

SKRIPSI

**ANALISIS RUGI-RUGI DAYA DAN JATUH TEGANGAN
DENGAN PENAMBAHAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
SURYA (PLTS) PADA SISTEM KELISTRIKAN PULAU
TOMIA KABUPATEN WAKATOBI**

Disusun dan diajukan oleh:

**AL FIQHUL HAQH JR
D041201011**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS RUGI-RUGI DAYA DAN JATUH TEGANGAN DENGAN PENAMBAHAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) PADA SISTEM KELISTRIKAN PULAU TOMIA KABUPATEN WAKATOBI

Disusun dan diajukan oleh

Al Fiqhul Haqh JR

D041 20 1011

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 20 November 2024
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Ir. Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197703222005011001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. Muzal Arya Samman, ST, MT, IPU, AseanEng, ACPE
NIP. 197506052002121004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Al Fiqhul Haqh JR

NIM : D041201011

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

ANALISIS RUGI-RUGI DAYA DAN JATUH TEGANGAN DENGAN PENAMBAHAN PEMABNGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) PADA SISTEM KELISTRIKAN PULAU TOMIA KABUPATEN WAKATOBI

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala risiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

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

Gowa, 25 November 2024

Yang Menyatakan



Al Fiqhul Haqh JR

ABSTRAK

AL FIQHUL HAQH JR. Analisis Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Dengan Penambahan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada Sistem Kelistrikan Pulau Tomia Kabupaten Wakatobi (dibimbing oleh Yusri Syam Akil).

Pendistribusian listrik dilakukan melalui sistem distribusi yang menghubungkan pembangkit dengan konsumen. Namun di Indonesia, tantangan seperti kondisi kepulauan membuat distribusi menjadi kompleks. Penggunaan Distributed Generation (DG) berupa PLTS seperti di Pulau Tomia, dapat meningkatkan keandalan pasokan, mengurangi kerugian daya, dan memperbaiki profil tegangan. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kerugian daya dan jatuh tegangan di Pulau Tomia sebelum dan sesudah penambahan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), serta penempatan PLTS yang optimal. Penelitian ini memberikan manfaat dengan membantu mengidentifikasi dan mengurangi kerugian daya serta jatuh tegangan pada sistem kelistrikan Pulau Tomia melalui pengoperasian PLTS. Adapun metode penelitian ini menggunakan analisis untuk menghitung nilai-nilai yang ada pada jaringan distribusi dan penggunaan metode *Power Loss Index* untuk menentukan lokasi optimal penempatan PLTS. Dalam melakukan analisis terdapat skenario yang dibandingkan, yaitu skenario jaringan kondisi eksisting, kondisi pengoperasian PLTS di lapangan, dan kondisi Penempatan PLTS metode *Power Loss Index*. Sebelum penambahan PLTS, sistem kelistrikan di Pulau Tomia mengalami rugi daya aktif sebesar 112,49 kW dan rugi daya reaktif sebesar 107,6 kVAr. Untuk nilai jatuh tegangan terdapat beberapa bus profil tegangannya dibawah batas dianjurkan sebesar 5%. Metode *Power Loss Index* (PLI) kemudian digunakan untuk menentukan lokasi optimal PLTS, yang berhasil menurunkan rugi daya aktif sebesar 27,02% hingga 82,08 kW dan rugi daya reaktif sebesar 32,35% hingga 72,41 kVAr dengan jatuh tegangan yang profil tegangannya diatas 5%. Dibandingkan dengan pengoperasian PLTS di lapangan yang menghasilkan rugi daya aktif sebesar 28,05% hingga 80,9 kW dan rugi daya reaktif sebesar 33,17% hingga 71,53 kVAr yang profil tegangannya juga diatas 5%, metode PLI tidak terbukti lebih efektif dalam mengurangi rugi daya dan jatuh tegangan, sehingga metode pengoperasian PLTS di lapangan menjadi pendekatan yang lebih unggul. Metode yang unggul tersebut digunakan untuk skenario penambahan beban. Penambahan beban di Pulau Tomia meningkatkan rugi daya dari 80,9 kW dan 71,53 kVAr menjadi 115,4 kW dan 126,63 kVAr setelah 25% di tahun kelima. Beberapa bus mengalami tegangan di bawah standar, sehingga penambahan beban sebaiknya dibatasi hingga 20% di tahun keempat.

Kata Kunci : Rugi-Rugi Daya, Jatuh Tegangan, Penempatan PLTS, PLI

ABSTRACT

AL FIQHUL HAQH JR. Analysis of Power Losses and Voltage Drops with the Addition of Solar Power Plants (PLTS) to the Electrical System of Tomia Island, Wakatobi Regency (Supervised by Yusri Syam Akil).

Electricity distribution is carried out through a distribution system that connects power plants to consumers. However, in Indonesia, challenges such as archipelagic conditions make distribution more complex. The use of Distributed Generation (DG), such as solar power plants (PLTS) in Tomia Island, can enhance supply reliability, reduce power losses, and improve voltage profiles. This study aims to compare power losses and voltage drops in Tomia Island before and after the addition of PLTS, as well as to determine the optimal placement of PLTS. The research provides benefits by identifying and minimizing power losses and voltage drops in Tomia Island's electrical system through PLTS operations. The methodology involves analyzing the distribution network parameters and employing the Power Loss Index (PLI) method to determine the optimal placement of PLTS. Three scenarios were compared: the existing network condition, the operational condition of PLTS in the field, and the placement of PLTS using the Power Loss Index method. Before the addition of PLTS, the electrical system in Tomia Island experienced active power losses of 112.49 kW and reactive power losses of 107.6 kVAr. Voltage drops resulted in some buses having voltage profiles below the recommended 5% limit. Using the PLI method, the optimal PLTS placement reduced active power losses by 27.02% to 82.08 kW and reactive power losses by 32.35% to 72.41 kVAr, with voltage profiles above the 5% threshold. Comparatively, the field-operating PLTS reduced active power losses by 28.05% to 80.9 kW and reactive power losses by 33.17% to 71.53 kVAr, also achieving voltage profiles above 5%. However, the PLI method proved less effective in reducing power losses and voltage drops, making the field-operating PLTS approach the more favorable solution. This superior method was applied to the load addition scenario. Load growth on Tomia Island increased power losses from 80.9 kW and 71.53 kVAr to 115.4 kW and 126.63 kVAr after a 25% increase in the fifth year. Several buses experienced voltages below the standard, indicating that load addition should be limited to 20% by the fourth year to maintain system performance.

