

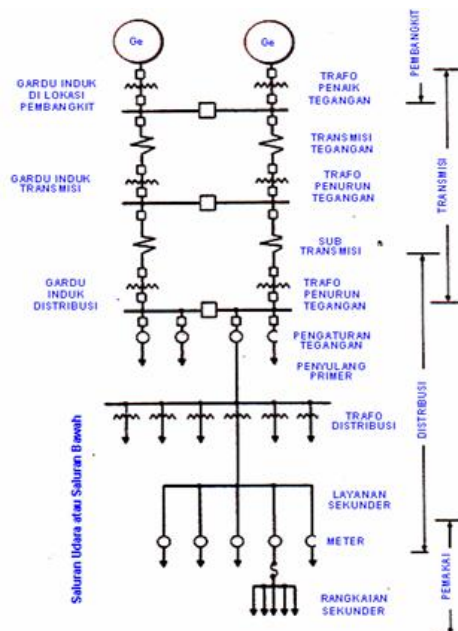
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Energi listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting dalam kehidupan masyarakat. Untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat, diperlukan pembangkit tenaga listrik berskala besar. Pada umumnya, pusat pembangkit tersebut berlokasi jauh dari pusat-pusat beban, sehingga diperlukan saluran penyaluran tenaga listrik. Secara umum, saluran penyaluran energi listrik terbagi menjadi dua jenis, yaitu saluran transmisi dan saluran distribusi. (Ananda Muhamad Tri Utama, 2022).

Pada gambar 2.1 terdapat rangkaian sistem tenaga listrik yang dibagi menjadi beberapa bagian dari mulai pembangkit hingga ke beban (konsumen).



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik
(Sumber : (Suhadi 2008))

Secara umum suatu sistem tenaga listrik dapat dikategorikan dalam empat bagian utama, yaitu sebagai berikut:

1. Pembangkitan
2. Transmisi
3. Distribusi
4. Beban

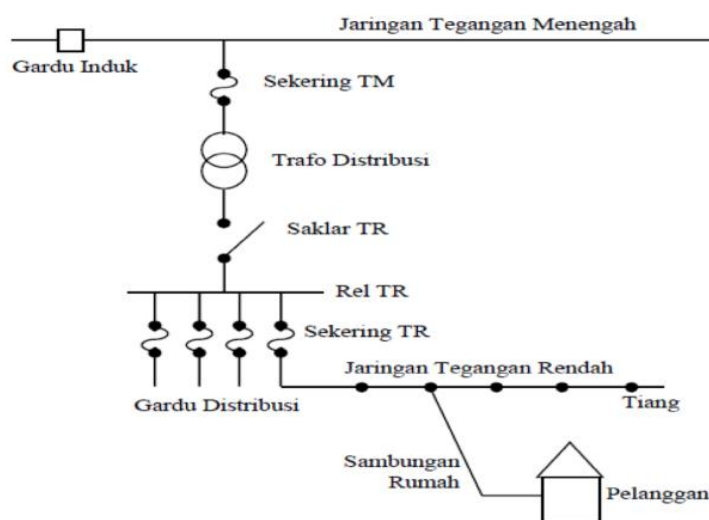
Tenaga listrik dibangkitkan pada dalam pusat-pusat pembangkit listrik (power plant) seperti PLTA, PLTU, PLTG, dan PLTD lalu disalurkan melalui saluran transmisi setelah terlebih dahulu dinaikkan tegangannya oleh transformator stepup yang ada di pusat listrik. Saluran transmisi tegangan tinggi mempunyai tegangan 70kV, 150kV, atau 500kV. Khusus untuk tegangan 500kV dalam praktek saat ini disebut sebagai tegangan ekstra tinggi. Setelah tenaga listrik disalurkan, maka sampailah tegangan listrik ke gardu induk (G1), lalu diturunkan tegangannya menggunakan transformator step-down menjadi tegangan menengah yang juga disebut sebagai tegangan distribusi primer. Kecenderungan saat ini menunjukkan bahwa tegangan distribusi primer PLN yang berkembang adalah tegangan 20kV. Setelah tenaga listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer atau jaringan Tegangan Menengah (JTM), maka tenaga listrik kemudian diturunkan lagi tegangannya dalam gardu-gardu distribusi menjadi tegangan rendah, yaitu tegangan 380/220 volt, lalu disalurkan melalui jaringan Tegangan Rendah (JTR) ke rumah-rumah pelanggan (konsumen) PLN. Pelanggan pelanggan dengan daya tersambung besar tidak dapat dihubungkan pada Jaringan Tegangan Rendah,

melainkan dihubungkan langsung pada jaringan tegangan menengah, bahkan ada pula pelanggan yang terhubung pada jaringan transmisi, tergantung dari besarnya daya tersambung (Suryadi 2018).

