

ANALISIS INTEGRASI PLTA WONOREJO TERHADAP PROFIL TEGANGAN DAN RUGI-RUGI DAYA PADA SISTEM KELISTRIKAN 20kV DI KABUPATEN TULUNGAGUNG

Arindi Dara Ayu Primayanti, Abraham Lomi, Awan Uji Krismanto
Institut Teknologi Nasional, Malang Indonesia

1812083@scholar.itn.ac.id, abraham@lecturer.itn.ac.id, awan_uji_krismanto@lecturer.itn.ac.id

Abstrak - Dalam penelitian ini akan menganalisa tentang pengaruh integrasi pembangkit Energi Baru Terbarukan terhadap kondisi kestabilan tegangan pada sistem kelistrikan 20kV Tulungagung yang terintegrasi dengan PLTA Wonorejo . Pada sistem kelistrikan, sistem distribusi berperan untuk menyalurkan listrik dari sumber daya listrik yang bertegangan tinggi hingga ke saluran menengah sampai ke beban atau konsumen. Dimana dalam sistem penyaluran terdapat sebuah rugi-rugi daya yang mengakibatkan penurunan tegangan (*undervoltage*). Salah satu cara untuk mengatasi penurunan tegangan, yaitu dengan pemasangan *Kapasitor*. Untuk menguji seberapa profil tegangan dan keberhasilan metode yang diusulkan maka dilakukan simulasi pada sistem distribusi 20kV Kabupaten Tulungagung, yang terintegrasi dengan salah satu pembangkitan EBT yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) menggunakan *software DigSILENT Power Factory*. Integrasi PLTA Wonorejo dapat memperbaiki profil tegangan pada sistem kelistrikan 20-kV Kabupaten Tulungagung, yang semula 0.928 pu menjadi 0.933 pu, 0.930 pu menjadi 0.936 pu, 0.945 pu menjadi 0.950pu, 0.945 pu menjadi 0.951 pu, dan 0.946 pu menjadi 0.952 pu. Kemudian dilakukan percobaan pemasangan kapasitor pada bus beban yang mengalami *undervoltage* profil tegangan naik rata-rata 0.015pu, dan pada percobaan pemasangan kapasitor pada bus yang selalu dengan bus yang mengalami *undervoltage* profil tegangan naik rata-rata 0.015pu dengan nilai standar $1.05 \leq v \leq 0.95$ p. u. Dan rugi-rugi daya dari tiap percobaan 0.23%, 3%, 3.1%, dan 4% dengan standar rugi rugi daya < 10%..

Kata kunci – Integrasi Pembangkit Energi Baru Terbarukan, Profil Tegangan, PLTA Wonorejo, Saluran Distribusi 20 kV

I. PENDAHULUAN

Penyaluran tenaga listrik yang dihasilkan oleh suatu pembangkit listrik harus melalui beberapa tahapan sebelum tenaga listrik ini sampai ke tangan konsumen. Panggung didasarkan pada energi listrik yang dihasilkan dari pusat pembangkit listrik dan biasanya menghasilkan tegangand11,5kV. Tegangan tersebut kemudian dinaikkan menjadi 150 kV oleh transformator step-up di dalam pembangkit listrik. Selanjutnya dikirim ke jaringan melalui

saluran udara tegangan tinggi (SUTT) yang mengarah langsung ke gardu induk (GI) [1]. Dari gardu induk (GI), tegangan diturunkan menjadi 20 kV oleh transformator penurun tegangan. Tenaga disalurkan ke jaringan distribusi primer melalui Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) dan Saluran Kabel Bawah Tanah (SKTM) [2]. Dari jaringan distribusi primer, daya didistribusikan melalui gardu distribusi yang diturunkan ke 380/220 V dan dikirimkan ke konsumen melalui saluran udara di atas kepala (SUTR) [1]. Meningkatkanusaha dibidang industriyangHbiasanya bersifatinduktif, telah meningkatkan kebutuhan daya reaktif induktif. Penurunan tegangan dapat terjadi ketika daya reaktif yang diinduksi dalam sistem meningkat. Setiap penurunan tegangan dalam pendistribusian energi listrik mempengaruhi besarnya energi yang hilang (*losses*).

Rugi-rugi energi juga dipengaruhi oleh besarnya impedansi arus peralatan distribusi dan kinerja saluran transmisi dan sistemkdistribusi. Kehilangan energigdalam sistemkenergi listrik tidak dapat dihindari. Salah satu cara untuk mengurangi kehilangan energihadalah dengan memperbaiki profil tegangan[3]. Alokasi pasokan listrik dan pembangkit listrik yang digunakan berbeda-beda di setiap wilayah, karena kebutuhan setiap wilayah selalu berbeda, tergantung pada konsumsi daya wilayah tersebut. SistemHtenagamterdiri darimsejumlah besar generator, transformator, elemen aktif dan pasif, dan perangkat lain yang saling terhubung oleh jaringan transmisi antara beberapa atau ratusan bus. Analisismaliran dayampada sistem energi listrik untuk menentukanparametermsistem energi listrik. Sistem tenaga yang baik harus memiliki nilai tegangan yang tidak melebihi batas yang dapat diterima dan memiliki rugi-rugi dayamyang rendah. Nilai tegangan yang konstan memaksimalkan kinerja peralatan listrik yang digunakan oleh konsumen [4].

Perubahan kondisi pembebanan memiliki pengaruh yang besar terhadap keseimbangan tegangan. Idealnya, tegangan yang dirasakan oleh perangkat adalah tegangan tiga fasa yang seimbang dengan bentuk sinusoidal. Namun, dengan adanya

beban yang tidak seimbang dan ketidakseimbangan impedansi saluran, tegangan yang terlihat oleh perangkat menjadi tidak seimbang [5]. Penelitian ini menggunakan software kDigSILENT Power Factory 15.1.7 untuk mendeskripsikan dampak integrasi PLTA Wonorejo terhadap profil tegangan jaringan distribusik20kV.