Keywords: Power Loss, Voltage Drops, PLTS Placement, PLI

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR SINGKATAN	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Sistem Distribusi Listrik.....	5
2.2 Tipe Jaringan Distribusi Primer.....	7
2.3 Rugi-Rugi Daya	9
2.4 Jatuh Tegangan	11
2.5 <i>Distributed Generation</i> (DG).....	13
2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).....	14
2.7 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD).....	17
2.8 Metode <i>Newton Rhapshon</i>	19
2.9 Metode <i>Power Loss Index</i>	20
BAB III METODE PENELITIAN.....	23
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	23
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	23
3.3 Teknik Pengumpulan Data.....	23
3.4 Diagram Alir.....	24
3.5 Data-Data yang Dibutuhkan.....	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27

4.1 Data dan Hasil Pengamatan	27
4.1.1 Kondisi Sistem Kelistrikan Pulau Tomia.....	27
4.1.2 Data Pembangkit Listrik.....	28
4.1.3 Data Transformator	29
4.1.4 Data Panjang Saluran	31
4.2 Analisis Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Kondisi Eksisting.....	34
4.3 Analisis Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Kondisi Pengoperasian PLTS	40
4.4 Analisis Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Kondisi Penempatan PLTS menggunakan Metode <i>Power Loss Index</i>	46
4.5 Analisis Perbandingan Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Ketiga Kondisi	55
4.6 Analisis Perbandingan Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Penambahan Beban di Kondisi Terbaik	58
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	64
5.1 Kesimpulan	64
5.2 Saran	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN.....	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Jaringan dua bus	21
Gambar 2 Lokasi penelitian di PT PLN (Persero) ULP Wangi-Wangi KP Tomia	23
Gambar 3 Skema diagram alir penelitian	24
Gambar 4 Skema diagram alir simulasi ETAP	25
Gambar 5 Single line diagram penyulang Waha-Tomia.....	27
Gambar 6 Data inputan rating kapasitas daya PLTD.....	32
Gambar 7 Data inputan jenis kabel pada pembangkit	32
Gambar 8 Data inputan rating kapasitas daya PLTS	32
Gambar 9 Data inputan rating daya trafo terpasang	32
Gambar 10 Data inputan data beban trafo	33
Gambar 11 Data inputan panjang saluran distribusi	33
Gambar 12 Data inputan jenis kawat saluran distribusi.....	33
Gambar 13 Rancangan ETAP sistem kelistrikan pulau tomia kondisi eksisting	34
Gambar 14 Rugi-rugi daya kondisi eksisting	36
Gambar 15 Grafik profil tegangan kondisi eksisting.....	38
Gambar 16 Rancangan ETAP sistem kelistrikan pulau tomia kondisi pengoperasian PLTS	40
Gambar 17 Rugi-rugi daya kondisi pengoperasian PLTS	43
Gambar 18 Grafik profil tegangan kondisi pengoperasian PLTS	45
Gambar 19 Grafik Power Loss Index setiap bus	47
Gambar 20 Rancangan ETAP sistem kelistrikan pulau tomia kondisi penempatan PLTS menggunakan metode Power Loss Index	49
Gambar 21 Rugi-rugi daya kondisi penambahan PLTS metode PLI.....	52
Gambar 22 Grafik profil tegangan kondisi penempatan PLTS metode PLI	54
Gambar 23 Grafik perbandingan setiap kondisi	55
Gambar 24 Grafik profil tegangan ketiga kondisi	57
Gambar 25 Grafik rugi-rugi daya kondisi penambahan beban	60
Gambar 26 Grafik profil tegangan penambahan beban	62

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Data pembangkit listrik	28
Tabel 2 Data panjang kabel pada pembangkit	29
Tabel 3 Data pengoperasian PLTS	29
Tabel 4 Data beban trafo	30
Tabel 5 Data panjang saluran	31
Tabel 6 Hasil Perhitungan Rugi-rugi daya kondisi eksisting	35
Tabel 7 Hasil perhitungan jatuh tegangan kondisi eksisting	37
Tabel 8 Pengoperasian PLTS	41
Tabel 9 Hasil perhitungan rugi-rugi daya kondisi pengoperasian PLTS	41
Tabel 10 Hasil perhitungan jatuh tegangan kondisi pengoperasian PLTS	44
Tabel 11 Perhitungan Power Loss Index dari setiap bus	46
Tabel 12 Nilai indeks	48
Tabel 13 Penempatan PLTS	48
Tabel 14 Hasil perhitungan rugi-rugi daya kondisi penempatan PLTS metode PLI-LS ...	50
Tabel 15 Hasil perhitungan jatuh tegangan kondisi penempatan PLTS metode PLI	53
Tabel 16 Perbandingan rugi-rugi daya ketiga kondisi	55
Tabel 17 Perbandingan jatuh tegangan ketiga kondisi	56
Tabel 18 Perbandingan sebelum dan sesudah penambahan beban	58
Tabel 19 Perbandingan rugi-rugi daya sebelum dan sesudah penambahan beban	60
Tabel 20 Perbandingan profil tegangan penambahan beban tiap bus	61

DAFTAR SINGKATAN

Singkatan	Arti dan Keterangan
DG	<i>Distributed Generation</i>
PLI	<i>Power Loss Index</i>
AAC	<i>All Aluminium Conductor</i>
AAAC	<i>All Aluminium Alloy Conductor</i>
AAAC-S	<i>All Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced</i>
XLPE	<i>Cross-Linked Polyethylene</i>
LBS	<i>Load Break Switch</i>
FCO	<i>Fused Cut-Out</i>

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Transformator	68
Lampiran 2 Data Panjang Saluran	69
Lampiran 3 Data Pembangkit	71
Lampiran 4 Pehitungan Power Loss Index	72
Lampiran 5 Perhitungan Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Kondisi Eksisting	73
Lampiran 6 Perhitungan Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Kondisi Penambahan PLTS	76
Lampiran 7 Perhitungan Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Kondisi Penempatan PLTS Metode PLI	79
Lampiran 8 Perhitungan Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Penambahan Beban 5% .	82
Lampiran 9 Perhitungan Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Penambahan Beban 10%	86
Lampiran 10 Perhitungan Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Penambahan Beban 15%	89
Lampiran 11 Perhitungan Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Penambahan Beban 20%	92
Lampiran 12 Perhitungan Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Penambahan Beban 25%	95
Lampiran 13 Gambar Sistem Kelistrikan Pulau Tomia	98

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Rabbil Alamin Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “**Analisis Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan dengan Penambahan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada Sistem Kelistrikan Pulau Tomia Kabupaten Wakatobi**”. Penyusunan tugas akhir merupakan salah satu syarat kelulusan pada pendidikan strata satu (S1) di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin sehingga penulisan tugas akhir ini tidak terlepas sebagai pemenuhan penulis untuk menyelesaikan studi sarjana.

Proses penyusunan skripsi ini telah memberikan penulis banyak pelajaran berharga, baik dalam aspek akademik maupun pengalaman pribadi. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji lebih dalam tentang pentingnya penyaluran sistem distribusi tenaga listrik, khususnya melalui pengintegrasian pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dalam mendukung pengurangan rugi-rugi daya dan jatuh tegangan. Fokus studi ini adalah pada sistem kelistrikan Pulau Tomia, yang memiliki tantangan tersendiri sebagai bagian dari daerah kepulauan di Indonesia.

Dalam penyelesaian skripsi ini, penulis tidak dapat melakukannya sendiri tanpa dukungan, bimbingan, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Jufri dan Sitti Ramlah yang selalu memberikan doa, cinta, dukungan, dan semangat tiada henti sepanjang perjalanan hidup saya. Tanpa pengorbanan, kasih sayang, dan bimbingan mereka, saya tidak akan mampu mencapai titik ini. Terima kasih atas setiap doa yang selalu menyertai langkah saya, atas kerja keras yang tidak pernah lelah dilakukan demi pendidikan dan masa depan saya.
2. Bapak Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal A Samman, M.T.,IPU.,ASEAN.Eng. ACPE. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro beserta para dosen pada Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin yang memberikan ilmu pengetahuan

dari awal proses perkuliahan serta segala bantuan hingga telah menyelesaikan studi.