2.2 Sistem Distribusi

Pada gambar 2.2 merupakan jaringan distribusi tegangan menengah (primer) dan jaringan distribusi tegangan rendah (sekunder).

2.2.1 Pengertian Sistem Distribusi



Gambar 2.2 Jaringan Distribusi Primer dan Sekunder
(Sumber : (Suhadi 2008))

Sistem distribusi merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari sistem tenaga listrik dan menjadi subsistem yang paling dekat dengan pelanggan. Sistem ini berfungsi menyalurkan energi listrik dari sumber daya listrik berskala besar (*bulk power source*) hingga sampai ke konsumen akhir. Jaringan distribusi tegangan menengah umumnya beroperasi pada tingkat tegangan antara 3 kV hingga 20 kV. Saat ini, PT PLN (Persero) mengembangkan jaringan distribusi tegangan menengah pada level 20 kV. Secara fisik, jaringan distribusi tegangan menengah sebagian

besar berupa saluran udara tegangan menengah (SUTM) dan kabel tanah tegangan menengah. (Syahputra 2016)

2.2.2 Klasifikasi Jaringan Distribusi

Secara umum, saluran tenaga Listrik atau saluran distribusi dapat diklasifikasikan sebagai berikut: (Jasmine, 2014)

1. Menurut nilai tegangannya:

Saluran distribusi primer berada pada sisi primer transformator distribusi, yaitu membentang antara titik sekunder transformator di gardu induk dengan titik primer transformator distribusi. Saluran ini beroperasi pada tegangan menengah, yaitu 20 kV. Selain itu, jaringan listrik dengan tingkat tegangan 70 kV atau 150 kV yang secara langsung melayani pelanggan juga dapat dikategorikan sebagai jaringan distribusi.

Saluran distribusi sekunder terletak pada sisi sekunder transformator distribusi, yaitu membentang dari titik keluaran transformator hingga titik percabangan menuju beban. Dalam praktiknya, jaringan distribusi primer dengan tegangan 20 kV dikenal sebagai Jaringan Distribusi Tegangan Menengah (JTM), sedangkan jaringan distribusi sekunder dengan tingkat tegangan 220/380 V disebut sebagai Jaringan Distribusi Tegangan Rendah (JTR).

2. Menurut jenis/tipe konduktornya:

- a. Saluran udara, dipasang pada udara terbuka dengan bantuan penyangga (tiang) dan perlengkapannya, dan dibedakan atas:

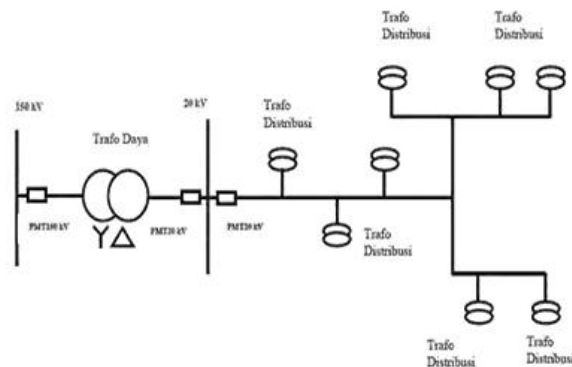
- 1) Saluran kawat udara, bila konduktornya telanjang, tanpa isolasi pembungkus.
 - 2) Saluran kabel udara, bila konduktornya terbungkus isolasi.
 - b. Saluran Bawah Tanah, dipasang di dalam tanah, dengan menggunakan kabel tanah (*ground cable*).
 - c. Saluran Bawah Laut, dipasang di dasar laut dengan menggunakan kabel laut (*submarine cable*).
3. Menurut susunan rangkainnya :
- a. Saluran Konfigurasi horizontal
Bila saluran fasa terhadap fasa yang lain/terhadap netral, atau saluran positif terhadap negatif (pada sistem DC) membentuk garis horizontal.
 - b. Saluran konfigurasi Delta
Bila kedudukan saluran satu sama lain membentuk suatu segitiga (delta).
 - c. Saluran konfigurasi vertikal,
Bila saluran-saluran tersebut membentuk garis vertikal