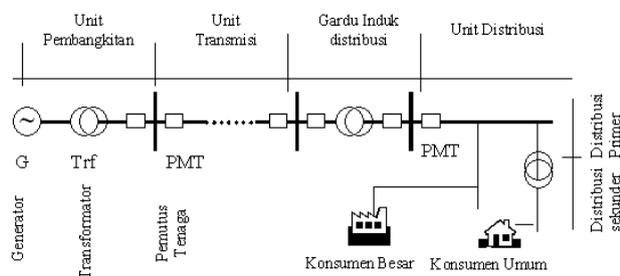
II. LANDASAN TEORI

A. Sistem Distribusi

Sistem distribusi daya ini membantu mendistribusikan daya dari sumber daya yang besar ke konsumen. Oleh karena itu, fungsi distribusi energi listrik adalah:

1. Pembagi atau penyalurantenaga listrikke beberapa tempat (pelanggan).
2. Merupakan sub sistemdenaga listrik yang langsung berhubunganffdengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan)kdilayani langsung melalui jaringan distribusi.

EnergiHlistrikkyang dibangkitkan pada pembangkit listrik besar dengan teganganm11 kV sampaim24 kV dinaikkanmenjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV atau 500 kV oleh gardu induk dengan trafo step-up dan didistribusikan melaluimsaluran transmisi. Tujuan dari boost adalah untuk meminimalkan kehilangan dayappada salurantransmisi. Dalam hal ini rugi daya sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir (I^2R). Sekalipun dayanya sama, jika nilai tegangan dinaikkan, arus yang mengalir akan berkurang, sehingga rugi daya juga akan berkurang. Dari saluran transmisi, trafomstep-down di gardu induk turun menjadin20 kV dan mendistribusikan skema tegangan ini ke saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer ini, stasiun distribusi menerima tegangan dan menurunkannya ke sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 volt, pada trafo distribusi. Selanjutnyamdialurkan kemkonsumen melaluimjalur distribusi sekunder [2].



Gambar 1 Sistem Jaringan Distribusi

B. PLTA Wonorejo

Pembangkit listrik tenaga air adalah pembangkit listrik tenaga air yang menggunakan energi kinetik dan

potensial dari air yang mengalir untuk menggerakkan turbin dan generator. PLTA Wonorekho atau Bendungan Wonorekho adalah sebuah bendungan yang terletak di Kecamatan Pagerwoho, Kabupaten Tulungagung, Jawa Timur. Hotel ini terletak di kaki Gunung Willis atau 11 km dari pusat kota. Dengan kapasitas sekitar 122 juta meter kubik, Bendungan Wonoreho merupakan salah satu bendungan terbesar di Indonesia. Setelah hampir sembilan tahun dibangun sejak tahun 1992, Bendungan Wonoreho dibuka pada tahun 2001 oleh Wakil Presiden Indonesia Megawati Sukarnoputri [2]. Bendungan Wonorejo merupakan pembangkit listrik 6,50 MW dengan sumber air minum 8,02 meter kubik per detik dan sumber irigasi untuk 7.540 hektar lahan pertanian di Jawa Timur. Sumber air utama PLTA Wonorejo adalah sungai Gondang dan Wangi.



Gambar 2 Waduk Wonorejo

C. Profil Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik

Profil tegangan dapat diidentifikasi sebagai nilai atau keadaan (baik atau buruk) tegangan dalam suatu sistem ketika kondisi beban berubah atau terjadi gangguan [3]. Pemadaman listrik dapat mempengaruhi atau merusak sistem tenaga. Ada berbagai jenis kesalahan, seperti B. Puncak dan penurunan tegangan [4]. Jika gangguan tegangan ini dihubungkan ke perangkat listrik atau elektronik dan batas tegangan pengenal yang diizinkan terlampaui, gangguan tersebut dapat mempengaruhi kinerja perangkat atau bahkan merusaknya. Dan gangguan merugikan produsen seperti halnya konsumen. Regulasi distribusi mendefinisikan undervoltage sebagai tegangan normal -10° dan tegangan lebih sebagai tegangan normal $+5^\circ$ [5].

D. Rugi-Rugi Daya Listrik

Dalam suatu jaringan distribusi, jumlah energi listrik yang sampai ke konsumen tidak sama dengan jumlah energi listrik yang dihasilkan karena kehilangan energi. disebabkan oleh berbagai faktor seperti B. Jarak antara generator dan konsumen, kerugian dan penuaan sistem kelistrikan di jaringan. Rugi-rugi pada jaringan distribusi juga disebabkan oleh ketidakseimbangan beban antara ketiga fasa sistem, panas yang dihasilkan oleh penghantar fasa dan transformator, dan panas yang dihasilkan oleh sambungan penghantar yang buruk (kehilangan kontak). Berdasarkan nomor SPLN. Nilai rugi daya untuk mengevaluasi keandalan sistem tidak boleh melebihi 10 ri

daya yang disuplai. [10] [6]. Rugi daya satu fasa dinyatakan dalam persamaan di bawah ini:

$$\Delta P = I^2 \times R \text{ (Watt)}$$

Dimana :

ΔP = Rugi daya pada jaringan (Watt)

I = Arus beban pada jaringan

R = Tahanan murni (Ohm)

Tingkat kehilangan daya dalam suatu jaringan tergantung pada tingkat pembatasan jaringan dan arus beban [11]. Untuk memilih tingkat rugi-rugi daya pada jaringan 3 fasa dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut::

$$\Delta P = 3 \times I^2 \times R \text{ (Watt)}$$

Rugi-rugi daya juga dapat menentukan efisiensi daya pada sistem[10]. Untuk menentukan besarnya efisiensi daya dapat menggunakan persamaan berikut :

$$\text{Rugi-rugi daya (\%)} = \frac{\Delta S}{S \text{ kirim}} \times 100\%$$

E. Kapasitor

Kapasitor merupakan komponen elektronika yang dapat menyimpan muatan listrik dan umumnya memiliki beda fasa (tegangan arus lead) mendekati 90 dibandingkan dengan induktor. Oleh karena itu, kapasitor menghilangkan daya lebih sedikit daripada induktor (untuk nilai yang sama). Kapasitor terdiri dari beberapa jenis tergantung pada bahan dielektrik dan dapat dengan mudah dibagi menjadi tiga bagian: kapasitor elektrostatik, kapasitor elektrolitik dan kapasitor elektrokimia.

