

E-ISSN : 2746 - 2536

Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan

Volume 4 No. 2 - Oktober 2023

Departemen Teknik Elektro dan Informatika
Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada
Jl. Yacaranda, Sekip Unit IV, Yogyakarta. 55281

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

Muhammad Arrofiq, Universitas Gadjah Mada

Associate Editor

Candra Febri Nugraha, Universitas Gadjah Mada

Editor

Budi Sumanto, Universitas Gadjah Mada

Esa Prakasa, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Fahmizal, Universitas Gadjah Mada

Fakih Irsyadi, Universitas Gadjah Mada

Imroatul Hudati, Universitas Gadjah Mada

Suhono, Universitas Gadjah Mada

Copyeditor

Jans Hendry, Universitas Gadjah Mada

Ahmad Adhiim Muthahhari, Universitas Gadjah Mada

Assistant Editor

Andi Fariel, Universitas Gadjah Mada

Rismanda Kusumadewi, Universitas Gadjah Mada

Published by:

- 1. Analisis Susut Daya Jaringan sebagai Skema Opsi Penentuan Jalur Manuver Jaringan Distribusi 20kV Penyulang PW02 PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Purworejo** 39 - 45
Burhanuddin Wafiq, Muhammad Hanif Setyo Sahidanto, Hanif Alauddin Zain, Fivta Abidha Nurulita, Ika Erna Putri
- 2. Analisis Metode Sisip Trafo Satu Fasa dan Rekonfigurasi Jaringan dalam Mengatasi Trafo Overload pada Gardu SCG08-0066 PT PLN (Persero) ULP Magelang Kota** 46 - 52
Muhammad Hanif Setyo Sahidanto, Burhanuddin Wafiq, Hanif Alauddin Zain, Fivta Abidha Nurulita, Tika Erna Putri
- 3. Analisis Perbandingan Uprating dan Sisip Transformator Tiga Fase untuk Mengantisipasi Terjadinya Overload pada Transformator Distribusi Penyulang GJN-12 Nomor Tiang U3-89/1 PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota** 53 - 60
Nur Risyia Difa Kusuma Ningrum, Nina Loenca Br Ginting, Haidar Nabil Muflih, Muhammad Dwi Cahyo Ramadhan, Candra Febri Nugraha
- 4. Identifikasi Parameter Adaptif Motor Arus Searah Penguat Terpisah Menggunakan Algoritma LMS** 61 - 68
Nia Saputri Utami, Imroatul Hudati
- 5. Sistem Pemantauan Suhu dan Intensitas Cahaya pada Ruang Kerja (Studi Kasus: Ruang Tugas Akhir Institut Teknologi Sumatera)** 69 - 75
Nia Saputri Utami, Syamsyarief Baqaruzi, M. Imam Robbani, Dani Rahmadana, George Ray Banurea
- 6. A Picofarad Capacitance Meter Based on Phase-Sensitive Demodulation for Tomography Application** 76 - 82
Rocky Alfanz, Hamzah Hamzah, Teguh Firmansyah, Irma Saraswati, Ceri Ahendyarti, Rohmadi Rohmadi, Imamul Muttakin

Published by:

Analisis Susut Daya Jaringan sebagai Skema Opsi Penentuan Jalur Manuver Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang PWO2 PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Purworejo

Burhanuddin Wafiq¹, Muhammad Hanif Setyo Sahidanto¹, Hanif Alauddin Zain¹, Fivta Abidha Nurulita¹, Tika Erna Putri^{1*}

¹Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Gadjah Mada; burhanuddin.wafiq@gmail.com, sahidanto.mh@mail.ugm.ac.id, hanif.a.z@mail.ugm.ac.id, fivtanurulita@mail.ugm.ac.id

*Korespondensi: tika.erna.p@ugm.ac.id

Abstract – *Medium voltage distribution maneuvers are a series of medium-voltage manipulation activities involving two or more feeders with the aim of minimizing blackouts due to disturbances by paying attention to power losses in the network. In maneuvering the network, the selection of the lowest power loss aims to minimize losses and get maximum distribution. Power losses occur due to resistance in the conducting wire of the medium voltage network which carries current, causing high temperatures. Network maneuvers on the PWO2 feeder in Purworejo can be performed on the PWO5 feeder or PWO11 feeder because they have a loop configuration. The PWO2 feeder requires a load overflow of 144,3 A with the network maneuver option on the PWO5 feeder having a total load current of 148,97 A and the PWO 11 feeder having a total load current of 204 A. Based on the calculation of the resistance loss from both network maneuver options, there is a difference where PWO5 is 2.7% and PWO11 is 6.7% of the total feeder power. Considering the total load and active power loss of the network, PWO5 is the main option in maneuvering the load sharing network from PWO2 feeders. The percentage of power loss after network maneuvers has increased to 6.3% of the total load receiving feeder power (PWO5). During network maneuvering, the energy not supplied (ENS) at the time of the outage decreased from 13,493.67 kWh to 77.64 kWh. The Losses incurred from ENS and the increase in post-network maneuvering power losses, when compared to an outage without network maneuvers, result in a total loss of 20,1 million rupiahs. However, with network maneuvering during the outage, the total loss is reduced to 2,8 million rupiahs, representing an 85,9% decrease.*

Keywords – *maneuver, feeder, distribution, power losses, ENS*

Intisari – Manuver jaringan merupakan serangkaian kegiatan manipulasi jaringan tegangan menengah yang melibatkan dua penyulang atau lebih dengan tujuan meminimalisasi terjadinya padam akibat gangguan dengan memperhatikan susut daya pada jaringan. Dalam melakukan manuver jaringan, pemilihan susut daya terendah bertujuan meminimalisasi kerugian dan mendapatkan penyaluran maksimal. Susut daya terjadi akibat adanya resistansi pada kawat penghantar jaringan tegangan menengah yang teraliri arus sehingga menimbulkan suhu tinggi. Manuver jaringan pada penyulang PWO2 Purworejo dapat dilakukan pada penyulang PWO5 atau penyulang PWO11 karena memiliki konfigurasi *loop*. Penyulang PWO2 memerlukan pelimpahan beban sebesar 144,3 A dengan opsi manuver jaringan pada penyulang PWO5 memiliki arus beban total 148,97 A dan penyulang PWO 11 memiliki arus beban total 204 A. Berdasarkan perhitungan susut daya resistansi dari kedua opsi manuver jaringan memiliki perbedaan di mana, PWO5 sebesar 2,7% dan PWO11 sebesar 6,7% dari total daya penyulang. Menimbang dari total beban dan susut daya aktif jaringan, PWO5 menjadi opsi utama dalam manuver jaringan pelimpahan beban dari penyulang PWO2. Persentase susut daya pasca manuver jaringan mengalami kenaikan menjadi 6,3% dari total daya penyulang penerima beban (PWO5). Dalam manuver jaringan, tingkat *Energy Not Supplied* (ENS) pada saat pemadaman turun dari 13.493,67 kWh menjadi 77,64 kWh. Kerugian yang dialami dari ENS dan kenaikan susut daya pasca manuver jaringan, saat terjadinya pemadaman tanpa manuver jaringan kerugian total sebesar 20,1 juta rupiah. Namun, dengan manuver jaringan saat terjadi pemadaman, kerugian total 2,8 juta rupiah atau turun hingga 85,9%.

Kata kunci – *manuver, penyulang, jaringan Distribusi, susut daya, ENS*

I. PENDAHULUAN

Distribusi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik tahapan terakhir setelah melalui proses transmisi. Penyaluran distribusi tenaga listrik bertujuan untuk mengirimkan listrik ke seluruh pelanggan, baik perusahaan maupun rumah tangga. Pendistribusian listrik menjadi tanggung jawab bagi pemerintah melalui Badan Usaha Milik Negara (BUMN), khususnya oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN). Dalam pendistribusian listrik, PLN memiliki unit-unit yang mempunyai fungsi masing-masing di setiap wilayah Indonesia. Tujuan dari pembagian setiap unit agar pelayanan PLN dapat lebih terfokus secara langsung melayani masyarakat. PLN Unit Induk Distribusi (UID) Jawa Tengah dan DI Yogyakarta terdapat total 13 Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) yang tersebar di seluruh wilayah, salah satunya UP3 Magelang [1]. Unit Layanan Pelanggan (ULP) Purworejo merupakan salah satu unit dari tujuh unit yang berada dalam naungan PLN UP3 Magelang. PLN ULP

Purworejo memiliki tanggung jawab dalam kelancaran pendistribusian listrik pada kawasan Kabupaten Purworejo. Wilayah kerja PLN ULP Purworejo memiliki 9 dari 12 penyulang yang bersumber dari Gardu Induk 150kV Purworejo. Penyulang pada Gardu Induk 150 kV Purworejo yaitu PWO1 s.d. PWO12 dengan kode PWO mewakili Purworejo dan angka di belakangnya merupakan nomor penyulang.

Penyulang merupakan media yang digunakan sebagai pendistribusian listrik ke pelanggan melalui jaringan listrik yang berupa jaringan tegangan menengah (JTM). JTM memiliki tipe konfigurasi berupa radial dan *loop*. Konfigurasi radial memiliki sistem menyalurkan listrik dengan satu sumber penyulang. Sistem tersebut dianggap kurang andal dalam pendistribusian listrik karena tidak terdapat *back up system* apabila terjadi pemadaman yang diperlukan untuk pemeliharaan jaringan listrik tegangan menengah [2]. Berdasarkan hal tersebut, dibuat variasi bentuk yaitu berupa

konfigurasi loop. Konfigurasi *loop* merupakan gabungan dari sedikitnya dua konfigurasi *radial* yang terpisahkan oleh peralatan manuver yang berupa *air break switch* (ABS_w) atau *motorized load break switch* (LBS).

Manuver jaringan merupakan kegiatan pemindahan jalur tegangan yang mengalami padam disebabkan karena adanya gangguan listrik [3]. Gangguan jaringan listrik tegangan menengah dapat terjadi akibat adanya kegiatan seperti pemasangan jaringan baru, perbaikan kabel penghantar, atau perbaikan peralatan *switching* tegangan menengah (ABS_w, LBS, dll). Manipulasi jalur bertujuan agar jaringan lain tetap dalam keadaan normal (tidak padam). Penyulang PWO2 Purworejo mengalami gangguan pada pemutus (PMT) kabel kubikel *Outgoing* 20kV. Pada kubikel tersebut, terdapat suara anomali (berdesis) yang menandakan adanya gangguan. Gangguan terjadi pada *shoes cable* yang menempel di *busbar* di mana terdapat isolasi kawat penghantar yang tidak sempurna sehingga mengakibatkan adanya *spark over*. Dalam permasalahan tersebut diperlukan perbaikan kawat penghantar dengan cara terminasi ulang. Perbaikan tersebut diperlukan pemadaman listrik untuk keamanan pekerja. Guna meminimalisasi daerah pemadaman listrik, diperlukan manuver jaringan untuk menyalurkan daya. Hal ini menyebabkan jaringan setelah *section* padam sehingga diperlukan *backup* penyulang dengan cara manuver jaringan. Penyulang PWO2 dapat dilakukan manuver jaringan ke penyulang PWO5 atau penyulang PWO11 karena memiliki konfigurasi jaringan berbentuk *loop*. Kegiatan manuver jaringan perlu memperhatikan penyulang dengan arus beban dan susut daya terkecil sehingga dapat meminimalisasi kerugian yang dialami oleh PLN. Pengoperasian peralatan *switching* jaringan distribusi diperlukan untuk melakukan manuver jaringan. Setiap titik akhir penyulang PWO2 dengan penyulang PWO5 atau penyulang PWO11 dilengkapi *switching* berupa ABS dan LBS yang dapat digunakan untuk manuver jaringan.

Analisis manuver jaringan dapat dilakukan dengan dua metode yaitu dengan metode perhitungan dan menggunakan simulasi *software* ETAP. Metode perhitungan dilakukan untuk mengetahui rugi-rugi daya yang dialami penyulang alternatif manuver jaringan. Hasil dari rugi-rugi daya digunakan sebagai pembandingan pemilihan alternatif manuver jaringan. Hasil rugi-rugi daya pada penyulang sebagai alternatif manuver jaringan tegangan menengah sebesar 0,298 MW- 0,607 MW [4], [5].

Penelitian juga dilakukan dengan menggunakan metode simulasi *software* ETAP. Penggunaan *software* ETAP untuk membuat simulasi jaringan. Melalui simulasi tersebut, akan dihasilkan jatuh tegangan pada setiap penyulang. Pemilihan alternatif manuver jaringan mengacu pada nilai jatuh tegangan terendah yang terukur pada ujung jaringan. Hasil rata-rata jatuh tegangan yang digunakan sebagai manuver jaringan sebesar 0,008%-3,9% [6], [7].

Penelitian oleh Nurul Hidayah pada tahun 2017 mengenai manuver jaringan menggunakan metode perangkat lunak *Matlab Matpower* 4.0. Metode perangkat lunak *Matlab Matpower* 4.0 digunakan sebagai bantuan dalam melakukan

perhitungan terhadap *system average interruption duration index* (SAIDI) dan *system average interruption frequency index* (SAIFI) melalui pengolahan data sekunder PLN. SAIDI adalah rata-rata durasi gangguan yang terjadi, sedangkan SAIFI adalah rata-rata frekuensi gangguan yang terjadi. Hasil dari penelitian tersebut menyatakan bahwa tingkat perbaikan keandalan dari kondisi gangguan ke kondisi manuver terhadap kondisi normal adalah SAIFI dari 85% menjadi 100% dan SAIDI dari 69% menjadi 94,8% [8].

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan, belum adanya analisis kenaikan susut daya dari manuver jaringan dan total biaya dari *energy not supplied* (ENS) saat pemadaman akibat gangguan listrik. Metode perhitungan kenaikan susut daya digunakan untuk mengetahui perbedaan susut daya guna menentukan opsi manuver jaringan. Metode perhitungan ENS pada saat padam digunakan sebagai pembandingan total kerugian jika dilakukan manuver jaringan dengan tanpa manuver jaringan. Oleh karena itu, timbul gagasan penelitian yang berjudul “Analisis Susut Daya Jaringan sebagai Skema Opsi Manuver Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang PWO-2 PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Purworejo”.

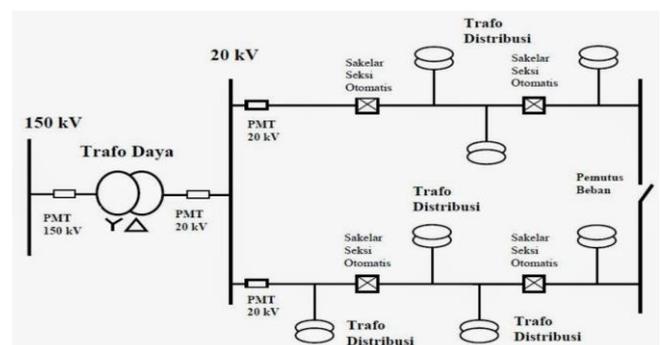
II. TINJAUAN ANALISIS

A. Konfigurasi Loop

Konfigurasi *ring* atau *loop* merupakan variasi dari jaringan radial dengan ujung jaringan saling berhubungan (*loop*) pada Gambar 1. Melalui konfigurasi *loop*, gangguan listrik dapat dilokalisasi sekecil mungkin sehingga kontinuitas pelayanan dapat lebih baik [9].

B. Manuver Jaringan

Manuver jaringan merupakan kegiatan memodifikasi terhadap jaringan yang mengalami gangguan dengan tujuan meminimalisasi daerah pemadaman[10]. Kegiatan yang dilakukan dalam manuver jaringan yaitu, memisahkan bagian-bagian jaringan yang awalnya terhubung dalam keadaan bertegangan atau tidak bertegangan; Menghubungkan bagian-bagian jaringan yang terpisah menurut keadaan operasi normalnya dalam keadaan bertegangan atau tidak bertegangan. Optimalisasi atas keberhasilan manuver dari segi teknis ditentukan oleh konfigurasi jaring dan kemampuan *switching* yang berupa *Motorized LBS* atau ABS_w [11].



Gambar 1. Jaringan konfigurasi *loop* [12]

C. Kawat Penghantar Jaringan tegangan Menengah

Kawat penghantar yang umum digunakan sebagai penghantar saluran udara tegangan menengah (SUTM) pada PLN yaitu AAAC. Pemilihan kawat penghantar selain dari bahan juga berdasarkan ukuran kawat. Ukuran kawat akan berpengaruh pada arus dan tegangan yang akan dialiri. Luas penampang kawat akan mempengaruhi nilai resistansi pada jaringan. Perhitungan nilai resistansi dapat mengacu pada (1).

$$R = \rho \times \frac{\ell}{A} \quad (1)$$

dengan,

- R nilai resistansi (Ω/km)
- ρ resistivitas logam (Ωm)
- ℓ panjang kawat penghantar (km)
- A luas penampang kawat (mm^2)

D. Beban Section

Beban *section* merupakan beban yang terukur dari salah satu bagian (*section*) pada jaringan distribusi tegangan menengah [13]. Perhitungan beban *section* dapat menggunakan teori *Kirrchoff Current Law* (KCL). Berdasarkan KCL 1 menyatakan bahwa total arus masuk pada titik cabang sama dengan total arus keluar dari titik cabang dengan (2).

$$\sum I_{in} = \sum I_{out} \quad (2)$$

dengan,

- $\sum I_{in}$ total arus masuk (A)
- $\sum I_{out}$ total arus keluar (A)

Arus beban yang mengalir pada penyulang menuju pada *section* dan *sub-section* jaringan dengan arus keluar sama dengan total arus masuk. Berdasarkan (2) didapatkan rumus perhitungan guna mengetahui beban arus setiap *section* seperti pada (3).

$$\sum I_{section} = I_{awal} - I_{akhir} \quad (3)$$

dengan,

- $\sum I_{in}$ total arus *section* (A)
- I_{awal} arus masuk batas awal *section* (A)
- I_{akhir} arus keluar batas akhir *section* (A)

Metode arus rata-rata merupakan metode yang digunakan untuk menganalogikan beban tidak seimbang menjadi beban seimbang. Nilai arus beban (3) dengan perhitungan rata-rata arus ketiga fase yaitu fase R, fase S, fase T. Perhitungan tersebut bertujuan agar nilai arus ketiga fase menjadi sama dan seimbang. Penyeimbangan arus beban dengan metode arus rata-rata dapat dituliskan seperti (4).

$$I_{rata-rata} = \frac{I_r + I_s + I_t}{3} \quad (4)$$

dengan,

- $I_{rata-rata}$ penyeimbangan rata-rata arus tiga fase (A)
- I_R arus fase R (A)
- I_S arus fase S (A)
- I_T arus fase T (A)

E. Beban Manuver Jaringan

Beban manuver jaringan merupakan arus beban yang dapat dilakukan *back up system* melalui penyulang lainnya. Perhitungan arus beban manuver jaringan diperoleh dari selisih arus beban total dengan arus beban padam akibat gangguan listrik. Persamaan (5) digunakan untuk mendapatkan nilai beban manuver jaringan.

$$I_{n \text{ manuver jaringan}} = I_{n \text{ beban total}} - I_{n \text{ padam}} \quad (5)$$

dengan,

- $I_{n \text{ manuver jaringan}}$ arus nominal beban manuver jaringan (A)
- $I_{n \text{ beban total}}$ arus nominal beban total (A)
- $I_{n \text{ padam}}$ arus nominal beban total (A)

F. Daya Aktif

Daya Aktif merupakan daya yang terpakai untuk penggunaan listrik yang sebenarnya atau nyata [14]. Daya aktif memiliki satuan *watt* (W). Persamaan (6) digunakan untuk mendapatkan nilai daya aktif pada jaringan tiga fase.

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Cos } \alpha \quad (6)$$

dengan,

- P daya Aktif (W)
- V tegangan (V)
- I arus yang melalui penghantar (A)
- $\text{Cos } \alpha$ faktor Daya (α)

G. Susut Daya Aktif

Susut daya aktif merupakan jumlah daya yang terbuang pada suatu jaringan pada proses penyaluran tenaga listrik menuju beban [15]. Dalam melakukan perhitungan susut daya aktif diperlukan beberapa parameter pokok untuk mendapatkan nilai susut daya. Parameter yang digunakan dalam perhitungan susut daya yaitu, jenis kawat penghantar, luas penampang, panjang penampang dan arus beban total [16]. Perhitungan susut daya aktif dapat menggunakan (7).

$$\Delta P \text{ loss} = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot \ell \quad (7)$$

dengan,

- $\Delta P \text{ loss}$ susut Daya (Watt)
- I arus beban yang mengalir pada jaringan (A)
- R resistansi Jaringan (Ohm/km)
- ℓ panjang jaringan (km)

Persentase susut daya diperoleh dari perbandingan antara susut daya dengan daya total pada penyulang. Melalui (7), didapatkan rumus perhitungan persentase susut daya seperti pada (8).

$$\% \Delta P \text{ loss} = (\Delta P_{\text{loss}} : \Delta P_{\text{total}}) \times 100\% \quad (8)$$

dengan,

- $\% \Delta P_{\text{loss}}$ susut Daya (Watt)
- ΔP_{loss} arus beban yang mengalir pada jaringan (A)
- ΔP_{total} resistansi Jaringan (Ohm/km)

H. Energy Not Supplied (ENS)

ENS merupakan indeks keandalan jaringan yang menyatakan bahwa jumlah energi listrik yang tidak dapat disalurkan oleh sistem kepada pelanggan. Energi listrik yang

tidak tersalurkan akibat dari gangguan jaringan sehingga memerlukan pemadaman [17]. Secara sistematis ENS pada saat padam dapat dituliskan sesuai (9).

$$ENS = P_{\text{gangguan}} \times \text{Durasi (h)} \quad (9)$$

dengan,

- ENS *Energy Not Supplied (Wh)*
- P daya yang padam akibat gangguan (kW)
- Durasi lama pemadaman (h)

I. Nilai Kerugian Total

Nilai ekonomi kerugian merupakan biaya yang dikeluarkan dari adanya ENS dan kenaikan susut daya pasca manuver jaringan. Kerugian tersebut dihitung dengan batasan pada saat pemadaman listrik terjadi. Secara sistematis nilai kerugian total dapat dituliskan seperti pada (10).

$$\text{Biaya ENS} = ENS \times \text{Cost}$$

$$\text{Biaya } \Delta P_{\text{loss Manuver}} = \Delta P_{\text{loss Manuver}} \times t \times \text{Cost} \quad (10)$$

$$\text{Kerugian total} = \text{Biaya ENS} + \text{Biaya } \Delta P_{\text{loss Manuver}}$$

dengan,

- Biaya ENS jumlah biaya akibat ENS (Rp)
- ENS *Energy Not Supplied (Wh)*
- Cost biaya listrik per kWh (Rp)
- t durasi pemadaman (h)
- $\Delta P_{\text{loss Manuver}}$ kenaikan susut daya pasca manuver (kW)
- Biaya $\Delta P_{\text{loss Manuver}}$ biaya kenaikan susut daya pasca manuver jaringan (Rp)
- Kerugian total kerugian nilai ekonomi total (Rp)

III. METODOLOGI

Pada penelitian ini digunakan metode perhitungan terhadap kenaikan susut daya dan ENS manuver jaringan. Penelitian dilakukan berdasarkan kondisi lapangan dengan pengumpulan data melalui pengukuran. Beberapa data yang diperlukan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 1 s.d. Tabel 3. Pada penyulang PWO2, PWO5 dan PWO11 menggunakan kawat penghantar bertipe AAAC. Luas penampang kawat penghantar AAAC yang digunakan sebesar 240 mm².

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengukuran Beban Penyulang

Pengukuran data beban penyulang dilakukan dengan menggunakan alat ukur berupa *amp stick*. Pengukuran bertujuan mengetahui nilai beban pada beberapa *section* di setiap penyulang. Beban yang terukur merupakan beban dari titik ujung PMT hingga titik akhir *section* dengan perbandingan antar fase yang dapat dilihat pada Gambar 2. Grafik penyulang PWO2 dan penyulang PWO5 memiliki bentuk yang identik. Hal tersebut dikarenakan penggunaan beban yang relatif sama di daerah perkotaan. Selain itu, perbedaan arus antar fase tidak terlalu signifikan atau seimbang. Grafik penyulang PWO11 cenderung berbeda dari penyulang lainnya. Hal tersebut dikarenakan penggunaan arus

Tabel 1. Data penyulang Purworejo

Penyulang	Frekuensi (Hz)	Faktor Daya (α)	Average Daya Aktif (MW)
PWO 2	50,1	0,93	4,79
PWO 5	50	0,95	5,01
PWO 11	50,1	0,9	6,74

Tabel 2. Data panjang penyulang Purworejo

Penyulang	Peralatan Switching & Nomer Tiang		Panjang Penghantar (Km)
	Dari	Sampai	
PWO 2	PMT	ABSW PWO2-744	12,78
PWO 5	PMT	ABSW PWO5-749-128	20,46
PWO 11	PMT	ABSW PWO11-641-95	28,10

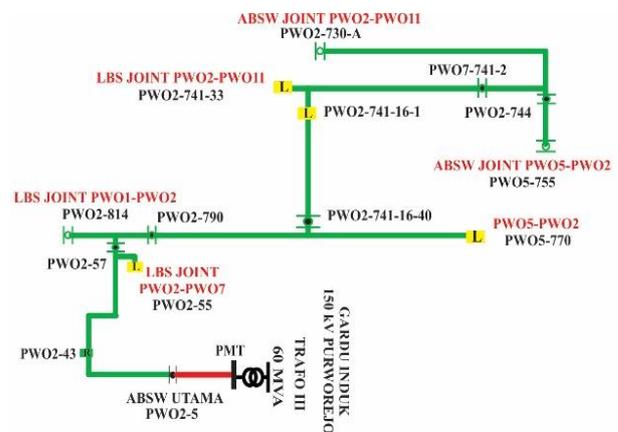
Tabel 3. Data arus pada PMT penyulang

Penyulang	Arus beban (A)		
	R	S	T
PMT PWO2	125,8	166,7	143
PMT PWO5	141,9	145,0	160
PMT PWO11	213	198	201

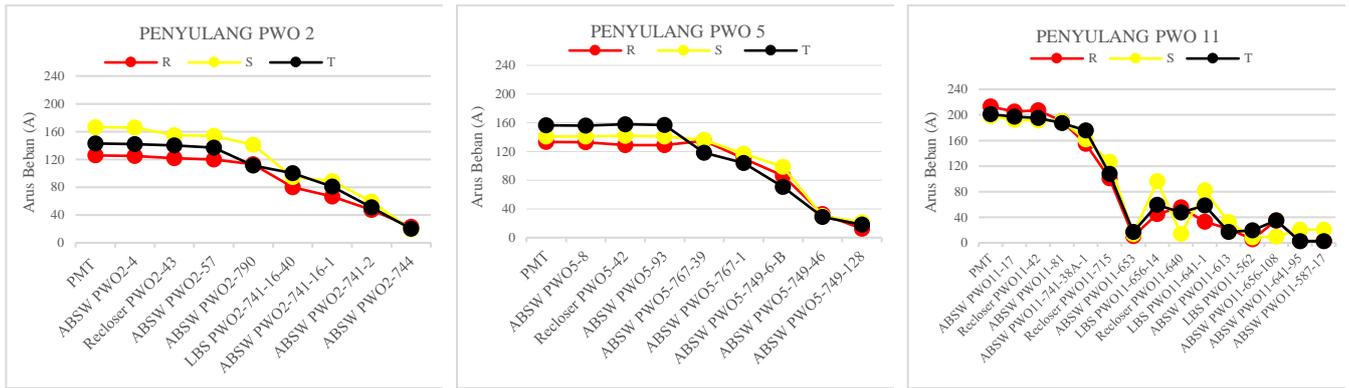
beban yang tidak menentu di mana terjadi di daerah pegunungan sehingga terdapat beberapa titik memiliki perbedaan arus antar fase cukup tinggi. Tidak landainya medan juga membuat jarak kawat penghantar pada penyulang akan semakin panjang.

B. Analisis Beban Section PWO2

Perhitungan beban *section* penyulang PWO2 bertujuan untuk mengetahui jumlah beban arus yang mengalami dampak pemadaman. Pemadaman dilakukan karena terdapat gangguan pada kubikel *outgoing* kabel 20kV diperlukan perbaikan dalam kondisi tidak bertegangan. Pada Gambar 3, garis yang berwarna merah merupakan jalur jaringan daerah yang mengalami pemadaman. Garis yang berwarna hijau merupakan jalur jaringan dampak dari pemadaman yang dapat dilakukan pelimpahan beban melalui manuver jaringan ke penyulang lain. Perhitungan arus beban pada penyulang PWO2 dengan (3), sehingga dihasilkan beban per *section* pada penyulang PWO2 dapat terlihat pada Tabel 4.



Gambar 2. Single line diagram penyulang PWO2



Gambar 3. Hasil pengukuran arus beban pada setiap section penyulang PWO2, PWO5, dan PWO11

C. Penyeimbangan Arus Beban Puncak

Manuver jaringan memerlukan penyulang lain sebagai jalur yang digunakan untuk melimpahkan beban. Dalam hal ini, penyulang PWO2 dapat dilakukan manuver jaringan ke penyulang PWO5 atau penyulang PWO11. Penyeimbangan arus beban berguna untuk mengetahui arus beban total pada penyulang opsi manuver jaringan. Penyeimbangan beban menggunakan metode arus rata-rata dengan (4), sehingga didapatkan hasil yang terlihat pada Tabel 5. Berdasarkan Tabel 5, Penyulang PWO5 memiliki beban total 148,97 A dan PWO11 sebesar 204 A. Penyulang PWO2 memiliki beban total 145,1A dalam kondisi puncak. Perhitungan beban section untuk mengetahui jumlah arus beban yang dapat dilakukan manuver jaringan. Jumlah arus beban manuver jaringan penyulang PWO2 dapat diketahui dengan menggunakan (5). Hasil dari perhitungan (5), arus nominal pada penyulang PWO2 yang dapat dilakukan manuver jaringan sebesar 144,7A.