2.2.3 Konfigurasi Jaringan Distribusi Primer

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat-pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan di suplai tenaga listrik sampai ke pusat beban. Terdapat

bermacam-macam bentuk rangkaian (konfigurasi) jaringan distribusi primer, yaitu:
(Jhonson M. Siburian dkk, 2020)

1. Jaringan Distribusi Radial



Gambar 2.3 Jaringan Distribusi Radial

(Sumber : (Basyarach 2016))

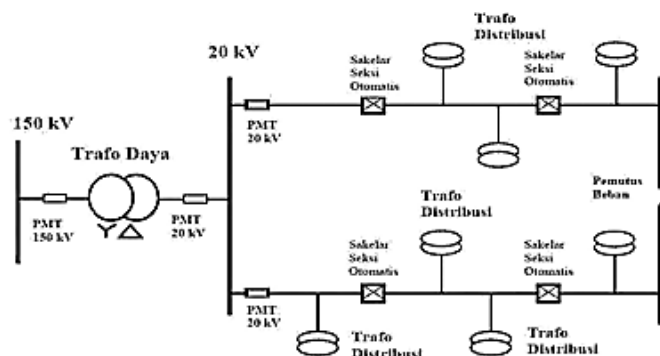
Gambar 2.3 menunjukkan konfigurasi jaringan distribusi tipe radial. Sistem radial hanya memiliki satu sumber dan satu penyulang. Apabila terjadi gangguan pada salah satu komponen tersebut, baik pada sumber maupun pada penyulang, seluruh beban yang dilayani oleh jaringan ini akan mengalami pemadaman. Oleh karena itu, tingkat keandalan sistem distribusi radial tergolong rendah. Sistem ini umumnya hanya memenuhi standar kontinuitas tingkat 1 dan banyak diterapkan pada jaringan distribusi di wilayah luar perkotaan.

Sistem distribusi radial ini mempunyai beberapa bentuk modifikasi, antara lain : (Basyarach 2016)

- a. Sistem Radial Pohon
- b. Sistem Radial dengan *Tie* dan *Switch* Pemisah.
- c. Radial dengan pusat beban.

d. Radial dengan pembagian phase area.

2. Jaringan Distribusi Ring (*Loop*)



Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan *Loop*

(Sumber : (Basyarach 2016))

Gambar 2.4 memperlihatkan konfigurasi jaringan distribusi tipe *loop*. Pada sistem ini, setiap titik beban memiliki dua jalur penyaluran alternatif yang berasal dari lebih dari satu sumber. Jaringan loop merupakan jaringan tertutup, di mana susunan penyulang membentuk konfigurasi cincin (*ring*). Dengan konfigurasi tersebut, titik beban dapat dilayani dari dua arah penyulang, sehingga kontinuitas pelayanan menjadi lebih terjamin. Selain itu, kualitas daya pada sistem loop cenderung lebih baik karena nilai jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran dapat ditekan. Secara umum, konfigurasi jaringan loop dibedakan menjadi dua jenis, yaitu: (Suhadi dan Wrahatnolo 2008)

a. Bentuk open loop:

Bila dilengkapi dengan normally-open switch, dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka.

b. Bentuk close loop :

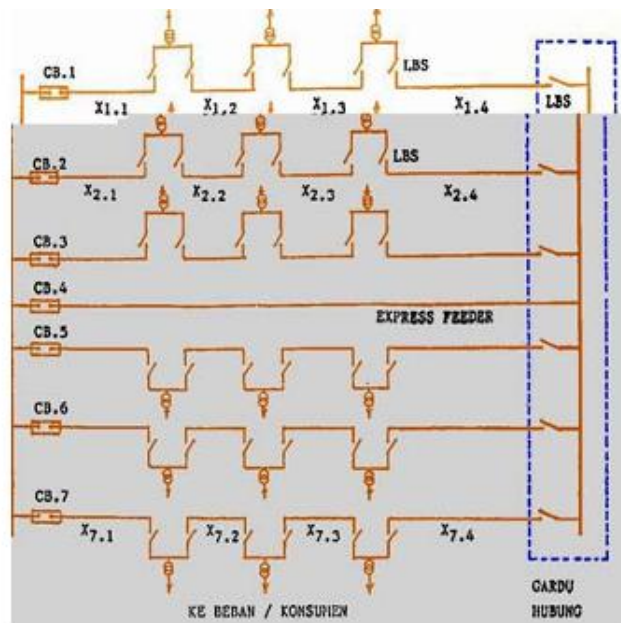
Bila diperlengkapi dengan normally-close switch, yang dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.