Kapasitor tegangan tinggi adalah perangkat yang banyak digunakan dalam sistem tegangan tinggi. Kapasitor dapat diklasifikasikan menjadi kapasitor catu daya, kapasitor eksperimental tegangan tinggi, dan kapasitor pembangkit frekuensi tinggi sesuai dengan aplikasinya.

Memasang kapasitor di saluran listrik distribusi besar sangat sulit karena Anda perlu mengetahui seberapa baik ukuran kapasitor untuk meningkatkan faktor daya dan mengurangi rugi daya. Secara umum fungsi kapasitor pada sistem tenaga adalah :

- Menyediakan daya reaktif untuk memaksimalkan konsumsi daya gabungan (KVA).
- Peningkatan faktor daya.
- Mengurangi jatuh tegangan.
- Hindari transformator yang kelebihan beban.
- Memberikan daya tambahan. • Hindari arus kabel dan kenaikan suhu.
- Hemat energi/efisiensi

F. Studi Aliran Daya

Studi aliran daya sistem tenaga adalah studi yang mengungkapkan daya dan aliran daya (aktif dan reaktif) dalam kondisi tertentu ketika sistem beroperasi dalam keadaan tunak. Tujuan utama studi aliran daya adalah untuk mengetahui besarnya tegangan, sudut/vektor tegangan, aliran daya aktif dan reaktif pada saluran transmisi, dan rugi-rugi daya yang terjadi pada jaringan tenaga listrik. Setiap titik/bus dalam sistem tenaga memiliki daya aktif P, daya reaktif Q, tegangan E, dan sudut fasa tegangan. Oleh karena itu, setiap bus memiliki empat besaran: P, Q, E, dan . Saat melihat aliran gaya, kita mengetahui 2 dari 4 besaran dan perlu menemukan 2. Berdasarkan uraian di atas, bus dibagi menjadi tiga jenis. [9]:

- Bus berayun (Slack bus)
Komponen yang diketahui dari bus ini adalah besar tegangan dan sudut fasa, tetapi daya aktif P dan daya reaktif Q tidak diketahui. Umumnya, dalam studi pasang surut hanya ada satu bus beresilasi.
- Bus generator (P-V bus)
Komponen yang diketahui dari bus ini adalah besar tegangan dan daya aktif P, tetapi sudut fasa tegangan dan daya reaktif Q tidak diketahui.
- Bus beban (P-Q bus)
Dalam bus ini perbedaan daya antara daya yang dihasilkan oleh generator dan daya yang dikonsumsi oleh beban diketahui.

G. Metode Newton-Raphson

Metode Newton-Raphson menentukan besaran dan sudut tegangan pada slack bus, sehingga perhitungan iteratif untuk menentukan tegangan mengabaikan slack bus. Dalam generator bus, hanya daya reaktif yang dihitung pada setiap iterasi karena daya aktif dan level tegangan tetap. Dalam analisis aliran daya ada dua persamaan yang perlu diselesaikan untuk setiap bus. Pada akhir iterasi Newton-Raphson, nilai yang dihitung dari daya aktif (Pp) dan daya reaktif (Qp) harus dibandingkan dengan nilai yang diberikan menggunakan rumus berikut [10]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_n \\ \dots \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_1}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_1|} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_n \\ \dots \\ \frac{\Delta V}{|V_1|} \\ \frac{\Delta V}{|V_n|} \end{bmatrix}$$

Proses berulang ini berlanjut hingga perubahandayanaktif (ΔP_p) dan perubahan daya reaktif (ΔQ_p) mencapai nilai konvergensi (ε). Secara umum, nilai konvergensi antaran0,01 dan 0,0001. Jacobian terdiri dari turunan parsial P dan Q sehubungan dengan masing-masing variabel tegangan, besaran, dan sudut fasa. Dengan menggunakan besaran tegangan dan sudut fasa yang diasumsikan serta daya aktif dan reaktif yang dihitung, dapatkan elemen Jacobian.. Setelah itu akan diperoleh harga dari perubahan besar tegangan, $\frac{\Delta|\Delta|}{\Delta}$, dan perubahan sudut fasa tegangan, $\Delta\delta$. Secara umum persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{vmatrix} H & N \\ J & L \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta\theta \\ \frac{\Delta P}{V} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{vmatrix}$$

ΔP dan ΔQ adalah ketidaksesuaian daya antara daya beban yang diketahui dan daya yang dihitung. Rumus daya yang dihitung adalah:

$$P_p = |V_p| \left| \sum_q^n = 1 (G_{pq} \cos\theta_{pq} + B_{pq} \sin\theta_{pq}) |V_p| \right|$$

$$Q_p = |V_p| \left| \sum_q^n = 1 (G_{pq} \sin\theta_{pq} + B_{pq} \cos\theta_{pq}) |V_p| \right|$$

Sehingga selisih daya (power mismatch) yang terjadi adalah:

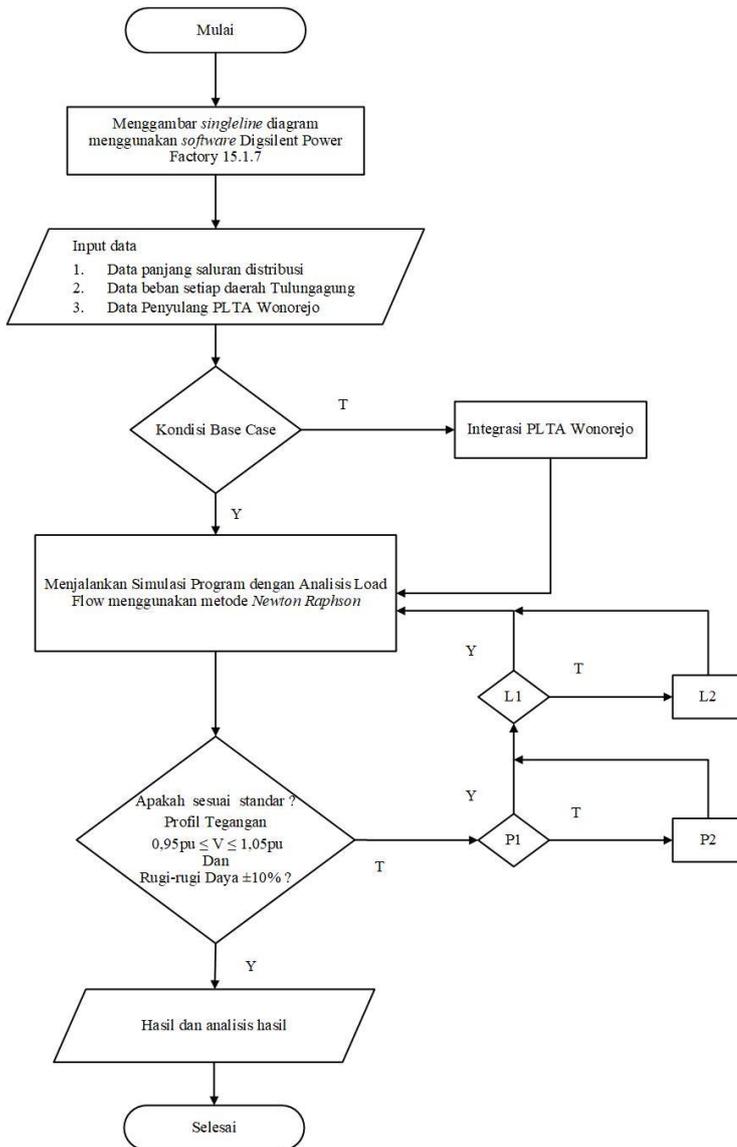
$$\Delta P_p = P_p^{Spec} - |V_p| \left| \sum_q^n = 1 (G_{pq} \cos\theta_{pq} + B_{pq} \sin\theta_{pq}) |V_p| \right|$$

$$\Delta Q_p = Q_p^{Spec} - |V_p| \left| \sum_q^n = 1 (G_{pq} \sin\theta_{pq} + B_{pq} \cos\theta_{pq}) |V_p| \right|$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

Simulasi dalam penelitian yaitu menggunakan data *real* sistem kelistrikan 20 kV Tulungagung, Jawa Timur.

A. Algoritma Penyelesaian Masalah



Gambar 3 Diagram Alir (flowchart) Pemecahan Masalah

Pemasangan dilakukan dengan kapasitas kapasitor bank mulai terkecil sampai kapasitas terbesar yang diasumsikan ($P_1 < P_2 < P_n$) di pasang pada masing masing bus beban dengan nilai kritis yang diasumsikan (L_1, L_2, L_n) secara bergantian, kemudian dilakukan analisis untuk melihat lokasi terbaik.

1. Mulai
2. Menggambar sistem kelistrikan yang akan diuji pada software DigSilent PowerFactory 15.1

3. Input data panjang saluran, data beban dan data PLTA pada software DigSilent PowerFactory 15.1
4. Simulasi pada kondisi *base case* system jika Ya menuju ke langkah 6. Jika tidak lanjut ke langkah 5.
5. Jika Tidak, dilakukan integrasi PLTA Wonorejo dari kondisi *base case* kemudian diteruskan ke langkah 6.
6. Simulasi Load Flow untuk melihat aliran daya pada sistem
7. Apakah profil tegangan kurang dari sama dengan 1,05 pu dan lebih dari sama dengan 0.95 pu dan rugi-rugi daya $\pm 10\%$. Jika Ya menuju langkah 12, namun jika Tidak lanjut ke langkah 8.
8. Penambahan kapasitor bank dan di check apakah pemasangan kapasito bank dengan kapasitas nominal terkecil (P_1) jika Ya ke langkah 9 jika Tidak menuju langkah 11
9. Penempatan kapasitor bank pada bus beban L_1 yang bernilai kritis , check nilai profil tegangan jika Ya menuju langkah 4, jika Tidak menuju langkah 10
10. Penempatan kapasitor bank pada bus beban L_2 yang satu saluran dengan busa yang bernilai kritis, check nilai profil tegangan menuju langkah 4
11. Jika profil tegangan masih dibawah standart yang telah ditentukan maka akan dilakukan penambahan kapasitas kapasitor bank $P_2 > P_1$, langsung menuju ke langkah 9-10-4
12. Hasil dan Analisis Hasil
13. Selesai

B. Algoritma Pengujian

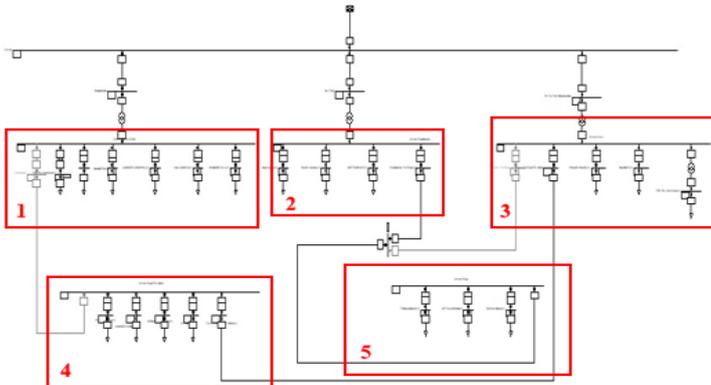
1. Pengujian dilakukan dengan kondisi *base case*, yaitu kondisi dimana sistem kelistrikan belum terintegrasi oleh PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) Wonorejo, kemudian diketahui nilai profil tegangan dari tiap bus beban pada distribusi 20kV Tulungagung.
2. Pengujian dilakukan dengan penambahan atau integrasi PLTA Wonorejo dari kondisi *base case*, sehingga terlihat nilai profil tegangan mengalami kenaikan pada bus beban jaringan distribusi 20kV Tulungagung.
3. Pengujian dengan penambahan kapasitor jika ada nilai profil tegangan yang turun pada saluran distribusi 20kV di Kabupaten Tulungagung

IV. HASIL DAN ANALISIS

Tabel 1. Hasil Simulasi Kondis Basecase

A. Simulasi pada sistem distribusi 20kV Tulungagung

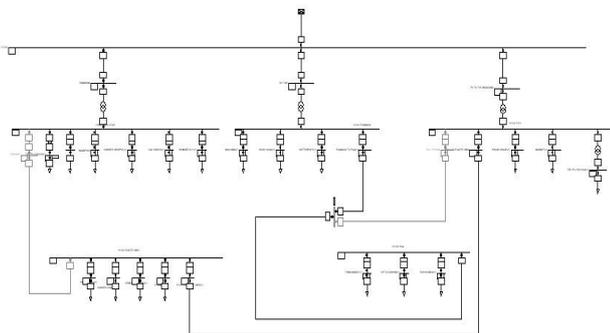
Melakukan simulasi aliran daya (Load Flow) pada sistem distribusi 20kV Tulungagung yang terdiri dari 5 penyulang, 31 bus dan 30 saluran yang terhubung dengan pusat-pusat beban, serta data panjang saluran dan beban. Tujuan dilakukan simulasi ini untuk mengetahui kondisi sistem tersebut apakah sudah berjalan dengan normal atau belum. Berikut adalah Single Line Diagram (SLD) jaringan sistem distribusi 20kV Tulungagung yang terintegrasi oleh PLTA Wonorejo.