D. Analisis Susut Daya Aktif

Susut daya pada jaringan dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya jenis kawat penghantar, panjang kawat penghantar, dan luas penampang kawat penghantar. PLN Purworejo menggunakan kawat penghantar jaringan tegangan menengah berupa AAAC. Kawat penghantar AAAC terbuat dari aluminium alloy dengan keunggulan memiliki konduktivitas tinggi dan tidak mudah berkarat. Perhitungan susut daya juga diperlukan data berupa panjang jaringan penyulang yang dapat dilihat pada Tabel 2. Dalam melakukan

perhitungan susut daya aktif, diperlukan nilai resistansi kawat penghantar. Resistansi kawat penghantar memiliki standar aturan yang dibedakan melalui bahan dan luas penampang kawat penghantar. Berdasarkan peraturan SPLN No.64 Tahun 1985 kabel AAAC dengan luas penampang 240 mm² memiliki resistansi sebesar 0.1344 Ω/Km [18].

Perhitungan susut daya aktif (6) dengan hasil dapat dilihat pada Tabel 6. Dalam mempermudah perbandingan susut daya yang terjadi pada setiap penyulang terhadap daya total, diperlukan persentase susut daya terhadap kapasitas penyaluran daya total pada (8). Hasil perhitungan persentase susut daya terhadap daya total terdapat pada Tabel 5. Berdasarkan Tabel 5, terdapat hasil dari susut daya pada setiap penyulang. Menurut standar SPLN, batas maksimum susut daya yaitu sebesar 10% [19]. Hal tersebut menandakan susut daya pada penyulang masih dalam kategori baik tidak melebihi 10%.

E. Penentuan Skema Opsi Manuver jaringan

Penyulang PWO2 pada daerah PMT-ABSW PWO2-4 mengalami gangguan sehingga perlu dilakukan pemadaman dengan posisi kontak ABSW PWO2-4 open/terbuka. Beban arus dari PMT PWO2-ABSW ke PWO2-4 sebesar 0,8 A. Penyulang PWO2 berdasarkan hasil analisis diperlukan pelimpahan beban sebesar 144,27 A. Penyulang PWO2 memiliki konfigurasi jaringan loop dengan penyulang PWO5 dan penyulang PWO11 sehingga dapat dilakukan manuver

Tabel 4. Hasil perhitungan arus beban per section pada penyulang PWO2

Section	Peralatan Switching & Nomer Tiang		Arus beban (A)		
	Dari	Sampai	R	S	T
Section A	PMT	ABSW PWO2-4	0,8	0,7	1
Section B	ABSW PWO2-4	Recloser PWO2-43	3	11	2
Section C	Recloser PWO2-43	ABSW PWO2-57	2	1	3
Section D	ABSW PWO2-57	ABSW PWO2-790	7	13	26
Section E	ABSW PWO2-790	LBS PWO2-741-16-40	33	46,4	11
Section F	LBS PWO2-741-16-40	ABSW PWO2-741-16-1	13,4	5,7	18,9
Section G	ABSW PWO2-741-16-1	ABSW PWO2-741-2	19,4	29,8	29,9
Section H	ABSW PWO2-741-2	ABSW PWO2-744	24,3	39,9	30,9

Tabel 5. Hasil perhitungan arus rata-rata dan susut daya aktif pada penyulang PWO2, PWO5, dan PWO11

Penyulang	Sebelum Manuver Jaringan			Setelah Manuver Jaringan		
	Arus Beban (A)	Susut Daya Aktif (MW)	Persentase Susut Daya (%)	Arus Beban (A)	Susut Daya Aktif (MW)	Persentase Kenaikan Susut Daya (%)
PWO 2	144,27	0,134	2,7	(Pemadaman jaringan listrik sementara)		
PWO 5	148,97	0,2	3	293,67	1,23	6,3
PWO 11	204	0,466	6,7	348,27	1,964	8,6

jaringan. Penyulang PWO5 memiliki arus beban sebesar 148,97 A dengan susut daya aktif 0,2 MW dan persentase susut daya terhadap daya total sebesar tiga persen. Penyulang PWO11 memiliki beban total sebesar 204 A dengan susut daya aktif sebesar 0,466 MW dan persentase susut daya terhadap daya total sebesar 6,3%. Pelimpahan beban dari penyulang PWO2 apabila menuju penyulang PWO5 mengakibatkan arus beban total menjadi 293,67 A. Sedangkan apabila menuju penyulang PWO11 arus beban total menjadi 348,27 A. Manuver jaringan dapat dilakukan dengan batas maksimal arus yang diizinkan oleh PLN sebesar 480 A. Selain itu, juga perlu diperhatikan susut daya aktif pada kondisi normal sesuai dengan standar. Penyulang PWO5 menjadi opsi manuver jaringan utama karena memiliki susut daya terendah. Pemilihan susut daya terendah untuk meminimalisasi kerugian yang dialami oleh PT PLN.

F. Kenaikan Susut Daya pasca Manuver Jaringan

Susut daya pada saat manuver jaringan akan terjadi kenaikan. Kenaikan ini akibat adanya pelimpahan beban sehingga beban pada penyulang dan kawat penghantar penyulang semakin panjang. Analisis kenaikan susut daya pasca manuver jaringan bertujuan untuk mengetahui besaran kenaikan susut daya pada penerima beban. Perhitungan kenaikan susut daya dengan mengetahui selisih persentase susut daya sebelum manuver jaringan dan pasca manuver jaringan. Guna mengetahui persentase susut daya setelah diperlukan data berupa daya total pasca manuver jaringan dengan menggunakan (6), diperoleh daya total PWO5 setelah manuver jaringan sebesar 9,66 MW. Perhitungan susut daya pasca manuver jaringan menggunakan (7), dengan hasil pada Tabel 5. Kenaikan persentase susut daya total (PWO2 dan PWO5) setelah manuver didapat dari selisih persentase susut daya sebelum manuver penyulang PWO5 (opsi manuver jaringan) dan penyulang PWO2 (normal) dengan persentase susut daya pasca manuver penyulang PWO5 (opsi manuver jaringan) dan penyulang PWO2 (pemadaman jaringan) terhadap total daya manuver sehingga didapatkan hasil sebesar 6,2%. Hasil tersebut tidak melebihi ambang dari standar susut daya PT PLN (Persero).

G. ENS Manuver Jaringan

Kerugian yang dialami oleh PLN diakibatkan adanya energi yang tidak dapat tersalurkan atau ENS. ENS terjadi akibat adanya pemadaman dikarenakan gangguan, sehingga listrik tidak dapat tersalurkan ke beban atau pelanggan. Manuver jaringan bertujuan meminimalisasi total ENS yang terjadi akibat pemadaman. Perhitungan ENS diperlukan data beban daya total jaringan yang dapat dilakukan manuver

menggunakan (6), sehingga dihasilkan daya sebesar 4.497 kW tanpa menggunakan manuver jaringan dan daya sebesar 25 kW. Berdasarkan hasil dari perhitungan tersebut, maka dapat dilakukan perhitungan total ENS dengan menggunakan (9). Hasil dari perhitungan tersebut didapatkan total ENS tanpa manuver jaringan sebesar 13.493,67 kWh sedangkan total ENS dengan manuver jaringan sebesar 77,64 kWh.

H. Biaya Kerugian Total

Biaya kerugian total didapatkan melalui kerugian pada ENS dan kerugian dari adanya kenaikan susut daya pasca manuver. Berdasarkan data gangguan jaringan, pemadaman dilakukan selama 3 jam dengan harga listrik per kwh sebesar Rp 1.487,25 rupiah. Perhitungan total biaya kerugian dari pemadaman PWO2 menggunakan (10). Hasil dari perhitungan ini, biaya kerugian ENS sebesar 115 ribu rupiah. dan biaya kerugian kenaikan susut daya pasca manuver jaringan (PWO5) sebesar 2,7 juta rupiah sehingga total kerugian sebesar 2,8 juta rupiah. Hal ini menunjukkan, saat terjadi pemadaman tanpa manuver jaringan kerugian total sebesar 20,1 juta rupiah, sedangkan dengan melakukan manuver jaringan kerugian total sebesar 2,8 juta rupiah atau turun hingga 85,9 %

V. SIMPULAN

Penyulang PWO2 mengalami gangguan listrik sehingga diperlukan pemadaman untuk perbaikan. Arus Beban total rata-rata pada penyulang PWO2 sebesar 145,1 A. Gangguan terjadi pada *section A* arus gangguan rata-rata sebesar 0,8 A. Guna memperkecil kerugian akibat gangguan diperlukan manuver jaringan ke penyulang lain yaitu penyulang PWO5 atau PWO11. Penyulang PWO5 memiliki arus beban sebesar 148,97 A dengan susut daya aktif 0,2 MW dan persentase susut daya terhadap daya total sebesar tiga persen. Penyulang PWO11 memiliki beban total sebesar 204 A dengan susut daya aktif sebesar 0,46 MW dan persentase susut daya terhadap daya total sebesar 6,7%. Penyulang PWO5 dijadikan sebagai opsi utama manuver jaringan dari penyulang PWO2 untuk pelimpahan beban karena memiliki susut daya terendah dan arus beban penyulang lebih kecil dibanding PWO11. Total beban arus yang dilimpahkan ke PWO5 sebesar 144,27 A, sehingga setelah manuver jaringan PWO5 memiliki arus beban total rata-rata 293,67 A. Kenaikan persentase susut daya pasca manuver jaringan sebesar 6,3%. Dengan adanya manuver jaringan PWO2, tingkat ENS pada saat gangguan listrik turun dari 13.493,67 kWh menjadi 77,64 kWh. Kerugian yang dialami dari ENS dan kenaikan susut daya pasca manuver jaringan, apabila pemadaman tanpa manuver jaringan kerugian total sebesar 20,1 juta rupiah, sedangkan

pemadaman dengan manuver jaringan kerugian total 2,8 juta rupiah atau turun hingga 85,9%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ESDM, "Rancangan Besar TMP PT PLN (Persero) Unit Induk Distribusi Jakarta Raya Tahun 2021," 2021.
- [2] SPLN: 59, "SPLN 59:1985 Keandalan Distribusi Jaringan 20kV," Indonesia, 1985.
- [3] Dwisantiya Ganta Saputri, "Analisis Drop Tegangan dan Manuver Jaringan pada Penyulang Kikim dan Parkit di PT. PLN (persero) Area Palembang," *Analisis Drop Tegangan dan Manuver Jaringan pada Penyulang Kikim dan Parkit di PT. PLN (persero) Area Palembang*, Apr. 2019.
- [4] A. Jamaah, "Analisa Beban Section untuk Menentukan Alternatif Manuver Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang BRG-3 PT PLN (Persero) Unit Layanan Salatiga," Oct. 2013.
- [5] Eko Wibowo, "Analisis Pengaruh Manuver Jaringan 20 kV GI Sragen terhadap Susut Daya," Surakarta, 2019.
- [6] B. Setiawan, "Analisis Penentuan Skenario pilihan Manuver Jaringan pada Penyulang WBN04 di PT. PLN (Persero) UP2D Jawa Tengah & D.I.Y pada DCC 2 Yogyakarta," Sleman, 2018.
- [7] M. A. Sobikin, "Analisis Drop Tegangan dan Manuver Jaringan pada Penyulang SGN11 dan Penyulang SGN14 Menggunakan Software ETAP 16.0.0," *Cyclotron*, vol. 5, no. 1, 2022, doi: 10.30651/cl.v5i1.10638.
- [8] N. Hidayah and A. Budi Muljono, "Analisis Manuver Jaringan terhadap Keandalan Kontinuitas Penyaluran Tenaga Listrik Penyulang di Area Ampenan," vol. 3, no. 1, pp. 109–115, 2014.
- [9] A. Saadah, M. Iqbal Arsyad, and P. Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro, "Studi Perencanaan Pembangunan Penyulang Baru untuk Pembagian Beban Penyulang Sahang 1 Dan Raya 17 PT.PLN (Persero) ULP Siantan," 2020. Accessed: Jun. 15, 2023. [Online]. Available: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jteuntan/article/view/43319>
- [10] D. Ganta Saputri, "Analisis Drop Tegangan dan Manuver Jaringan pada Penyulang Kikim dan Parkit di PT. PLN (persero) Area Palembang," *Universitas Muhammadiyah Palembang*, 2019.
- [11] A. K. Ode and M. Faridha, "Pengaruh Manuver Jaringan Distribusi 20 kV terhadap Indeks Keandalan Penyulang BT07 Batulicin," 2020. [Online]. Available: <https://ojs.uniska-bjm.ac.id/index.php/eeict>
- [12] T. Watiningsih, "Sistem Jaringan Distribusi Tegangan Menengah," *Teodolita: Media Komunikasi Ilmiah di Bidang Teknik*, vol. 13, no. 2, 2012.
- [13] Gunawan Sihombing, "Analisis Indeks Keandalan Secara Teknis dan Ekonomis Jaringan Distribusi 20 KV Menggunakan Metode Section Technique pada PT. PLN (Persero) Rayon Belawan," *Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*, vol. 6, pp. 105–115, 2022.
- [14] Y. Esye and S. Lesmana, "Analisa Perbaikan Faktor Daya Sistem Kelistrikan," Mar. 2021.
- [15] R. Fauzie Ariyanti, "Identifikasi Penyebab Susut Energi Listrik PT. PLN (Persero) Area Semarang Menggunakan Metode Failure Mode & Effect Analysis (FMEA)," 2019.
- [16] Y. Marniati, "Evaluasi Susut Daya Penyulang Cendana 20 kV Pada Gardu Induk Bungaran Dengan ETAP 12.6," *Jurnal Teknik Elektro ITP*, vol. 7, no. 1, pp. 79–92, Jan. 2018, doi: 10.21063/JTE.2018.3133712.
- [17] F. Funan and W. Sutama, "Evaluasi Keandalan Sistem Distribusi Tenaga Listrik Berdasarkan Indeks Keandalan SAIDI dan SAIFI pada PT PLN (PERSERO) Rayon Kefamenanu," Apr. 2020.
- [18] SPLN: 64, "SPLN: 64 1985 Petunjuk Pemilihan dan Penggunaan Pelebur pada Sistem Dist-TM," *Standar Peraturan PLN*, vol. 64, 1985.
- [19] SPLN: 72, "SPLN 72:1987 Standar Desain untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR)," *Standar Penyaluran Listrik Nasional*, vol. 72, 1987.

Analisis Metode Sisip Trafo Satu Fase dan Rekonfigurasi Jaringan dalam Mengatasi Trafo *Overload* pada Gardu SCG08-0066 PT PLN (Persero) ULP Magelang Kota

Muhammad Hanif Setyo Sahidanto¹, Burhanuddin Wafiq¹, Fivta Abida Nurulita¹, Hanif Alaudin Zain¹, Tika Erna Putri^{1*}

¹Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Gadjah Mada; sahidanto.mh@mail.ugm.ac.id, burhanuddin.wafiq@gmail.com, hanif.a.z@mail.ugm.ac.id, fivtanurulita@mail.ugm.ac.id

*Korespondensi: tika.erna.p@ugm.ac.id

Abstract – *Overloaded transformer are common in field conditions. This can affect the performance of the system, such as voltage drops, load imbalances, and power losses. In the working area of PT. PLN (Persero) ULP Magelang Kota, a single-phase transformer with substation number SCG08-0066 is overloaded at 92.72% loading. To address the issue, the solution proposed involves making improvements to the electricity distribution network by adding a single-phase transformer and reconfiguring the network. The methods used include direct field observations and software simulation to assess the loading percentage and voltage drop before and after the transformer insertion and network reconfiguration. The simulation results show a decrease in loading percentage from 200.7 A to 158.9 A (19.3% decrease) for the transformer insertion method and from 200.7 A to 158.1 A (19.82% decrease) for the network reconfiguration method. Both methods successfully reduce transformer loading and improve voltage drop. However, the transformer insertion method is more effective in addressing transformer overload, as the new insert transformer ensures long-term continuity by supplying the existing load.*

Keywords – *Distribution Transformer, Overloading, Transformer Insertion, Network Reconfiguration*

Intisari – Pada kondisi di lapangan, tidak jarang terjadi adanya trafo yang kelebihan beban. Hal ini dapat memengaruhi kinerja sistem seperti, *drop* tegangan, ketidakseimbangan beban, dan kerugian daya. Pada wilayah kerja PT. PLN (Persero) ULP Magelang Kota terdapat trafo satu fase dengan nomor gardu SCG08-0066 yang mengalami *overload* dengan persentase pembebanan sebesar 92,72%. Untuk mengatasi masalah tersebut, solusi yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan perbaikan pada jaringan distribusi listrik, sebagai contoh dengan menambahkan trafo satu fase sebagai penyisipan pada bagian jaringan tertentu dan melakukan rekonfigurasi jaringan. Metode yang digunakan adalah dengan melakukan pengamatan langsung di lapangan dan menggunakan simulasi perangkat lunak. Simulasi ini diperlukan untuk mendapatkan hasil yang akurat mengenai nilai persentase pembebanan dan jatuh tegangan pada trafo sebelum dan setelah dilakukan sisip trafo maupun rekonfigurasi jaringan. Hasil dari simulasi penyisipan trafo satu fase pada gardu SCG08-0066 mengalami penurunan dari pembebanan awal, yaitu 200,7 A turun menjadi 158,9 A dengan penurunan sebesar 19,3%. Sedangkan pada rekonfigurasi jaringan dihasilkan penurunan sebesar 19,82% dari pembebanan awal, yang mulanya 200,7 A turun menjadi 158,1. Hasil dari kedua metode tersebut dapat menurunkan persentase pembebanan trafo sehingga tidak mengalami *overload*. Selain itu, kedua metode tersebut dapat memperbaiki jatuh tegangan di ujung jaringan, yang mulanya 195 Volt menjadi 212 Volt. Namun apabila kedua metode tersebut dilakukan perbandingan, maka metode sisip trafo merupakan metode paling efektif untuk mengatasi trafo *overload* karena beban yang ada disuplai oleh trafo sisipan baru, sehingga lebih terjamin untuk kontinuitas jangka panjang.

Kata kunci – trafo distribusi, pembebanan berlebih, trafo sisip, rekonfigurasi jaringan

I. PENDAHULUAN

PT PLN (Persero) merupakan perusahaan penyedia layanan listrik terbesar di Indonesia. PT. PLN (Persero) bertanggung jawab untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat Indonesia dan mengelola distribusi listrik di seluruh wilayah Indonesia. Namun, dalam melakukan tugasnya, PT. PLN (Persero) sering mengalami masalah dalam hal kelebihan beban (*overload*), jatuh tegangan (*voltage drop*), dan kerugian daya (*power losses*) dalam sistem distribusi listrik [1].

Salah satu penyebab terjadinya kelebihan beban pada sistem distribusi listrik adalah terlalu banyaknya beban dalam satu penyulang (*feeder*) yang terhubung ke suatu trafo distribusi. Hal ini dapat menyebabkan beban pada satu bagian jaringan tersebut menjadi *overload*. Selain itu, terdapat kerugian daya yang terjadi dalam jaringan distribusi listrik karena adanya resistansi pada kabel dan transformator distribusi. Kerugian daya tersebut dapat meningkatkan biaya

operasional PT. PLN (Persero) dan mempengaruhi kualitas layanan listrik yang diberikan kepada masyarakat [2].

Untuk mengatasi masalah tersebut, salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan perbaikan pada jaringan distribusi listrik, salah satunya dengan menambahkan trafo satu fase yang disisipkan pada bagian jaringan tertentu dan melakukan rekonfigurasi jaringan. Perbaikan tersebut diharapkan dapat mengurangi beban *overload*, sehingga dapat mengurangi kerugian daya pada jaringan distribusi listrik [3].

Permasalahan yang serupa pernah dialami dalam sistem jaringan distribusi listrik milik PT. PLN (Persero). Untuk mengatasi permasalahan trafo *overload* ini, terdapat beberapa metode yang telah dilakukan. Metode pertama dilakukan dengan cara penyisipan trafo, yaitu menambahkan gardu sisipan baru pada jaringan. Dengan adanya gardu sisipan baru, dapat berpengaruh terhadap penurunan persentase pembebanan trafo antara 23-50% dari kondisi awal. Hasil

tersebut dapat berpengaruh pada peningkatan kinerja trafo yang mampu beroperasi secara optimal [1][2][3].

Kemudian metode kedua adalah rekonfigurasi jaringan dengan memindahkan sebagian beban dari trafo *overload* ke trafo lain terdekat. Hasil yang diperoleh mengungkapkan bahwa setelah dilakukan rekonfigurasi jaringan, pembebanan trafo mengalami penurunan antara 30-40% dari kondisi awal yang membuat trafo tidak lagi mengalami kelebihan beban [4][5].

Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dilakukan perbaikan trafo satu fase pada gardu SCG08-0066 penyulang Secang-08 PT. PLN (Persero) ULP Magelang Kota yang mengalami *overload*. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, akan menggunakan metode sisip trafo satu fase dan rekonfigurasi jaringan dengan mempertimbangkan jatuh tegangan. Metode penelitian yang dilakukan adalah dengan pengamatan langsung di lapangan dan menggunakan simulasi perangkat lunak. Simulasi ini diperlukan untuk mendapatkan hasil yang akurat mengenai nilai persentase pembebanan, rugi-rugi daya, serta jatuh tegangan pada trafo sebelum dan setelah dilakukan sisip trafo maupun rekonfigurasi jaringan. Dengan dilakukannya simulasi perbaikan tersebut, diharapkan dapat menjadi acuan guna menentukan metode yang paling efektif dan efisien antara sisip trafo satu fase dengan rekonfigurasi jaringan dalam mengantisipasi *overload* di jaringan.

II. TINJAUAN ANALISIS

A. Trafo Distribusi

Trafo adalah sebuah peralatan yang berperan penting dalam sistem distribusi energi listrik. Fungsinya adalah untuk mengubah tegangan listrik menjadi lebih tinggi atau lebih rendah tergantung pada kebutuhan sistem [6][7]. Terdapat dua jenis trafo untuk mengubah tegangan, yaitu trafo *step-up* yang berfungsi untuk menaikkan tegangan, dan trafo *step-down* yang berfungsi untuk menurunkan tegangan. Tujuan dari penggunaan trafo distribusi adalah untuk mengatur tegangan pada sistem distribusi listrik agar sesuai dengan kebutuhan pengguna. Trafo distribusi yang umum digunakan adalah trafo trafo *step-down* dengan nilai tegangan primer sebesar 20kV dan tegangan sekunder sebesar 400V [8].

B. Pembebanan Trafo

Pembebanan trafo harus diperhitungkan dengan hati-hati untuk memastikan bahwa trafo bekerja dalam batas kapasitasnya. *Overloading* trafo dapat menyebabkan penurunan umur pakai, kerusakan, atau bahkan kegagalan trafo [2][3]. Apabila mengacu pada SPLN 50:1997 tentang Spesifikasi Transformator Distribusi, disebutkan bahwa kondisi suatu trafo disebut normal apabila persentase pembebanannya $\leq 80\%$, waspada pada $80\% \leq x \leq 91\%$, dan darurat apabila persentase pembebanan telah melebihi 91% [9]. Perhitungan persentase pembebanan trafo dapat dilakukan seperti yang ditunjukkan pada (1).

$$PP = \frac{S \text{ Total}}{S_N} \times 100\% \quad (1)$$

dengan,

PP	nilai resistansi (Ω/km)
S Total	resistivitas logam (Ωm)
S_N	panjang kawat penghantar (km)

C. Penyisipan Gardu

Penyisipan gardu distribusi satu fase dapat dilakukan dengan memasang trafo satu fase pada suatu titik pada jaringan distribusi listrik. Trafo satu fase ini berfungsi untuk menurunkan tegangan listrik pada jaringan distribusi agar sesuai dengan kebutuhan konsumen yang ada di sekitar gardu distribusi tersebut [1].

Dalam pemasangan trafo satu fase, perlu diperhatikan beberapa faktor penting seperti impedansi trafo, arus hubung singkat, dan rugi-rugi daya. Impedansi trafo merupakan karakteristik penting dalam menentukan besarnya arus beban dan tegangan yang dihasilkan oleh trafo tersebut. Arus hubung singkat harus dihitung dengan cermat karena akan berpengaruh pada pemilihan ukuran kabel dan pengaman yang digunakan pada gardu distribusi. Sedangkan rugi-rugi daya harus diperhatikan agar tidak terlalu besar dan mempengaruhi efisiensi sistem distribusi secara keseluruhan. Selain itu, penyisipan gardu distribusi satu fase juga dapat dilakukan untuk mengurangi beban pada gardu distribusi yang *overload* dan mengurangi jatuh tegangan di jaringan distribusi [10].

D. Rekonfigurasi Jaringan Tegangan Rendah

Rekonfigurasi jaringan adalah suatu teknik yang dilakukan pada jaringan listrik untuk mengoptimalkan performa dan efisiensi jaringan, terutama dalam hal peningkatan reliabilitas, peningkatan efisiensi energi, pengurangan kerugian daya, dan penanganan *overload*. Rekonfigurasi jaringan dilakukan dengan cara merubah susunan dan pengaturan konfigurasi jaringan listrik, seperti perubahan posisi sumber daya listrik, penempatan pengaman dan pengatur beban listrik, serta pengaturan peralatan listrik seperti trafo, kapasitor dan sakelar [5].

Prinsip dasar dari rekonfigurasi jaringan adalah memaksimalkan penggunaan aset yang sudah ada, sehingga tidak diperlukan investasi besar dalam pembangunan infrastruktur baru [5]. Dalam hal pengurangan kerugian daya, rekonfigurasi jaringan bertujuan untuk memperbaiki kualitas tegangan dan mengoptimalkan penyaluran daya listrik, sehingga mengurangi kerugian daya akibat hambatan konduktor dan transmisi daya listrik yang berlebihan.

Dalam aplikasinya, rekonfigurasi jaringan listrik dapat dilakukan pada jaringan distribusi maupun transmisi. Pada jaringan distribusi, rekonfigurasi jaringan dapat dilakukan untuk mengoptimalkan penyaluran daya listrik pada suatu wilayah distribusi, sehingga mengurangi kerugian daya dan penanganan *overload* jaringan [11].

E. Jatuh Tegangan

Pengaturan tegangan dan jatuh tegangan menurut SPLN 72:1987 mengenai spesifikasi desain untuk jaringan tegangan menengah (JTM) dan jaringan tegangan rendah (JTR) adalah sebagai berikut:

- Jatuh tegangan yang diizinkan untuk sistem *spindel* tidak boleh melebihi 2% dari tegangan nominalnya, sedangkan drop tegangan untuk sistem radial yang diizinkan mencapai 5% [10][11].
- Jatuh tegangan pada trafo distribusi dibolehkan 3% dari tegangan kerja.
- Jatuh tegangan pada JTR dibolehkan sampai 4% dari tegangan kerja tergantung kepadatan beban.
- Jatuh tegangan pada sambungan rumah (SR) dibolehkan 1% dari tegangan nominal.

Persentase jatuh tegangan pada jaringan distribusi dapat dihitung seperti pada (2).

$$\Delta V = \frac{V_s - V_r}{V_s} \times 100\% \tag{2}$$

dengan,

- V_s tegangan di pangkal (Volt)
- V_r tegangan di ujung (Volt)

F. Rugi Daya Jaringan Distribusi

Rugi-rugi pada trafo terjadi ketika trafo diberikan tegangan kemudian timbul pemanasan pada trafo tersebut. Akibat adanya rugi daya itu, membuat daya keluaran pada trafo menjadi lebih kecil dari daya masukannya. Rugi-rugi pada trafo berkisar antara 20% - 25% dari keseluruhan rugi jaringan [12].