3. Jaringan Distribusi *Spindel*

Selain konfigurasi dasar jaringan distribusi, telah dikembangkan berbagai bentuk modifikasi dengan tujuan meningkatkan keandalan dan kualitas sistem. Salah satu konfigurasi modifikasi yang banyak diterapkan adalah jaringan tipe *spindle*. Sistem ini umumnya terdiri atas maksimal enam penyulang yang beroperasi dalam kondisi berbeban serta satu penyulang yang beroperasi tanpa beban. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.5, keenam penyulang yang bekerja dalam kondisi berbeban disebut sebagai *working feeder* atau penyulang kerja, sedangkan satu penyulang yang dioperasikan tanpa beban dikenal sebagai *express feeder* (Suhadi dan Wrahatnolo 2008).

Express feeder berfungsi sebagai saluran cadangan ketika terjadi gangguan pada salah satu *working feeder*. Selain itu, pada kondisi operasi normal, *express feeder* juga berperan dalam mengurangi terjadinya jatuh tegangan pada sistem distribusi yang bersangkutan. Dalam keadaan normal, penyulang ini sengaja dioperasikan tanpa beban. Perlu dicatat bahwa berbagai bentuk konfigurasi jaringan distribusi beserta modifikasinya, sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, pada umumnya dikembangkan untuk sistem jaringan arus bolak-balik (AC) (Suhadi dan Wrahatnolo 2008).

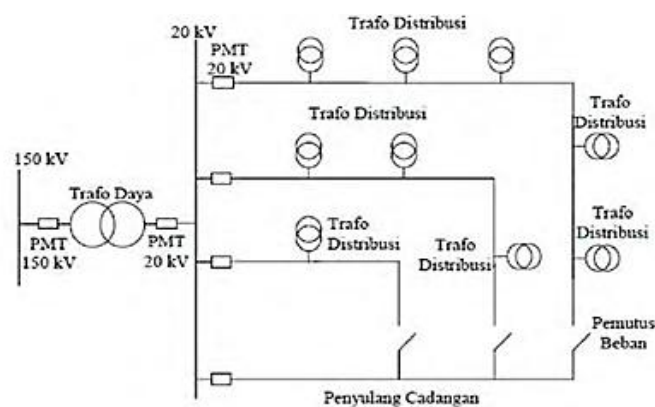
Pada gambar 2.5 dibawah merupakan sistem jaringan distribusi tipe *spindle*.



Gambar 2.5 Jaringan Distribusi *Spindle*
(Sumber : (Suhadi dan Wrahatnolo 2008))

4. Jaringan Distribusi Gugus atau *Cluster*

Dalam sistem ini terdapat saklar pemutus beban dan penyulang cadangan. Sistem ini banyak digunakan untuk kota besar yang mempunyai kerapatan beban yang tinggi. Konfigurasi gugus ditunjukkan pada Gambar 2.6.



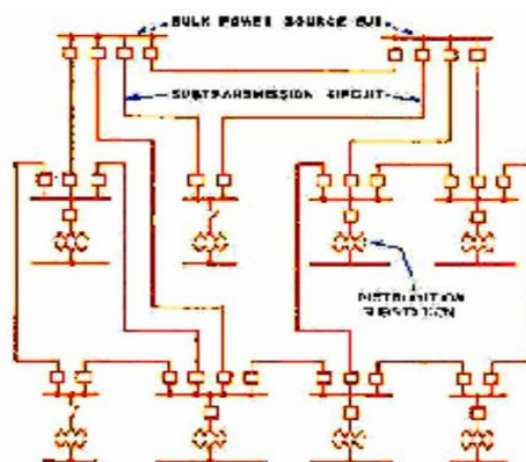
Gambar 2.6 Jaringan Distribusi *Cluster*
(Sumber : (Basyarach 2016))

Penyulang cadangan ini berfungsi untuk menggantikan penyulang konsumen apabila terjadi gangguan pada penyulang konsumen, maka penyulang cadangan inilah yang berfungsi untuk suplai ke konsumen (PLN Persero,2010) .