3. Bapak Ir. Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing akademik yang dengan sabar telah memberikan saran, kritik, dan masukan yang bermanfaat serta meluangkan banyak waktu dan pikirannya sehingga skripsi ini dapat tersusun dengan baik.
4. Bapak Dr. Ir. Yusran, S.T., MT. dan Ibu Dr. Ir. Sri Mawar Said, MT. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran-saran yang membangun demi kesempurnaan skripsi yang telah disusun untuk menjadi lebih baik lagi
5. Seluruh staf Departemen Teknik Elektro khususnya kepada Ibu Salmiah dan Kak Yuyun yang telah membantu dan memudahkan penulis dalam berbagai urusan administrasi.
6. Kakak Penulis, Al Abi Usmar JR, Al Fathahilla JR, dan Mardatillah beserta keluarga besar lainnya yang telah mendukung sampai titik terselesaikannya penyusunan sampai melakukan hal-hal untuk membuat suasana hati menjadi lebih baik saat lelah menyusun skripsi.
7. Seluruh teman-teman seperjuangan Teknik Elektro 2020 PROCEZ20R yang bersama-sama menempuh kehidupan perkuliahan sejak awal dengan berbagai cerita yang ada dan memberikan makna dan warna di masa-masa perkuliahan hingga saat ini.
8. Teman-teman KERANG WARING, yang menemani perjalanan penulis sejak SMA yang menemani dalam kebersamaan, canda tawa dan semangat yang kalian berikan untuk penulis, baik dalam suka maupun duka.
9. Teman-teman KKNT 110 Bontona Saluk Selayar yang telah bersama-sama menjalani momen yang ada baik saat selama program pengabdian maupun selama pengerjaan skripsi ini. Terima kasih atas kerja sama, semangat, dan kebersamaan yang kalian berikan.
10. Teman-teman A40 yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan hidup saya. Bersama kalian, hari-hari kuliah yang penuh tugas, praktikum, dan ujian menjadi lebih ringan karena kebersamaan, canda tawa dan dukungan yang tak

pernah putus. Terima kasih atas malam-malam panjang belajar bersama, momen berbagi cerita, hingga dukungan selama ini.

11. Teman spesial saya Nanda Latifa Khumaira yang selalu ada di berbagai momen penting dalam hidup saya. Terima kasih atas dukungan, perhatian, keluhan dan semangat yang tak pernah putus selama perjalanan ini. Kehadiranmu memberi kekuatan terutama di saat-saat sulit yang kadang membuat saya ingin menyerah. Semoga hubungan baik ini selalu terjaga dan menjadi salah satu bagian indah dari cerita hidup kita.
12. Diriku sendiri, terima kasih atas semua usaha, kesabaran, dan keberanian yang telah saya tunjukkan sepanjang perjalanan ini. Terima kasih telah bertahan di saat-saat sulit, terus melangkah meski rasanya ingin menyerah dan selalu berusaha memberikan yang terbaik.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik menjadi kebutuhan utama dalam mendukung berbagai aktivitas sehari-hari yang memainkan peran sentral dalam pemenuhan kebutuhan hidup. Proses pembangkitan listrik menjadi langkah awal dalam penyediaan sumber daya tersebut. Sistem distribusi sebagai bagian dari sistem tenaga listrik, menjadi penghubung unit pembangkitan dengan berbagai jenis konsumen, termasuk rumah tangga, sektor sosial, industri, dan bisnis.

Dalam tahap distribusi, energi listrik dialirkan melalui saluran distribusi untuk mencapai konsumen pada berbagai sektor tersebut. Pengiriman energi ini terjadi pada tingkat tegangan distribusi sekunder setelah mengalami penurunan dari tingkat tegangan distribusi primer. Dengan demikian, sistem distribusi berperan penting dalam mengatur dan menyediakan energi listrik sesuai dengan kebutuhan beragam konsumen. Keseluruhan proses ini menunjukkan peran sistem distribusi dalam memenuhi kebutuhan energi listrik pada kehidupan sehari-hari.

Indonesia sebagai negara kepulauan yang terdiri dari ribuan pulau, menghadapi tantangan dalam pendistribusian listrik yang merata. Kondisi kepulauan ini memperumit upaya untuk menyediakan akses listrik yang optimal di seluruh wilayah. Dalam konteks ini, kendala utama terletak pada pilihan penempatan sumber listrik, apabila hanya diletakkan pada satu titik pusat beban, pengiriman listrik ke daerah terjauh menjadi tidak optimal. Proses distribusi listrik juga melibatkan rugi-rugi teknis. Salah satu aspek yang sangat berpengaruh adalah rugi-rugi jaringan. Keberadaan konsumen yang berjarak jauh dari pusat beban menjadi faktor penting yang mempengaruhi kualitas daya dan tegangan yang diterima oleh konsumen tersebut.

Pengimplementasian *Distributed Generation* (DG) ke dalam sistem distribusi listrik membawa dampak positif. Manfaat positif yang dapat dihasilkan melibatkan peningkatan keandalan pasokan sistem, pengurangan kerugian daya, peningkatan

kualitas daya, dan perbaikan profil tegangan. Salah satu DG yang banyak digunakan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Penempatan PLTS pada lokasi dengan profil tegangan yang paling menurun membawa dampak positif pada keseluruhan sistem, memastikan efisiensi distribusi daya yang lebih optimal. Pendekatan ini bukan hanya menghadirkan solusi teknis, tetapi juga menciptakan dasar yang kuat untuk peningkatan kinerja dan keberlanjutan sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Pulau Tomia merupakan salah satu pulau di Kabupaten Wakatobi, Provinsi Sulawesi Tenggara yang menggunakan konsep *microgrid* yang menggabungkan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Pulau Tomia memiliki lima Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang tersebar di beberapa lokasi namun hanya satu di antaranya yang beroperasi saat ini. Pengoperasian PLTS lain terkendala oleh isu sengketa lahan yang belum terselesaikan. Pembatasan ini mengakibatkan sistem kelistrikan di Pulau Tomia hanya mengandalkan satu unit PLTS dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), yang berpotensi menimbulkan permasalahan terkait rugi-rugi daya dan jatuh tegangan. Selain itu, penelitian ini akan mencoba metode lain dengan membuat rancangan baru penempatan PLTS di sistem kelistrikan Pulau Tomia dan melihat dampaknya terhadap pengurangan rugi-rugi daya dan jatuh tegangan dibandingkan kondisi saat ini.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, penulis mengajukan untuk melakukan penelitian yang berjudul “Analisis Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Akibat Penambahan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Pada Sistem Kelistrikan Pulau Tomia Kabupaten Wakatobi”.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana rugi-rugi daya dan jatuh tegangan yang dihasilkan dari sistem kelistrikan Pulau Tomia kondisi saat ini?