Rugi-rugi daya dapat berdampak negatif pada efisiensi pengiriman listrik dan biaya produksi listrik. Semakin besar rugi-rugi daya yang terjadi, semakin banyak energi listrik yang hilang dan semakin besar biaya yang harus dikeluarkan untuk memproduksi listrik tambahan untuk menggantikan energi yang hilang tersebut [13]. Persamaan (3) dan (4) digunakan untuk mengetahui besarnya rugi-rugi daya pada trafo satu fase.

$$\Delta P = I^2 \times R \tag{3}$$

atau

$$\Delta P = (V_{Pangkal} - V_{Ujung}) \times I_{beban} \times \cos \theta \tag{4}$$

dengan,

- ΔP rugi daya total (Watt)
- I_{beban} arus saluran (A)
- $V_{Pangkal}$ tegangan di ujung (Volt)
- V_{Ujung} tegangan di pangkal (Volt)
- R hambatan total (Ω)
- $\cos \theta$ faktor daya

III. METODOLOGI

Penelitian ini membahas tentang perbandingan penggunaan sisip trafo dengan rekonfigurasi jaringan dalam mengatasi trafo *overload*. Beberapa tahapan yang dilakukan

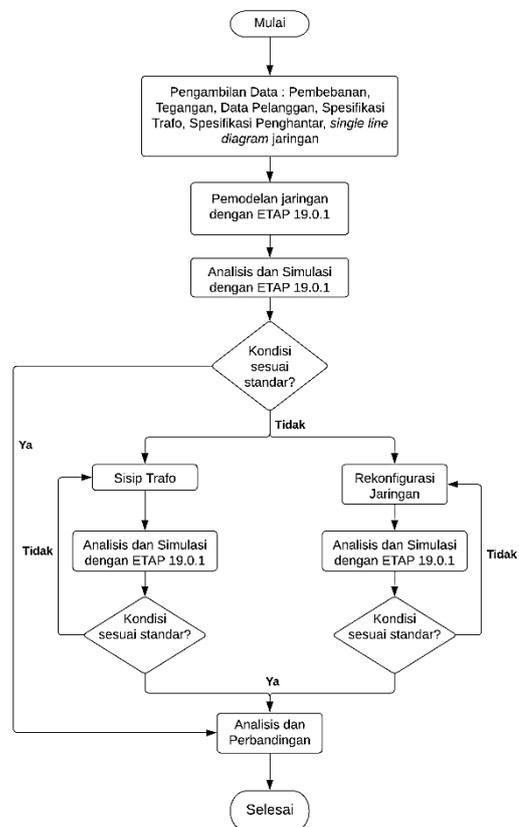
dalam penelitian ini meliputi dua pendekatan yaitu analisis dari hasil observasi lapangan dan menggunakan *software* simulasi. *Software* ETAP 19.0 digunakan untuk menghitung dan menganalisis data-data yang telah terkumpul. *Flowchart* tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Observasi Lapangan

Dalam penelitian ini, observasi lapangan dilakukan dengan pengamatan dan pencatatan data-data yang dibutuhkan. Data yang dicatat ialah data historis pembebanan dari trafo 1 fase pada penyulang SCG-08 di tahun 2022 hingga 2023. Pada Tabel 1 ditunjukkan bahwa penyulang Secang-08 memiliki beberapa gardu distribusi satu fase dengan nilai pembebanan yang bervariasi di setiap gardu.

Pembebanan terendah terdapat pada gardu SCG08-0163 dengan total 58,9 A. Hal ini masih jauh di bawah beban nominal yang mampu dihasilkan trafo satu fase kapasitas 50kVA yaitu sebesar 216,45 A (27,21% dari beban nominal trafo). Sedangkan nilai pembebanan tertinggi terdapat pada gardu SCG08-0066 dengan total beban yang disuplai sebesar 200,7 A atau 92,72% dari beban nominal trafo. Nilai tersebut melebihi standar yang tercantum pada SPLN 50:1997 yang hanya memperbolehkan trafo beroperasi dengan persentase pembebanan maksimal 80% [9]. Nilai pembebanan ini dipengaruhi oleh besarnya beban yang disuplai oleh suatu trafo ke pelanggan. Persamaan (1) digunakan untuk mengetahui nilai persentase pembebanan.



Gambar 1. Flowchart tahapan penelitian

Tabel 1. Pengukuran Beban pada Penyulang SCG-08

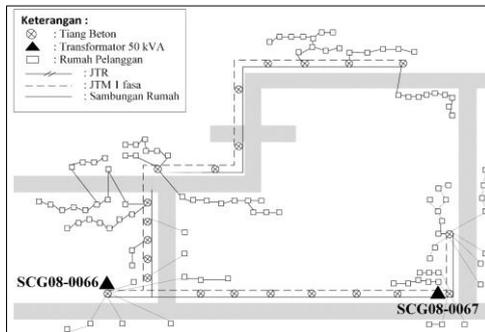
Nomor Gardu	Daya (kVA)	Beban Nominal (A)	Pengukuran Beban			Persentase beban (%)
			X1 (A)	X2 (A)	N (A)	
SCG08-0066	50	216,45	102	98,7	10,2	92,72
SCG08-0067	50	216,45	47,9	56,9	24,2	48,42
SCG08-0162	50	216,45	42,8	38,8	2,2	37,70
SCG08-0163	50	216,45	21,1	37,8	13,4	27,21
SCG08-0164	50	216,45	50,6	51,2	2,9	47,00
SCG08-0165	50	216,45	41,9	59,0	9,3	46,60
SCG08-0160	50	216,45	46,3	37,9	1,9	38,90
SCG08-0179	50	216,45	67,8	68,2	10,0	62,83
SCG08-0167	25	108,23	18,9	27,9	9,0	43,24
SCG08-0159	25	108,23	28,1	45,9	19,5	68,37

Tabel 2. Daya Pelanggan Dusun Wonosobo, Magelang Kota

Tiang	Daya Pelanggan (VA)				Total Daya (VA)	Keterangan
	450	900	1300	2200		
SCG08-0066	0	6	1	1	8.900	SD Kalegen dan rumah
JTR 1	0	0	0	1	2.200	Rumah
JTR 2	0	0	0	0	0	Tanpa SR
JTR 3	0	0	2	0	2.600	Musholla dan rumah
JTR 4	0	0	1	0	1.300	Rumah
JTR 5	13	7	0	0	12.150	Rumah
JTR 6	11	6	0	1	12.550	SD Kebon Agung dan rumah
JTR 7	0	0	0	0	0	Tanpa SR
JTR 8	0	0	0	0	0	Tanpa SR
JTR 9	0	0	0	0	0	Tanpa SR
JTR 10	0	0	0	0	0	Tanpa SR
JTR 11	9	2	0	0	5.850	Rumah
JTR 12	4	1	0	0	2.700	Rumah
JTR 13	9	0	0	0	4.050	Rumah



Gambar 2. Nameplate trafo SCG08-0066



Gambar 3. Denah Konfigurasi Jaringan Dusun Wonosobo, Magelang Kota

Gardu SCG08-0066 merupakan gardu distribusi satu fase dengan merek Voltra berkapasitas 50kVA yang aliran dayanya disalurkan ke JTR untuk menyuplai 75 pelanggan di Dusun Wonosobo, Magelang Kota. Nameplate trafo SCG08-0066 ditunjukkan pada Gambar 2. Tabel 2 merupakan rincian beban dari rumah-rumah pelanggan pada masing-masing tiang JTR di Dusun Wonosobo yang disuplai oleh trafo SCG08-0066. Variasi tipe daya yang tersambung pada rumah pelanggan di daerah tersebut antara 450-2200 VA.

Denah konfigurasi dari jaringan di Dusun Wonosobo dapat dilihat seperti pada Gambar 3. Tabel 1 menunjukkan bahwa titik tumpu trafo langsung menyuplai pelanggan dengan akumulasi daya sebesar 8,9kVA yang terdiri dari SD

Kalegen dan rumah pelanggan. JTR 5 dan JTR 6 memiliki total daya besar dikarenakan daerah tersebut merupakan kawasan padat penduduk yang diantaranya terdapat SD Kebonagung, masjid, dan banyak rumah pelanggan yang tersambung. Sedangkan JTR 7 hingga JTR 10 bernilai 0 karena daerah tersebut merupakan kawasan pertanian sehingga tidak ada pelanggan yang tersambung, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

B. Hasil Simulasi ETAP

Untuk mengetahui alternatif yang terbaik dalam upaya menurunkan persentase pembebanan trafo pada Gardu SCG08-0066 yang mengalami *overload*, maka dilakukan uji coba melalui dua tahap simulasi. Setiap tahap pengujian, dilakukan analisis, selanjutnya hasil simulasi dibandingkan untuk mengetahui kondisi pembebanan trafo. Hasil dari perbandingan kedua metode ini akan menjadi tolok ukur dalam penentuan metode paling efektif untuk mengatasi permasalahan trafo *overload* dengan mempertimbangkan kontinuitas aliran daya jangka panjang.

1) *Pemasangan Gardu Sisipan*: Data hasil survei lapangan yang tercantum pada Tabel 2 dan Gambar 3 digunakan sebagai acuan untuk melakukan simulasi penyisipan trafo gardu SCG08-0066. Tahap pertama dilakukan pengujian simulasi penambahan gardu sisipan dengan kapasitas 50 kVA dengan konfigurasi fase tunggal.

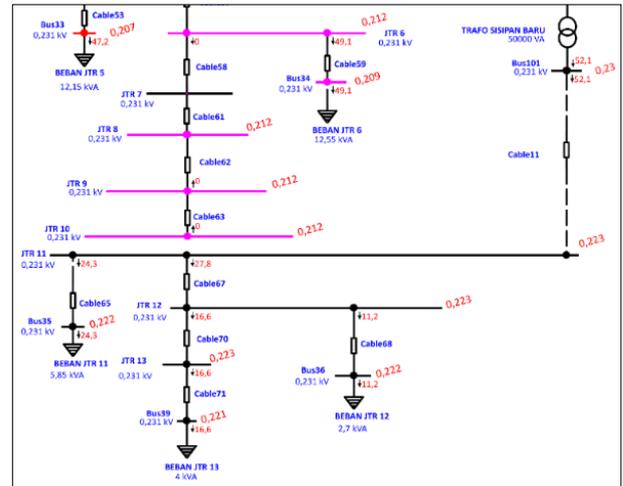
Beban pada masing-masing JTR diatur dengan satuan kVA, sedangkan untuk kabel yang digunakan disesuaikan dengan *library* SPLN yang ada pada ETAP. Kabel untuk jaringan tegangan menengah (JTM) menggunakan tipe AAA-CS dengan ukuran $70mm^2$, sedangkan pada sambungan rumah (SR) menggunakan tipe NFA2X ukuran $2x10mm^2$.

Hasil yang diperoleh dari simulasi menunjukkan bahwa persentase pembebanan trafo pada Gardu SCG08-0066 mengalami penurunan. Pembebanan awal pada Gardu SCG08-0066 sebesar 92,72% dengan beban puncak mencapai 200,7 A mengalami penurunan menjadi 73,41% dengan beban 158,9 A. Selain itu, penyisipan trafo dapat memperbaiki tegangan jaringan dari 195V menjadi 212V pada ujung jaringan.

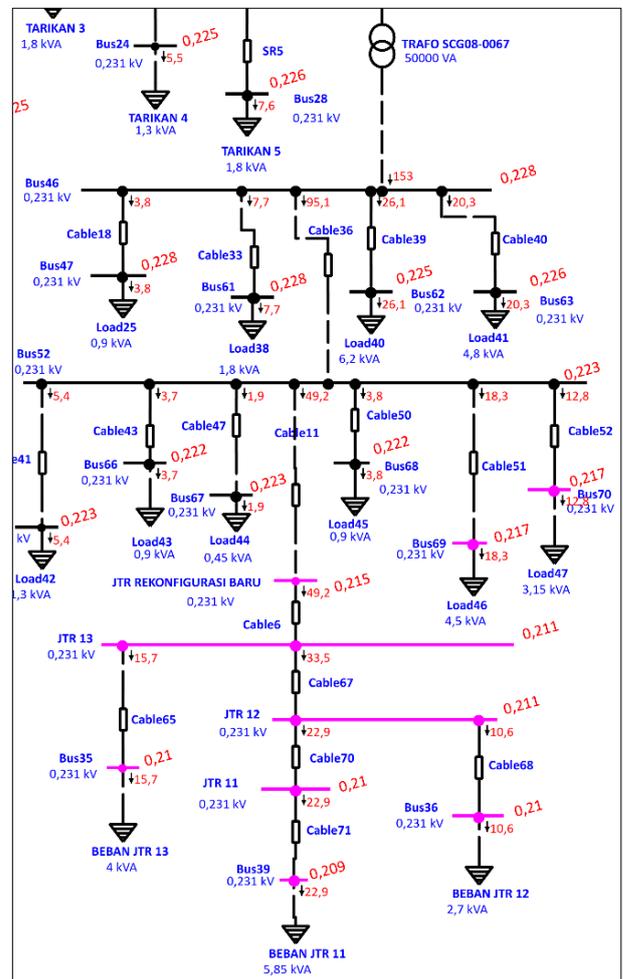
2) *Rekonfigurasi Jaringan*: Simulasi rekonfigurasi jaringan dilakukan dengan pemindahan beban ke tiang trafo terdekat yang belum mengalami *overload*. Berdasarkan data Tabel 1, trafo terdekat dari SCG08-0066 yang belum mengalami *overload* adalah trafo SCG08-0067 dengan persentase pembebanan 48,42%. Single Line Diagram (SLD) untuk rekonfigurasi jaringan dengan melakukan pemindahan beban dari trafo SCG08-0066 ke trafo SCG08-0067 ditunjukkan pada Gambar 5.

Penentuan trafo rekonfigurasi untuk pelimpahan beban diperhitungkan dari jarak trafo SCG08-0066 ke trafo terdekat lainnya serta persentase pembebanan trafo tersebut tidak terlalu besar. Berdasarkan data Tabel 1, diketahui bahwa gardu terdekat dari SCG08-0066 adalah gardu SCG08-0067 dengan persentase pembebanan sebesar 48,42% serta jarak 495m dari gardu SCG08-0066. Gardu SCG08-0067 merupakan gardu distribusi 1 fase dengan kapasitas 50kVA yang menyuplai 27 pelanggan di Dusun Kalegen, Magelang Kota.

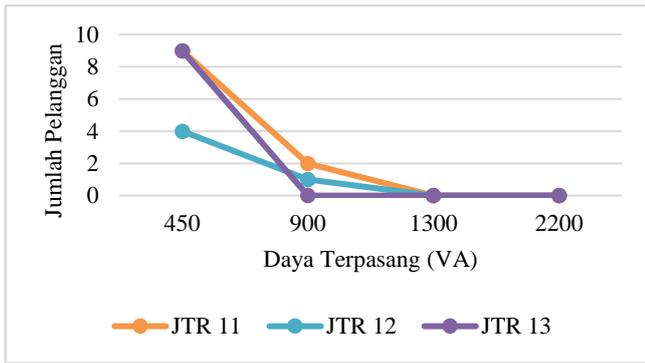
Simulasi pelimpahan beban dilakukan seperti pada Gambar 5. Rincian besar beban yang dipindahkan dari gardu SCG08-0066 ke gardu SCG08-0067 mengacu pada Gambar 6. Gambar 6 menunjukkan nominal beban yang dipindah dari Gardu SCG08-0066 ke Gardu SCG08-0067 sebesar 12,6 kVA atau 24,1% dari total beban yang disuplai oleh Gardu SCG08-0066. Beban tersebut merupakan daya terpasang dari JTR 11 yang terdiri dari 11 pelanggan dengan total daya 5,85kVA, JTR 12 yang terdiri dari 5 pelanggan dengan total daya 2,7kVA, dan JTR 13 yang terdiri dari 9 pelanggan dengan total daya 4,05kVA. Pemindahan beban tersebut diperhitungkan melihat jarak tiang terdekat dari trafo awal ke Gardu SCG08-0067.



Gambar 4. SLD Sispip Trafo pada Gardu SCG08-0066



Gambar 5. SLD Rekonfigurasi Jaringan pada Gardu SCG08-0066

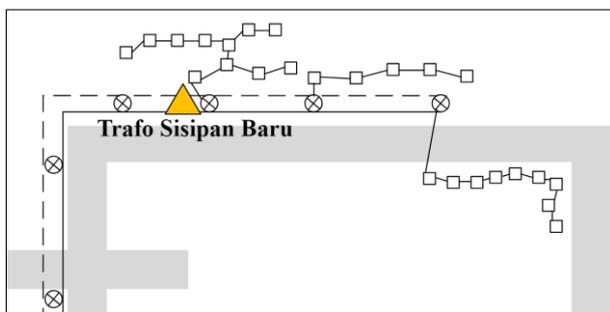


Gambar 6. Beban yang dipindah ke Gardu SCG08-0067

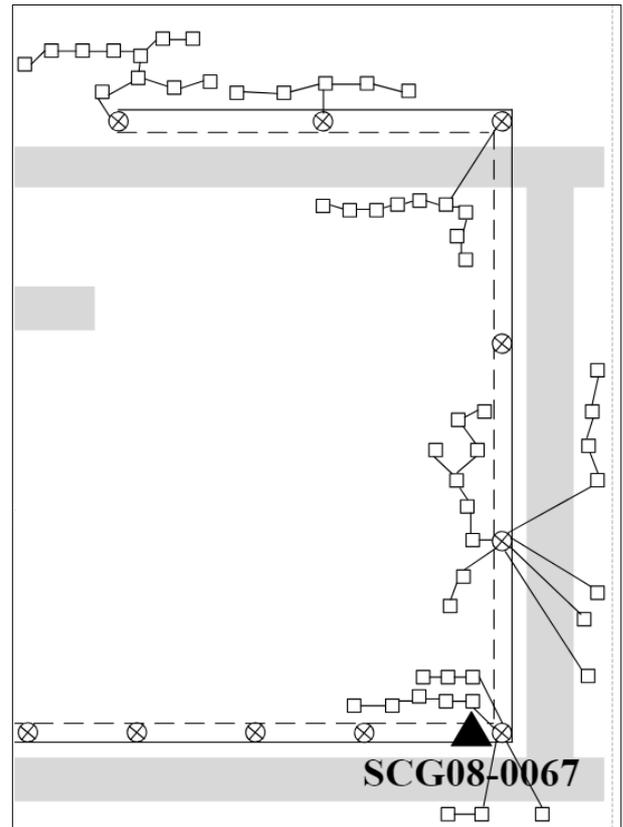
Gambar 7 menunjukkan rancangan denah setelah dilakukan sisip trafo satu fase. Berdasarkan gambar tersebut, dapat diketahui bahwa trafo terpasang pada JTR 11. Hal ini karena JTR 11 merupakan daerah yang terdekat dengan beban. Pada Gambar 8 ditunjukkan rancangan denah setelah dilakukan rekonfigurasi jaringan. Berdasarkan gambar tersebut dapat diketahui bahwa beban yang tersambung pada JTR 11-13 dipindahkan ke SCG08-0067. Rekonfigurasi jaringan ini membutuhkan satu buah tiang JTR baru agar panjang kabel tidak terlalu panjang sehingga meminimalisasi adanya *drop* tegangan.

Hasil dari simulasi rekonfigurasi jaringan menunjukkan bahwa persentase pembebanan transformator pada Gardu SCG08-0066 dengan persentase pembebanan awal sebesar 92,72% dengan beban puncak mencapai 200,7A mengalami penurunan menjadi 72,9% dengan beban 158,1 A. Selain itu, setelah dilakukan rekonfigurasi jaringan juga terdapat perbaikan nilai tegangan menjadi 206V yang pada kondisi awal sempat terjadi *drop voltage* hingga 195V di ujung jaringan.

Setelah dilakukan simulasi dengan metode sisip trafo dan rekonfigurasi jaringan, hasil perbandingan kedua metode tersebut ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4. Metode sisip trafo dan rekonfigurasi jaringan mampu mengatasi trafo *overload* yang menurunkan persentase pembebanan 19-20% dari pembebanan awal. Namun untuk kontinuitas jangka panjang, metode sisip trafo menjadi lebih efektif karena dilakukan penambahan gardu sisipan baru, sehingga pembebanan pada trafo tersebut masih sangat kecil, yaitu 24,7%. Apabila dibandingkan dengan rekonfigurasi jaringan yang menggunakan trafo *existing* memiliki pembebanan mencapai 70,68%. Nilai tersebut hampir mencapai batas maksimum persentase pembebanan trafo yang diperbolehkan menurut SPLN 50:1997.



Gambar 7. Rancangan denah setelah sisip trafo



Gambar 8. Rancangan denah setelah rekonfigurasi jaringan

V. SIMPULAN

Pada trafo SCG08-0066 persentase pembebanan sebelum dilakukan pemasangan sisip trafo maupun rekonfigurasi jaringan yaitu sebesar 92,72% dengan beban sebesar 200,7 A. Dengan dilakukannya penyisipan trafo satu fase pada gardu SCG08-0066 mengalami penurunan sebesar 19,3% dari persentase pembebanan awal, setelah sisip persentase pembebanan menjadi 73,41% dengan beban 158,9 A. Sedangkan pada rekonfigurasi jaringan, pelimpahan beban dilakukan ke gardu terdekat yaitu SCG08-0067 yang memiliki persentase pembebanan sebesar 48,42%. Dihilangkan penurunan persentase pembebanan sebesar 19,82%, setelah rekonfigurasi persentase pembebanan menjadi 72,9% dengan beban 158,1 A, dan pada trafo SCG08-67 sebesar 70,68% dengan beban 153 A.

Hasil dari kedua metode tersebut dapat menurunkan persentase pembebanan trafo sehingga tidak mengalami *overload*. Selain itu, kedua metode tersebut dapat memperbaiki jatuh tegangan di ujung jaringan yang mulanya 195 Volt menjadi 212 Volt. Namun untuk kontinuitas jangka panjang, metode sisip trafo menjadi lebih efektif. Hal ini dikarenakan penambahan gardu sisipan baru, sehingga pembebanan pada trafo tersebut masih sangat kecil apabila dibandingkan dengan rekonfigurasi jaringan yang menggunakan trafo eksisting

Tabel 3. Perbandingan data sebelum dan setelah penyisipan trafo

Gardu	Sebelum				Setelah			
	Persentase Beban (%)	Beban Terukur (A)	Tegangan Pangkal (V)	Tegangan Ujung (V)	Persentase Beban (%)	Beban Terukur (A)	Tegangan Pangkal (V)	Tegangan Ujung (V)
SCG08-0066	92,72	200,7	224	195	73,41	158,9	225	212
Sisipan Baru	-	-	-	-	24,07	52,1	223	221

Tabel 4. Perbandingan data sebelum dan setelah rekonfigurasi jaringan

Gardu	Sebelum				Setelah			
	Persentase Beban (%)	Beban Terukur (A)	Tegangan Pangkal (V)	Tegangan Ujung (V)	Persentase Beban (%)	Beban Terukur (A)	Tegangan Pangkal (V)	Tegangan Ujung (V)
SCG08-0066	92,72	200,7	224	195	72,9	158,1	224	206
SCG08-0067	48,42	104,8	226	220	70,68	153	225	209

Harapan untuk penelitian selanjutnya yaitu mampu menjelajahi aspek-aspek yang belum dipelajari dalam konteks sisip trafo satu fase dan rekonfigurasi jaringan. Misalnya, dapat dipertimbangkan pengaruh variabel-variabel yang berbeda, seperti penggunaan bahan baru, desain yang lebih efisien, atau metode produksi yang lebih ramah lingkungan. Eksplorasi ini akan memberikan pemahaman yang lebih lengkap tentang topik tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Muhammad, S. Meliala, dan Damayanti, "Mengatasi Beban Lebih Transformator Gardu Distribusi Dengan Menggunakan Trafo Sisip di PT PLN (Persero) ULP Langsa Kota," *Jurnal Energi Elektrik*, vol. 11, 2022.
- [2] G. A. Setia, H. U. Setiawan, F. Haz, dan E. Taryana, "Studi Penambahan Gardu Sisipan Tipe Tiang untuk Mengatasi Beban Lebih di PT PLN (PERSERO) Area Cianjur Rayon Mande," *EPSILON: Journal of Electrical Engineering and Information Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 139–149, 2022.
- [3] M. Najmul Fadli, Ni Made Seniari, dan I Made Ginarsa, "Analisis Rencana Pemasangan Transformator Sisipan pada Saluran Transformator Distribusi Penyulang Pagutan," Universitas Mataram, 2018.
- [4] I. Putu Sutawinaya, A. A. N. M. Narottama, dan I. G. N. Ade Pujana, "Meningkatkan kinerja gardu distribusi SK76 Penyulang Sukasada dalam menangani overblast menggunakan simulasi perangkat lunak ETAP," *Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology*, vol. 3, pp. 1–7, 2022.
- [5] A. A. N. M. Narottama, I. G. A. M. Sunaya, I. M. Purbhawa, dan K. R. D. Noviyanti, "Analisis pengaruh rekonfigurasi jaringan terhadap pembebanan transformator pada gardu distribusi KA 1316 penyulang Sriwijaya," *Matrix: Jurnal Manajemen Teknologi dan Informatika*, vol. 4, no. 3, p. 125, 2017.
- [6] A. Ar, M. Thahir, dan M. Tahir, "Studi Manajemen Trafo PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Sungguminasa," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI) 2022-Teknik Listrik*, Teknik Listrik, 2022, pp. 344–359.
- [7] R. Khomarudin dan L. Subekti, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban dan Harmonisa Terhadap Arus Netral Pada Trafo Distribusi 8 Kapasitas 500 KVA di PPSDM Migas Cepu," *Jurnal Listrik, Instrumentasi dan Elektronika Terapan (JuLIET)*, vol. 1, no. 2, Jan. 2021, doi: 10.22146/juliet.v1i2.59560.
- [8] M. F. Ibrahim, "Studi Aliran Daya Tiga Fasa dengan Mempertimbangkan Transformator Distribusi Hubung Belitan Delta-Delta pada Penyulang Katu Gardu Induk Menggala," Universitas Lampung, Bandar Lampung, 2016.
- [9] *SPLN 50: Spesifikasi Transformator Distribusi*. Jakarta: PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero), 1997.
- [10] P. Harahap, M. Adam, dan A. Prabowo, "Analisa Penambahan Trafo Sisip Sisi Distribusi 20 Kv Mengurangi Beban Overload Dan Jutah Tegangan Pada Trafo BI 11 Rayon Tanah Jawa Dengan Simulasi Etab 12.6. 0," *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, vol. 1, no. 2, pp. 62–69, 2019.
- [11] M. Suartika, I. Wayan, dan A. Wijaya, "Rekonfigurasi Jaringan Tegangan Rendah (JTR) untuk Memperbaiki Drop Tegangan di Daerah Banjar Tulangnyuh Klungkung," *Teknologi Elektro*, vol. 9, no. 2, pp. 175–181, Jul. 2010.
- [12] D. Chembe, "Reduction of Power Losses Using Phase Load Balancing Method in Power Networks," *World Congress on Engineering and Computer Science*, vol. 2178, Oct. 2009, Accessed: May 13, 2023.
- [13] A. Damnjanovic and G. Feruson, "The measurement and evaluation of distribution transformer losses under nonlinear loading," in *Power Engineering Society General Meeting*, Jul. 2004, pp. 1416-1419 Vol.2. doi: 10.1109/PES.2004.1373098.

Analisis Perbandingan *Uprating* dan Sisip Transformator Tiga Fase untuk Mengantisipasi Terjadinya *Overload* pada Transformator Distribusi Penyulang GJN-12 Nomor Tiang U3-89/1 PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota

Nur Risya Difa Kusuma Ningrum¹, Nina Loenca Br Ginting¹, Haidar Nabil Muflih¹,
Muhammad Dwi Cahyo Ramadhan¹, Candra Febri Nugraha^{1,*}

¹Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Gadjah Mada; risyadifa912@mail.ugm.ac.id;
ninaginting10@mail.ugm.ac.id; haidar.nabil.muflih@mail.ugm.ac.id; cahyoramadhan@mail.ugm.ac.id

*Korespondensi: candra.febri.nugraha@ugm.ac.id

Abstract – As the population increases, the need for electricity also increases every year. The rapid population and economic growth in the area of PLN (Persero) ULP Yogyakarta City has affected the increasing requests for additional electric power by customers, resulting in overloads on the distribution transformers. Based on SPLN Decree No. 17 of 1979, there are three types of transformer conditions: normal, alert, and emergency. According to the percentage of transformer loading, alert and emergency conditions are greater than 80%. Therefore, a simulation is conducted to determine the condition of the transformer when power is added. This research method compares the effects of uprating and inserting transformers to prevent overload. The comparison method is based on three aspects: the percentage of loading, the percentage of drop voltage, and the cost of work. Based on the simulation results in this study, the two methods show the same effectiveness, with the percentage of loading decreasing by 75.9% and the percentage of voltage drop decreasing by 1.81%. While the cost of work for uprating the transformer is Rp44,417,670, the cost of inserting the transformer is Rp48,843,740. The cost for uprating is cheaper because it does not require the costs of installing poles and CC7 construction. Accordingly, the uprating method is more efficient than the transformer insertion method in terms of operating costs.

Keywords – uprating, transformer insertion, overload, drop voltage, ETAP

Intisari – Seiring bertambahnya jumlah penduduk, kebutuhan listrik juga mengalami peningkatan tiap tahun. Pesatnya pertumbuhan penduduk dan ekonomi di area PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota berpengaruh pada bertambahnya permohonan tambah daya listrik oleh pelanggan yang mengakibatkan terjadinya *overload* (beban lebih) pada transformator distribusi. Berdasarkan ketetapan SPLN No. 17 Tahun 1979 menyatakan bahwa terdapat tiga macam kondisi transformator yaitu normal, waspada dan darurat. Menurut persentase pembebanan transformator, kondisi waspada dan darurat terjadi saat pembebanan lebih dari 80%. Oleh karena itu, dilakukan simulasi dilakukan untuk mengetahui kondisi transformator ketika dilakukan penambahan daya. Pada metode penelitian ini membandingkan pengaruh *uprating* dan sisip transformator untuk mengantisipasi terjadinya *overload*. Metode perbandingan tersebut berdasarkan tiga aspek yaitu persentase pembebanan, persentase *drop voltage* dan biaya pengerjaan. Berdasarkan hasil simulasi pada penelitian ini, kedua metode tersebut menunjukkan hasil efektivitas yang sama, dengan persentase pembebanan mengalami penurunan 75,9% dan penurunan persentase *drop voltage* 1,81%. Sedangkan biaya pengerjaan untuk *uprating* sebesar Rp44.417.670, sedangkan untuk sisip transformator sebesar Rp48.843.740. Biaya pengerjaan *uprating* transformator lebih murah karena tidak memerlukan biaya pemasangan tiang serta konstruksi CC7. Maka dari itu, metode *uprating* lebih efisien dari metode sisip transformator dalam hal biaya pengerjaan.