5. Jaringan Distribusi Jaring-Jaring (NET)

Jaringan distribusi tipe *jaring-jaring*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.7, merupakan gabungan dari beberapa saluran distribusi tipe *loop*. Pada konfigurasi ini, sistem memiliki lebih dari satu sumber sehingga membentuk jaringan interkoneksi. Secara struktur, jaringan jaring-jaring merupakan kombinasi antara sistem radial dan *loop*. Titik beban dilayani oleh lebih banyak alternatif saluran atau penyulang, sehingga apabila salah satu penyulang mengalami gangguan, penyulang lainnya dapat segera menggantikan fungsi penyaluran. Dengan kondisi tersebut, kontinuitas penyaluran daya pada jaringan ini menjadi sangat terjamin (Basyarach 2016).

Pada gambar 2.7 dibawah ini menunjukan konfigurasi sistem jaringan distribusi tipe NET.

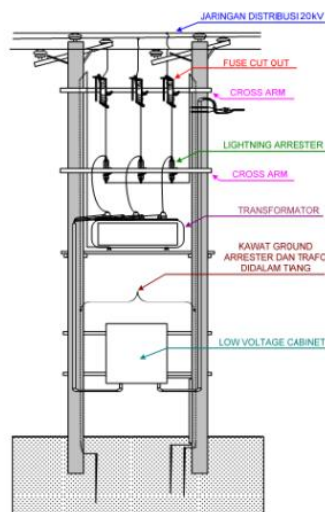


Gambar 2.7 Jaringan Distribusi NET
(Sumber : (Suhadi dan Wrahatnolo 2008))

2.2.4 Komponen Jaringan Distribusi

Penyaluran listrik dari pembangkit hingga ke konsumen melibatkan berbagai komponen yang berfungsi untuk memastikan distribusi listrik yang efisien dan aman. Berikut adalah komponen utama dalam sistem distribusi:

1. Gardu Distribusi



Gambar 2.8 Gardu Distribusi
(Sumber : (PT. PLN - Persero 2010))

Gambar 2.8 memperlihatkan komponen-komponen utama pada gardu distribusi. Gardu transformator distribusi umumnya ditempatkan dekat dengan konsumen, dengan transformator yang dipasang pada tiang listrik dan terintegrasi langsung dengan jaringan distribusi. Untuk menjamin keamanan transformator dan sistem secara keseluruhan, gardu distribusi dilengkapi dengan berbagai unit pengaman. Mengingat tegangan menengah belum dapat digunakan secara langsung untuk mencatu beban, kecuali pada

peralatan yang dirancang khusus, maka digunakan transformator penurun tegangan (*step-down transformer*) yang berfungsi menurunkan tegangan menengah 20 kV menjadi tegangan rendah 400/230 V. Secara umum, gardu transformator distribusi terdiri atas dua sisi utama, yaitu sisi primer dan sisi sekunder (Anang Dasa Novfowan, Mochammad Mieftah, and Wijaya Kusuma 2021).

Sisi primer merupakan saluran yang akan mensuplay ke bagian sisi sekunder. Unit peralatan yang termasuk sisi primer adalah : (Anang Dasa Novfowan, Mochammad Mieftah, and Wijaya Kusuma 2021)

- a. Saluran sambungan dari SUTM ke unit transformator (primer trafo).

Saluran SUTM memiliki fungsi sebagai jalur penghantar utama untuk mentransmisikan listrik dari stasiun transformator tegangan menengah (SUTM) ke berbagai area pelayanan, seperti industri, perkantoran, dan pemukiman. Saluran SUTM ini menyediakan distribusi tegangan menengah yang dibutuhkan oleh konsumen. Pada gambar 2.9 merupakan jaringan SUTM dilapangan.