2. Bagaimana rugi-rugi daya dan jatuh tegangan yang dihasilkan berdasarkan lokasi pengoperasian PLTS yang sudah ada dan perbandingannya dengan penempatan PLTS berdasarkan metode *Power Loss Index*?
3. Bagaimana kondisi rugi-rugi daya dan jatuh tegangan sistem kelistrikan Pulau Tomia jika terjadi pertumbuhan beban?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui besar kerugian daya dan bagaimana jatuh tegangan di kelistrikan Pulau Tomia sebelum dan sesudah pengoperasian PLTS.
2. Mengetahui besar kerugian daya dan jatuh tegangan yang dihasilkan berdasarkan lokasi pengoperasian PLTS yang sudah ada.
3. Membandingkan kerugian daya dan jatuh tegangan yang dihasilkan berdasarkan lokasi pengoperasian PLTS yang sudah ada dan penempatan PLTS berdasarkan metode *Power Loss Index*.
4. Mengetahui pengaruh rugi-rugi daya dan jatuh tegangan sistem kelistrikan Pulau Tomia jika terjadi pertumbuhan beban.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Penelitian ini akan membantu untuk tahu tentang rugi daya yang dihasilkan dan jatuh tegangan di sistem kelistrikan Pulau Tomia.
2. Mengetahui bagaimana pengopersaian dan penambahan PLTS mempengaruhi kerugian daya dan jatuh tegangan di sistem kelistrikan Pulau Tomia.
3. Mengetahui rugi-rugi daya dan jatuh tegangan jika terjadi pertumbuhan beban pada sistem kelistrikan Pulau Tomia.

1.5 Batasan Masalah

1. Penelitian ini terfokus pada sistem kelistrikan di Pulau Tomia, Kabupaten Wakatobi, Provinsi Sulawesi Tenggara kondisi saat ini, kondisi pengoperasian dan penambahan PLTS yang sudah ada

2. Penelitian berfokus pada analisis rugi-rugi daya dan jatuh tegangan dari penambahan PLTS.
3. PLTS pada penelitian ini tidak memperhitungkan kapasitas baterai, panel surya, efisiensi inverter serta parameter teknis lain dari PLTS.
4. Data yang dianalisis dalam penelitian ini berupa data beban hanya mencakup kondisi beban puncak pada sistem kelistrikan dan simulasi PLTS diasumsikan stabil dan tidak memperhitungkan fluktuasi radiasi matahari yang berubah-ubah.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi Listrik

Penyaluran listrik dari pembangkit hingga sampai ke konsumen adalah proses penting yang perlu dipahami. Proses ini melibatkan beberapa tahap. Pertama, listrik yang dihasilkan di pembangkit disalurkan melalui jaringan transmisi bertegangan tinggi (SUTET) menuju gardu induk. Dari gardu induk, listrik disalurkan ke jaringan distribusi utama (SUTM), lalu melalui gardu distribusi, listrik dialirkan ke jaringan distribusi sekunder (SUTR) yang akhirnya sampai ke konsumen. Jadi, jaringan distribusi listrik berfungsi untuk mendistribusikan listrik ke konsumen melalui tegangan rendah (SUTR), sementara jaringan transmisi berfungsi menyalurkan listrik bertegangan sangat tinggi dari pembangkit menuju pusat beban yang besar melalui jaringan distribusi (Susanto, 2009).

Sistem distribusi listrik adalah proses pengaliran listrik dari gardu induk ke konsumen. Ada dua jenis sistem distribusi, yaitu distribusi primer dan distribusi sekunder. Distribusi primer mengalirkan listrik dari gardu induk (dari sisi sekunder transformator daya) ke gardu distribusi (sisi primer transformator distribusi), atau langsung ke konsumen yang membutuhkan tegangan menengah 20 kV. Pada tahap ini, tegangan tinggi diturunkan menjadi tegangan menengah 20 kV menggunakan transformator *step down*. Distribusi sekunder mengalirkan listrik dari gardu distribusi (dari sisi sekunder transformator distribusi) ke konsumen yang memerlukan tegangan rendah. Listrik disalurkan melalui kabel udara atau kabel bawah tanah dari gardu distribusi. Gardu distribusi berfungsi untuk menurunkan tegangan dari distribusi primer menjadi tegangan rendah 220/380 V yang dapat digunakan oleh konsumen. Penurunan tegangan menengah 20 kV ke tegangan rendah 220/380 V dilakukan melalui trafo distribusi (Syufrijal & Monantun, 2014).

Sistem jaringan distribusi memiliki komponen-komponen yang terintegrasi menjadi sebuah jaringan yang utuh. Komponen-komponen tersebut yaitu (Nelwan dkk., 2015):

1. Penghantar

Secara umum, penghantar dibagi menjadi dua jenis yaitu kawat dan kabel. Penghantar kawat tidak memiliki lapisan isolasi dan biasanya digunakan pada JTM. Jenis konduktor yang sering dipakai pada jaringan distribusi meliputi AAC (*All Aluminium Conductor*) dan AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*). Sementara itu, penghantar kabel adalah konduktor yang dilapisi dengan isolasi. Pada jaringan distribusi PLN, jenis kabel yang digunakan termasuk AAAC-S, BC, dan XLPE.

2. Isolator

Isolator dalam jaringan distribusi listrik berfungsi untuk menjaga agar bagian yang bertegangan tetap terpisah dari bagian yang tidak bertegangan atau dari tanah. Isolator ini digunakan pada tiang-tiang listrik untuk menahan kawat penghantar dan mencegah arus bocor atau loncatan bunga api yang bisa merusak sistem jaringan listrik. Dengan kata lain, isolator membantu memastikan bahwa aliran listrik tetap aman dan tidak menyebabkan gangguan pada jaringan.

3. Tiang penyangga

Tiang penyangga digunakan dalam jaringan distribusi listrik udara untuk menjaga agar saluran listrik tetap berada pada ketinggian aman. Tiang ini harus cukup kuat untuk menahan tarikan dan beban dari kabel yang ditopangnya. Tiang penyangga bisa terbuat dari kayu, beton, atau besi.

4. Trafo Distribusi

Trafo distribusi digunakan untuk menurunkan tegangan dari level tegangan menengah ke level tegangan rendah yang dipakai konsumen. Sebagai contoh trafo distribusi menurunkan tegangan 20 kV menjadi 220/380V untuk konsumen.

5. Peralatan Hubung

Peralatan hubung ini digunakan untuk membagi dan mengatur bagian-bagian pada jaringan distribusi listrik. Dengan adanya peralatan ini, penanganan gangguan pada jaringan menjadi lebih mudah dan efektif. Peralatan yang biasanya digunakan adalah *Load Break Switch* (LBS) dan *Fused Cut-Out* (FCO).

2.2 Tipe Jaringan Distribusi Primer

Distribusi primer adalah jaringan distribusi daya listrik yang bertegangan menengah (20 kV). Jaringan distribusi primer tersebut merupakan jaringan penyulang. Jaringan distribusi primer berawal dari sisi sekunder trafo daya yang terpasang pada gardu induk hingga ke sisi primer trafo distribusi yang terpasang pada tiang-tiang saluran. Pola konfigurasi jaringan pada distribusi primer terdiri dari 3 tipe yaitu sistem radial, sistem *loop* dan sistem spindel (Syufrijal & Monantun, 2014).