Kata kunci – uprating, sisip transformator, overload, drop voltage, ETAP

I. PENDAHULUAN

Sistem ketenagalistrikan di Indonesia selalu mengalami perkembangan tiap tahun. Perkembangan ini merupakan dampak dari peningkatan jumlah penduduk. Pertumbuhan jumlah penduduk dan ekonomi yang semakin pesat tentunya menyebabkan peningkatan kebutuhan energi listrik pula. Hal ini mengakibatkan bertambahnya permohonan tambah daya listrik oleh pelanggan terutama di area PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota. Semakin tingginya permohonan pelanggan dari tahun ke tahun berpengaruh pada peningkatan beban energi listrik. Melihat hal tersebut, keandalan pendistribusian tenaga listrik sangat diperlukan. Sistem distribusi merupakan sistem yang memiliki fungsi membagikan listrik ke pelanggan sesuai kebutuhan [1]. Namun, terdapat hambatan dalam pendistribusian listrik yaitu adanya gangguan pada transformator distribusi berupa *overload* [2]. Transformator distribusi merupakan komponen yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah [3].

Transformator distribusi adalah alat yang menurunkan nilai tegangan supaya tegangan yang dipakai sesuai dengan rating beban (peralatan listrik) pada umumnya [4]. Transformator dapat mengubah tenaga listrik di sisi primer dan sekunder melalui proses induksi elektromagnetik [5].

Berdasarkan data PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota tahun 2022, di area Yogyakarta Kota terdapat ratusan buah transformator distribusi tiga fase yang mengalami *overload*. Terjadinya *overload* pada transformator mengakibatkan kerugian dalam pendistribusian tenaga listrik seperti terhambatnya proses pendistribusian listrik, menurunnya *lifetime* dan rusaknya transformator karena panas yang berlebihan [6]. Sebagaimana yang ditetapkan SPLN No. 17 Tahun 1979 bahwa persentase pembebanan transformator tidak boleh melebihi 80% kapasitas bebannya [7]. SPLN No. 1 Tahun 1995 yang menyatakan bahwa sistem kelistrikan dikatakan andal apabila persentase jatuh tegangan

di sisi pelanggan tidak lebih dari +5% dan -10% tegangan normalnya [8].

Berdasarkan data PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota tahun 2022, area Yogyakarta Kota mendapat ratusan permohonan pelanggan untuk penambahan daya. Pada penambahan daya pelanggan, dampak yang akan terjadi haruslah diperhatikan. Hal ini karena penambahan daya pelanggan juga dapat mengakibatkan terjadinya *overload* pada transformator distribusi yang beroperasi. Oleh karena itu, diperlukan studi untuk mengetahui apakah transformator distribusi yang beroperasi akan mengalami *overload* apabila dilakukan penambahan daya. Jika benar, maka perlu dilakukan upaya antisipasi *overload*. Terdapat upaya yang umum dilakukan untuk mengatasi *overload* yaitu 54utase transformator (*change*) atau menaikkan kapasitas transformator (*uprating*), sisip transformator, dan rekonfigurasi jaringan (mengalihkan sebagian beban ke transformator lain) [9].

Uprating dapat memecahkan permasalahan *overload* pada transformator distribusi GT-PCDJ di ULP Pangkep. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan nilai persentase pembebanan transformator [10]. *Uprating* transformator-1 yang berada di GI BSB juga memiliki dampak seperti level tegangan naik, faktor beban naik, serta nilai *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI) dan *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI) yang menurun. Selain itu terdapat konsekuensi berupa adanya biaya investasi serta perlunya *re-setting* relai arus lebih dan penambahan relai gangguan tanah terbatas [11].

Cara mengatasi transformator yang mengalami *overload* yaitu dengan menambahkan atau menyisipkan transformator untuk membagi beban. Hal ini diketahui dari persentase pembebanan transformator dan persentase tegangan jatuh yang turun [12]. Sisip transformator merupakan upaya untuk meminimalisir terjadinya *overload*. Hal ini ditunjukkan pada kondisi pembebanan transformator BL 11 yang menurun sedangkan untuk tegangan ujung naik [13]. Umumnya transformator sisipan dipasang paralel dengan transformator eksisting. Adapun syarat supaya transformator dapat dioperasikan paralel yaitu tegangan kerja, frekuensi, *vector group*, dan impedansi transformator harus sama [14].

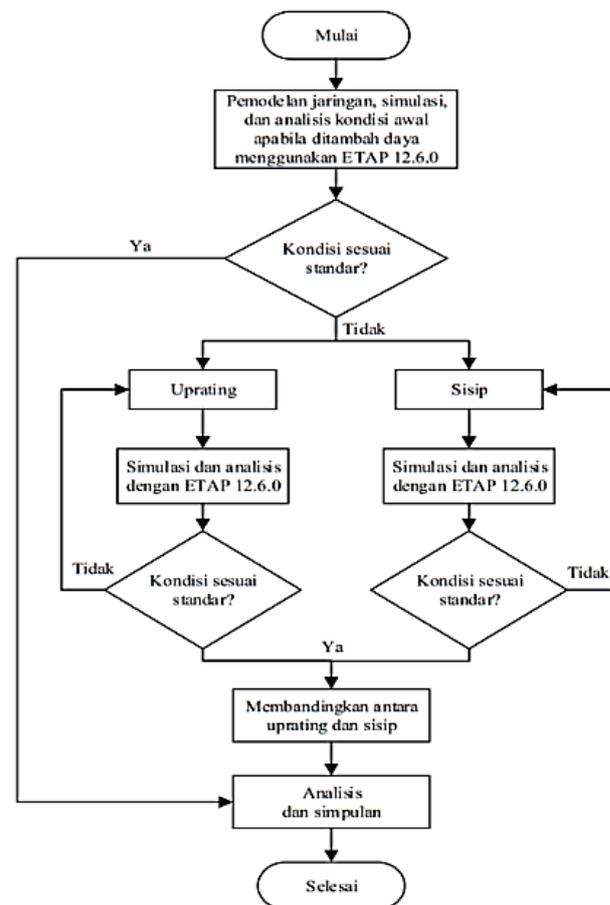
Kinerja transformator dapat diperbaiki dengan *uprating* transformator, menambahkan gardu sisip, atau melalui rekonfigurasi jaringan. Berdasarkan hasil simulasi, *uprating* menyebabkan persentase pembebanan menurun. Selain itu, penambahan gardu sisipan dan rekonfigurasi jaringan juga mengakibatkan persentase pembebanan mengalami penurunan [15]. Rekonfigurasi penyulang dilakukan karena beban puncak penyulang sangat tinggi melebihi batas maksimum yang ditetapkan PT PLN (Persero). Dari hasil pengukuran didapat bahwa persentase arus pembebanan pada Penyulang Berawa turun sedangkan untuk Penyulang Bumbak naik [16].

Beberapa penelitian terdahulu masih membahas upaya untuk mengatasi permasalahan *overload*, belum ada yang

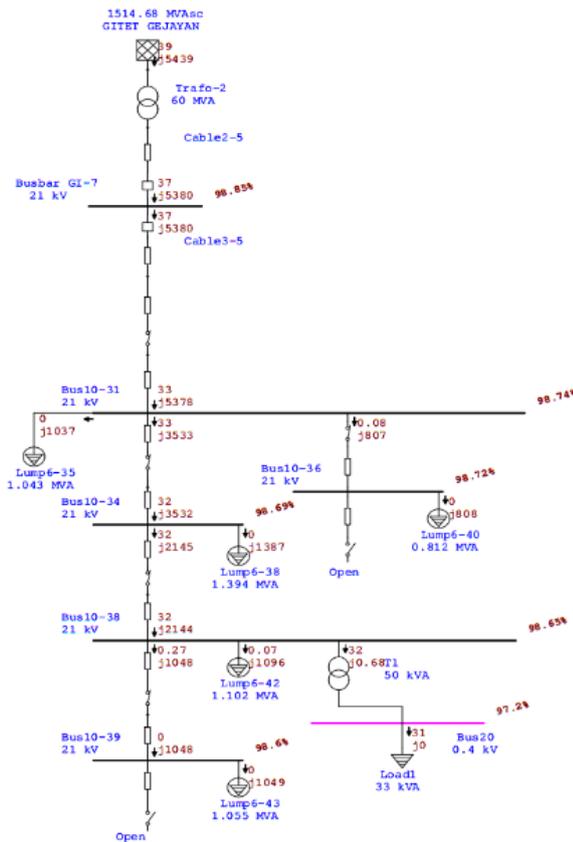
membahas upaya mengantisipasi *overload*. Mayoritas penelitian juga hanya membahas satu metode penelitian saja. Sebagai informasi, upaya/metode yang umum dilakukan PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota dalam mengantisipasi dan mengatasi *overload* yaitu *uprating* dan sisip transformator. Kedua upaya umum dilakukan karena lebih ekonomis dari segi biaya dan lebih efektif mengatasi *overload* kedepannya. Sedangkan upaya rekonfigurasi jaringan jarang dilakukan di Yogyakarta Kota karena merupakan area yang relatif padat penduduk beserta segala aktivitasnya sehingga transformator distribusi yang ada mayoritas sudah cukup besar nilai pembebanannya. Penelitian ini bertujuan untuk menyimulasikan, menganalisis, dan membandingkan antara upaya *uprating* dan sisip transformator, mana yang lebih efektif dan efisien dalam mengantisipasi *overload* pada transformator distribusi penyulang GJN-12 nomor tiang U3-89/1 PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota.

II. METODOLOGI

Penelitian mengenai analisis perbandingan *uprating* dan sisip transformator 3 fasa untuk mengantisipasi terjadinya *overload* pada transformator distribusi penyulang GJN-12 nomor tiang U3-89/1 PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota ini dilakukan secara bertahap sesuai dengan Gambar flowchart yang tertera pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart penelitian



Gambar 3. SLD simulasi kondisi awal dengan 33 kVA

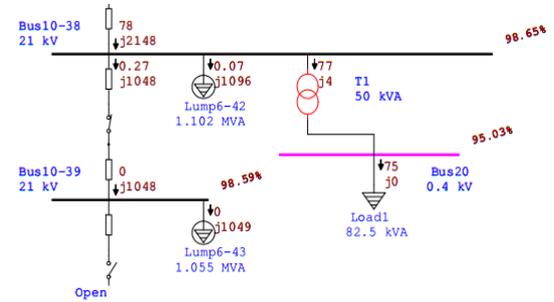
Berdasarkan Tabel 2 dapat diketahui bahwa nilai pembebanan transformator distribusi pada kondisi awal dengan beban sebesar 33 kVA yaitu 63,3%. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa berdasarkan hasil simulasi dan report, pada kondisi sebelum dilakukan penambahan daya, transformator dalam kondisi normal dan nilai persentase pembebanan transformator distribusi penyulang GJN-12 nomor tiang U3-89/1 sudah sesuai standar.

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, perkembangan penduduk di daerah Affandi menyebabkan pelanggan yang berupa toko semakin ramai dan perlu penambahan berbagai peralatan listrik yang dapat mendukung operasionalnya. Hal ini berakibat pada perlunya penambahan daya listrik pelanggan tersebut. Oleh karena itu, pelanggan mengajukan permohonan penambahan daya dari yang sebelumnya 33 kVA menjadi 82,5 kVA pada ULP Yogyakarta Kota.

2) *Setelah Penambahan Daya.*: ULP Yogyakarta Kota merupakan unit perantara distribusi listrik ke pelanggan. Sebagai unit yang menerima pengajuan tambah daya dari pelanggan, ULP tidak langsung menyanggupi. Divisi teknik perlu melakukan survei lokasi untuk mengetahui informasi yang mendukung perencanaan tambah daya pelanggan. Setelah survei, diketahui bahwa jika kegiatan tambah daya dari 33 ke 82,5 kVA dilakukan dengan kapasitas transformator 50 kVA, maka akan terjadi *overload*.

Tabel 3. Laporan pembebanan kondisi awal dengan 82,5 kVA

ID	Tipe	Kapasitas (kVA)	Loading	
			kVA	%
T1	Transformator 3 fasa	50	77	154,7



Gambar 4. SLD simulasi kondisi awal dengan 82,5 kVA

Dari Gambar 4 dapat diketahui bahwa telah dilakukan penambahan daya pada pelanggan dari yang semula 33 kVA menjadi 82,5 kVA. Pada Gambar terlihat bahwa meskipun telah dilakukan penambahan daya, kapasitas transformator distribusi yang terhubung pada beban tetap 50 kVA

Hal ini mengakibatkan transformator (T1) terlihat berwarna merah yang berarti telah mengalami *overload*. Selain itu, berdasarkan Gambar 4 dapat diketahui pula bahwa telah terjadi *drop voltage* pada bus terdekat dengan beban yaitu bus 20. Pada bus 20, nilai tegangan yang terukur hanya 95,03 % dari tegangan nominal. Hal ini berarti bahwa pada bus 20, terjadi *drop voltage* sebesar 4,97 %. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa berdasarkan hasil simulasi dan *report* ETAP, pada kondisi setelah dilakukan penambahan daya menjadi 82,5 kVA, nilai jatuh tegangan atau *drop voltage* di bus 20 sudah sesuai standar.

Berdasarkan Tabel 3 diketahui bahwa nilai pembebanan transformator distribusi pada kondisi awal dengan beban sebesar 82,5 kVA yaitu 154,7%. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa pada kondisi setelah dilakukan penambahan daya baik berdasarkan hasil simulasi dan *report* ETAP, nilai persentase pembebanan transformator distribusi lebih dari 91% kapasitas maksimumnya. Maka dari itu, berdasarkan SPLN No.17 Tahun 1979, transformator distribusi ini termasuk dalam kondisi darurat (*overload*).

Berdasarkan hasil simulasi setelah penambahan daya, dapat diketahui pula bahwa diperlukan suatu upaya untuk mengantisipasi terjadinya *overload* pada transformator distribusi. Terdapat dua upaya atau metode yang akan dibahas pada penelitian ini yaitu *uprating* dan sisip transformator.

B. Metode Antisipasi Terjadinya Overload

1) *Uprating Transformator*: Gambar 5 merupakan Gambar SLD simulasi pada metode *uprating* transformator. Pada Gambar ini telah dilakukan penambahan daya pada pelanggan dari yang semula 33 kVA menjadi 82,5 kVA. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, penambahan daya

transformator distribusi penyulang GJN-12 nomor tiang U3-89/1 dilakukan pendataan material dasar utama (MDU) dan material *hardware* (material pendukung dari material utama) serta pembuatan RAB pekerjaan. Adapun RAB *uprating* tertera pada Tabel 6.

Seperti Tabel 6, *uprating* transformator membutuhkan MDU sebesar 36 juta rupiah, upah pekerja empat juta rupiah, biaya transportasi sebesar Rp225.400. Selain itu, ada pajak sebesar 11%. Dengan demikian, total biaya yang diperlukan dalam pekerjaan *uprating* transformator distribusi penyulang GJN-12 nomor tiang U3-89/1 yaitu sebesar 44,4 juta rupiah.

2) *Biaya Sisip Transformator*: Sebelum dilaksanakan sisip transformator, terlebih dahulu dilakukan pendataan material dasar utama (MDU), material *hardware*, dan pembuatan RAB pekerjaan. Adapun RAB sisip transformator tertera pada Tabel 7.

Seperti Tabel 7, sisip transformator membutuhkan biaya MDU sebesar 39 juta rupiah dan material hardware dua juta rupiah. Konstruksi yang digunakan yaitu CC7, tiang beton JTM tiga fase pada ujung jaringan (dead end). Konstruksi CC7 terdiri dari beberapa material hardware sebagai berikut:

- 4 buah isolator tarik 20 KV, 10" (2 pcs) (kode: sus)
- 1 buah *eye bolt, double arming* 5/8" (kode: bdm)
- 1 buah *spool insulator* ansi 53-2 (kode: ansi)
- 1 buah *oval eye bolt* 5/8" (kode: oeb)
- 3 buah *oval eye nut* 5/8" (kode: oen)
- 1 buah *clevis swinging secondary* (kode: clv)

Tabel 6. RAB *uprating* transformator

Uraian	Biaya (Rp)
Pemasangan APP 3 fasa 82,5 kVA	14.638.326
Pemasangan Trafo 3 fasa 100 KVA 1	25.152.193
Lain-lain (transportasi)	225.400
Jumlah MDU	36.004.160
Jumlah Jasa	4.011.759
PPN 11%	4.401.751
Jumlah Total	44.417.670

Tabel 7. RAB sisip transformator

Uraian	Biaya (Rp)
Pemasangan APP 3 fasa 82,5 kVA	16.966.110
Pemasangan Trafo 3 fasa 100 KVA 1 tiang	18.696.723
Pemasangan Konstruksi Tiang CC7	8.106.076
Lain-lain (transportasi dan penomoran tiang)	225.400
Jumlah MDU	39.176.985
Jumlah Jasa	2.062.050
PPN 11%	4.840.371
Jumlah Total	48.843.740

- 2 buah *cross arm steel* 2000 mm galvanis (kode: cas)
- 4 buah *brace steel* 770 mm (kode: bst)
- 3 buah *bolt machine* 5/8"X10" (kode: bm)
- 1 buah *pole band double rack* 7" atau 71/2" (kode: pbdr)
- 8 buah *washer square* 2 1/4" (kode: wsq)
- 1 buah *armour tape*
- 1 buah *loop dead end clamp/LC* 35 s/d 240 mm²
- 1 buah *primary dead-end clamp*
- 1 buah *split plastic sleeve* (tutup kabel)

Sisip trafo juga memerlukan biaya upah pekerja sebesar tiga juta rupiah. Biaya transportasi dan penomoran tiang sebesar Rp234.460. Pajak untuk jasa layanan kelistrikan sebesar 11%. Dengan demikian, total biaya yang diperlukan dalam pekerjaan sisip transformator distribusi penyulang GJN-12 nomor tiang U3-89/1 yaitu sebesar 48 juta rupiah.

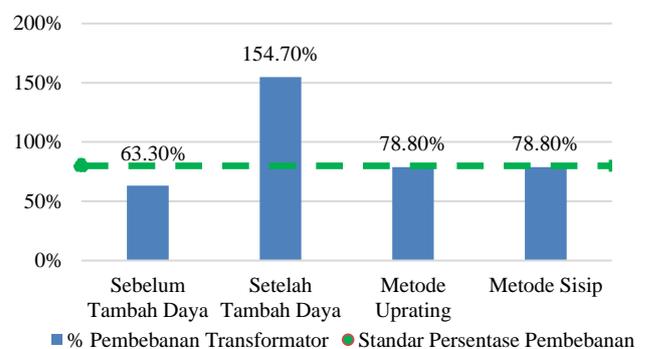
D. Perbandingan Metode *Uprating* dan Sisip Transformator

Pembahasan ini dilakukan perbandingan untuk mengetahui antara dua metode mana yang lebih efektif dan efisien untuk mengantisipasi *overload*.

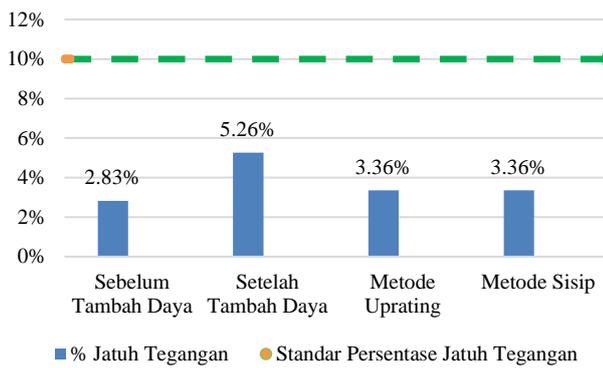
1) *Segi Teknis*: Perbandingan dari segi teknis merupakan perbandingan persentase pembebanan transformator distribusi dan persentase jatuh tegangan (*drop voltage*) dengan acuan hasil simulasi ETAP. Perbandingan persentase pembebanan berdasarkan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 7.

Berdasarkan Gambar 7 dapat diketahui bahwa metode *uprating* dan sisip transformator dapat menurunkan nilai persentase pembebanan transformator. Kedua metode yaitu *uprating* dan sisip transformator sama-sama dapat menurunkan nilai persentase pembebanan transformator sebesar 75,9% dari yang semula persentase pembebanannya 154,7% menjadi 78,8%.

Berdasarkan Gambar 8 diketahui bahwa *uprating* dan sisip transformator dapat menurunkan nilai persentase jatuh tegangan sebesar 1,81% dari yang semula 4,97% menjadi 3,16%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa dari segi teknis, metode *uprating* dan sisip transformator memiliki tingkat efektivitas yang sama untuk mengantisipasi *overload* pada transformator distribusi penyulang GJN-12 nomor tiang U3-89/1 PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota.



Gambar 7. Grafik perbandingan %pembebanan transformator



Gambar 8. Grafik perbandingan persentase jatuh tegangan

Tabel 8. Perbandingan biaya pekerjaan

Metode	Uprating transformator (Rp)	Sisip transformator (Rp)
Material Dasar Utama (MDU)	39.176.985	36.004.160
Material Hardware	2.764.334	0
Jasa	3.789.359	4.011.789
Lain-lain	234.460	225.400
Total Biaya Pekerjaan	44.417.670	48.843.740

Berdasarkan Gambar 8 diketahui bahwa *uprating* dan sisip transformator dapat menurunkan nilai persentase jatuh tegangan sebesar 1,81% dari yang semula 4,97% menjadi 3,16%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa dari segi teknis, metode *uprating* dan sisip transformator memiliki tingkat efektivitas yang sama untuk mengantisipasi *overload* pada transformator distribusi penyulang GJN-12 nomor tiang U3-89/1 PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota.

2) *Segi Teknis*:. Perbandingan dari segi biaya pekerjaan merupakan perbandingan dengan acuan RAB pekerjaan yang dilakukan. Untuk perbandingan biaya pekerjaan *uprating* dan sisip transformator tertera pada Tabel 8.

Berdasarkan Tabel 8 diketahui bahwa total biaya pekerjaan kedua metode cukup berbeda. *Uprating* membutuhkan biaya sebesar Rp44.417.670. Sedangkan sisip transformator distribusi penyulang GJN-12 nomor tiang U3-89/1 membutuhkan biaya sebesar Rp48.843.740. Berikut merupakan perbedaan di antara kedua metode:

- Pada pemasangan APP 3 fasa daya 82,5 kVA: *Uprating* perlu kabel NYY 4x70 mm² sepanjang 7 meter sedangkan sisip transformator perlu 15 meter.
- Pada pemasangan trafo: *Uprating* perlu sebuah trafo 3 fase 100 kVA, serandang, upah pasangannya dan upah bongkar trafo 50 kVA. Sedangkan sisip trafo perlu sebuah transformator 3 fase 50 kVA, serandang dan upah jasa pasangannya.

- *Uprating* tidak perlu biaya penomoran dan pemasangan tiang serta konstruksi CC7.

Berdasarkan Tabel 8 diketahui bahwa *uprating* lebih murah Rp4.426.070 dibandingkan sisip transformator. Selain itu, disimpulkan pula bahwa pekerjaan *uprating* transformator lebih efisien untuk mengantisipasi terjadinya *overload* pada transformator distribusi penyulang GJN-12 nomor tiang U3-89/1 PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota.

IV. SIMPULAN

Penambahan daya berpengaruh pada peningkatan persentase pembebanan transformator distribusi penyulang GJN-12 nomor tiang U3-89/1 dari yang semula 63,3% menjadi 154,7%. Sesuai SPLN No.17 Tahun 1979, penambahan daya ini menyebabkan transformator *overload* karena persentase pembebanan lebih dari 91%. Berdasarkan simulasi ETAP, metode *uprating* menyebabkan penurunan persentase pembebanan transformator dari 154,7% menjadi 78,8% sehingga transformator sudah normal kembali. *Uprating* juga menyebabkan penurunan persentase *drop voltage* dari 4,97% menjadi 3,16%. Untuk total biaya pekerjaan *uprating* sebesar Rp44.417.670. Selain itu, berdasarkan simulasi ETAP, metode sisip transformator menyebabkan penurunan persentase pembebanan dari 154,7% menjadi 78,8% sehingga transformator sudah normal. Sisip transformator juga menyebabkan penurunan persentase *drop voltage* dari 4,97% menjadi 3,16%. Untuk total biaya pekerjaan sisip transformator sebesar Rp48.843.740.

Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa dari segi teknis, kedua metode antisipasi *overload* menunjukkan hasil efektivitas yang sama karena persentase pembebanan dan *drop voltage* mengalami penurunan yang sama. Sedangkan dari segi biaya pekerjaan, metode *uprating* membutuhkan biaya yang lebih murah sehingga *uprating* lebih efisien dari sisip transformator dalam mengantisipasi terjadinya *overload* pada transformator distribusi penyulang GJN-12 nomor tiang U3-89/1 PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota.

PENELITIAN LANJUTAN

Pada penelitian lebih lanjut di masa depan, direkomendasikan kepada sesama peneliti untuk menambahkan metode lain seperti rekonfigurasi jaringan dalam penelitian mengenai cara antisipasi maupun mengatasi terjadinya beban lebih (*overload*) pada transformator distribusi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada PT. PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota yang telah memberi saran dan masukan serta menyediakan berbagai data penelitian untuk mendukung terlaksananya penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Purnomo, Analisis Sistem Daya Bagian: Saluran Transmisi Daya Elektrik, Malang: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, 2016.

- [2] K. Samangun, M. Suyanto and S. Priyambodo, "Analisis Transformator Distribusi Akibat Gangguan Overload dan Sparkover di PT PLN (Persero) APJ Yogyakarta," *Jurnal Elektrikal*, vol. 4, no. 1, pp. 21-30, 2019.
- [3] S. Sadi and M. Arif, "Pengukuran Perbandingan Belitan Pada Transformator 3 Fasa 50 Hz 250 kVA," *Jurnal Teknik*, vol. 3, no. 2, pp. 67-74, 2014.
- [4] K. A. Kodoati, F. Lisi and M. Pakiding, "Analisa Perkiraan Umur Transformator," *E-journal Teknik Elektro dan Komputer*, pp. 35-43, 2015.
- [5] R. Khomarudin and L. Subekti, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban dan Harmonisa Terhadap Arus Netral pada Trafo Distribusi 8 Kapasitas 500 kVA di PPSDM Migas Cepu," *Jurnal Listrik, Instrumentasi dan Elektronika Terapan*, vol. 1, no. 2, pp. 28-33, Desember 2020.
- [6] M. T. Nugraha and D. Fauziah, "Penanggulangan Overload Transformator Distribusi dengan Metode Uprating di Gardu PNBS 20 KV ULP Pangandaran," in *Seminar Nasional Energi, Telekomunikasi dan Otomasi (SNETO)*, Bandung, 2021.
- [7] PLN, *Pedoman Pembebanan Transformator Terendam Minyak*, 17 ed., vol. 17, Jakarta: Departemen Pertambangan dan Energi Perusahaan Umum Listrik Negara, 1979.
- [8] PLN, *Tegangan-Tegangan Standar*, 1 ed., Jakarta: PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero), 1995.
- [9] A. A. D. Amir, A. R. Sultan and M. I. Bachtiar, "Analisis Penerapan Fungsi Dua Tahap Pada Relai Proteksi Standby," in *Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI) 2022-Teknik Listrik*, Makassar, 2022.
- [10] M. R. W. Susanto, "Studi Analisis Dampak Overload Transformator Terhadap Kualitas Daya di PT. PLN (Persero) ULP Pangkep," Universitas Muhammadiyah Makassar, Makassar, 2020.
- [11] D. A. Nikmah, "Analisis Dampak dan Konsekuensi dari Uprating Transformator-1 di Gardu Induk Bumi Semarang Baru 150 KV," Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2020.
- [12] A. A. F. N. Rochim, "Analisis Penambahan Trafo Sisipan Pada Penyulang ULP Klaten Kota dengan Menggunakan Aplikasi Program ETAP," Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, 2022.
- [13] P. Harahap, M. Adam and A. Prabowo, "Analisa Penambahan Trafo Sisip Sisi Distribusi 20 KV Mengurangi Beban Overload dan Jatuh Tegangan Pada trafo BI 11 Rayon Tanah Jawa dengan Simulasi Etap 12.6.0," *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro*, vol. 1, no. 2, pp. 62-68, Januari 2019.
- [14] B. Y. Husodo and Firmansyah, "Analisis Vector Group Pada Hubungan Paralel Transformator Unit Gardu Bergerak," *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 7, no. 3, pp. 130-139, 2016.
- [15] I. P. Sutawinaya, A. Narrotama and I. A. Pujana, "Meningkatkan Kinerja Gardu Distribusi SK76 Penyulang Sukasada dalam Menangani Overblast Menggunakan Simulasi Perangkat Lunak ETAP," *Jurnal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology*, vol. 3, pp. 1-7, 2022.
- [16] I. G. N. I. Wiguna, I. G. D. Arjana and T. G. Indra, "Analisa Rekonfigurasi Jaringan Distribusi 20 kV Pada Penyulang Berawa Untuk Menurunkan Losses dan Drop Tegangan Penyaluran Tenaga Listrik," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 6, no. 2, pp. 67-71, Juni 2019.