Gambar 2.9 Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)
(Sumber : (PT. PLN - Persero 2010))

b. Peralatan Hubung (*Switching*)



Gambar 2.10 Contoh Peralatan Hubung (*Switching*) pada Sistem Distribusi
(Sumber : (PT. PLN - Persero 2010))

Pada gambar 2.10 menunjukkan peralatan hubung (*switching*) yang ada pada sistem distribusi. Pada percabangan atau pengalokasian seksi pada jaringan SUTM untuk maksud kemudahan operasional harus dipasang Pemutus Beban (*Load Break Switch* : LBS), selain LBS dapat juga dipasangkan Fused Cut-Out (FCO) (PT.PLN - Persero 2010).

c. Pemutus Beban (*Load Break Switch*)

Load Break Switch (LBS) merupakan peralatan pada sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi untuk mengisolasi area yang mengalami gangguan. LBS bekerja sebagai alat pemutus dan penyambung sirkuit yang dapat dioperasikan dalam kondisi berbeban. Peralatan ini memungkinkan pengaturan penyaluran listrik, baik untuk memutus

maupun mengalirkan daya ke konsumen pada wilayah tertentu. Secara fungsi, LBS memiliki kemiripan dengan pemutus tenaga (*Power Circuit Breaker* atau *Circuit Breaker*), dan umumnya dipasang pada saluran jaringan distribusi tenaga listrik. (Kenedy et al. 2017).

d. Pemisah (*Disconnecting Switch*)

Pemisah atau *Disconnecting Switch* (PMS/DS) merupakan peralatan yang digunakan untuk memisahkan tegangan pada instalasi tegangan tinggi. Secara prinsip, cara kerja PMS hampir menyerupai *Circuit Breaker* (CB), namun perbedaannya terletak pada fungsinya, di mana PMS tidak dirancang untuk memutus arus gangguan. Peralatan ini digunakan untuk mengisolasi peralatan, khususnya pemutus tenaga (PMT), dari sumber tegangan sehingga kegiatan perawatan atau perbaikan dapat dilakukan dengan aman. Oleh karena itu, PMS harus berada pada posisi terbuka agar PMT benar-benar bebas dari tegangan dan keselamatan teknisi selama proses pemeliharaan dapat terjamin. (Gonibala, Silimang, and Patras 2018).

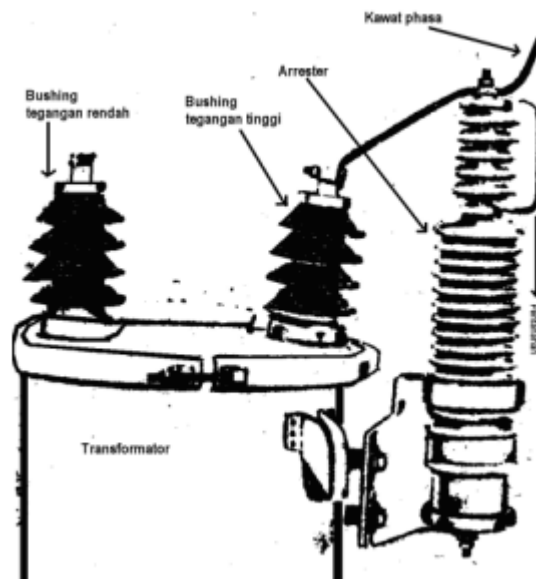
e. Pemutus Tenaga (*Circuit Breaker*)

Berdasarkan *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV) 441-14-20, *Circuit Breaker* (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT) didefinisikan sebagai peralatan saklar mekanis yang mampu melakukan fungsi penutupan, pengaliran, dan pemutusan arus beban dalam kondisi operasi normal. Selain itu, CB juga dirancang untuk dapat menutup, mengalirkan arus dalam jangka waktu tertentu, serta memutus arus pada

kondisi operasi tidak normal atau gangguan, seperti hubung singkat (*short circuit*).

f. *Lightning Arrester*

Pada gambar 2.11 dibawah ini menunjukan Arrester pada trafo distribusi beserta bagian-bagiannya.