1. Sistem Radial

Sistem jaringan radial pada distribusi listrik adalah yang paling umum digunakan dan paling sederhana dibandingkan dengan tipe lainnya. Dalam sistem ini, listrik disalurkan dari gardu induk ke konsumen secara terpisah, tanpa saling terhubung. Disebut radial karena aliran listrik ditarik dari satu titik pusat sebagai sumber, lalu bercabang ke berbagai titik beban. Sistem ini terdiri dari penyulang (*feeder*) yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial. Jaringan radial terbagi menjadi dua jenis, yaitu sistem radial terbuka dan sistem radial paralel.

a. Sistem Radial Terbuka

Sistem radial terbuka kurang dapat diandalkan karena hanya menggunakan satu saluran untuk mengalirkan listrik. Jika terjadi gangguan, sistem ini akan berhenti mengalirkan listrik untuk waktu yang lama sampai gangguan diperbaiki. Jadi pelayanan pada sistem ini tidak bisa diandalkan. Selain itu, semakin jauh jarak dari Pembangkit atau gardu

induk ke konsumen, tegangan listrik akan semakin tidak stabil dan rugi-rugi tegangan menjadi lebih besar. Akibatnya, kapasitas pelayanan sistem radial terbuka sangat terbatas.

b. Sistem Radial Paralel

Dalam mengatasi kekurangan dari sistem radial terbuka, digunakan sistem radial paralel yang mengalirkan listrik melalui dua saluran yang bekerja bersamaan. Dalam sistem ini, setiap titik beban dilayani oleh dua saluran, jadi jika salah satu saluran mengalami gangguan, saluran yang lain masih bisa menggantikan, sehingga pemadaman tidak perlu terjadi. Pelayanan sistem radial paralel lebih terjamin, kapasitas pelayanan lebih besar, dan dapat menangani beban puncak sesuai kebutuhan. Biasanya, kedua saluran bekerja sama untuk melayani titik beban, meskipun seringkali hanya salah satu saluran yang aktif untuk menjaga pelayanan kepada konsumen.

2. Konfigurasi Sistem *Loop*

Sistem jaringan *loop*, juga dikenal sebagai jaringan *ring*, adalah bentuk jaringan listrik tertutup yang membentuk lingkaran. Dengan konfigurasi ini, titik beban bisa dilayani dari dua arah saluran, sehingga pelayanan lebih terjamin dan kualitas daya menjadi lebih baik. Jaringan *loop* adalah gabungan dari dua jaringan radial, di mana di ujung masing-masing jaringan dipasang pemutus (PMT) atau pemisah (PMS). Jika terjadi gangguan, pemutus atau pemisah bisa ditutup sehingga aliran listrik ke bagian yang tidak terkena gangguan tetap berjalan. Biasanya, penghantar dalam jaringan ini memiliki ukuran yang cukup untuk menyalurkan seluruh daya listrik dari kedua jaringan radial. Jaringan distribusi *loop* memberikan kualitas dan kontinuitas pelayanan yang lebih baik, tetapi biaya investasi lebih tinggi dan lebih cocok digunakan di daerah padat dengan kebutuhan keandalan tinggi..

3. Konfigurasi Sistem Spindel

Jaringan distribusi spindel adalah sistem kabel bawah tanah untuk tegangan menengah yang cocok digunakan di kota-kota besar. Biasanya, sistem ini memiliki hingga 6 saluran penyulang yang aktif saat ada beban, dan satu

saluran penyulang yang tidak aktif saat tidak ada beban. Saluran penyulang yang aktif disebut *working feeder* atau saluran kerja, sementara saluran yang tidak aktif disebut *express feeder*. *Express feeder* berfungsi sebagai cadangan jika salah satu *working feeder* mengalami gangguan dan juga membantu mengurangi penurunan tegangan dalam sistem distribusi saat beroperasi secara normal.

2.3 Rugi-Rugi Daya

Pada sistem tenaga listrik terdapat perbedaan antara daya atau kekuatan (*power*) dan energi. Energi adalah daya dikalikan waktu sedangkan daya listrik merupakan hasil perkalian tegangan dan arusnya, dengan satuan daya listrik yaitu watt yang menyatakan banyaknya tenaga listrik yang mengalir per satuan waktu (Joule/s). Daya listrik (P) yang dihasilkan oleh arus listrik (I) pada tegangan (V) dinyatakan dengan persamaan (1)

$$P = I \cdot V \quad (1)$$

Dimana,

$$P = \text{Daya (watt)}$$

$$I = \text{Arus (ampere)}$$

$$V = \text{Tegangan (V)}$$

Dalam sistem listrik arus bolak-balik, dikenal adanya 3 jenis daya untuk beban yang memiliki impedansi (Z), yaitu

1. Daya aktif (P)

Daya aktif (*Active Power*) disebut juga daya nyata yaitu daya yang dibutuhkan oleh beban. Satuan daya aktif adalah Watt dinyatakan dengan persamaan (2).

$$P = V \cdot I \cdot \cos \theta$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \theta \quad (2)$$

2. Daya reaktif (Q)

Daya reaktif adalah daya yang timbul akibat adanya efek induksi elektromagnetik oleh beban yang mempunyai nilai induktif (fase arus

tertinggal/*lagging* atau kapasitif (fase arus mendahului/*leading*). Satuan daya reaktif adalah Var dinyatakan dengan persamaan (3).

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \theta$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \sin \theta \quad (3)$$

3. Daya semu (S)

Pada beban impedansi (Z), daya semu adalah daya yang terukur atau terbaca pada alat ukur. Daya semu adalah penjumlahan daya aktif dan daya reaktif secara vektoris. Satuan daya ini adalah VA dinyatakan dengan persamaan (4).

$$S = V \cdot I \quad (4)$$

Hubungan dari ketiga daya diatas (P, Q, S) disebut segitiga daya. Semakin besar nilai daya reaktif (Q) akan meningkatkan sudut antara daya nyata dan daya semu atau biasa disebut *power factor* $\cos \theta$. Sehingga daya yang terbaca pada alat ukur (S) lebih besar daripada daya yang sesungguhnya dibutuhkan oleh beban (P). Dimana,

$$P = V \cdot I \cdot \cos \theta \quad (5)$$

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \theta \quad (6)$$

$$S = V \cdot I \quad (7)$$

Rugi dalam sistem kelistrikan adalah sesuatu yang pasti terjadi. Rugi daya adalah selisih antara jumlah energi listrik yang dihasilkan dan jumlah energi listrik yang sampai ke konsumen.. (Husu dkk, 2019)

Dalam penyalurannya, tenaga listrik mengalami rugi-rugi daya listrik yang besar karena luasnya daerah yang membutuhkan suplai tenaga listrik dari jaringan distribusi. Rugi-rugi daya listrik pada saluran distribusi dibagi menjadi 2 bagian yaitu rugi-rugi daya aktif dan rugi-rugi daya reaktif (Syufrijal & Monantun, 2014).

1. Rugi-rugi daya aktif

Besar rugi daya aktif ditentukan oleh kuadrat arus (I^2) dan resistansi jaringan (R) yang merupakan representasi jarak saluran. Dengan kata lain, elemen yang paling berpengaruh terhadap besarnya rugi – rugi daya aktif

adalah besarnya arus dan besarnya resistansi jaringan. Resistansi jaringan akan sangat dipengaruhi oleh jarak saluran itu sendiri.

Rugi-rugi daya aktif per fasa dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$P_{\text{rugi-rugi}(1\phi)} = I^2 \cdot R \text{ (watt)} \quad (8)$$

sedangkan rugi-rugi daya aktif tiga fasa adalah

$$\begin{aligned} P_{\text{rugi-rugi}(3\phi)} &= \sqrt{3} \cdot I^2 \cdot R \text{ (watt)} \\ &= \sqrt{3} \cdot P_{1\phi} \end{aligned} \quad (9)$$

dimana,

I = arus yang mengalir dalam jaringan (A)

R = hambatan dalam penghantar (ohm)

2. Rugi-rugi daya reaktif

Besar rugi daya reaktif ditentukan oleh kuadrat arus (I^2) dan reaktansi jaringan (X) yang merupakan representasi jarak saluran. Dengan kata lain, elemen yang paling berpengaruh terhadap besarnya rugi – rugi daya reaktif adalah besarnya arus dan besarnya reaktansi jaringan. Reaktansi jaringan akan sangat dipengaruhi oleh jarak saluran itu sendiri.