Identifikasi Parameter Adaptif Motor Arus Searah Penguat Terpisah Menggunakan Algoritma LMS

Nia Saputri Utami^{1*}, Imroatul Hudati²,

¹Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Sumatera; nia.utami@el.itera.ac.id

²Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Gadjah Mada; imroatul.hudati@mail.ugm.ac.id

*Korespondensi: nia.utami@el.itera.ac.id

Abstract – An adaptive control system is a system which can adapt with the changes around its environment. It is usually used to identification the parameters of the system. A separated excited DC motor has different voltage source between the armature and the flux. The parameter of the separated excited DC motor was used to get continous transfer function. Then, the continous transfer function is converted to a discrete transfer function to get the differensial equation. Coeffisien of the differensial equation has been used as target during the iteration process on simulation of least mean square algorithm with input $x_k = \text{rand}(1,n)$, sample $N=1000$ and convergence size $\mu=0.05$. In this article, the purpose of simulation is to finding out the best weight, number of iterations, and convergences rates that are suitable for the model. The actual weights of $w_1=0.01566$ and $w_2=0.0003107$. Furthermore, the best weight had been achieved during the iteration process are $w_1=0.015659$ and $w_2=0.00031161$. It has an error value of 0.00000042928 and MSE (mean square error) value 0.000000000016.

Keywords – adaptive control system, LMS alghoritm, MATLAB, separated-excited DC Motor

Intisari – Sistem kendali adaptif merupakan suatu sistem yang mampu menyesuaikan dirinya terhadap perubahan yang terjadi di lingkungan sekitarnya (beradaptasi). Salah satu pemanfaatan sistem kendali adaptif adalah untuk identifikasi parameter sistem. Motor arus searah penguat terpisah merupakan jenis motor searah yang sumber tegangan jangkar dan tegangan medannya dipasang terpisah. Parameter motor searah penguat terpisah digunakan dalam pemodelan untuk mendapatkan fungsi alih. Dari fungsi alih kontinu kemudian diubah ke dalam bentuk fungsi alih diskrit untuk memperoleh persamaan diferensial diskritnya. Selanjutnya koefisien dari persamaan diferensial tersebut dijadikan sebagai target yang ingin dicapai selama proses iterasi berlangsung pada simulasi algoritma *least mean square* dengan input $x_k = \text{rand}(1,n)$, jumlah sampel sebanyak 1000 dan laju konvergensi sebesar 0,05. Pada artikel ini, simulasi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui bobot terbaik, jumlah iterasi dan laju konvergensi yang sesuai untuk pemodelan. Parameter Adaptif yang akan diidentifikasi berupa bobot dari pemodelan adaptif yang dibuat dan hasilnya dibandingkan dengan perhitungan fungsi alih diskrit sebenarnya. Bobot w_1 yang ingin dicapai dalam proses iterasi yaitu 0,01566 dan bobot $w_2=0,0003107$. Hasil terbaik yang dapat dicapai dalam proses iterasi yaitu $w_1=0,015659$ dan $w_2=0,00031161$ dengan eror sebesar 0,00000042928 serta nilai MSE (*mean square error*) sebesar 0,000000000016.

Kata kunci – sistem kendali adaptif, algoritma LMS, MATLAB, motor arus searah penguat terpisah

I. PENDAHULUAN

Sistem kendali adaptif banyak sekali digunakan di dunia industri maupun berbagai macam penelitian. Hal ini dikarenakan kemampuannya dalam beradaptasi langsung terhadap perubahan yang terjadi di sekitarnya. Beberapa industri yang menggunakan kendali adaptif antara lain yaitu industri penerbangan, pengolahan bahan kimia, dan industri pembuatan kertas [1]. Salah satu pemanfaatan sistem kendali adaptif yaitu untuk identifikasi parameter sistem dengan menggunakan berbagai macam metode adaptif seperti algoritma *least mean square* (LMS), *root mean square* (RMS), serta *adaptif linear combiner* (ALC). Sementara itu, untuk algoritma LMS banyak digunakan oleh peneliti sebagai filter adaptif karena memiliki sifat yang *robust*, mudah diimplementasikan serta perhitungannya yang cukup sederhana [2]. Namun, algoritma LMS juga banyak digunakan untuk identifikasi parameter suatu plant dan sebagai *noise cancelling* [3]–[5]. Sukarman [6] telah melakukan simulasi identifikasi parameter pada plant orde dua menggunakan algoritma LMS dengan memperoleh hasil penelitian yang menunjukkan bahwa nilai *mean square error* (MSE) semakin mengecil dengan bertambahnya jumlah iterasi sedangkan nilai bobot (parameter adaptif) dicapai setelah iterasi ke 600. Seiring dengan perkembangan zaman, algoritma LMS untuk identifikasi parameter sistem telah

mengalami banyak perkembangan. Penelitian [7] menggunakan algoritma *combination least mean square* (CLMS) dengan memodifikasi setiap bobot filter adaptif untuk proses identifikasi parameter sistem. Metode ini menggabungkan filter LMS cepat dan filter LMS lambat untuk mengatasi permasalahan laju konvergensi yang merupakan salah satu kelemahan dari algoritma LMS. Penelitian [8], menggunakan tiga metode yaitu algoritma LMS, *normalized least mean square* (NLMS), dan *recursive least square* (RLS) untuk mengidentifikasi sistem yang tidak diketahui. Sementara itu, implementasi identifikasi sistem dengan menggunakan algoritma LMS dasar dilakukan oleh [9], dengan menggunakan dua laju konvergensi yang berbeda yaitu 0,05 dan 0,025. Kemudian, hasil simulasi dengan jelas menunjukkan bahwa bobot estimasi sama dengan bobot yang sebenarnya. Di samping itu, [10] juga melakukan identifikasi parameter sistem yang tidak diketahui menggunakan algoritma LMS. *Plant* diasumsikan sebagai model linear yang kemudian diberi masukan sinyal acak, kemudian setelah disimulasikan dengan dua laju konvergensi yaitu 0,3 dan 0,15, diperoleh hasil penelitian bahwa bobot yang di estimasi sesuai dengan bobot yang sebenarnya.

Pada artikel ini akan dilakukan simulasi kendali adaptif untuk mengidentifikasi parameter motor arus searah penguat terpisah menggunakan algoritma LMS dasar, di mana

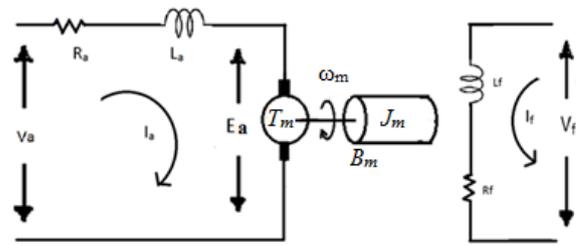
parameter dari motor tersebut sudah diketahui. Simulasi bertujuan untuk mengetahui jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk mencapai bobot yang diinginkan serta untuk mengetahui pengaruh nilai laju konvergensi terhadap kecepatan dan kestabilan grafik bobot selama proses adaptasi. Adapun pokok bahasan artikel ini yaitu model matematis motor arus searah penguat terpisah, algoritma LMS, blok diagram adaptif untuk identifikasi sistem, dan hasil simulasi pada MATLAB.

II. METODOLOGI

Dalam sistem kendali, salah satu komponen yang tidak dapat dilupakan adalah aktuator. Aktuator ini merupakan komponen yang selalu bergerak mengubah energi listrik menjadi pergerakan mekanik [11]. Salah satu aktuator yang banyak digunakan adalah motor listrik [12]. Kegunaan motor listrik yaitu sebagai perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik [13]. Motor listrik itu sendiri terdiri atas motor arus searah (*direct current*) dan motor arus bolak-balik (*alternating current*), tergantung dari sumber dayanya [14]. Motor arus searah memerlukan sumber tegangan yang searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Motor arus searah terdiri dari dua jenis yaitu motor arus searah penguat terpisah (*separately excited*) yaitu motor arus searah yang arus medannya dipasok dari sumber penguat terpisah. Jenis lainnya adalah motor arus searah penguat sendiri (*self excited*) yang terdiri atas tiga tipe yaitu motor arus searah *shunt*, motor arus searah seri, dan motor arus searah kompon atau gabungan. Motor arus searah penguat terpisah adalah salah satu jenis motor arus searah yang penguatannya terpisah, yang artinya pada motor ini memiliki sumber tegangan yang berbeda antara medan jangkar dan medan penguatnya [15]. Gambar 1 merupakan rangkaian ekuivalen dari motor arus searah penguat terpisah yang dilengkapi dengan parameter-parameternya seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter motor arus searah penguat terpisah

Parameter	Keterangan
V_a	tegangan jangkar merupakan tegangan yang diberikan kepada kumparan jangkar
R_a	resistansi jangkar
L_a	induktansi jangkar
E_a	gaya gerak listrik (ggl) balik yang dihasilkan oleh kumparan jangkar
I_a	arus jangkar
V_f	tegangan medan merupakan tegangan yang diberikan kepada kumparan medan.
L_f	induktansi medan
R_f	resistansi medan
I_f	arus medan
ω_m	kecepatan sudut putar motor
J_m	momen inersia
B_m	koefisien gesek
T_m	torsi motor



Gambar 1. Rangkaian ekuivalen motor arus searah penguat terpisah[16]

Pada artikel ini, algoritma LMS digunakan untuk identifikasi sistem dari parameter adaptif suatu *plant* yaitu berupa bobot w_k dengan jenis masukan tunggal dari struktur umum ALC. Suatu tapis (*filter*) adaptif terdiri dari dua elemen dasar yaitu tapis digital dan algoritma adaptif. Tapis digital berfungsi untuk melakukan proses yang dikehendaki yaitu memperoleh keluaran sebagai respons dari masukan yang diberikan, sedangkan algoritma adaptif berfungsi untuk menyesuaikan nilai koefisien tapis digital dengan cara meminimalkan galat (*error*). Gambar 2 menunjukkan bentuk umum dari ALC yang memiliki sinyal masukan dengan notasi x_{1k}, x_{2k} dan x_{Lk} , sedangkan w_{1k}, w_{2k} dan w_{Lk} adalah bobot. Sementara itu, d_k merupakan keluaran yang dikehendaki, sedangkan y_k merupakan sinyal keluaran dari tapis.

Sinyal masukan terdiri dari dua macam yaitu masukan tunggal dan masukan jamak. Maka hubungan antara sinyal masukan dan sinyal keluaran tapis seperti pada (1).

$$y_k = w_k^T x_k = x_k^T w_k \quad (1)$$

Sedangkan galat (e_k) merupakan hasil pengurangan antara keluaran yang diinginkan dengan keluaran tapis, seperti pada (2).

$$e_k = d_k - y_k \quad (2)$$

Pada proses pengadaptasian dengan umpan balik, nilai vektor bobot diperoleh secara rekursif atau berulang-ulang sehingga galat yang diperoleh sekecil mungkin. Algoritma LMS mendapatkan koefisien tapis dengan membuat galat kuadrat rata-rata yang minimum yang disebut sebagai MSE (*mean square error*). Jika e_k dikuadratkan maka diperoleh (3)-(5). Dengan $y_k = x_k^T w_k = w_k^T x_k$, sehingga didapatkan (6).

$$e_k^2 = (d_k - y_k)^2 \quad (3)$$

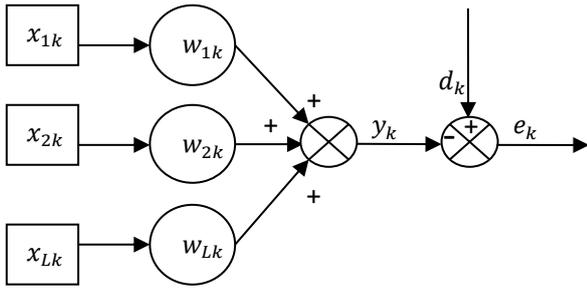
$$e_k^2 = d_k^2 - 2 d_k y_k + y_k^2 \quad (4)$$

$$e_k^2 = d_k^2 + y_k^2 - 2 d_k y_k \quad (5)$$

$$e_k^2 = d_k^2 + w_k^T x_k \cdot x_k^T w_k - 2 d_k w_k^T x_k \quad (6)$$

Maka dari itu, nilai ekspektasi (nilai terharap) dari (6) ditunjukkan pada (7).

$$\xi = E[e_k^2] \\ \xi = E[d_k^2] + w_k^T E[x_k x_k^T] w_k - 2 E[d_k x_k^T] w_k \quad (7)$$



Gambar 2. Bentuk umum ALC

Pada kebanyakan proses adaptasi, yang menentukan vektor bobot untuk dapat mencari error seminimal mungkin adalah dengan menggunakan metode gradien (∇), seperti pada (8).

$$\nabla = \frac{\partial \xi}{\partial w} = \left\{ \frac{\partial \xi}{\partial w_0} \quad \frac{\partial \xi}{\partial w_1} \quad \dots \quad \frac{\partial \xi}{\partial w_L} \right\} \quad (8)$$

Sedangkan untuk menghitung bobot baru yaitu bobot lama (w_k) ditambah dengan korelasi yang proporsional dengan nilai negatif dari gradien *squared error* pada bobot baru, yang ditunjukkan pada (9).

$$\begin{aligned} w_{k+1} &= w_k + \mu(-\nabla k) \\ w_{k+1} &= w_k - \mu \nabla k \end{aligned} \quad (9)$$

Dengan μ adalah laju peradaptasian atau laju konvergensi dengan nilai $0 < \mu < 1$. Estimasi gradien $\xi = E[e_k^2]$ ditentukan dengan menggunakan e_k^2 secara langsung, seperti di (10). Sehingga bobot baru yang diperoleh pada (11).

$$\nabla k = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_k^2}{\partial w_0} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_k^2}{\partial w_L} \end{bmatrix} = 2e \begin{bmatrix} \frac{\partial e_k}{\partial w_0} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_k}{\partial w_L} \end{bmatrix} = -2e_k \quad (10)$$

$$\begin{aligned} w_{k+1} &= w_k - \mu \nabla k \\ w_{k+1} &= w_k + 2\mu e_k x_k \end{aligned} \quad (11)$$

Adapun tahapan penelitian yang dilakukan antara lain:

1. Membuat pemodelan matematis motor arus searah penguat terpisah [16].

Gambar 1 merupakan rangkaian ekuivalen motor arus searah penguat terpisah yang dilengkapi dengan parameter-parameternya seperti Tabel 1. Persamaan (12) dan (13) merupakan persamaan untuk torsi motor dan tegangan ggl balik.

$$T_m = K_f I_f I_a \quad (12)$$

$$E_a = K_f i_f \omega_m \quad (13)$$

Jika i_f konstan dan K_m merupakan konstanta pengganti dari $K_f i_f$, maka persamaan dapat diubah menjadi (14)-(17).

$$T_m = K_m i_a \quad (14)$$

$$T_m(s) = K_m I_a(s) \quad (15)$$

$$E_a = K_m \omega_m \quad (16)$$

$$E_a(s) = K_m \omega_m(s) \quad (17)$$

Sehingga persamaan tegangan masukan motor menjadi seperti pada (18) dan (19).

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_a \quad (18)$$

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_m \omega_m \quad (19)$$

Persamaan (19) kemudian diubah ke dalam bentuk persamaan Laplace sehingga diperoleh (20) dan (21).

$$\begin{aligned} V_a(s) &= R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + K_m \Omega_m(s) \\ R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) &= V_a(s) - K_m \Omega_m(s) \\ I_a(s)(R_a + L_a s) &= V_a(s) - K_m \Omega_m(s) \end{aligned} \quad (20)$$

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_m \Omega_m(s)}{(R_a + L_a s)} \quad (21)$$

Persamaan (22) merupakan persamaan dinamik motor arus searah penguat terpisah yang berkaitan dengan momen inersia dan koefisien gesekan.

$$T_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_{Lm} w_{k+1} \quad (22)$$

Dengan $T_{Lm} = 0$ dan $T_m = K_m i_a$, maka (22) menjadi (23).

$$T_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m \quad (23)$$

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m = K_m i_a$$

Persamaan (23) kemudian di-laplace-kan sehingga diperoleh persamaan kecepatan, seperti pada (24).

$$\begin{aligned} J_m s \Omega_m(s) + B_m \Omega_m(s) &= K_m I_a(s) \\ (J_m s + B_m) \Omega_m(s) &= K_m I_a(s) \\ \Omega_m(s) &= \frac{K_m I_a(s)}{(J_m s + B_m)} \end{aligned} \quad (24)$$

Dengan menyubstitusikan persamaan arus ke dalam persamaan kecepatan diperoleh (25).

$$\begin{aligned} \Omega_m(s) &= \frac{K_m I_a(s)}{(J_m s + B_m)} \\ \Omega_m(s) &= \frac{K_m \left(\frac{V_a(s) - K_m \Omega_m(s)}{(R_a + L_a s)} \right)}{(J_m s + B_m)} \\ \Omega_m(s) &= \frac{K_m V_a(s) - K_m^2 \Omega_m(s)}{(R_a + L_a s)(J_m s + B_m)} \\ \Omega_m(s)(R_a + L_a s)(J_m s + B_m) &= K_m V_a(s) - K_m^2 \Omega_m(s) \\ \Omega_m(s) \{ (R_a + L_a s)(J_m s + B_m) + K_m^2 \} &= K_m V_a(s) \end{aligned} \quad (25)$$

Dengan demikian, fungsi alih motor arus searah penguat terpisah dapat dituliskan sebagai (26).

$$\frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(L_a s + R_a)(J_m s + B_m) + K_m^2} \quad (26)$$

Berdasarkan penurunan beberapa persamaan di atas, maka blok diagram dari motor arus searah penguat terpisah seperti pada Gambar 3.

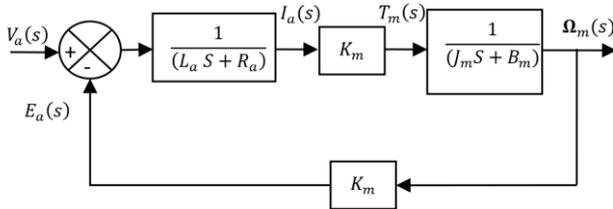
- Mengambil dan mengumpulkan data parameter motor arus searah penguat terpisah.

Motor arus searah penguat terpisah yang digunakan dalam penelitian yaitu motor arus searah pabrikan dari Lucas Nuelle (Jerman) dengan tipe SE 2662-5D yang memiliki beberapa parameter pada *name plate* seperti pada Tabel 2.

Selain itu, pengukuran secara langsung terhadap resistansi jangkar (R_a) dan Induktansi jangkar (L_a) juga dilakukan dan diperoleh hasil seperti pada Tabel 3. Kemudian, untuk mendapatkan parameter-parameter lain yang belum ada, maka dilakukan perhitungan seperti pada (26) – (31).

- Menyubstitusikan data parameter motor arus searah penguat terpisah yang telah diperoleh ke dalam fungsi alih dari pemodelan motor arus searah penguat terpisah yang telah dibuat sebelumnya.

Berdasarkan data-data pada Tabel 2, maka fungsi alih dari motor arus searah penguat terpisah diperoleh dengan menyubstitusikan data parameter-parameter ke (26) sehingga diperoleh (33).



Gambar 3. Blok diagram motor arus searah penguat terpisah

Tabel 2. Parameter pada *name plate*

Parameter	Nilai
Tegangan Nominal	220 V
Arus Nominal	5,7/6,2/5,8 A
Kecepatan Nominal	2040/1650/1870 RPM
Daya Nominal	1000 watt

Tabel 3. Hasil pengukuran resistansi dan induktansi jangkar

Parameter	Nilai
Resistansi jangkar	46,4 Ω
Induktansi jangkar	0,09506 H

$$\omega_{nom} = 2040 \text{ rpm} \times \frac{2\pi}{60} = 213,52 \text{ rad/s} \quad (27)$$

$$T_{nom} = \frac{P_{nom}}{\omega_{nom}} = \frac{1000 \text{ watt}}{213,52 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 4,683 \text{ Nm} \quad (28)$$

$$\alpha_{nom} = \frac{\omega_{nom}}{t} = \frac{213,52 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{5 \text{ s}} = 42,74 \text{ rad/s}^2 \quad (29)$$

$$B_m = \frac{T_{nom}}{\omega_{nom}} = \frac{4,68 \text{ N.M}}{213,52 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 0,022 \text{ Kg m}^2 \quad (30)$$

$$K_m = \frac{T_{nom}}{I_{nom}} = \frac{4,68 \text{ N.M}}{5,7 \text{ Amp}} = 0,821 \text{ Nm/Amp} \quad (31)$$

$$J_m = \frac{4,68 \text{ N.M}}{42,74 \text{ rad/s}^2} = 0,1,9 \text{ Kg m}^2 \quad (32)$$

$$\frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(L_a s + R_a)(J_m s + B_m) + K_m^2}$$

$$\frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{0,821}{(0,09506 s + 46,4)(0,109 s + 0,022) + 0,821^2}$$

$$\frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{0,821}{(0,0104 s^2 + 0,0021 s + 5,0576 s + 1,0208) + 0,6740} \quad (33)$$

$$\frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{0,821}{0,0104 s^2 + 5,0597 s + 1,6948}$$

$$\frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{0,821}{0,010 s^2 + 5,060 s + 1,695}$$

- Membuat pemodelan sistem adaptif yang akan digunakan. Persamaan (33) diubah menjadi fungsi alih diskrit menggunakan MATLAB sehingga diperoleh (34)-(35).

$$G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0,01566 z^{-1} + 0,0003107 z^{-2}}{1 - 0,967 z^{-1}} \quad (34)$$

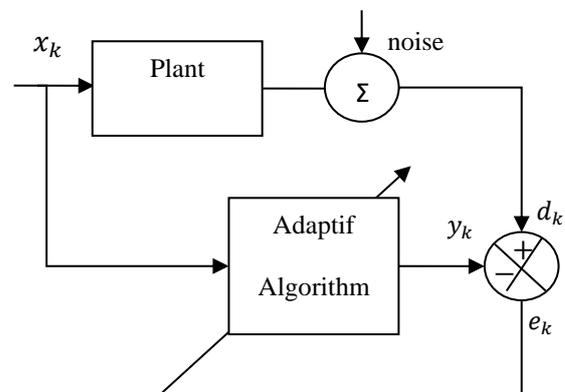
$$Y(z) - 0,967 z^{-1} Y(z) = 0,01566 z^{-1} X(z) + 0,0003107 z^{-2} X(z)$$

$$y(k) - 0,967 y(k-1) = 0,01566 x(k-1) + 0,0003107 x(k-2) \quad (35)$$

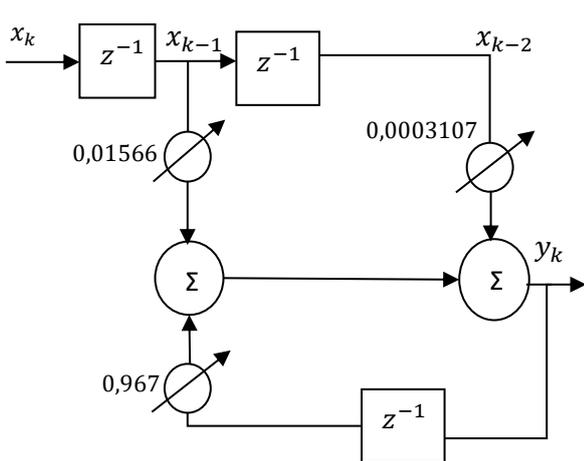
$$y(k) = 0,01566 x(k-1) + 0,0003107 x(k-2) + 0,967 y(k-1)$$

Dengan y_k merupakan hasil perkalian dari masukan x_k dengan bobot w_k , maka berdasarkan (1), persamaan keluaran dari motor arus searah penguat terpisah yang akan dijadikan acuan dalam algoritma LMS yaitu (35). Maka, blok diagram model adaptif untuk identifikasi sistem serta blok diagram persamaan diskrit dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6. Agar memudahkan proses pembuatan kode program dari algoritma LMS yang digunakan, maka dibuatlah diagram alir untuk identifikasi parameter adaptif (bobot w_k) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

- Membuat program algoritma LMS menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan menyubstitusikan koefisien hasil perhitungan persamaan keluaran sistem.
- Menyimulasi algoritma LMS.
- Menganalisis hasil simulasi algoritma LMS yang digunakan dalam identifikasi parameter adaptif.



Gambar 5. Blok diagram model adaptif untuk identifikasi



Gambar 6. Blok diagram persamaan diskrit motor arus searah penguat terpisah

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

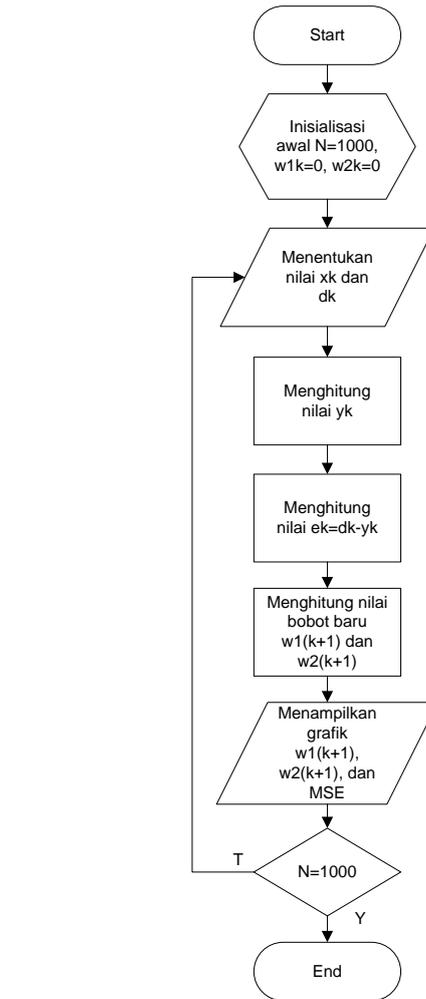
Identifikasi parameter adaptif bobot w_k dilakukan secara simulasi menggunakan MATLAB. Kode program dibuat pada mscript, di mana pada inialisasi awal program, bobot awal w_1 dan w_2 adalah nol dengan jumlah iterasi sebanyak 1000 dan tidak ada *noise*. Nilai w_1 yang ingin dicapai adalah 0,01566 sedangkan nilai w_2 yang ingin dicapai adalah 0,0003107. Laju konvergensi (μ) dalam algoritma LMS merupakan nilai yang mempengaruhi kecepatan dan kestabilan nilai bobot target selama proses adaptasi atau iterasi berlangsung. Adapun nilai laju konvergensi μ yang dianjurkan yaitu antara nol dan satu ($0 < \mu < 1$). Pada artikel ini, nilai laju konvergensi (μ) yang digunakan bervariasi dengan tujuan untuk memperoleh nilai μ yang sesuai. Hasil simulasi berupa grafik bobot yang dicapai dan grafik nilai MSE. Grafik bobot menunjukkan proses adaptasi nilai bobot mulai dari iterasi yang pertama sampai iterasi yang terakhir. Sementara itu, nilai MSE dihitung dengan mengkuadratkan nilai galat seperti pada 3.

A. Laju Konvergensi ($\mu = 0,01$)

Pada pengujian pertama, nilai $\mu = 0,01$ sehingga diperoleh hasil grafik bobot seperti pada Gambar 8, dengan jumlah iterasi 1000, nilai bobot w_1 dan w_2 belum mencapai target yang ingin diinginkan. Bahkan grafik sama sekali belum stabil menuju bobot target yang telah ditetapkan. Hal ini mengakibatkan nilai kuadrat galat bernilai cukup besar seperti terlihat pada grafik MSE Gambar 9.

B. Laju Konvergensi ($\mu = 0,05$)

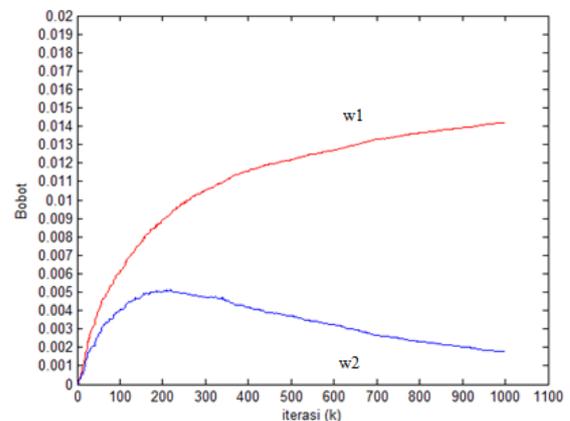
Pada pengujian kedua, nilai μ diubah menjadi 0,05 sehingga diperoleh hasil grafik bobot seperti pada Gambar 10. Jumlah iterasi yang digunakan masih sama yaitu 1000, diperoleh hasil nilai bobot w_1 dan w_2 yang jauh lebih baik jika dibandingkan dengan pengujian pertama. Sementara itu, nilai galat bernilai lebih kecil dari pengujian pertama seperti yang terlihat pada grafik MSE Gambar 11.