Gambar 2.11 Pemasangan *Arrester* pada Transformator Distrbusi
(Sumber : (Saragih et al. 2020))

Lightning Arrester merupakan alat pelindung atau pengaman bagi peralatan sistem distribusi apabila terjadi masalah pada surja petir dengan cara membatasi tegangan lebih dan tegangan lebih ini di alirkan ke tanah. Arrester di pasang sedekat mungkin pada peralatan yang dilindungi yang dihubungkan dari fasa konduktor tanah (Syarifah, Kurniawan, and Asmar 2021).

g. Isolator



Gambar 2.12 Isolator pada Jaringan Tegangan Menengah
(Sumber : (Prasetyo and Hidayah 2013))

Pada gambar 2.12 diatas menunjukan isolator yang berada pada jaringan distribusi tegangan menengah. Isolator jaringan tenaga listrik merupakan alat tempat menompang kawat penghantar jaringan pada tiang-tiang listrik yang digunakan untuk memisahkan secara elektris dua buah kawat atau lebih agar tidak terjadi kebocoran arus (*leakage current*) atau loncatan bunga api (*flash over*) sehingga mengakibatkan terjadinya kerusakan pada sistem jaringan tenaga listrik (PT.PLN - Persero 2010).

2.2.5 Faktor yang Mempengaruhi Penyaluran

Penyaluran daya listrik dari pembangkit sampai ke konsumen melalui suatu sistem penyaluran yang panjang, terdapat parameter-parameter yang mempengaruhi besaran tenaga listrik yang diterima. Adapun yang mempengaruhi sistem penyaluran daya listrik pada saluran udara tegangan menengah adalah sebagai berikut : (Hontong, Tuegeh, and Patras 2015)

1. Pengaruh eksternal

Pengaruh eksternal merupakan faktor lingkungan yang sering memicu terjadinya gangguan pada sistem tenaga listrik. Gangguan tersebut dapat menyebabkan pemadaman, penurunan tingkat tegangan, serta fluktuasi atau ayunan tegangan. Faktor eksternal umumnya berasal dari kondisi alam, seperti angin kencang, gempa bumi, badai, dan aktivitas gunung berapi. Selain faktor alam, gangguan juga dapat disebabkan oleh aktivitas hewan dan manusia, khususnya tindakan yang mengakibatkan kerusakan lingkungan, seperti penebangan pohon di sekitar jaringan listrik.

2. Pengaruh Internal

Pengaruh internal merupakan faktor yang timbul pada saluran distribusi tegangan menengah sebagai akibat dari kondisi penyaluran tenaga listrik itu sendiri. Faktor ini dapat menyebabkan perubahan karakteristik listrik selama proses penyaluran energi dari pusat pembangkitan hingga ke konsumen. Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan melalui penggunaan peralatan bantu pada sistem distribusi. Pengaruh internal yang dimaksud meliputi parameter kelistrikan saluran, yaitu resistansi, induktansi, dan kapasitansi.

2.3 Rugi – Rugi Daya (*Losses*)

Rugi-rugi daya merupakan kehilangan energi listrik yang terjadi pada jaringan distribusi, baik dalam bentuk daya aktif maupun daya reaktif. Panjang saluran distribusi berpengaruh langsung terhadap besarnya tahanan dan reaktansi jaringan. Semakin panjang saluran, nilai tahanan dan reaktansi akan semakin besar,

sehingga menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya, baik pada komponen daya aktif maupun daya reaktif. (Azka Azhari 2017)

Pada saluran distribusi rugi – rugi daya (*Losses*) dapat dihitung menggunakan persamaan umum rugi rugi daya aktif sebagai berikut :

$$\Delta P = I^2 \cdot \Delta R \quad (2-1)$$

Dimana :

ΔP = rugi daya aktif (watt)

I^2 = arus beban (ampere)

R = tahanan saluran (ohm)

Persamaan umum rugi-rugi daya reaktif :

$$\Delta Q = I^2 \cdot \Delta X_L \quad (2-2)$$

Dimana :

ΔQ = rugi daya reaktif (VAR)

I^2 = arus beban (ampere)

X_L = reaktansi jaringan (ohm)

Rugi-rugi daya pada jaringan tiga fasa dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L \quad (2-3)$$

Dimana :

ΔP = rugi daya aktif (watt)

I^2 = arus beban (ampere)

R = tahanan saluran (ohm)

L = Panjang Penghantar (kms)

2.3.1 Rugi – Rugi Daya Berdasarkan Sifat

1. Rugi-Rugi Daya Non Teknis

Rugi-rugi daya nonteknis timbul akibat permasalahan dalam penyaluran tenaga listrik yang tidak berkaitan langsung dengan kondisi teknis peralatan. Bentuk rugi nonteknis yang sering terjadi antara lain pencurian energi listrik dan penyambungan listrik secara ilegal. Untuk mengantisipasi hal tersebut, PT PLN (Persero) perlu melakukan langkah pengendalian, seperti inspeksi rutin ke pelanggan, pemutusan aliran listrik terhadap pelanggaran yang terbukti, serta pelaporan kepada pihak berwenang sesuai dengan ketentuan yang berlaku (Azka Azhari 2017).