Rugi-rugi daya reaktif per fasa dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$Q = I^2 \cdot X \text{ (VAr)} \quad (10)$$

sedangkan rugi-rugi daya reaktif tiga fasa adalah

$$\begin{aligned} Q_{\text{rugi-rugi}(3\phi)} &= \sqrt{3} \cdot I^2 \cdot X \text{ (VAr)} \\ &= \sqrt{3} \cdot Q_{1\phi} \end{aligned} \quad (11)$$

2.4 Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan adalah jumlah tegangan yang hilang pada sebuah penghantar. Jatuh tegangan pada saluran listrik biasanya meningkat seiring dengan panjang saluran dan beban yang diterima, serta menurun jika luas penampang kabel lebih besar. Jatuh tegangan dapat dinyatakan dalam persen atau volt. Ini adalah perbedaan antara tegangan yang dikirim dan tegangan yang diterima, disebabkan oleh hambatan pada kabel (PT PLN (Persero), 2010).

Panjang sebuah jaringan tegangan menengah (JTM) perlu dirancang dengan memperhitungkan jatuh tegangan. Jatuh tegangan adalah perbedaan antara tegangan yang dikirim dan tegangan yang diterima karena adanya hambatan pada kabel. Jatuh tegangan selalu terjadi di seluruh jaringan. Pada saluran distribusi, jatuh tegangan adalah perbedaan antara tegangan di sisi pengiriman dan tegangan di sisi penerimaan. Dalam perhitungan jatuh tegangan, biasanya hanya tahanan kabel yang dihitung, tetapi pada sistem tegangan menengah, induktansi dan kapasitansi juga harus diperhitungkan karena pengaruhnya cukup signifikan. Semakin besar impedansi semakin besar pula perbedaan nilai tegangan yang ada pada sisi pengirim dengan yang ada pada sisi penerima. Apabila perbedaan nilai tegangan tersebut melebihi standar yang ditentukan, maka mutu penyaluran tersebut rendah. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijakan perusahaan kelistrikan (Pramono dkk., 2018).

Salah satu upaya yang dilakukan agar para konsumen pada titik penerima tidak mengalami terlalu banyak penurunan tegangan yaitu dengan menaikkan tegangan sumber. Akibat tegangan sumber dinaikkan, maka konsumen yang dekat dengan sumber akan menerima tegangan yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan para konsumen (konsumen) yang jauh dari sumber (Akbar, 2016)

Jatuh tegangan pada jaringan distribusi primer sebuah penghantar dapat dihitung melalui persamaan (12) berikut ini (Dewi & Yusdartono, 2023) :

$$\Delta V = \sqrt{3} \times I \times (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \times L \quad (12)$$

Dimana,

I = Besar arus fase pada sisi primer transformator (A)

L = Panjang saluran (km)

R = Besar resistansi saluran (Ohm/km)

X = Besar reaktansi induksi (Ohm/km)

φ = Sudut sistem daya.

Sedangkan persentase jatuh tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\% \Delta V = \frac{\text{Jatuh Tegangan}}{V_s} \times 100\% \quad (13)$$

dimana,

- $\% \Delta V$: Persen Jatuh Tegangan
- Jatuh Tegangan : *Drop* Tegangan (kV)
- V_s : Nilai Tegangan Sumber (kV)

Penurunan tegangan maksimum pada beban penuh, yang diperbolehkan di beberapa titik pada jaringan distribusi adalah sebagai berikut (SPLN 72 :1987) :

1. SUTM = 5% dari tegangan kerja bagi sistem radial.
2. Trafo Distribusi = 3% dari tegangan kerja.
3. Saluran tegangan rendah = 4 % dari tegangan kerja tergantung kepadatan beban.
4. Sambungan rumah = 1% dari tegangan nominal.

2.5 *Distributed Generation (DG)*

Pembangkitan terdistribusi adalah sistem pembangkitan listrik yang menggunakan banyak sumber energi kecil. Kelebihan sistem ini dibandingkan dengan sistem pembangkitan listrik yang terpusat dapat beroperasi secara mandiri, tidak memerlukan area yang luas dan rumit, memiliki jaringan transmisi yang pendek, dan dapat menggunakan sumber energi yang sesuai dengan lokasi yang akan dialirkan listrik. Pembangkitan terdistribusi dapat mengurangi rugi energi selama distribusi listrik karena berada dekat dengan konsumen dan mengurangi jumlah komponen yang perlu digunakan (Asran dkk., 2020).

Distributed Generation (DG) adalah pemasangan unit pembangkit listrik di jaringan distribusi. Pembangkitan listrik skala kecil yang tersebar ini dapat mengurangi kebutuhan untuk jaringan listrik besar, bahkan jika terjadi perubahan dalam sistem tenaga listrik. Teknologi DG penting untuk jaringan distribusi karena dapat mengurangi rugi daya dan meningkatkan kualitas tegangan, sehingga meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik. Penggunaan DG juga dapat meningkatkan efisiensi dan mempengaruhi performa dari pusat tenaga listrik (Artawa dkk., 2017).

Distributed Generation dapat dikelompokkan berdasarkan besar daya yang dihasilkan sebagai berikut:

1. *Micro DG* : 1 W < 5 kW
2. *Small DG* : 5 kW < 5 MW
3. *Medium DG* : 5 MW < 50 MW
4. *Large DG* : 50 MW < 300 MW

Pembangkit ini berfungsi utama sebagai unit cadangan untuk mengatasi jika terjadi pemutusan pasokan daya dari jaringan utama, atau sebagai unit yang beroperasi saat beban puncak. Karakteristik DG adalah berskala kecil, tersebar, dan dekat dengan pusat beban, terhubung dengan sistem distribusi, membatasi kebutuhan jaringan distribusi, dan memiliki aliran daya satu arah. Pembangkit ini ramah lingkungan, cepat merespons perubahan beban, mengurangi penggunaan bahan bakar fosil, dan menawarkan berbagai keuntungan lainnya (Artawa dkk., 2017).

2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit listrik tenaga surya adalah jenis pembangkit listrik yang mengubah energi dari matahari menjadi energi listrik. Ada dua cara untuk menghasilkan listrik dari energi surya pertama, dengan menggunakan panel fotovoltaik yang langsung mengubah cahaya matahari menjadi listrik melalui efek fotoelektrik dan dengan menggunakan sistem pemusatan energi surya, yang memanfaatkan lensa atau cermin untuk mengumpulkan dan memfokuskan energi matahari ke satu titik guna menggerakkan mesin (Darwin dkk., 2020).

Sistem PLTS pada dasarnya terbagi menjadi tiga yaitu *on grid*, *off grid* dan *hybrid*. Berikut penjelasan mengenai sistem PLTS (Hayani dkk., 2021).