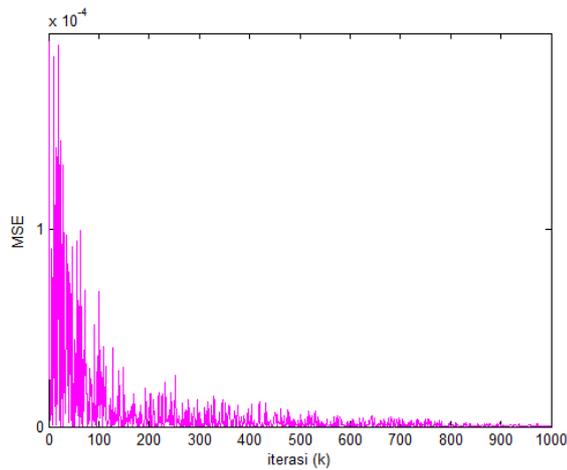
Gambar 7. Flowchart identifikasi sistem adaptif

C. Laju Konvergensi ($\mu = 0,09$)

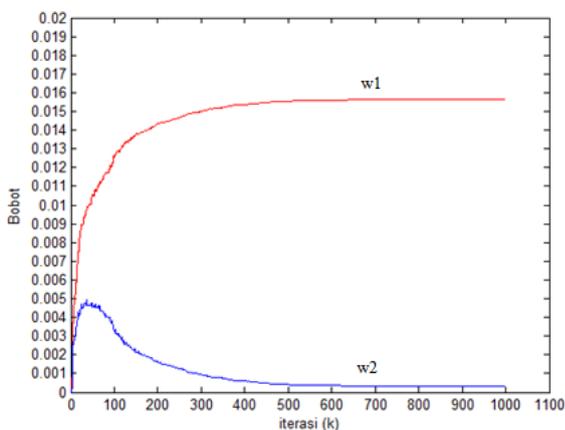
Pada pengujian ketiga, nilai μ diubah menjadi 0,09 sehingga diperoleh hasil grafik seperti pada Gambar 12 yang menunjukkan bahwa nilai bobot w_1 dan w_2 jauh lebih cepat mencapai nilai yang diharapkan dibandingkan dengan kedua pengujian sebelumnya. Grafik MSE menunjukkan nilai galat yang sangat kecil atau mencapai nilai minimumnya seperti pada Gambar 13.



Gambar 8. Tampilan grafik w_1 dan w_2 dengan $\mu = 0.01$



Gambar 9. Tampilan grafik MSE dengan $\mu = 0.01$



Gambar 10. Tampilan grafik w_1 dan w_2 dengan $\mu = 0.05$

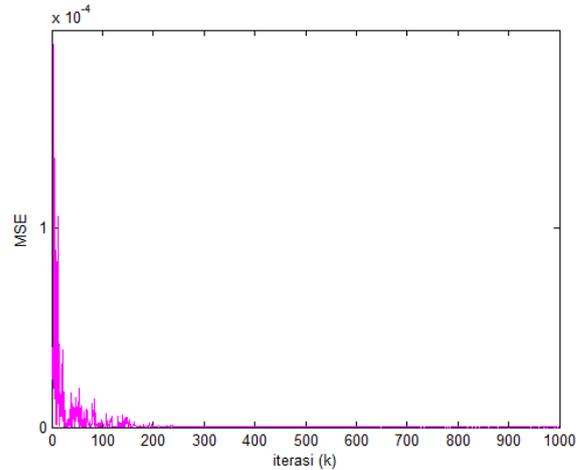
D. Laju Konvergensi ($\mu = 0,5$)

Pada pengujian keempat, nilai μ diubah menjadi 0,5 sehingga diperoleh hasil grafik seperti pada Gambar 14, dimana nilai bobot w_1 dan w_2 lebih stabil dibandingkan dengan percobaan pertama. Sementara itu, nilai galat bernilai cukup besar seperti terlihat pada Gambar 15. Nilai bobot w yang diharapkan mulai tercapai pada iterasi ke 650. Garis warna merah merupakan bobot w_1 dan garis berwarna biru merupakan bobot w_2 . Berdasarkan hasil identifikasi bobot w_1 lebih cepat mencapai target nilai yang diharapkan dibandingkan dengan w_2 , hal ini terjadi karena nilai bobot w_1 jauh lebih besar dari w_2 , sehingga proses adaptasinya lebih cepat. Bobot w_1 telah mencapai nilai terbaik dan paling mendekati dengan nilai sebenarnya pada iterasi ke 960, sedangkan bobot w_2 mencapai nilai terbaik pada iterasi ke 1000. Adapun untuk mengetahui nilai eror antara nilai bobot yang sebenarnya dengan bobot hasil identifikasi dengan algoritma LMS, maka diambil data hasil iterasi ke 1000 dimana nilai kedua bobot telah mencapai hasil terbaik mendekati nilai yang sebenarnya yaitu $w_1 = 0,0156$ dan $w_2 = 0,0003107$ dengan nilai galat sebesar 0,00000042928. Sementara itu, nilai MSE yang diperoleh cukup kecil yaitu 0,000000000016. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi memiliki selisih nilai bobot yang sangat kecil dan bahkan

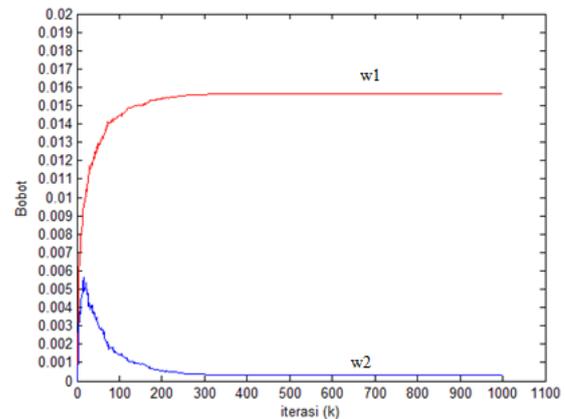
mendekati sama dengan nilai bobot yang sebenarnya seperti yang terdapat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan nilai bobot aktual dan hasil Identifikasi

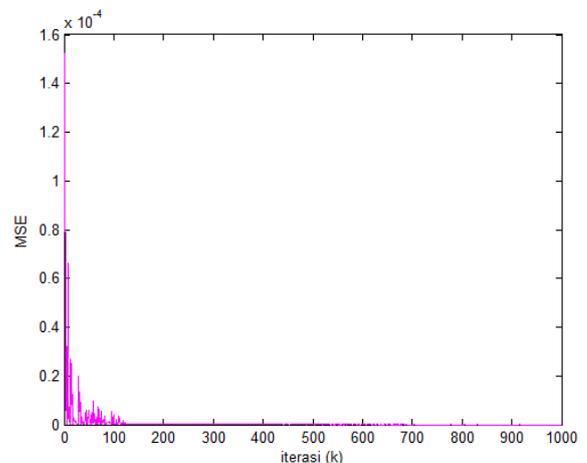
Bobot	Aktual	Simulasi	MSE
w_1	0,01566	0,015659	0,0000000000016
w_2	0,0003107	0,00031161	



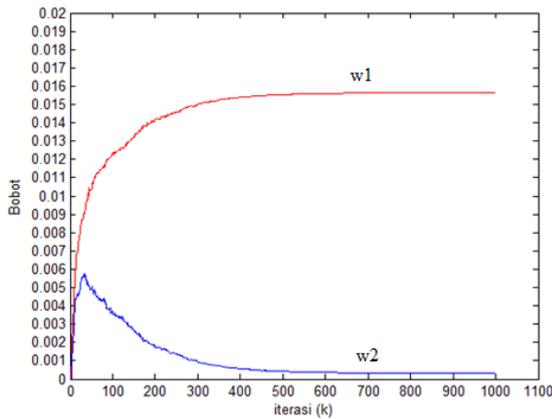
Gambar 11. Tampilan grafik MSE dengan $\mu = 0.05$



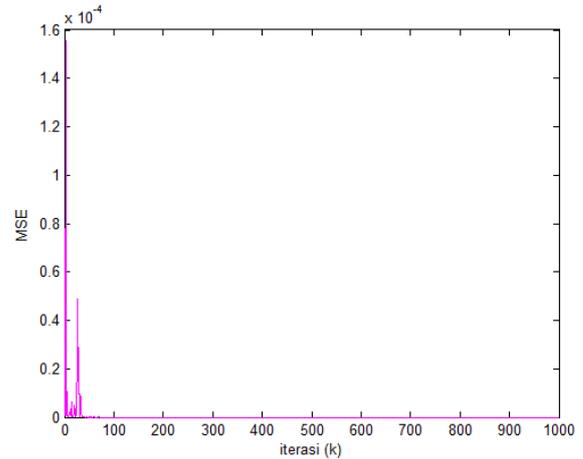
Gambar 12. Tampilan grafik w_1 dan w_2 dengan $\mu = 0.09$



Gambar 13. Grafik MSE dengan $\mu = 0.09$



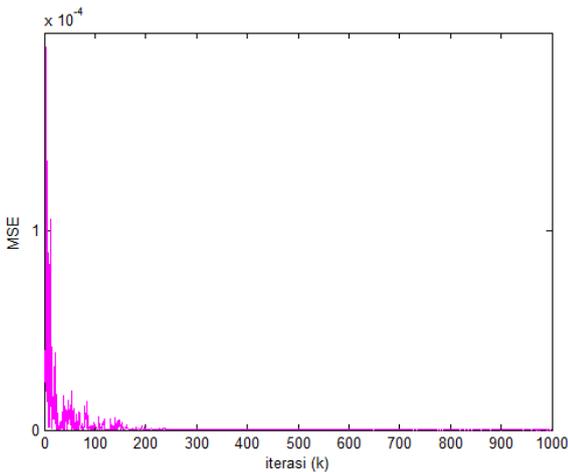
Gambar 14. Tampilan grafik w_1 dan w_2 dengan $\mu = 0,5$



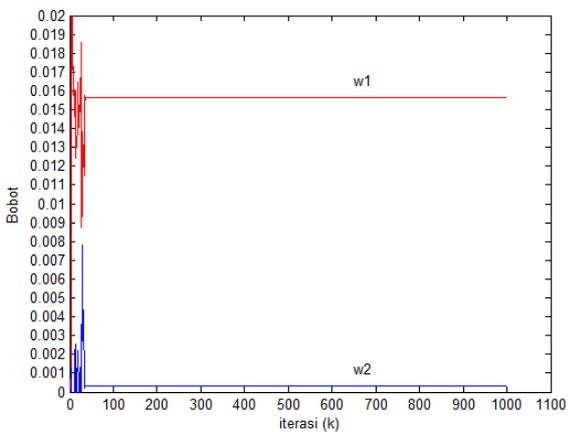
Gambar 15. Grafik MSE dengan $\mu = 1$

E. Laju Konvergensi ($\mu = 1$)

Pada pengujian kelima, nilai $\mu = 1$ dan diperoleh hasil grafik seperti pada Gambar 16, dimana terlihat osilasi pada awal respon grafik setelah itu grafik langsung menuju stabil. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi proses pembelajaran dan adaptasi pada bobot.



Gambar 15. Grafik MSE dengan $\mu = 0.05$



Gambar 16. Tampilan grafik w_1 dan w_2 dengan $\mu = 1$

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pemodelan yang telah dibuat, disimulasi dan, maka dapat di ambil kesimpulan bahwa bobot terbaik yang dapat dicapai dalam proses adaptasi parameter adaptif menggunakan algoritma LMS yaitu $w_1 = 0.015659$ dan $w_2 = 0.00031161$ dengan nilai MSE sebesar 0,000000000016. Sementara itu, pemilihan nilai μ yang sesuai akan berpengaruh pada waktu proses adaptasi. Pada artikel ini, nilai μ yang sesuai yaitu 0,5 dimana bobot terbaik dicapai pada iterasi ke 960. Selain itu, nilai μ juga berpengaruh terhadap grafik MSE, semakin besar nilai laju konvergensi (μ) maka akan semakin kecil nilai MSE dan begitu pula sebaliknya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. A. Samman, *Sistem Kendali Adaptif Lembaga Sains, Teknologi dan Seni*. 2016. Accessed: Jul. 02, 2023. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/132584477.pdf>
- [2] B. Widrow and M. E. Hoff, *Adaptive switching circuits*. 1960.
- [3] S. Haykin, *Adaptive filter theory*. 2002.
- [4] Q. Ling, M. A. Ikbal, and P. Kumar, "Optimized LMS algorithm for system identification and noise cancellation," *Journal of Intelligent Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 487–498, Jan. 2021, doi: 10.1515/jisys-2020-0081.
- [5] A. K. Maurya, P. Agrawal, and S. Dixit, "Modified Model and Algorithm of LMS Adaptive Filter for Noise Cancellation," *Circuits Syst Signal Process*, vol. 38, no. 5, pp. 2351–2368, May 2019, doi: 10.1007/s00034-018-0952-z.
- [6] S. Tinggi, T. Nuklir-Batan, and J. B. Kotak, "Seminar Nasional Iv Sdm Teknologi Nuklir Simulasi Kendali Adaptif Menggunakan Algoritma Lms Untuk Identifikasi Plant Orde-2 Sukarman".
- [7] J. Arenas-Garcia, V. Gomez-Verdejo, M. Martinez-Ramon, and A. R. Figueiras-Vidal, "Separate-variable adaptive combination of LMS adaptive filters for plant identification," in *2003 IEEE XIII Workshop on Neural Networks for Signal Processing (IEEE Cat. No.03TH8718)*, IEEE, pp. 239–248. doi: 10.1109/NNSP.2003.1318023.
- [8] S. A. Ghauri and M. F. Sohail, "System identification using LMS, NLMS and RLS," in *2013 IEEE Student Conference on Research and Development*, IEEE, Dec. 2013, pp. 65–69. doi: 10.1109/SCORED.2013.7002542.
- [9] S. R. Prasad and S. A. Patil, "Implementation of LMS Algorithm for System Identification."
- [10] S. R. Prasad and Y. V. Joshi, "Unknown System Identification using LMS Algorithm," 2016.

-
- [11] I. Oktariawan, Martinus, and Sugiyanto, "Pembuatan Sistem Otomasi Dispenser Menggunakan Mikrokontroler Arduino Mega 2560".
- [12] M. Firdana and D. H. Ananta, "Pembuatan Trainer Motor DC Sebagai Media Pembelajaran Aktuator Dengan Menggunakan Mikrokontroler Atmega328," *Edu Elektrika Journal*, vol. 9, no. 1, p. 2020.
- [13] M. Afnan *et al.*, "TEKNO Jurnal Teknologi Elektro dan Kejuruan Implementasi Penggerak Elektronika Sederhana Sebagai Upaya Meningkatkan Respon Waktu Motor Listrik DC," 2021. [Online]. Available: <http://journal2.um.ac.id/index.php/tekno>
- [14] T. A. Zarma, A. A. Galadima, and M. A. Aminu, "Review of Motors for Electrical Vehicles," *J Sci Res Rep*, pp. 1–6, Oct. 2019, doi: 10.9734/jsrr/2019/v24i630170.
- [15] S. N. Al-Bargothi, G. M. Qaryouti, and Q. M. Jaber, "Speed control of DC motor using conventional and adaptive PID controllers," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 16, no. 3, pp. 1221–1228, 2019, doi: 10.11591/ijeecs.v16.i3.pp1221-1228.
- [16] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2021 IEEE MI-SAT: 2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA2021): conference proceeding: 25-27 May, Tripoli, Libya.*

Sistem Pemantauan Suhu dan Intensitas Cahaya pada Ruang Kerja (Studi Kasus: Ruang Tugas Akhir Institut Teknologi Sumatera)

Nia Saputri Utami^{1*}, Syamsyarief Baqaruzi¹, M. Imam Robbani¹, Dani Rahmadana¹, George Ray Banurea¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Sumatera; syamsyarief.baqaruzi@el.itera.ac.id,

mimam.118130108@student.itera.ac.id, dani.118130080@student.itera.ac.id,

george.118130116@student.itera.ac.id

*Korespondensi: nia.utami@el.itera.ac.id

Abstract – *The Covid-19 pandemic has caused a disruption in various fields such as education, economic, health, technology, etc. In order to anticipate the crisis, Indonesian government issued several national policies such as work from home (WFH), social distancing, "pembatasan sosial berskala besar" (PSBB) and "pemberlakuan pembatasan kegiatan masyarakat" (PPKM). During the PPKM, many offices and companies are implementing WFH for safety reasons. So does the Institute Technology of Sumatera. And because of that, the awareness of electricity waste has reappeared. A lot of electronic devices are on even though nobody in the room. The electrical engineering of Sumatera Institute Technology has a study room for the final year student. This room has several electronic devices that potentially can be use unwisely by the student. So, to resolve this issue, an internet of things based was developed to monitoring temperature and light intensity in a room. It is used to prevent the electricity wasted. In this paper, the developed system can monitor temperature, light intensity, number of people, and electrical power. The lights and air conditioning will turn on as needed, namely based on the number of people in the room. This system also can monitor electricity consumption of lights and air conditioning. The hardware of this system equipped by a lot sensors such as temperature sensor, light intensity sensor, human detection sensor, current sensor, and voltage sensor. It is also using a microcontroller that equipped with Wi-Fi module. The detection results of sensors are sent to the Android smartphone application via the internet connection for user to access. Meanwhile, the results shows that each sensor can perform according its function and the data results can be sent and displayed well on the Android application. Thus, the developed system successfully monitors the room so that it can avoid the electricity wasted.*

Keywords – *android, current, microcontroller, current sensor, light intensity sensor, temperature sensor, voltage sensor.*

Intisari – Pandemi Covid-19 mengakibatkan banyaknya disrupsi diberbagai sektor seperti pendidikan, perekonomian, kesehatan, teknologi, dan lainnya. Pemerintah Indonesia pun mengeluarkan beberapa kebijakan nasional selama pandemi Covid-19 terjadi antara lain *work from home* (WFH), *social distancing*, pembatasan sosial berskala besar (PSBB) dan pemberlakuan pembatasan kegiatan masyarakat (PPKM). Selama PPKM berlangsung, banyak kantor-kantor yang menerapkan sistem kerja bergantian dimana sebagian pekerja melaksanakan WFH dan sebagian lainnya melaksanakan WFO. Institut Teknologi Sumatera pun menerapkan WFH sebagian selama PPKM. Selama PPKM ini muncul kesadaran mengenai hemat listrik karena sebagian besar perangkat elektronik aktif meskipun jumlah orang di dalam ruangan hanya sedikit. Program studi teknik elektro Institut Teknologi Sumatera memiliki ruangan tugas akhir yang sampai saat ini masih dapat dimanfaatkan oleh mahasiswa untuk mengerjakan tugas akhirnya. Pada ruangan ini terdapat perangkat elektronik seperti lampu dan pendingin ruangan yang berpotensi digunakan secara tidak bijaksana yaitu dengan diaktifkan terus-menerus meskipun tidak ada orang di dalam ruangan tersebut, lupa untuk menonaktifkan perangkat elektronik tersebut ketika meninggalkan ruangan, atau jumlah orang di dalam ruangan hanya sedikit namun perangkat elektronik semuanya aktif sehingga berpotensi terjadinya pemborosan listrik. Maka untuk mengatasi permasalahan tersebut dikembangkan sistem pemantauan suhu dan intensitas cahaya berbasis *internet of things* agar lampu dan pendingin ruangan digunakan sesuai kebutuhan dan terhindar dari pemborosan listrik. Pada artikel ini, sistem yang dikembangkan dapat memantau suhu, intensitas cahaya, jumlah orang di dalam ruangan serta daya listrik. Lampu dan pendingin ruangan akan aktif sesuai dengan kebutuhan yaitu sesuai dengan jumlah orang yang ada di dalam ruangan tersebut. Sistem ini juga dapat memantau daya konsumsi listrik lampu dan pendingin ruangan. *Hardware* pada sistem ini menggunakan sensor suhu, sensor cahaya, sensor arus, sensor tegangan, dan mikrokontroler yang dilengkapi dengan modul *Wi-Fi*. Data hasil pendeteksian sensor-sensor tersebut dikirimkan ke aplikasi Android *smartphone* melalui koneksi internet agar dapat diakses oleh pengguna. Hasil pengujian *hardware* sistem menunjukkan bahwa masing-masing sensor dapat mendeteksi sesuai fungsinya dan data hasil pendeteksian pun dapat dikirim serta ditampilkan pada aplikasi Android *smartphone*. Maka dari itu, sistem pemantauan yang dikembangkan berhasil memantau kondisi ruangan sehingga dapat menghindari pemborosan listrik.

Kata kunci – *android, arus, mikrokontroler, sensor arus, sensor cahaya, sensor suhu, sensor tegangan.*

I. PENDAHULUAN

Pada akhir Desember 2019, ditemukan kasus virus Covid-19 pertama di Provinsi Wuhan, Tiongkok. Virus ini kemudian mulai menyebar ke beberapa negara di dunia pada awal Januari 2020. Puncaknya pada bulan Maret World Health Organization (WHO) mengumumkan Covid-19 sebagai suatu pandemi global yang berdampak dengan adanya penetapan status darurat kesehatan internasional [1]. Hampir semua sektor terkena dampak dari penetapan pandemi tersebut

antara lain sektor pendidikan, ekonomi, dan terutama kesehatan [2]. Beberapa negara bahkan menerapkan kebijakan *lockdown* yang mengakibatkan aktivitas sehari-hari lumpuh total [3]. Di Indonesia misalnya, sebagai respons dari kondisi darurat tersebut, pemerintah memberlakukan kebijakan nasional seperti *work from home* (WFH), *social distancing*, dan pemberlakuan pembatasan kegiatan masyarakat (PPKM) atau pembatasan sosial berskala besar (PSBB) [4]. Sistem kerja WFH banyak diterapkan oleh kantor-kantor pemerintahan, perusahaan nasional maupun

swasta. Sementara itu, di lingkungan pendidikan seperti kampus dan sekolah diberlakukan kebijakan pembelajaran dari rumah.

Selama sistem kerja WFH diberlakukan, muncul masalah pemborosan mengenai penggunaan sarana dan prasarana di ruang kerja. Contohnya mengenai penggunaan lampu penerangan dan pendingin ruangan yang kurang bijak seperti dibiarkan menyala atau aktif secara terus-menerus meskipun tidak ada orang di dalam ruangan tersebut. Selain itu, contoh lainnya ialah ketika jumlah orang yang ada di ruangan tersebut hanya sedikit, namun lampu dan pendingin ruangan yang dinyalakan cukup banyak. Hal ini tentu saja mengakibatkan pemborosan pemakaian listrik dan meningkatkan pembayaran listrik setiap bulannya. Presiden Republik Indonesia pun telah lama memberi instruksi kepada seluruh masyarakat untuk melakukan penghematan energi dan air yang tercantum pada Instruksi Presiden Republik Indonesia Nomor 13 Tahun 2011. Selain dari instruksi Presiden tersebut, peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 13 tahun 2012 juga berisi tentang Penghematan Pemakaian Energi Listrik. Dalam peraturan menteri tersebut menyatakan dengan jelas bahwa seluruh bangunan gedung kantor pemerintah baik di pusat maupun daerah harus melaksanakan program penghematan energi sistem tata udara, sistem tata cahaya dan peralatan pendukung lainnya. Banyak sekali penelitian yang telah dilakukan untuk mengatasi masalah tersebut dengan menerapkan sistem kendali otomatis pada perangkat-perangkat elektronik dan listrik.

Penelitian [5] melakukan pengendalian otomatis pada sistem penerangan rumah berdasarkan intensitas cahaya dan keberadaan manusia di dalam ruangan. Sistem yang dibuat pada penelitian tersebut menggunakan 3 buah lampu yang dibagi menjadi 3 ruangan. Lampu 1 pada ruangan 1 akan menyala apabila intensitas cahaya kurang dan terdeteksi keberadaan orang dalam ruangan tersebut. Hal yang sama juga berlaku untuk ruangan 2 dan ruangan 3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor-sensor yang digunakan bekerja dengan baik sehingga lampu ruangan dalam dapat menyala dan padam secara otomatis. Penelitian serupa juga dilakukan oleh [6]–[9] dengan merancang sistem pengendalian otomatis pada pendingin ruangan (kipas angin atau *air conditioner*) dan lampu dengan tujuan mengatur suhu dan pencahayaan yang sesuai kebutuhan di dalam suatu ruangan.

Di samping itu, selain sistem pengaktifan perangkat listrik dan elektronik yang dibuat secara otomatis, diperlukan juga sistem pemantauan atau *monitoring* penggunaan daya listrik (konsumsi listrik). Pemantauan daya listrik tidak cukup dengan kWh meter saja, hal ini dikarenakan kWh meter hanya memberikan informasi keseluruhan daya yang digunakan. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem yang dapat memantau penggunaan daya dari perangkat elektronik atau perangkat listrik. Sistem yang dibutuhkan dapat memanfaatkan koneksi internet (*internet of things*, IoT) dan aplikasi pada *smartphone* Android. Penelitian [10] mengembangkan suatu sistem *smart monitoring* tegangan dan arus pada *inverter* tiga fase. Data hasil pendeteksian dari sensor arus dan tegangan akan

dikirimkan ke aplikasi pada *smartphone* Android melalui koneksi *bluetooth*. Sementara itu, [11] melakukan *monitoring* pemakaian daya listrik pada perangkat elektronik seperti kipas angin, setrika listrik, *rice cooker*, mesin air dan gabungan seluruh beban. Nilai arus dan tegangan serta daya ditampilkan pada laman *website* Ubidot. Selanjutnya, [12] membuat prototipe sistem yang dapat memantau penggunaan daya listrik peralatan elektronik rumah tangga berbasis IoT. Prototipe ini menggunakan sampel beban berupa lampu, sensor CT sebagai sensor arus, ZMPT101B sebagai sensor tegangan, dan mikrokontroler NodeMCU untuk koneksi internet. Hasil dari pengujian prototipe dapat ditampilkan dengan baik pada *website*. Sedangkan [13] membangun sistem yang dapat memantau daya listrik pada kamar kos. Sistem yang dikembangkan juga memanfaatkan sensor arus dan tegangan serta koneksi internet. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa data arus, tegangan, dan daya listrik dapat ditampilkan dan diakses pada halaman *website*.

Kemudian, [14] juga melakukan *monitoring* suhu dan kelembaban pada ruangan pengering berbasis *website*. Pada penelitian tersebut, *website* yang telah didesain dapat menampilkan data hasil *monitoring* suhu, kelembaban, serta keadaan ruang pengering secara *real time*. Sementara itu, penelitian [15] juga melakukan hal serupa dengan membuat sistem *monitoring* suhu, kelembaban, dan pengendali penyiraman tanaman hidroponik menggunakan Blynk Android. Data-data hasil pendeteksian oleh sensor-sensor ditampilkan pada aplikasi di perangkat lunak Android secara *real time*. Selain itu, pengendalian penyiraman tanaman (*on* dan *off*) juga dapat dilakukan pada aplikasi yang telah dibuat tersebut.

Program Studi Teknik Elektro Institut Teknologi Sumatera memiliki ruangan kerja tugas akhir yang menjadi tempat berkumpul seluruh mahasiswa tingkat akhir teknik elektro. Ruangan tersebut memiliki lampu dan pendingin ruangan yang masih dioperasikan secara manual oleh penggunanya dengan cara menekan sakelar. Sistem pengoperasian secara manual ini memiliki risiko kelalaian penggunaan perangkat elektronik yang tidak sesuai dengan keperluannya, seperti menyalakan seluruh perangkat elektronik meskipun jumlah orang di dalam ruangan hanya sedikit atau tidak menonaktifkan perangkat elektronik tersebut ketika ruangan dalam kondisi kosong. Perilaku-perilaku tersebut dapat menyebabkan pemborosan listrik.

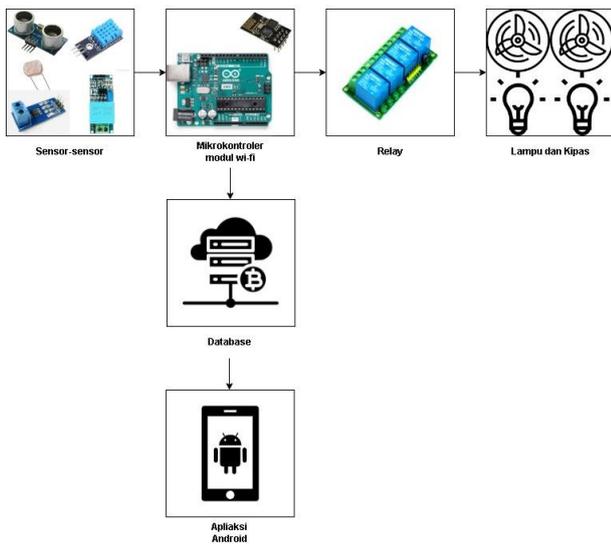
Oleh karena itu, pada artikel ini akan membahas mengenai perancangan dan implementasi sistem pemantauan suhu dan intensitas cahaya ruang kerja dengan mengambil studi kasus pada ruang tugas akhir teknik elektro Institut Teknologi Sumatera. Perancangan dan implementasi sistem pemantauan suhu dan intensitas cahaya pada artikel ini akan memanfaatkan IoT agar penggunaan lampu dan pendingin ruangan digunakan sesuai dengan kebutuhan sehingga tidak terjadi pemborosan listrik. Adapun pokok bahasan dari artikel ini yaitu perancangan dan implementasi sistem pemantauan suhu dan lampu, serta pengujian dan analisis sistem yang telah diimplementasikan.

II. METODOLOGI

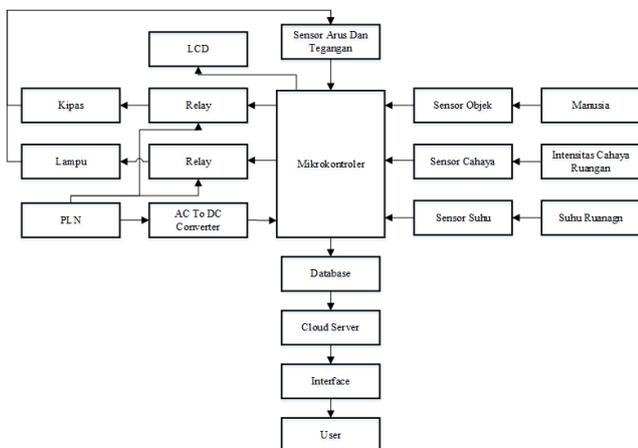
Adapun langkah-langkah yang dikerjakan dalam membuat sistem pemantauan suhu dan intensitas cahaya antara lain sebagai berikut:

1. Membuat perancangan sistem pemantauan suhu, intensitas cahaya, jumlah orang dan daya listrik.

Arsitektur sistem secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 1, sedangkan blok diagram perancangan sistem ditampilkan pada Gambar 2. Arsitektur sistem *hardware* terdiri dari sensor, mikrokontroler, relay, lampu dan kipas, modul Wi-Fi, dan aplikasi Android. Sistem ini menggunakan sumber listrik 220VAC yang berasal dari PLN. Sensor digunakan untuk mendeteksi nilai besaran seperti suhu ruangan dan intensitas cahaya lampu. Sensor DHT11 digunakan untuk mendeteksi suhu ruangan sedangkan sensor *light dependant resistance* (LDR) digunakan untuk mendeteksi intensitas cahaya. Selain itu, sistem ini juga menggunakan sensor HC-SR04 untuk mendeteksi jumlah orang, serta terdapat sensor arus ACS712 dan sensor tegangan ZMPT101B yang dapat mendeteksi nilai arus dan tegangan pada sistem tersebut.