Gambar 4 Single Line Diagram Sistem Distribusi 20kV Tulungagung yang Terintegrasi dengan PLTA Wonorejo

B. Pengujian Simulasi Sistem 20kV Tulungagung Kondisi Basecase

Simulasi awal pengujian load flow pada sistem jaringan distribusi 20kV Tulungagung, sebelum adanya integrasi PLTA Wonorejo disimulasikan menggunakan software DigSILENT PowerFactory 15.1.7 yang dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Load Flow Single Line Diagram Sistem Jaringan Distribusi 20kV Tulungagung Kondisi Basecase

Dengan memasukkan parameter-parameter beban, panjang saluran, serta supply daya sehingga didapatkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada tabel 1.

No.	Bus	Rtd.v [kV]	ProfilTegangan [p.u]
1.	SENDANG MULYO(2)	20	0.928
2.	PAGERWOJO(2)	20	0.930
3.	A YANI(1)	20	0.945
4.	SUMBER RINGIN(2)	20	0.945
5.	20 KV EGATELINDO	20	0.946
6.	FUJI TO EGATELINDO(2)	20	0.952
7.	TUNGGANGRI(1)	20	0.978
8.	FUJI TO EGATELINDO	20	0.983
9.	BOYOLANGU(1)	20	0.985
10.	SETIA KAWAN(1)	20	0.986
11.	SUPRIYADI(1)	20	0.989
12.	20 KV EGA	20	0.987
13.	KALIDAWIR(2)	20	0.991
14.	WONOREJO 1(2)	20	0.991
15.	NGUNUT(2)	20	0.991
16.	SUMBER GEMPOL(2)	20	0.992
17.	METROPOLE(1)	20	0.991
18.	NGANTRU(1)	20	0.993
19.	PASAR WAGE(2)	20	0.993
20.	TO EGA	20	0.991
21.	20KV GOLD STAR	20	0.995
22.	EGANUSA TO EGA(1)	20	0.994
23.	NGUJANG(1)	20	0.996
24.	RSUD ISKAK(1)	20	0.996
25.	20 KV FUJI	20	0.997
26.	20 KV EGANUSA	20	0.997

Dari Tabel 1, dapat diketahui ada 5 wilayah yang mengalami *under voltage* yaitu wilayah Sendang Mulyo dengan 0.928 pu, Pagerwojo dengan 0.930 pu, A Yani dengan 0.945 pu, Sumber Ringin dengan 0.945 pu, dan Egatelindo dengan 0.946 pu yang seharusnya batas normal profil tegangan lebih dari samadengan 0.95 pu dan kurang dari sama dengan 1.05 pu di perlihatkan pada Tabel 2 dan rugi daya pada Tabel 3.

Tabel 2. Wilayah Yang Mengalami Under Voltage

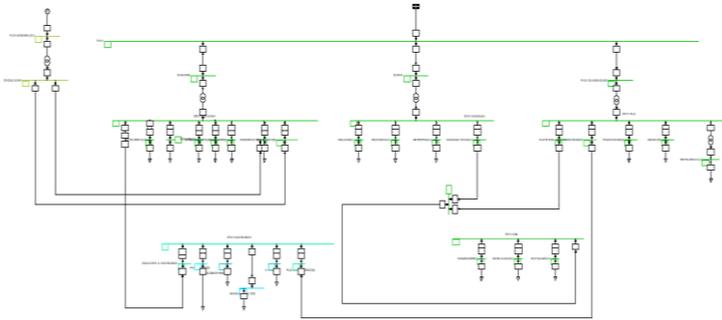
BUS	WILAYAH	PROFIL TEGANGAN
1.	SENDANG MULYO	0.928
2.	PAGERWOJO	0.930
3.	A YANI	0.945
4.	SUMBER RINGIN	0.945
5.	20KV EGATELINDO	0.946

Tabel 3. Tabel Rugi-Rugi Daya Pada Saat Kondisi Basecase

Kondisi	Plosses (MW)	Qlosses (MVar)	Rugi Daya (%)
BASE CASE	0.7	0.01	0.23 %

C. Pengujian Simulasi Sistem 20kV Tulungagung Setelah Integrasi PLTA Wonorejo

Simulasi ini juga dilakukan pengujian load flow pada sistem jaringan distribusi 20kV Tulungagung, setelah adanya integrasi PLTA Wonorejo disimulasikan menggunakan software DigSILENT PowerFactory 15.1.7 yang dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Load Flow Single Line Diagram Sistem Jaringan Distribusi 20kV Tulungagung setelah integrasi PLTA Wonorejo

Dari simulasi load flow yang telah dilakukan didapatkan hasil yang ditunjukkan dengan Tabel 3 berikut.