1. PLTS *on grid*

PLTS *on grid* adalah sistem tenaga surya yang hanya bekerja ketika ada listrik dari PLN. Sistem ini memungkinkan listrik yang dihasilkan PLTS dijual ke PLN atau disimpan sebagai kredit untuk penggunaan di kemudian hari. Proses ini memerlukan meteran khusus bernama *net metering* yang disediakan

oleh PLN. Sistem ini tergolong sederhana dan efektif dari segi biaya, dengan komponen utama berupa panel surya dan inverter. Keunggulannya adalah bisa langsung mengurangi tagihan listrik. Namun, kelemahannya adalah jika listrik PLN mati, listrik di rumah juga akan padam karena PLTS on grid bergantung pada pasokan listrik dari PLN untuk beroperasi.

2. PLTS *off grid*

PLTS *off grid* adalah sistem tenaga surya yang digunakan di daerah terpencil atau pedesaan yang tidak terjangkau oleh jaringan PLN. Biasanya, sistem ini digunakan untuk kebutuhan listrik rumah tangga. Secara prinsip, sistem PLTS *off grid* mirip dengan PLTS *on grid*. Keunggulan dari sistem ini adalah memiliki rangkaian yang sederhana dan cocok untuk penggunaan listrik di rumah. Namun, kelemahannya adalah membutuhkan lebih banyak komponen, terutama baterai, untuk menyimpan energi.

3. PLTS *Hybrid*

Sistem pembangkit listrik *hybrid* didefinisikan sebagai suatu sistem pembangkit tenaga listrik yang menggabungkan dua atau lebih pembangkit dalam sumber energi yang berbeda, umumnya digunakan untuk *isolated grid*, sehingga diperoleh sinergi penerapannya dapat menghasilkan keuntungan ekonomis maupun teknis.

Konsep pembangkit listrik tenaga surya cukup sederhana, yaitu mengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik. Cahaya matahari adalah salah satu bentuk energi yang berasal dari sumber daya alam. Sumber daya alam ini telah banyak digunakan untuk menyediakan listrik di satelit komunikasi melalui sel surya. Sel surya dapat menghasilkan energi listrik dalam jumlah tak terbatas yang langsung diambil dari matahari, tanpa memerlukan bagian yang bergerak atau bahan bakar. Oleh karena itu, sistem sel surya sering disebut sebagai sistem yang bersih dan ramah lingkungan (Darwin dkk., 2020).

Prinsip kerja sel surya silikon didasarkan pada konsep semikonduktor p-n junction. Sel ini terdiri dari dua lapisan semikonduktor satu lapisan yang diberi *doping* tipe-n dan satu lapisan yang diberi *doping* tipe-p, serta lapisan pelindung anti-refleksi dan substrat logam untuk aliran arus. Semikonduktor tipe-n dibuat

dengan menambahkan unsur golongan V ke silikon, yang memberikan kelebihan elektron. Sebaliknya, semikonduktor tipe-p dibuat dengan menambahkan unsur golongan III, yang mengurangi jumlah elektron. Ketika kedua tipe semikonduktor ini bertemu, elektron dari tipe-n berpindah ke tipe-p, membuat area tipe-n menjadi positif dan area tipe-p menjadi negatif. Medan listrik yang terbentuk mendorong elektron dan hole (kekosongan elektron) ke arah yang berlawanan, menciptakan p-n junction. Dengan menambahkan kontak logam di area p dan n, terbentuklah dioda. Saat p-n junction terkena cahaya, photon yang energinya cukup tinggi dapat memindahkan elektron dari pita valensi ke pita konduksi, meninggalkan hole di pita valensi. Elektron dan hole ini bergerak dalam material, menciptakan pasangan elektron-hole. Jika dihubungkan dengan beban, elektron dari area-n akan kembali ke area-p, menciptakan perbedaan tegangan dan menghasilkan arus listrik (Idris, 2019).

PLTS memiliki beberapa komponen penyusunnya yaitu sebagai berikut (Purwoto dkk., 2018) :

1. Sel Surya

Sel surya merupakan sebuah perangkat yang mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik dengan proses efek fotovoltaic, oleh karenanya dinamakan juga sel fotovoltaic (*Photovoltaic cell* – disingkat PV). Tegangan listrik yang dihasilkan oleh sebuah sel surya sangat kecil, sekitar 0,6V tanpa beban atau 0,45V dengan beban. Untuk menghasilkan tegangan listrik besar yang diinginkan, diperlukan beberapa sel surya yang disusun secara seri. Untuk menghasilkan tegangan yang lebih tinggi, dibutuhkan lebih banyak sel surya.

2. *Solar Charge Controller*

Solar Charge Controller adalah salah satu komponen di dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya, berfungsi sebagai pengatur arus listrik baik terhadap arus yang masuk dari Panel Surya maupun arus beban keluar/ digunakan. Bekerja untuk menjaga baterai dari pengisian yang berlebihan. *Solar Charge Controller* mengatur tegangan dan arus dari Panel Surya ke baterai.

3. *Inverter*

Inverter adalah rangkaian yang mengubah tegangan DC menjadi AC. Atau lebih tepatnya inverter memindahkan tegangan dari sumber DC ke beban AC. Sumber tegangan inverter dapat berupa baterai, Panel Surya maupun sumber tegangan DC lainnya.

4. Baterai

Komponen ini digunakan sebagai penyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Panel surya tidak dapat menghasilkan energi listrik pada malam hari, oleh karena itu diperlukan baterai atau akumulator sebagai alat untuk menyimpan energi listrik (Yuniarti & Aji, 2019).

2.7 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

Pembangkit listrik tenaga diesel adalah pembangkit yang menggunakan solar atau diesel sebagai bahan bakar utama untuk menjalankan mesinnya. Dibandingkan dengan jenis pembangkit listrik lain di Indonesia, kapasitas PLTD relatif kecil. Biasanya, PLTD digunakan di daerah terpencil atau pulau yang sulit dijangkau dan tidak memungkinkan dibangun infrastruktur penghubung antar daerah atau antar pulau (Yuniarti & Aji, 2019).

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) ialah Pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak mula (*prime mover*). *Prime mover* merupakan peralatan yang mempunyai fungsi menghasilkan energi mekanis yang diperlukan untuk memutar rotor generator. Mesin diesel sebagai penggerak mula PLTD berfungsi menghasilkan tenaga mekanis yang dipergunakan untuk memutar rotor generator. Motor diesel dinamai juga motor penyalaan kompresi (*compression ignition engine*) oleh karena cara penyalaan bahan bakarnya dilakukan dengan menyemprotkan bahan bakar ke dalam udara bertekanan dan temperatur tinggi, sebagai akibat dari proses di dalam ruang bakar kepala silinder (Masrianto dkk., 2021).

Komponen-komponen PLTD terdiri atas bahan bakar, tangki bahan bakar, *injector* bahan bakar, pompa bahan bakar, dan mesin diesel, dan generator (Yuniarti & Aji, 2019).

1. Bahan bakar

Bahan bakar diesel yang ada di Indonesia dikategorikan menjadi beberapa jenis. Dan dari setiap jenis bahan bakar diesel juga memiliki tingkatan kualitas bahan bakar. Kualitas bahan bakar solar ditandai dengan kandungan cetane yang tinggi dan kandungan sulfur yang rendah didalam bahan bakar.

2. Tangki bahan bakar utama

Tangki bahan bakar digunakan sebagai tempat penampungan bahan bakar mesin diesel. Didalam PLTD tangki bahan bakar dapat disimpan didalam tanah maupun di permukaan tanah.