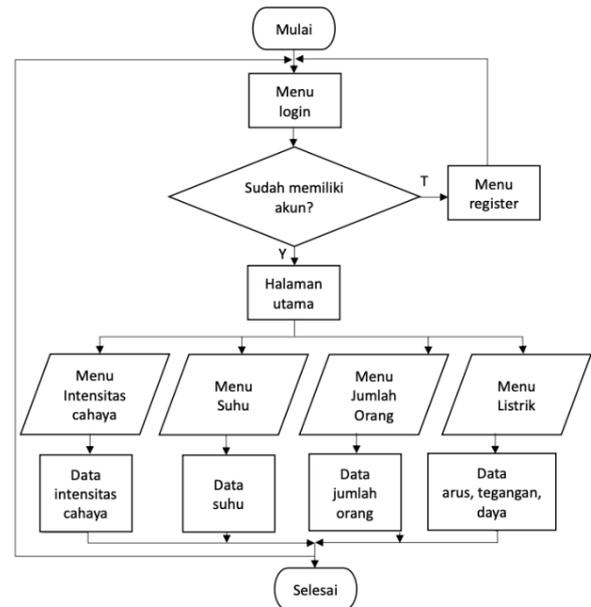
Gambar 1. Arsitektur sistem secara keseluruhan



Gambar 2. Blok diagram perancangan sistem



Gambar 3. Desain aplikasi Android



Gambar 4. Diagram alir aplikasi

Data arus dan tegangan digunakan untuk mengetahui jumlah konsumsi daya pendingin ruangan dan lampu pada ruangan tersebut. Sementara itu, mikrokontroler yang digunakan pada sistem telah dilengkapi dengan modul Wi-Fi sehingga dapat terkoneksi dengan aplikasi Android pada *smartphone* sebagai fungsi *monitoring*. Aplikasi berbasis Android tersebut akan memantau parameter-parameter ruangan seperti suhu, intensitas cahaya, jumlah orang, nilai tegangan dan arus yang dipakai oleh peralatan elektronik pada ruangan tersebut. Aplikasi Android dibuat menggunakan android studio dan untuk *database* menggunakan MySQL. Desain aplikasi dapat dilihat seperti pada Gambar 3. Pada halaman utama terdapat empat parameter yang dapat dipantau yaitu jumlah orang di dalam ruangan, suhu di dalam ruangan, intensitas cahaya ruangan, serta data pemakaian daya listrik. Data-data parameter tersebut diperoleh dari hasil pendeteksian sensor-sensor yang dikirimkan ke aplikasi pada *smartphone* dengan memanfaatkan koneksi internet (modul Wi-Fi). Diagram alir aplikasi Android yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 4.

Pada diagram alir sistem aplikasi, halaman awal aplikasi akan ditampilkan halaman *login*, pengguna akan diminta untuk mengisi data akun yang sudah terdaftar. Jika belum

memiliki akun yang terdaftar, maka akan diarahkan menuju halaman registrasi untuk memasukkan data-data yang diminta. Setelah berhasil mendaftarkan akun, maka pengguna dapat melakukan *login* dan akan masuk ke halaman utama. Pada halaman utama ini, pengguna dapat mengakses fitur sistem pemantauan yang terdapat pada aplikasi.

2. Melakukan implementasi *hardware* dan aplikasi sistem pemantauan suhu dan intensitas cahaya ruangan kerja.
3. Melakukan pengujian *hardware* dan aplikasi sistem pemantauan suhu dan intensitas cahaya ruangan kerja.
4. Melakukan analisis hasil pengujian sistem pemantauan suhu dan lampu ruangan kerja.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem pemantauan suhu dan intensitas cahaya lampu yang telah dirancang, kemudian diimplementasikan pada ruang belajar tugas akhir mahasiswa teknik elektro Institut Teknologi Sumatera yang berukuran 6m×8m serta dilengkapi dengan 2 kipas angin dan 2 lampu LED. Sistem *hardware* dikemas dalam *box* berwarna putih yang dibuat menggunakan 3D *printing* dengan dimensi 20cm×13cm×5cm seperti yang ditampilkan pada Gambar 5. Sistem *hardware* tersebut ditempatkan pada dinding dekat dengan pintu masuk ruangan serta terhubung dengan sumber arus listrik dan komponen-komponen lain seperti sensor suhu, sensor cahaya, sensor jarak, serta sensor arus dan tegangan. Data hasil pengujian suhu disajikan pada Tabel 1, dengan hasil pengujian suhu pada sistem yang telah dibuat dibandingkan dengan pengukuran suhu secara manual menggunakan termometer ruangan. Hasil pengujian intensitas cahaya ditampilkan pada Tabel 2, dengan membandingkan hasil antara pengukuran oleh sistem dan pengukuran secara manual menggunakan lux meter. Kedua pengujian ini dilakukan setiap satu jam dari pukul 08.00 WIB hingga 16.00 WIB. Rentang waktu pengujian selama 8 jam dilakukan untuk menyesuaikan dengan jam kerja atau jam operasional pemakaian ruangan.



Gambar 5. Implementasi *hardware* sistem

Pada pengujian suhu, nilai eror pengukuran terbesar terjadi pada pembacaan suhu pukul 09.00 WIB dengan nilai 3,04% sedangkan nilai eror terkecil terjadi pada pengukuran suhu pukul 14.00 WIB yaitu 0,35%. Rata-rata eror pengukuran antara sensor DHT11 dan termometer ruangan cukup kecil yaitu 1,27% sehingga hal ini menunjukkan bahwa

sistem mampu mendeteksi suhu dengan baik. Selanjutnya, pada pengujian intensitas cahaya hasil rata-rata nilai eror sebesar 3,87% dengan nilai eror terbesar terjadi pada pembacaan data pada pukul 09.00 WIB sebesar 5,94%, dan nilai eror terkecil terjadi pada pembacaan data pada pukul 15.00 WIB dengan nilai sebesar 2,01%. Pengujian fungsi sensor HC-SR04 dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi performa sensor dalam mendeteksi jumlah orang di dalam ruangan. Sensor HC-SR04 diletakkan di dekat pintu, sehingga dapat menghitung jumlah orang yang masuk dan keluar dari ruangan tersebut berdasarkan jarak orang yang terdeteksi ketika melewati sensor tersebut. Hasil pengujian sensor HC-SR04 ditunjukkan pada Tabel 3 dengan hasil eror 0% dan akurasi 100%. Tidak terdapat perbedaan antara hasil pengukuran sensor dan pengukuran manual. Selain itu, proses pengujian ditampilkan pada Gambar 6.

Hasil pengujian arus dan tegangan juga dilakukan seperti yang disajikan pada Tabel 4 dan Tabel 5. Terdapat 6 skenario pengujian beban yang aktif pada pengujian sensor arus dan tegangan yaitu pengujian dengan variasi beban 1 lampu, 1 kipas, 1 lampu dan 1 kipas, 2 lampu dan 1 kipas, 1 lampu dan 2 kipas, serta 2 lampu dan 2 kipas. Implementasi aplikasi Android yang telah dibuat ditampilkan pada Gambar 7(a)-7(b) dan Gambar 8(a)-8(b). Aplikasi ini memiliki beberapa fitur seperti halaman *splash screen*, halaman *login*, halaman registrasi, dan halaman utama. Halaman *splash screen* merupakan halaman pertama yang muncul ketika aplikasi tersebut diakses dan setelah itu muncul halaman *login* seperti pada Gambar 7a dan 7b.

Tabel 1. Data hasil pengujian suhu

No.	Waktu	Sensor DHT11 (°C)	Termometer (°C)	Eror (%)
1	08.00	27,1	27,3	0,20
2	09.00	27,1	26,3	3,04
3	10.00	28,0	27,3	2,56
4	11.00	28,8	28,5	1,05
5	12.00	29,1	28,9	0,69
6	13.00	29,0	28,6	1,39
7	14.00	28,6	28,5	0,35
8	15.00	28,0	27,7	1,08
9	16.00	27,9	27,6	1,08
Rata-rata				1,27

Tabel 2. Data hasil pengujian intensitas cahaya

No.	Waktu	Sensor LDR (Lux)	Lux meter (Lux)	Eror (%)
1	08.00	103	99	4,04
2	09.00	107	101	5,94
3	10.00	127	122	4,09
4	11.00	173	166	4,21
5	12.00	188	193	2,59
6	13.00	187	181	3,31
7	14.00	146	142	2,81
8	15.00	152	149	2,01
9	16.00	145	137	5,83
Rata-rata				3,87

Tabel 3. Data hasil pengujian jumlah orang

No.	Berdasarkan sensor HC-SR04	Perhitungan manual	Error (%)	Akurasi (%)
1	0	0	0	100
2	1	1	0	100
3	5	5	0	100
4	7	7	0	100
5	10	10	0	100
6	8	8	0	100
7	6	6	0	100
8	4	4	0	100
9	2	2	0	100
10	0	0	0	100
Rata-rata			0	100



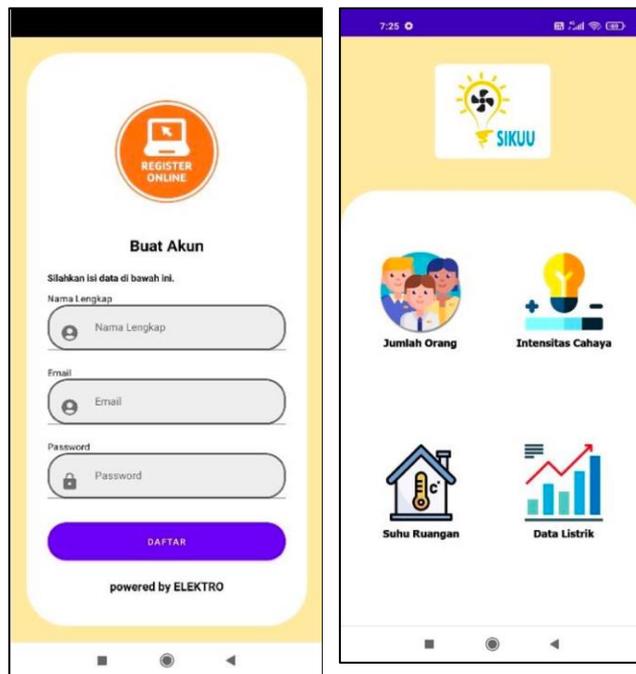
Gambar 6. Pengujian sensor HC-SR04 dalam mendeteksi orang yang masuk dan keluar ruangan

Tabel 4. Hasil pengujian sensor ACS712

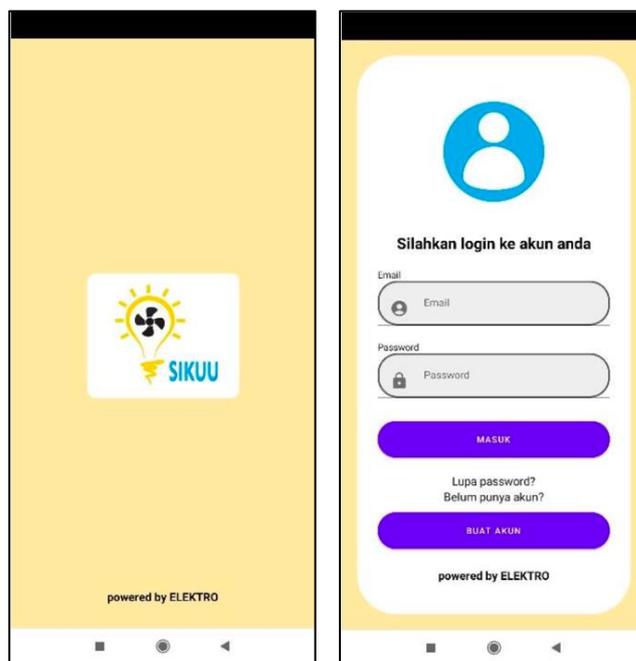
Jenis Beban	Arus (A)		Eror (%)
	Sensor ACS712	Tang Meter	
1 Lampu	0,39	0,38	2,56
1 Kipas	0,23	0,23	0
1 Lampu, 1 Kipas	0,6	0,58	3,44
2 Lampu, 1 Kipas	0,99	0,97	2,06
1 Lampu, 2 Kipas	0,78	0,78	0
2 Lampu, 2 Kipas	1,15	1,15	0

Tabel 5. Hasil pengujian sensor ZMPT101B

Jenis Beban	Tegangan (V)		Eror (%)
	Sensor ZMPT101B	Tang Meter	
1 Lampu	241,8	243,2	0,58
1 Kipas	242,2	242,8	0,25
1 Lampu, 1 Kipas	241,6	242,8	0,49
2 Lampu, 1 Kipas	241,6	242,8	0,49
1 Lampu, 2 Kipas	241,4	242,6	0,49
2 Lampu, 2 Kipas	241,4	242,4	0,41



Gambar 8. (a) Halaman registrasi (b) Halaman utama



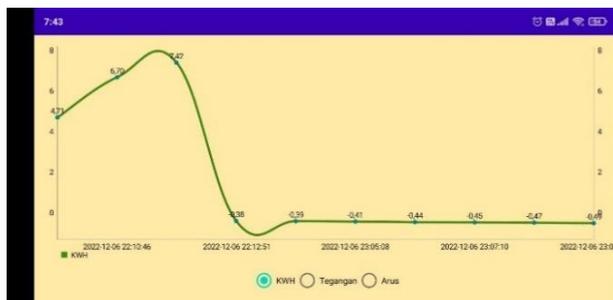
Gambar 7. (a) Halaman splash screen (b) Halaman login

Jika belum memiliki akun maka dapat mengakses menu "Buat Akun" untuk kemudian diarahkan menuju halaman registrasi seperti pada Gambar 8 (a). Kemudian, pada halaman utama seperti Gambar 8 (b), terdapat fitur yang digunakan untuk memantau beberapa parameter dari ruang kerja seperti kondisi suhu, intensitas cahaya, jumlah orang yang terdapat di dalam ruangan, serta daya listrik yang digunakan oleh perangkat elektronik pada ruangan tersebut. Agar dapat mengakses data-data hasil pendeteksian sensor, cukup dengan mengklik atau menekan fitur-fitur tersebut. Aplikasi android

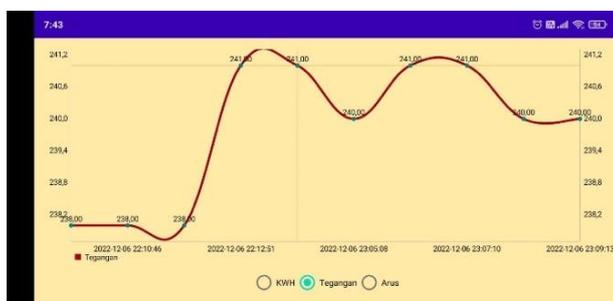
yang telah dibuat ini diberi nama dengan SIKUU (Sistem Informasi Kendali Suhu dan Lampu). Hasil pengujian yang dilakukan terlihat bahwa data-data yang diperoleh melalui sensor dapat ditampilkan pada aplikasi sistem pemantauan berbasis Android yang telah dibuat. Gambar 9a menampilkan bahwa sensor pendeteksi objek mengirimkan informasi/data bahwa terdapat satu orang pada ruangan, Gambar 9b memberikan informasi bahwa kondisi suhu ruangan $29,8^{\circ}\text{C}$ dan Gambar 9c menunjukkan data intensitas cahaya ruangan $0,15$ lux. Selain itu, data mengenai arus dan tegangan yang berasal dari sensor ACS712 dan ZMPT101B juga berhasil ditampilkan pada aplikasi ini seperti yang terlihat pada Gambar 10 hingga Gambar 12. Secara keseluruhan fitur-fitur pada aplikasi berhasil terhubung dengan sistem *hardware* melalui koneksi internet.



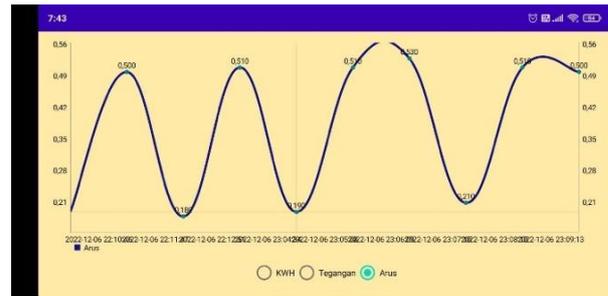
Gambar 9. (a) jumlah orang; (b) intensitas cahaya; (c) suhu ruangan



Gambar 10. Data penggunaan daya listrik



Gambar 11. Data tegangan listrik



Gambar 12. Data arus listrik

IV. SIMPULAN

Berdasarkan sistem pemantauan suhu dan intensitas cahaya di ruang kerja pada studi kasus ruang tugas akhir Institut Teknologi Sumatera berbasis Android yang telah berhasil dibuat dan dilakukan pengujian, diperoleh hasil bahwa masing-masing sensor dapat beroperasi dengan baik sesuai dengan fungsinya. Nilai rata-rata error pengukuran pada sensor suhu DHT11 jika dibandingkan dengan termometer ruangan masih cukup kecil yaitu sebesar $1,27\%$. Sedangkan nilai rata-rata error pengukuran sensor LDR lebih besar yaitu $3,87\%$. Rata-rata error hasil pengukuran pada sensor HC-SR04 sebesar 0% . Sensor arus dan tegangan juga mampu mendeteksi arus dan tegangan pada sistem ketika beroperasi dengan 6 jenis skenario beban. Pengujian juga dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran sistem dengan pengukuran manual menggunakan alat ukur. Semua hasil data pengujian dapat dikirimkan dan ditampilkan dengan baik pada aplikasi Android yang telah dibuat. Data mengenai daya konsumsi listrik dapat memberikan informasi kepada pengguna sehingga dapat lebih bijak dalam menggunakan perangkat elektronik. Secara keseluruhan, sistem pemantauan suhu dan intensitas cahaya pada ruang tugas akhir teknik elektro ini telah mampu beroperasi sesuai fungsinya. Lampu dan pendingin ruangan yang digunakan sesuai kebutuhan diharapkan dapat membantu mengurangi pemborosan pemakaian listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. N. Putri, "Indonesia dalam Menghadapi Pandemi Covid-19," *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, vol. 20, no. 2, p. 705, Jul. 2020, doi: 10.33087/jiubj.v20i2.1010.
- [2] N. Aeni *et al.*, "Pandemi COVID-19: Dampak Kesehatan, Ekonomi, dan Sosial COVID-19 Pandemic: The Health, Economic, and Social Effects," 2021. [Online]. Available: <http://>
- [3] A. Gupta, H. Zhu, M. K. Doan, A. Michuda, and B. Majumder, "Economic Impacts of the COVID-19 Lockdown in a Remittance-Dependent Region," *Am J Agric Econ*, vol. 103, no. 2, pp. 466–485, Mar. 2021, doi: 10.1111/ajae.12178.
- [4] E. Darmawan, M. E. Atmojo, M. Raja, and A. Haji, "TheJournalish: Social and Government Kebijakan Work from Home bagi Aparatur Sipil Negara di Masa Pandemi Covid-19." [Online]. Available: <http://thejournalish.com/ojs/index.php/thejournalish/index>
- [5] E. Gustian, D. Triyanto, T. Rismawan, J. Sistem Komputer, and F. H. MIPA Universitas Tanjungpura Jl Hadari Nawawi, "Sistem Penerangan Rumah Otomatis Berdasarkan Intensitas Cahaya Dan Keberadaan Manusia Dalam Ruang Berbasis Mikrokontroler," 2016.
- [6] D. C. Rini, A. Z. Arifin, A. Fanani, G. B. Prasanda, and W. N. Sunaryo, "Penerapan Fuzzy Inference System Dalam Pengoptimalan Suhu Ruangan Pada Double Air Conditioner (Ac)

- Secara Otomatis,” *Jurnal Matematika*, vol. 1, pp. 11–16, Mar. 2019.
- [7] F. Wahab, A. Sumardiono, A. Rafi, A. Tahtawi, A. Faisal, and A. Mulayari, “Desain dan Purwarupa Fuzzy Logic Control untuk Pengendalian Suhu Ruangan,” *Direvisi: 23 Mei*, vol. 2, no. 1, p. 22, 2017.
- [8] M. H. Widiyanto, “Alat Pengatur Suhu Otomatis pada Ruangan Produksi Textile Spining Berbasis Mikrokontroler Atmega32 di PT.San Star Manunggal,” vol. 2, no. 1.
- [9] J. Parhan and R. Rasyid, “Rancang Bangun Sistem Kontrol Kipas Angin dan Lampu Otomatis di Dalam Ruang Berbasis Arduino Uno R3 Menggunakan Multisensor,” *Jurnal Fisika Unand*, vol. 7, no. 2, 2018.
- [10] M. J. Mnati, A. Van den Bossche, and R. F. Chisab, “A smart voltage and current monitoring system for three phase inverters using an android smartphone application,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 4, Apr. 2017, doi: 10.3390/s17040872.
- [11] D. Handarly *et al.*, “Sistem Monitoring Daya Listrik Berbasis IoT (Internet of Thing),” 2018.
- [12] B. Prayitno, P. Palupiningsih, H. B. Agtriadi, S. Tinggi, and T. Pln, “Prototype Sistem Monitoring Penggunaan Daya Listrik Peralatan Elektronik Rumah Tangga Berbasis Internet Of Things,” vol. 12, no. 1, 2019.
- [13] I. S. Hudan and T. Rijianto, “Rancang Bangun Sistem Monitoring Daya Listrik Pada Kamar Kos Berbasis Internet of Things (IOT).” [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets>
- [14] F. Y. Q. Ontowirjo, V. C. Poekoel, P. D. K. Manembu, and R. F. Robot, “Implementasi Internet of Things Pada Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban Pada Ruangan Pengereng Berbasis Web,” *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 7, no. No 3, pp. 331–338, 2018.
- [15] W. A. Prayitno, A. Muttaqin, and D. Syauqy, “Sistem Monitoring Suhu, Kelembaban, dan Pengendali Penyiraman Tanaman Hidroponik menggunakan Blynk Android,” *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 1, no. No 4, pp. 292–297, 2017.
- [16] U. Ependi, T. B. Kumiawan, and F. Panjaitan, “System Usability Scale Vs Heuristic Evaluation: A Review,” *Jurnal SIMETRIS*, vol. 10, no. 1, 2019.

A Picofarad Capacitance Meter Based on Phase-Sensitive Demodulation for Tomography Application

Rocky Alfan¹, Hamzah¹, Teguh Firmansyah¹, Irma Saraswati¹, Ceri Ahendyarti¹,
Rohmadi², Imamul Muttakin^{1*}

¹Universitas Sultan Ageng Tirtayasa; rocky.alfanz@untirta.ac.id, hamzah.4416@gmail.com,
teguh.firmansyah1@gmail.com, irma.saraswati@untirta.ac.id, ceri.ahend@untirta.ac.id

²Universitas Wiralodra; rohmadi.ft@unwir.ac.id

*Corresponding: imamul@untirta.ac.id

Intisari – Electrical capacitance volume tomography (ECVT) adalah suatu teknik pencitraan berdasarkan nilai kapasitansi dari suatu objek. Untuk memberikan citra dari objek kaji yang representative, sistem ECVT membutuhkan metode yang mampu mengukur nilai kapasitansi dalam orde pikofarad (pF). Level resolusi tersebut menimbulkan kesulitan bagi alat pengukur kapasitansi umum yang komersial, sehingga menjadi kebutuhan untuk adanya metode special dengan rangkaian pengkondisi sinyal yang khusus. Alat pengukur kapasitansi berbasis phase sensitive demodulation (PSD) dibuat untuk mengatasi isu tersebut, dan alat ini kemudian dibandingkan dengan karakteristik alat pengukur kapasitansi berbasis pengaturan Arduino komersial. Alat pengukur kapasitansi berbasis PSD yang dirancang memiliki nilai akurasi sebesar 97,894%, ketepatan sebesar 0,704 pF, sensitivitas sebesar 0,1197 V/pF, linieritas dengan koefisien determinasi sebesar 0,9983 dan stabilitas sebesar 0,028 pF/menit. Sebagai perbandingan, alat pengukur kapasitansi berbasis Arduino memiliki nilai ketelitian sebesar 97,943%, ketepatan sebesar 0,027 pF, linieritas dengan koefisien determinasi sebesar 0,9999 dan stabilitas sebesar 0,04 pF/menit. Pengujian dilakukan menggunakan sensor ECVT 8 elektrode dengan menggunakan bahan dielektrik udara dan air. Pasangan elektroda terdekat pada kondisi media dielektrik udara memiliki nilai kapasitansi 2,62218 pF untuk alat ukur berbasis PSD dan 3,4027 pF untuk alat ukur berbasis Arduino, sedangkan pada kondisi media dielektrik air ia memiliki nilai kapasitansi 9,8229 pF untuk alat ukur berbasis PSD dan 9,1069 pF untuk alat ukur berbasis Arduino. Pasangan elektroda terjauh pada kondisi media dielektrik udara memiliki nilai kapasitansi 0 pF untuk alat ukur berbasis PSD dan 0,0798 pF untuk alat ukur berbasis Arduino, sedangkan pada kondisi media dielektrik air ia memiliki nilai kapasitansi 4,652 pF untuk alat ukur berbasis PSD dan 0,1224 pF untuk alat ukur berbasis Arduino.

Kata kunci : Kapasitansi meter, resolusi pikofarad, PSD, Arduino, ECVT

Abstract – Electrical capacitance volume tomography (ECVT) is an imaging technique based on the object's capacitance value. To provide a representative image of the object under study, the ECVT system requires a method that can measure the capacitance value in the order of picofarads (pF). This level of resolution poses a difficulty for typical commercial capacitance measuring devices, hence raising the need for a specialized method with dedicated signal conditioning circuitry. The capacitance meter based on phase-sensitive demodulation (PSD) is made to solve the aforementioned issue and it is then compared with the characteristics of a capacitance meter-based commercial Arduino setup. The designed PSD-based capacitance measuring device has 97.894% accuracy, precision of 0.704 pF, sensitivity of 0.1197 V/pF, linearity with a coefficient of determination 0.9983, and stability of 0.028 pF/min. In comparison, the capacitance meter based on Arduino has 97.943% accuracy, precision of 0.027 pF, linearity with a coefficient of determination 0.9999, and stability of 0.04 pF/min. Testing is done on an 8-electrode ECVT sensor using dielectric materials of air and water. The nearest electrode pair on the condition of air as the dielectric medium has a capacitance value of 2.62218 pF for PSD-based measuring devices and 3.4027 pF for Arduino-based measuring devices, while the pair of electrodes on the condition of water as a dielectric medium has a capacitance value 9.8229 pF for measuring device based on PSD and 9.1069 pF for Arduino-based measuring devices. The opposite and farthest electrode pair on the condition of air as a dielectric medium has a capacitance value of 0 pF for PSD-based measuring devices and 0.0798pF for Arduino-based measuring devices, while the pair of electrodes on the condition of water as a dielectric medium has a capacitance value of 4.652 pF for PSD-based measuring devices and 0.1224 pF for Arduino-based measuring devices.

Keywords: Capacitance meter, picofarad resolution, PSD, Arduino, ECVT

I. INTRODUCTION

Medical, industrial processes, geology, security systems, and other fields need ways to see inside objects non-invasively (without damaging) or non-intrusively (without inserting a tool). Electrical capacitance volume tomography (ECVT) is an imaging technique based on the capacitance value of an object that utilizes the principle of parallel plate capacitive sensing [1]. Only the dielectric constant between the plates is affected when the plate spacing and area are kept constant. The difference in the value of this dielectric constant, which will be the basis of the object between the plates, can be reconstructed through an image processing technique. ECVT consists of three main parts: the

capacitance sensor, the data acquisition system, and the computer for control and image processing [2].

Capacitance measurement is an important means of acquiring a fundamental quantity of interest with diverse applications. This includes liquid level sensing [3], flow measurement [4], and sensor interface platforms [5]. In previous studies, there were four circuit methods used to obtain capacitance values from electrical capacitance tomography (ECT) sensors, namely charge–discharge circuit [6], ac-based circuit [7], active differentiator-based capacitance transducer circuit [8] and phase–sensitive demodulation circuit (PSD) [9]. The charge–discharge method uses the time required for charging and discharging a capacitance to determine its value. However, the charge

injection into the input circuit will degrade the measurement's performance. An ac-based circuit excites capacitive plates using a sinusoidal signal and infers the capacitance value from the signal's response, but this demands a complex implementation to sample a full-wave high-frequency signal. On the other hand, an active differentiator employs a filter configuration, thus introducing another time delay which makes the measurement relatively slower.