Tabel 4. Hasil Simulasi Load Flow Setelah Integrasi PLTA wonorejo pada Sistem 20kV Tulungagung

No.	Bus	Rtd.v [kV]	ProfilTegangan [p.u]
1.	SENDANG MULYO(2)	20	0.933
2.	PAGERWOJO(2)	20	0.936
3.	A YANI(1)	20	0.950
4.	SUMBER RINGIN(2)	20	0.951
5.	20 KV EGATELINDO	20	0.952
6.	FUJI TO EGATELINDO(2)	20	0.957
7.	TUNGGANGRI(1)	20	0.978
8.	FUJI TO EGATELINDO	20	0.983
9.	BOYOLANGU(1)	20	0.985
10.	SETIA KAWAN(1)	20	0.986
11.	SUPRIYADI(1)	20	0.996
12.	20 KV EGA	20	0.987
13.	KALIDAWIR(2)	20	0.998
14.	WONOREJO 1(2)	20	1.00
15.	NGUNUT(2)	20	0.991
16.	SUMBER GEMPOL(2)	20	0.999
17.	METROPOLE(1)	20	0.991
18.	NGANTRU(1)	20	1.00
19.	PASAR WAGE(2)	20	0.993
20.	TO EGA	20	0.991
21.	20KV GOLD STAR	20	1.00
22.	EGANUSA TO EGA(1)	20	0.994
23.	NGUJANG(1)	20	0.996
24.	RSUD ISKAK(1)	20	0.996
25.	20 KV FUJI	20	0.997
26.	20 KV EGANUSA	20	0.997

Dari tabel 3, dapat diketahui pada wilayah yang mengalami *under voltage* sebelum adanya integrasi PLTA Wonorejo mengalami kenaikan profil tegangan namun masih ada profil tegangan yang masih dibawah standar yang telah di tentukan. Perbandingan tersebut dinyatakan pada Tabel 4. Dan total rugi daya pada kondisi adanya integrasi PLTA Wonorejo diperlihatkan pada tabel 5.

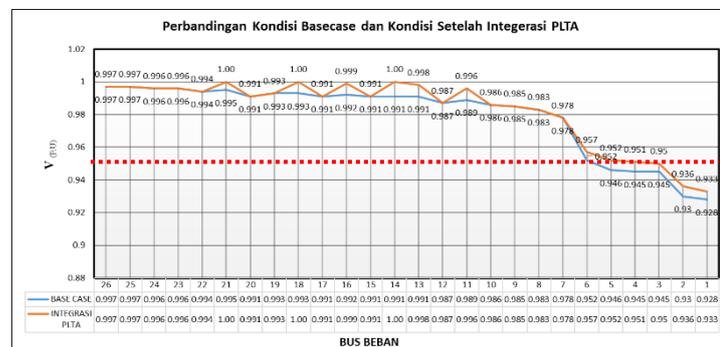
Tabel 5. Perbandingan Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Integrasi PLTA Wonorejo

BUS	WILAYAH	PROFIL TEGANGAN (pu)	
		BASE CASE	INTEGRASI PLTA
1.	SENDANG MULYO	0.928	0.933
2.	PAGERWOJO	0.930	0.936
3.	A YANI	0.945	0.950
4.	SUMBER RINGIN	0.945	0.951
5.	20KV EGATELINDO	0.946	0.952

Tabel 6.. Tabel Rugi-Rugi Daya Pada Saat Kondisi Terintegrasi PLTA Wonorejo

Kondisi	Plosses (MW)	Qlosses (MVar)	Rugi Daya (%)
INTEGRASI PLTA	0.1	0.2	3%

Perbandinga kedua hasil simulasi sebelum dan sesudah integrasi PLTA Wonorejo 1x6.5MW dapat dilihat pada Gambar 7. dengan keterangan garis berwarna biru sebelum adanya integrasi PLTA Wonorejo dan garis berwarna oranye setelah adanya integrasi PLTA Wonorejo.

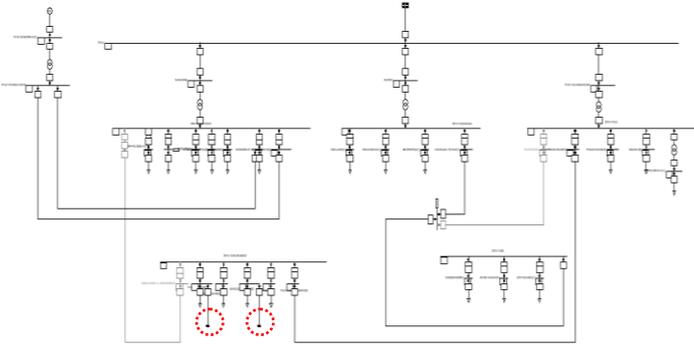


Gambar 7. Grafik Perbandingan Sebelum dan Sesudah Integrasi PLTA Wonorejo 1x6.5 MW

D. Simulasi Pemasangan Unit Kapasitor Untuk Perbaikan Profil Tegangan

Pada simulasi pemasangan kapasitor menggunakan untuk memperbaiki profil tegangan yang masih mengalami *undervoltage*. pada percobaan ini membahas perbandingan penempatan kapasitor pada bus yang mengalami *under voltage*.

a. Pemasangan Kapasitor Bank Pada Busbar Kritis Sebesar 61.2KVar dan 68KVar



Gambar 8. Simulasi Pemasangan Kapasitor Bank Pada Busbar Gold Star

Setelah dilakukan simulasi load flow ke 3 didapatkan hasil yang ditunjukkan dengan tabel 7 dan hasil rugi-rugi daya yang ditunjukkan dengan tabel 8 berikut.

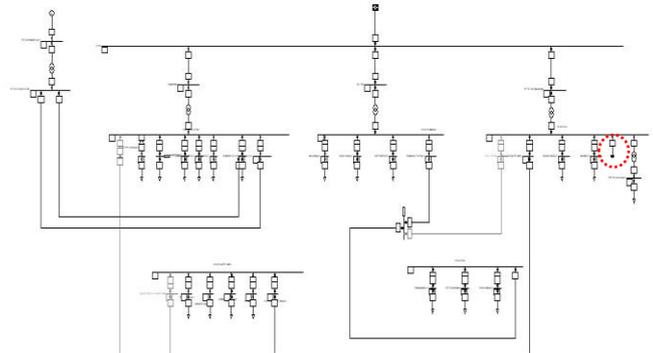
Tabel 7. Hasil Simulasi Load Flow Stelah Pemasangan Kapasitor Pada Bus Kritis