3. Tangki bahan bakar sementara

Tangki ini difungsikan sebagai tangki bahan bakar sementara yang umumnya berada di dekat mesin diesel. Hal ini ditujukan sebagai indikator ketersediaan bahan bakar serta agar pada saat menyalakan mesin, pompa bahan bakar lebih mudah untuk mendapatkan bahan bakar sehingga mempermudah proses penyalaan mesin diesel.

4. *Injector* bahan bakar

Injector bahan bakar memiliki fungsi untuk mengabutkan bahan bakar dari bentuknya yang cair dan bertekanan menjadi butiran-butiran kecil untuk mempermudah proses pembakaran bahan bakar. Selain untuk mempermudah proses pembakaran, *injector* juga membantu meningkatkan efisiensi dari mesin diesel karena bahan bakar dapat terkompresi dengan sempurna.

5. Pompa bahan bakar

Pompa bahan bakar berfungsi untuk memompa bahan bakar diesel menuju *injector*. Bahan bakar dipompa dari tangki penampungan sementara. Pompa bahan bakar dapat dijalankan oleh putaran mesin itu sendiri ataupun dengan bantuan motor listrik.

6. Mesin Diesel

Mesin diesel merupakan penggerak utama atau *prime mover* dari PLTD. Mesin diesel mengonversi energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik. Proses perubahan terjadi di dalam *combustion chamber* yang kemudian energi mekanik hasil pembakaran akan diterima oleh *noken as* dan diteruskan dengan satu poros menuju generator.

7. Generator

Generator adalah sebuah alat yang mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Generator terdiri dari dua bagian yaitu bagian bergerak (rotor) dan bagian diam (stator) didalam sebuah generator.

2.8 Metode *Newton Raphson*

Metode *Newton Raphson* dalam menyelesaikan aliran daya didasarkan pada konsep Deret Taylor untuk fungsi dengan dua atau lebih variable. Metode ini menyelesaikan masalah aliran daya dengan menggunakan suatu persamaan nonlinier untuk menghitung besarnya tegangan dan sudut fasa tegangan tiap bus.

Daya injeksi pada bus i adalah

$$P_i - jQ_i = V_i * \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (14)$$

Dengan:

P_i = Daya aktif ke-i

Q_i = Daya reaktif ke-i

V_i = Tegangan ke-i

Y_{ij} = Admintansi

Dalam hal ini dilakukan pemisahan daya nyata dan daya reaktif pada bus i. Pemisahan ini akan menghasilkan suatu set persamaan simultan nonlinier. Dalam koordinat kutub diketahui :

$$|V_i| \angle \delta_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad (14)$$

$$|V_j| \angle \delta_j = |V_j| e^{j\delta_j} \quad (15)$$

$$|Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| e^{j\theta_{ij}} \quad (16)$$

Karena $e^{j(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij})} = \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij})$ maka pemisahan daya pada bus i menjadi komponen real dan imajiner adalah

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \angle \theta_{ij} + \delta_j = |V_i| e^{-j\delta_i} \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \angle (e^{j(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij})}) \quad (17)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (18)$$

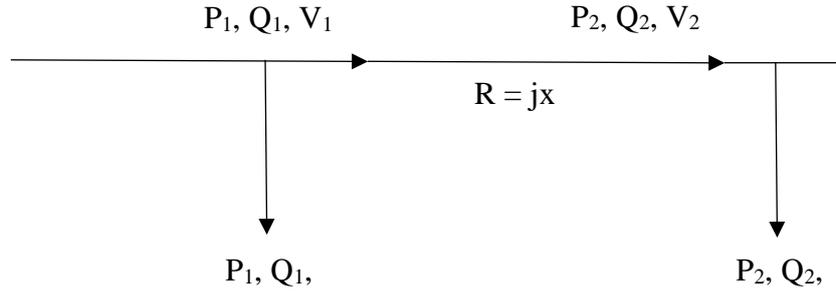
$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (19)$$

Nilai daya aktif (P_i) dan daya reaktif (Q_i) telah diketahui, tetapi nilai tegangan (V_i) dan sudut (δ_i) tidak diketahui kecuali pada slack bus. Kedua persamaan nonlinier tersebut dapat diuraikan menjadi suatu set persamaan simultan linier dengan cara menyatakan hubungan antara perubahan daya nyata ΔP_i daya reaktif ΔQ_i terhadap perubahan magnitude tegangan ΔV_i dan sudut fasa tegangan $\Delta \delta$. (Fikri & Anggani, 2018)

2.9 Metode Power Loss Index

Metode *Power Loss Index* (PLI) adalah sebuah pendekatan dalam analisis jaringan distribusi listrik yang digunakan untuk mengidentifikasi bus-bus yang memberikan kontribusi signifikan terhadap kerugian daya dalam jaringan. Tujuan utama dari metode PLI adalah untuk mengidentifikasi bus-bus yang menjadi penyebab utama kerugian daya sehingga tindakan perbaikan dapat diarahkan ke titik-titik yang paling penting dalam jaringan.

Power Loss Index merupakan metode berdasarkan persamaan aliran daya. Formulasi matematis dari *Power Loss Index* (PLI) diturunkan dari persamaan tegangan dari dua jaringan bus seperti gambar 1 (Rahman, 2015).



Gambar 1 Jaringan dua bus

Misalkan sebuah saluran menghubungkan dua bus (1 dan 2), dimana P_1 dan Q_1 adalah daya yang diinjeksikan ke dalam saluran. Dari sistem sederhana dua bus dapat diturunkan menjadi persamaan berikut:

$$|I_1|^2 = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \quad (20)$$

$$|I_1|^2 = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{V_1^2} \quad (21)$$

$$P_2 = P_1 - P_{\text{loss}} \quad (22)$$

$$Q_2 = Q_1 - Q_{\text{loss}} \quad (23)$$

$$P_{\text{loss}} = \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) r_1 \quad (24)$$

$$Q_{\text{loss}} = \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) X_1 \quad (25)$$

Dari persamaan (22), (23), (24), dan (25) dapat disubstitusikan ke persamaan (21) sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$|I_1|^2 = \frac{[P_2 + \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) r_1]^2 + [P_2 + \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) X_1]^2}{V_1^2} \quad (26)$$

Dan mensubstitusikan sisi ke persamaan (26) dengan persamaan (21) yang menjadi :

$$V_1^2 = V_2^2 + 2(P_2 r_1 + Q_2 X_1) + \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) (r_1^2 + X_1^2) \quad (27)$$

Membentuk persamaan kuadrat dalam V_2^2

$$V_2^4 + V_2^2 [2(P_2 r_1 + Q_2 X_1) - V_1^2] + P_2^2 + Q_2^2 (r_1^2 + x_1^2) = 0 \quad (28)$$

Dari persamaan kuadrat V_2^2 dan akan memiliki akar-akar positif jika $b^2 - 4ac \geq 0$, sehingga didapatkan persamaan (29)

$$8P_2Q_2r_1x_1 - 4V_1^2(P_2r_1 + Q_2X_1) + V_1^4 - 4(P_2^2x_1^2 + Q_2^2r_1^2) \quad (29)$$

Sehingga persamaan *Power Loss Index* adalah :

$$\frac{4[V_1^2(P_2r_1+Q_2X_1)+(P_2x_1+Q_2r_1)^2]}{V_1^4} \leq 1 \quad (30)$$

Nilai PLI memiliki skala mulai dari 1 sampai dengan 0. Dimana nilai 1 sebagai nilai PL1 tertinggi dan 0 sebagai nilai PL1 terendah.