–35, 2020.
- [15] Tambi, S. Manjang, Syafaruddin, and I. Kitta, "Development of Real – Time Monitoring and Identification System of Aging Insulators in the Tropics," in *2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), Denpasar, Bali, Indonesia., pp. 213-217., 2020.*