No.	Bus	Rtd.v [kV]	ProfilTegangan [p.u]
1.	SENDANG MULYO	20	0.951
2.	PAGERWOJO	20	0.954
3.	A YANI	20	0.960
4.	SUMBER RINGIN	20	0.961
5.	20 KV EGATELINDO	20	0.962
6.	FUJI TO EGATELINDO	20	0.965
7.	TUNGGANGRI	20	0.978
8.	FUJI TO EGATELINDO	20	0.987
9.	BOYOLANGU	20	0.985
10.	SETIA KAWAN	20	0.986
11.	SUPRIYADI	20	0.996
12.	20 KV EGA	20	0.987
13.	KALIDAWIR	20	0.998
14.	WONOREJO 1	20	1.016
15.	NGUNUT	20	0.992
16.	SUMBER GEMPOL	20	0.999
17.	METROPOLE	20	0.991
18.	NGANTRU	20	1
19.	PASAR WAGE	20	0.994
20.	TO EGA	20	0.991
21.	20KV GOLD STAR	20	1.002
22.	EGANUSA TO EGA	20	0.994
23.	NGUJANG	20	0.996
24.	RSUD ISKAK	20	0.996
25.	20 KV FUJI	20	0.997
26.	20 KV EGANUSA	20	0.997

Tabel 8. Tabel Rugi-Rugi Daya Pada Saat Penambahan Unit Kapasitor Pada Bus Yang Mengalami Undervoltage

Kondisi	Plosses (MW)	Qlosses (MVar)	Rugi Daya (%)
KAPASITOR PADA BUS UNDERVOLTAGE	0.9	0.02	3.1%

b. Pemasangan Kapasitor Pada Bus Sejalur Dengan Bus Kritis



Gambar 9. Simulasi Pemasangan Kapasitor Bank Pada Busbar Fuji

Pada percobaan keempat pemasangan kapasitor, ditempatkan pada busbar yang sejalur dengan busbar yang mengalami *undervoltage* dengan kapasitas kapascitorbank sebesar 20 Mvar. Sehingga didapatkan data hasil simulasi yang ditunjukkan pada Tabel 9, dan rugi daya ditunjukkan dengan tabel 10 berikut.

Tabel 9. Hasil Simulasi Load Flow Stelah Pemasangan Kapasitor Bank Pada Busbar Fuji

No.	Bus	Rtd.v [kV]	ProfilTegangan [p.u]
1.	SENDANG MULYO	20	0.950
2.	PAGERWOJO	20	0.952
3.	A YANI	20	0.966
4.	SUMBER RINGIN	20	0.967
5.	20 KV EGATELINDO	20	0.968
6.	FUJI TO EGATELINDO	20	0.973
7.	TUNGGANGRI	20	0.978
8.	FUJI TO EGATELINDO	20	1.004
9.	BOYOLANGU	20	0.985
10.	SETIA KAWAN	20	0.986
11.	SUPRIYADI	20	0.996
12.	20 KV EGA	20	0.997
13.	KALIDAWIR	20	0.998
14.	WONOREJO 1	20	1.016
15.	NGUNUT	20	1.012
16.	SUMBER GEMPOL	20	0.999
17.	METROPOLE	20	0.991
18.	NGANTRU	20	1.000
19.	PASAR WAGE	20	1.014
20.	TO EGA	20	0.991
21.	20KV GOLD STAR	20	1.002
22.	EGANUSA TO EGA	20	0.994
23.	NGUJANG	20	0.996
24.	RSUD ISKAK	20	0.996
25.	20 KV FUJI	20	1.017
26.	20 KV EGANUSA	20	0.997

Tabel 10. Tabel Rugi-Rugi Daya Pada Saat Penambahan Unit Kapasitor Pada Bus Yang Sejalur Dengan Bus Undervoltage

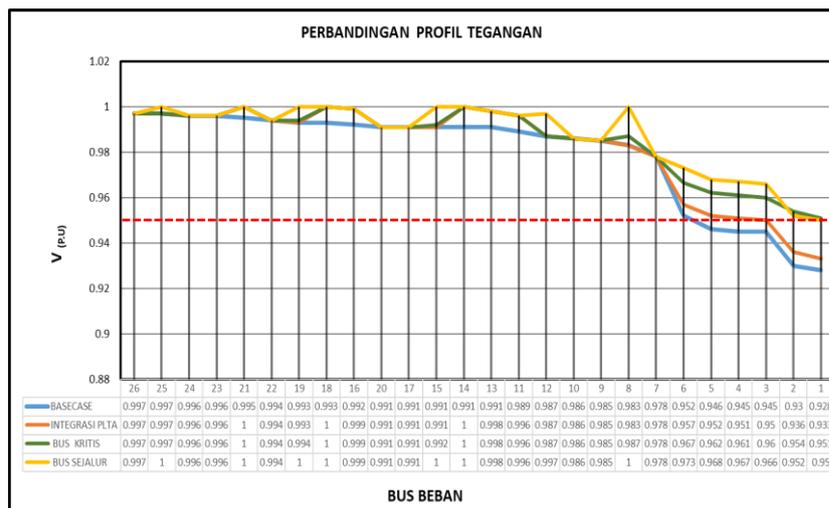
Kondisi	Plosses (MW)	Qlosses (MVar)	Rugi Daya (%)
KAPASITOR PADA BUS SEJALUR	1.13	0.47	4.1

Dari tabel 1, tabel 4, tabel 7, dan tabel 9. dapat diketahui pada 5 wilayah yang mengalami *under voltage* mengalami kenaikan profil tegangan dengan terpasangnya kapasitor. Berikut perbandingan pemasangan kapasitor yang dinyatakan pada tabel 11 dan lebih jelasnya diperlihatkan pada gambar 10.