Phase-sensitive demodulation circuit (PSD), also known as lock-in amplification, has been employed to enhance the accuracy and sensitivity of capacitance measurements. It is a method that extracts amplitude and phase information from a modulated signal. Its operation entails the application of an ac voltage signal to a capacitive sensor, leading to capacitance modulation. By precisely synchronizing measurements with the modulation frequency, this technique can separate the capacitance-related signal from background noise, ensuring high sensitivity and accurate measurement [10].

This research was conducted to determine the characteristics of a PSD circuit-based capacitance meter compared to that of an Arduino-based capacitance meter and to measure the capacitance value of the 8-electrode ECVT sensor in the order of picofarads.

II. METHODOLOGY

This study has stages described in a flowchart, as shown in Figure 1. Capacitance measuring instruments are designed in two scenarios: PSD-based and Arduino-based systems. These systems are tailored to accept measurement ranges between 0 pF to 40 pF. In the PSD-based system, firstly the sinusoidal signal synthesis is tested to cover an operating frequency of 500 kHz with an amplitude of 16 Vpp. Then current-to-voltage converter is tested to ensure the input-output current-voltage relationship. Afterward, the amplification is tested for its gain and phase performance. Analog multiplier functions are evaluated to determine whether the output is a true multiplication between the input signal and reference signal. Subsequently, a low-pass filter is tested to reject the ac component while preserving the DC component.

On the other hand, the implementation of an Arduino-based system lies mainly in the software to count the time constant required to charge the capacitor. This transient time is related to the capacitance value. Both systems will be tested by using capacitors of various values (1 pF– 40 pF) as the device under test. In addition, the measurement is repeated regularly within one hour of the timespan. From tests, the instrument's characteristics such as accuracy, precision, sensitivity, and stability are derived. Lastly, both PSD and Arduino-based systems are then tested to measure the capacitance value of the 8-electrode ECVT sensor containing a dielectric medium.

In measuring capacitors using Arduino, the pins of the capacitor being measured are connected to pins A0 and A2 of Arduino [11]. This circuit of this method is shown in Figure 2 where CT is the capacitor being tested. First, the

circuit is connected with a voltage at A2 = 0 volts. When A2 is given 5 volts, current will flow through both capacitors. The voltage at A0 will be obtained by 1% of the final value for 30 ns. The value obtained at A0 is proportional to the ratio of CT divided by the total capacitance of C1 + CT.

As for the PSD instrument, the design is shown in Fig 3. It consists of a direct digital synthesis (DDS) [12], a high-pass filter (HPF) + amplifier, a current-to-voltage (CV) converter [13], inverting amplifier, an analog multiplier, and a low-pass filter (LPF). In this PSD method, DDS generates the source signal as a voltage. This voltage has dc offset value which must be rejected using HPF such as a capacitor. In the preceding stage, the signal should be amplified to a sufficient level for exciting the capacitive electrodes. The signal from the electrode will be in the form of current, thus CV converter and another amplifier are required for further processing in the voltage-based analog multiplier. The LPF rejects the high-frequency components, leaving only the DC component that suits the internal ADC capability of the microcontroller.

The capacitance measurement value (C_x) can be obtained by using a computation that has been explained thoroughly in [9] utilizing (1). Where V_0 is dc output from low pass filter (V), C_f is feedback capacitor (F), A is input signal amplitude, A_v is the gain factor of the amplifier, and α is the phase shift (degree).

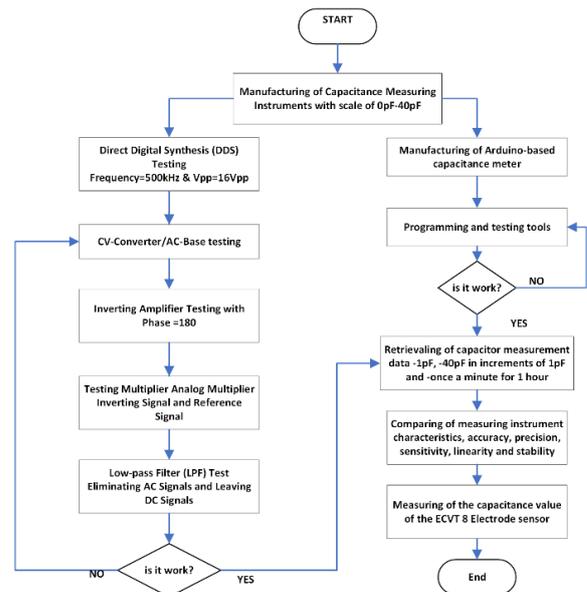


Figure 1. Flowchart of the study

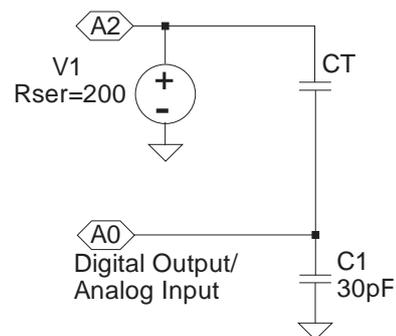


Figure 2. Capacitance measurement circuit with Arduino

$$C_x = \frac{20V_0 C_f}{A^2 A_p \cos \alpha} \tag{1}$$

The instrument's accuracy is the measuring system's ability to indicate the approach to the actual value of the object being measured. Another definition of accuracy is the closest value to reading pertinent with quantity being measured against the actual price so that the level of measurement error becomes smaller. Drift is related to the variability of instruments used at the time of measurement. To determine accuracy, the data obtained is processed using (2). Where A is accuracy, C_x is measured capacitor (F), and C'_x is measurement value (F).

$$A = 1 - \left| \frac{C_x - C'_x}{C_x} \right| \tag{2}$$

$$\%A = \bar{A} \times 100\%$$

The precision of the measuring instrument is the closeness of the individual measurement values that are distributed around the average value or the spread of the individual measurement values from the average value. A measuring instrument that has good precision does not guarantee that the measuring instrument has good accuracy. Another definition of precision is the level of similarity of values in a group of measurements or several values where measurements are made repeatedly with the same instrument.

The precision value is obtained by calculating the difference between the average capacitance value of the measurement results. Calculation of precision uses (3). where C is the average measured capacitor (F) and C_x is the measured capacitor (F).

$$P = \sum_{x=1}^n \left| \frac{C - C_x}{n} \right| \tag{3}$$

Sensitivity is the ratio between the output signal or instrument response to changes in the measured input variable. On the other hand, it usually requires the output value of the instrument reading to be directly proportional to the value of the measured object. The sensitivity value is obtained from the average value of the change in the signal V_0 (V) to changes in C_x (F). Calculation of the sensitivity value uses (4).

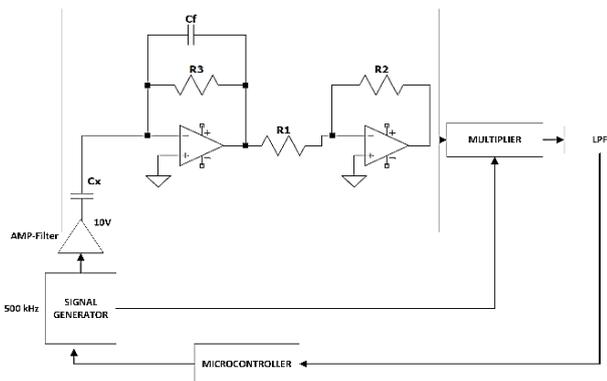


Figure 3. PSD-based capacitance meter design block diagram

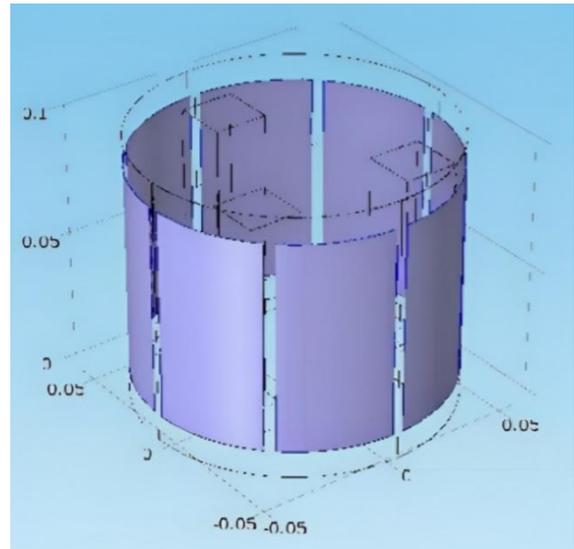


Figure 4. Design of 8-Electrode ECVT Sensor

$$S = \sum_{x=1}^n \left| \frac{V_x - V_{x-1}}{C_x} \right| \tag{4}$$

The stability of the measuring instrument is characterized by the variability of the measurement results or reading results, which are free from the influence of random variations. The stability is shown by the measurement results that do not change during the measurement. The data is processed to find the drift value using (5), where drift (D , in F/minute) represents the stability value.

$$D = \frac{\Delta C_x}{t} = \sum_{t=1}^T \left| \frac{C_x - C_{x-1}}{t} \right| \tag{5}$$

Figure 4 illustrates the ECVT 8-electrode sensor comprises eight copper plates measuring 4 cm long and 8 cm wide, circumventing a tube with a diameter of 11.385 cm [14].

III. RESULT AND DISCUSSION

The PSD-based capacitance measuring instrument has five parts. The first is a DDS, the second is a CV converter, the third is an inverting amplifier, the fourth is an analog multiplier, and the fifth is an LPF. The finished design is shown in Fig. 5. The AD9850 DDS module was programmed using Arduino Uno R3 to produce an output signal with a frequency of 500 kHz. Figure 6 shows the AD9850 output signal obtained using a digital oscilloscope.

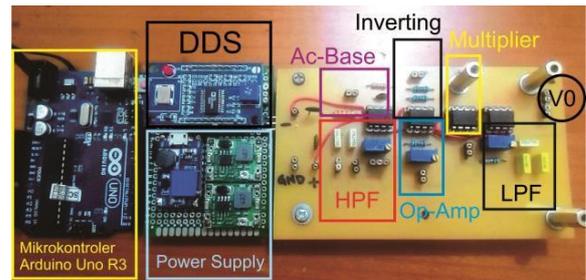


Figure 5. PSD-based capacitance meter

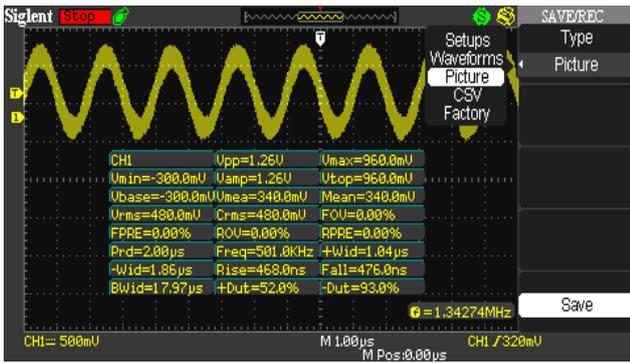


Figure 6. DDS AD9850 signal

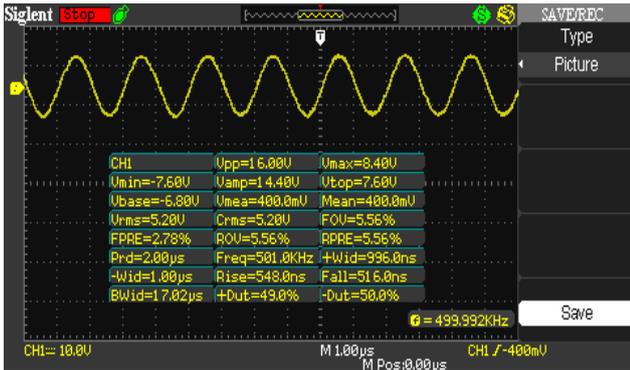


Figure 7. Signal gain by 18x to provide 16 Vpp

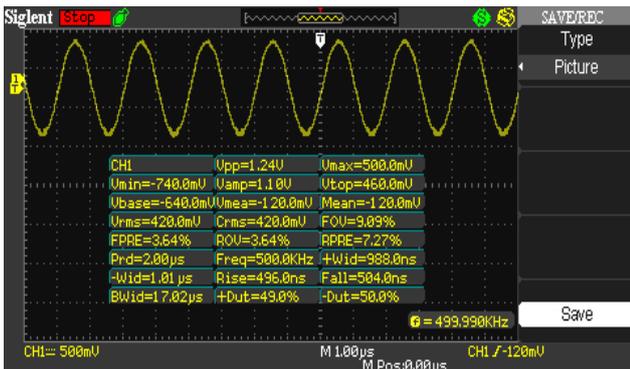


Figure 8. Output signal of CV converter

The required input signal as an excitation signal for the CV circuit was a sine signal with an amplitude of 18 Vpp and a frequency of 500 kHz. Additionally, an HPF was needed to dampen the existing offset voltage, and a signal amplifier with 18 times gain was also needed. Figure 7 shows that the offset has been damped, and the signal has been amplified to 16 Vpp.

The circuit converted the excitation signal from DDS into a signal whose magnitude corresponds to the measured C_x value. Figure 8 shows the output signal of the CV converter with the signal amplitude changing to 1.24 Vpp and Vrms changing to 420 mV for the 1 pF capacitor.

The signal that has passed through the circuit experienced a phase shift of 180°. The phase change was anticipated by using a unity gain inverter circuit. Figure 9 shows the phase change of the signal after passing through the inverting amplifier. An analog multiplier multiplied the information signal with the excitation signal, as represented in Figure 9,

colored yellow and blue respectively. The output signal obtained after going through the multiplier can be seen in Fig. 10.

An LPF filtered the high-frequency signals and passed low-frequency signals. The output signal from the LPF can be seen in Fig. 11. The Vrms value obtained from the LPF output was 100 mV for a capacitor value of 1 pF. In the experimental data, the Vrms value from the LPF output was used as the value of the variable V_0 to determine the value of the measured capacitor (C_x).

Capacitance measurement experiments using Arduino Uno R3 were carried out by programming Arduino with a capacitance measurement program, and then the results were displayed on the serial monitor in the Arduino IDE. The test was done using capacitors between 1 pF to 40 pF with an increase of 1 pF to obtain data for determining the measuring instrument characteristics. Figure 12 shows the scheme of measuring capacitance using the Arduino Uno.

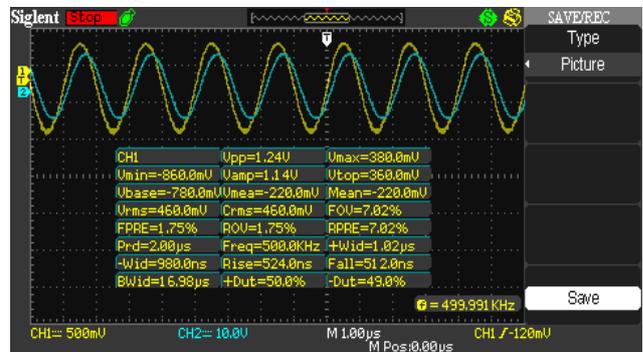


Figure 9. Inverting amplifier output signal (yellow) and excitation signal (blue)

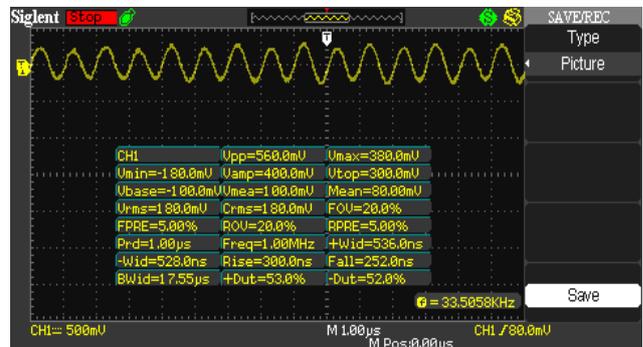


Figure 10 Multiplier output signal



Figure 11 Low-pass filter result signal

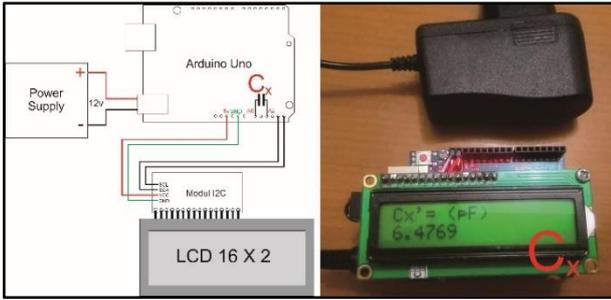


Figure 12. Arduino-based capacitance meter test

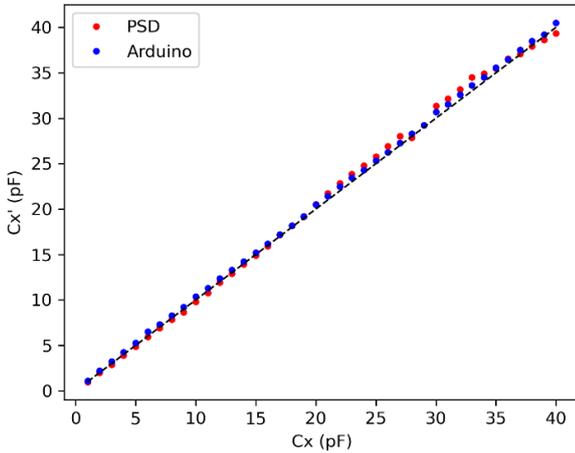


Figure 13. Graph of measurement results against true values

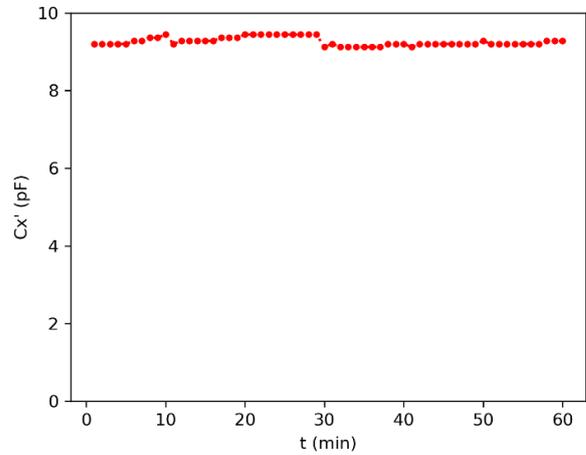
The instrument’s accuracy can be found by comparing measurement results (C'_x) against true capacitor values (C_x) from 1 pF to 40 pF in 1 pF increments. Figure 13 shows the results. The accuracy of the PSD-based capacitance meter obtained after processing the data was 97.894%, whereas the accuracy value of the Arduino-based capacitance meter was 97.943%. The precision of the PSD-based capacitance meter was 0.704 pF, whereas that of the Arduino-based capacitance meter was 0.027 pF. Furthermore, the sensitivity in this experiment can only be measured in the PSD-based measuring instrument experiment because the Arduino-based measuring instrument does not have data on changes in the V_0 signal to changes in C_x . The resulting sensitivity value for a PSD-based system was 0.1197 V/pF.

Figure 13 shows the capacitance measurement from both methods is linear. The blue graph shows the linearity line of the PSD-based system with regression $R^2 = 0.9983$, the equation $y = 1.0206x - 0.1418$ with an average error of 2.106%. The red graph shows the linearity line of the Arduino-based system with regression $R^2 = 0.9999$, the equation $y = 1.0073x + 0.1391$ with an average error of 2.057%.

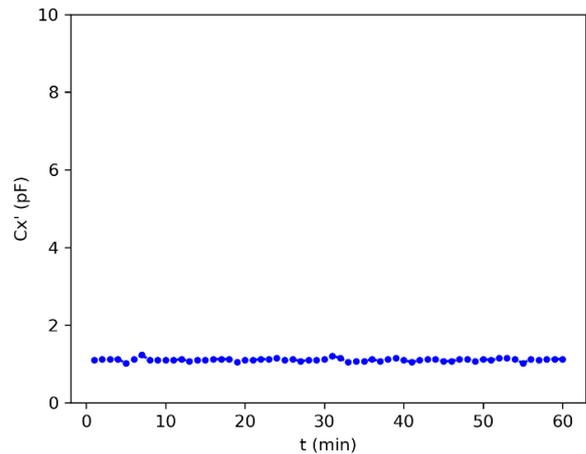
The stability value was calculated by taking measurement data for the capacitor value that is closest to its original value (in this case, 9 pF for a PSD-based circuit and 1 pF for an Arduino-based circuit) for 60 minutes while recording changes in the capacitance value every one minute. Figure 14 shows a graph of the stability in measuring reference capacitors for both capacitance-measuring circuits. The stability value of the PSD-based capacitance meter is 0.028

pF/minute, while the stability value of the Arduino-based capacitance meter was 0.04 pF/minute.

A comparison of characteristics such as precision, accuracy, sensitivity, linearity, and stability of the two measuring instruments is shown in Table 1.



(a)



(b)

Figure 14. Stability graph: (a) capacitance meter based on psd, (b) capacitance meter based on arduino.

Table 1. Comparison of the measuring method’s characteristics

Parameter	Method	
	PSD Circuit	Arduino
Accuracy	97.894%	97.943%
Precision	0.704 pF	0.027 pF
Sensitivity	0.1197 V/pF	-
Linearity	$R^2=0.9983$ $y=1.0206x-0.1418$	$R^2=0.9999$ $y=1.0073x+0.1391$
Stability	0.028 pF/min	0.04 pF/min

The next test used the 8-electrode ECVT sensor on two dielectric materials. The first is with the air medium or ‘empty’ condition, and the second is water medium or ‘full’ condition. Figure 15 shows the capacitance measurement scheme on the 8-electrode ECVT sensor. The test results with the 8-electrode ECVT sensor were analyzed by taking data on the capacitance values of a pair of two electrodes that were adjacent and so on until the opposite pair, alternately for every independent pair combination up to 28 data in total. Figure 16 shows the order in which data is collected, from the nearest pair of electrodes to the farthest pair of electrodes.

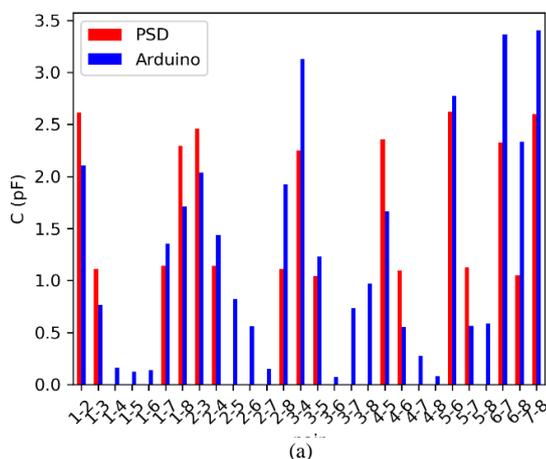


(a)

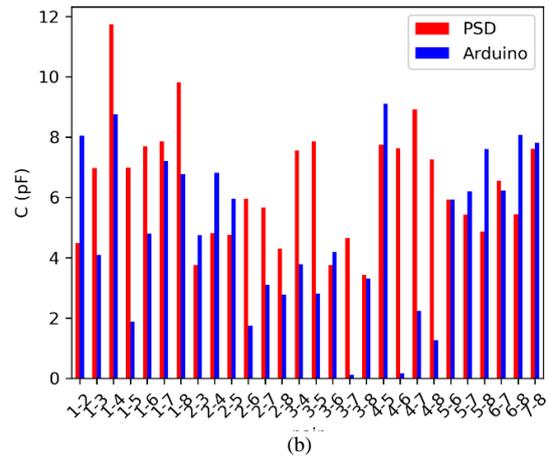


(b)

Figure 15. ECVT sensor measurement: (a) empty condition, (b) condition filled with water.



(a)



(b)

Figure 16. Electrode pair capacitance values: (a) empty conditions and (b) conditions with water objects

V. CONCLUSION

A capacitance measuring instrument based on the PSD circuit has been successfully designed and tested for picofarad-order measurement level. The accuracy of the PSD-based circuit is 97.894%, while the accuracy of the Arduino-based circuit is 97.943%. The precision of the PSD-based circuit is 0.704 pF, while the precision of the Arduino-based circuit is 0.027 pF. The sensitivity of the PSD-based circuit is 0.1197 V/pF. PSD-based circuits are linear as reflected by the coefficient of determination 0.9983, while Arduino-based circuit linearity has a coefficient of determination 0.9999. The stability of the PSD-based circuit is 0.028 pF/minute, while the stability of the Arduino-based circuit is 0.04 pF/minute. The designed capacitance measuring instrument also has been tested in the 8-electrode ECVT sensor. The results for air and water as medium comply with the respective dielectric constant for both objects.

REFERENCES

- [1] W. Warsito, Q. Marashdeh, and L.-S. Fan, “Electrical Capacitance Volume Tomography,” *IEEE Sensors J.*, vol. 7, no. 4, pp. 525–535, Apr. 2007, doi: 10.1109/JSEN.2007.891952.
- [2] W. Q. Yang, “Hardware design of electrical capacitance tomography systems,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 225–232, Mar. 1996, doi: 10.1088/0957-0233/7/3/003.
- [3] S. V. Balakin and D. L. Serbinov, “A Method of Determining the Level of Dielectric Liquids from the Parameters of a Model of a Capacitance Fuel Level Sensor,” *Meas Tech*, vol. 60, no. 10, pp. 998–1002, Jan. 2018, doi: 10.1007/s11018-018-1307-7.
- [4] H.-Y. Yang, Y. Chen, and H. Zhao, “Signal acquisition and processing method for capacitive electromagnetic flowmeter,” *Journal of Electronic Science and Technology*, vol. 19, no. 1, p. 100026, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jnlest.2020.100026.
- [5] K. Kishore and S. A. Akbar, “Evolution of Lock-In Amplifier as Portable Sensor Interface Platform: A Review,” in *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 18, pp. 10345–10354, 15 Sept.15, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2993309.
- [6] J. Kryszyn, W. T. Smolik, B. Radzik, T. Olszewski, and R. Szabatin, “Switchless charge-discharge circuit for electrical capacitance tomography,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 11, p. 115009, Nov. 2014, doi: 10.1088/0957-0233/25/11/115009.
- [7] W. Q. Yang and T. A. York, “New AC-based capacitance tomography system,” *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 146, no. 1, pp. 47–53, Jan. 1999, doi: 10.1049/ip-smt:19990008.
- [8] F. T. Kühn and P. A. V. Halderen, “Design of an active-differentiator-based capacitance transducer for electrical capacitance tomography,”

- Meas. Sci. Technol., vol. 8, no. 8, pp. 947–950, Aug. 1997, doi: 10.1088/0957-0233/8/8/020.
- [9] I. Muttakin, A. Yusuf, R. Rohmadi, W. Widada, and W. P. Taruno, "Design and Simulation of Quadrature Phase Detection in Electrical Capacitance Volume Tomography," *TELKOMNIKA*, vol. 13, no. 1, p. 55, Mar. 2015, doi: 10.12928/telkomnika.v13i1.1299..
- [10] S. Malik, L. Somappa, M. Ahmad, T. Islam, and M. S. Baghini, "An accurate digital converter for lossy capacitive sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 331, p. 112958, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.sna.2021.112958.
- [11] M. Varga, M. Romakov, N. Blaz, and M. Damjanovic, "Measurement of capacitive sensor with Arduino," in 2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Pilsen, Czech Republic: IEEE, May 2016, pp. 490–493. doi: 10.1109/ISSE.2016.7563247.
- [12] M. Liao, Y. Tian, and K. Wang, "Micro-capacitance Measurement Based on Phase-Sensitive Detection," in 2010 Third International Symposium on Information Science and Engineering, Dec. 2010, pp. 375–378. doi: 10.1109/ISISE.2010.42.
- [13] J. C. Lotters, W. Olthuis, P. H. Veltink and P. Bergveld, "A sensitive differential capacitance to voltage converter for sensor applications," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 48, no. 1, pp. 89-96, Feb. 1999, doi: 10.1109/19.755066.
- [14] R. Fahrizal, J. S. Julianto, A. Maulana, R. Alfanz, C. Ahendyarti, Rohmadi and I. Muttakin, "Electrical Tomography Sensor Modelling for Detection of Fuel Proportion in Vessel," *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika (JITEKI)*, vol. 9, no. 2, pp. 493–501, Jun. 2023, doi: 10.26555/jiteki.v9i2.26304.

Acknowledgment

We sincerely thank the experts and colleagues who have committed to reviewing the Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan Volume 4 No. 2 of 2023. The experts and colleagues who have contributed to the journal are listed below.

Name	Affiliation
Airlangga Adi Hermawan, S.T., M.Sc.	Universitas Gadjah Mada
Brahmantya Aji Pramudita, S.Si., M.Eng.	Universitas Telkom
Isnan Nur Rifa'i, S.Si., M.Eng.	Universitas Gadjah Mada
Jimmy Trio Putra, S.T., M.Eng.	Universitas Gadjah Mada
Muhammad Khairuddin, S.ST., M.Sc.	Politeknik Negeri Malang
Nurriza Kholifatulloh Hasanah, S.T., M.Eng.	Politeknik Enjineri Indorama
Pinto Anugrah, S.T., M.Eng.	Universitas Andalas
Rendra Dwi Firmansyah, S.Si., M.Eng.	Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Dr. Sahirul Alam, S.T., M.Eng.	Universitas Gadjah Mada
Unan Yusmaniar Oktawati, S.T., M.Sc., Ph.D.	Universitas Gadjah Mada
Wahri Sunanda, S.T., M.Eng.	Universitas Bangka Belitung
Yanuar Mahfudz Safarudin, S.T., M.T.	Politeknik Negeri Malang