Tabel 11. Perbandingan Profil Tegangan Setelah Pemasangan Kapasitor pada Busbar Egatelindo dan Busbar Fuji

BUS	LOKASI	BASECASE (p.u)	INTEGRASI PLTA (p.u)	KAPASITOR BUS KRITIS (p.u)	KAPASITOR BUS SEJALUR (p.u)
1	Sendang Mulyo	0.928	0.933	0.951	0.950
2	Pagerwojo	0.930	0.936	0.954	0.952
3	A Yani	0.945	0.950	0.960	0.966
4	Sumber Ringin	0.945	0.951	0.961	0.967
5	20KV Egatelindo	0.946	0.952	0.962	0.968

Gambar 11. Perbandingan Keempat Percobaan



V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

- Dari simulasi loadflow yang di lakukan menggunakan software DigSILENT PowerFactory 15.1 profil tegangan yang muncul sebelum adanya integrasi PLTA Wonorejo pada sistem distribusi 20kV Tulungagung rata-rata 0.983 pu. dan ada 5 wilayah yang mengalami penurunan profil tegangan sebesar 0.928pu pada wilayah Sendang Mulyo, 0.930pu pada wilayah Pagerwojo, 0.945 pu pada wilayah A Yani, 0.945 pu pada wilayah Sumber Ringin, dan 0.946 pu pada bus 20kV Egatelindo.
- Setelah dilakukannya integrasi PLTA Wonorejo 1x6.5 MW pada sistem distribusi 20kV Tulungagung rata-rata profil tegangan naik 0.007 pu menjadi 0.999 pu. Dan pada daerah yang mengalami under voltage juga mengalami kenaikan masing-masing sebesar 0.005pu menjadi 0.933pu pada Sendang Mulyo, 0.936pu pada Pagerwojo, 0.950pu pada A Yani, 0.951pu pada Sumber Ringin, dan 0.952pu pada 20kV Egatelindo.
- Dengan ditambahkan kapasitor daerah yang mengalami undervoltage setelah adanya integrasi PLTA Wonorejo pada percobaan ke 3 profil tegangan mengalami kenaikan sebesar 0.015 pu. Sehingga profil tegangan naik menjadi 0.951pu pada Sendang Mulyo, 0.954pu pada Pagerwojo, 0.960pu pada A Yani, 0.961pu pada Sumber Ringin, dan 0.962pu pada 20kV Egatelindo.
- Pada percobaan ke 4 dengan penambahan kapasitor 20MVar didapati kenaikan profil tegangan pada bus yang mengalami undervoltage setelah integrasi PLTA Wonorejo rata-rata sebesar 0.016pu. Sehingga profil tegangan menjadi 0.950pu pada Sendang Mulyo, 0.952pu pada Pagerwojo, 0.966pu pada A Yani, 0.967pu pada Sumber Ringin, dan 0.968pu pada 20kV Egatelindo.
- Dari keempat simulasi yang telah dilakukan didapatkan persentase rugi rugi daya. Pada kondisi base case rugi rugi daya yang diperoleh sebesar 2.3%, pada kondisi setelah integrasi PLTA Wonorejo rugi-rugi daya naik sebesar 3%, pada kondisi penambahan unit kapasitor pada bus yang mengalami undervoltage diadapati rugi-rugi daya naik sebesar 3.1%, dan pada kondisi penambahan kapasitor 20MVar pada bus yang sejalur dengan bus yang mengalami undervoltage naik hingga 4.1%. Dapat disimpulkan dengan bertambahnya daya reaktif dan daya aktif maka rugi-rugi daya juga akan bertambah dan rugi-rugi daya pada simulasi ini sesuai standart PLN yaitu kurang dari sama dengan 10%.

B. Saran

Optimasi penentuan lokasi pemasangan dan kapasitas Kapasitor yang lebih tepat agar lebih efisien dan optimal sistem kerja dari Kapasitor tersebut terhadap jaringan distribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ninla Elmawati Falabiba *et al.*, “Jaringan Distribusi,” *Pap. Knowl. . Towar. a Media Hist. Doc.*, vol. 5, no. 2, pp. 40–51, 2014.
- [2] “Bendungan Wonorejo,” p. 19615636, 2001.
- [3] M. I. Mashudi, A. U. Krismanto, and N. P. Agustini, “Analisa Pengaruh Variasi Beban Terhadap Profil Tegangan Pada Feeder GI Polehan Distribusi 20 kV PLN Kota Malang,” pp. 367–377.
- [4] B. M. Arsyad, A. Sofwan, and A. Nugroho, “PERANCANGAN SISTEM KONTROL OVER / UNDER VOLTAGE RELAY BERBASIS MIKROKONTROLER PADA SALURAN TEGANGAN 220VAC,” no. 1, pp. 25–32, 2019.
- [5] PT. PLN, “Standar-Standar Tegangan,” *Standar Perusah. List. Negara*, p. 5, 1995.
- [6] Y. R. Pranata, “Analisis Batas Kestabilan Tegangan Pada Sistem Interkoneksi Jawa Bali 500Kv Dengan Pemasangan Svc Pada Tahun 2024 Analysis of Voltage Stability Limit in Java Bali 500Kv Interconnection System With Presencing of Svc in 2024,” 2017.
- [7] A. Abadi and . S., “Analisa Perbaikan Profil Tegangan Sistem Tenaga Listrik Sumbar Menggunakan Kapasitor Bank dan Tap Transformator,” *J. Nas. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 2, p. 158, 2015, doi: 10.25077/jnte.v4n2.145.2015.
- [8] S. Abimanyu, “Perbaikan Profil Tegangan Menggunakan OCP Untuk Penempatan Kapasitor Pada Sistem Kelistrikan PT . Kutai Timber Indonesia Probolinggo,” *ITN Repos.*, 2019.
- [9] J. J. W. S. G. W. C. Grainger, “Power-Flow Solutions,” in *Power System Analysis*, McGraw-Hill Companies, 1994, pp. 342–356.
- [10] J. J. W. S. G. W. C. Grainger, “Power-Flow Solutios,” in *Power System Analysis*, McGraw-Hill Companies, 1994, pp. 332–333.

BIODATA PENULIS



Nama Arindi Dara Ayu Primayanti, lahir tanggal 11 bulan Mei tahun 2000 di Kabupaten Tulungagung, Jawa Timur. Pada tahun 2006-2012 menempuh pendidikan Sekolah Dasar (SD) di SDN Balerejo 02, pada tahun 2013-2015 melanjutkan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPN 04 Tulungagung, pada tahun 2016-2018 melanjutkan sekolah di Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 01 Kauman, dan pada tahun 2018 memulai pendidika Perguruan Tinggi Swasta (PTS) di Institut Teknologi Nasional Malang, Jawa Timur mengambil jurusan Teknik Elektro S-1 konsentrasi Energi Listrik. Bergabung sebagai asisten laboratorium dan pernah menjabat menjadi ketua laboratorium Konversi Energi Elektrik (KEE) Teknik Elektro S-1, Institut Teknologi Nasional Malang tahun 2021.

Email : arindidarra@gmail.com