2. Rugi-Rugi Daya Teknis.

Rugi-rugi teknis (susut teknis) muncul akibat sifat daya hantar material/peralatan listrik itu sendiri yang sangat bergantung dari kualitas bahan dari material/peralatan listrik tersebut, jika pada jaringan maka akan sangat bergantung pada konfigurasi jaringannya (Azka Azhari 2017).

a. Kerugian akibat panas

Apabila suatu penghantar dialiri arus listrik secara terus-menerus, akan timbul panas akibat energi listrik yang mengalir pada penghantar tersebut. Semakin lama arus mengalir, suhu penghantar akan semakin meningkat, sehingga semakin besar pula energi listrik yang hilang karena berubah menjadi panas. Kondisi ini merugikan karena kehilangan energi tersebut menyebabkan penurunan tegangan pada

ujung penghantar. Dengan demikian, semakin besar energi yang terdisipasi sebagai panas, semakin besar pula daya yang hilang pada saluran.

b. Kerugian akibat jarak

Panjang penghantar memiliki pengaruh yang signifikan terhadap keandalan jaringan distribusi. Semakin panjang jarak penghantar dari sumber atau pembangkit tenaga listrik, semakin besar nilai tahanan yang dimilikinya. Akibatnya, rugi-rugi daya pada penghantar meningkat sehingga daya listrik yang sampai ke ujung beban menjadi berkurang. Kondisi ini secara langsung berdampak pada penurunan keandalan sistem penyaluran tenaga listrik.

c. Luas penampang penghantar

Arus listrik yang mengalir pada suatu penghantar selalu mengalami hambatan yang berasal dari penghantar itu sendiri, di mana besar kecilnya tahanan dipengaruhi oleh jenis bahan penghantar. Tegangan saluran juga berperan penting terhadap besarnya rugi-rugi daya, karena semakin tinggi tegangan pada suatu saluran, arus yang mengalir akan semakin kecil. Sebaliknya, besarnya arus merupakan salah satu faktor utama yang menentukan besar kecilnya rugi daya pada saluran distribusi.

2.4 Tegangan Jatuh (*Drop Voltage*)

Jatuh tegangan merupakan penurunan nilai tegangan yang terjadi sepanjang suatu penghantar. Secara umum, besarnya jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik

berbanding lurus dengan panjang saluran dan besar beban, serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Berdasarkan SPLN Nomor 72 Tahun 1987, batas jatuh tegangan yang diperbolehkan pada sistem distribusi berada dalam kisaran +5% dan -10% dari tegangan nominal (Sugianto, Jaya, and Ashad 2020).

Karena adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen (V_r) akan lebih kecil dari tegangan kirim (V_s), sehingga tegangan jatuh (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik, sesuai dengan persamaan berikut: (Sugianto, Jaya, and Ashad 2020)

$$\Delta V = \frac{V_s V_R}{V_s} \times 100\% \quad (2-4)$$

Dimana :

ΔV = Jatuh Tegangan (V)

V_s = Tegangan pada pangkal pengirim (V)

V_r = Tegangan pada pangkal penerima (V)

Drop tegangan pada sistem distribusi meliputi :

1. Penyulang tegangan menengah (JTM)
2. Transformator distribusi
3. Penyulang jaringan (SKTR)

Kenaikan maupun penurunan tegangan sangat memengaruhi kinerja peralatan elektronik. Kondisi tegangan yang tidak stabil dapat menyebabkan pemanasan berlebih dan bahkan berpotensi merusak peralatan tersebut. Oleh karena itu, kestabilan tegangan yang disuplai oleh sistem tenaga listrik harus dijaga untuk menjamin keandalan pelayanan.

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) Tahun 2000, batas kenaikan tegangan yang diizinkan di Indonesia adalah sebesar +5%, sedangkan batas penurunan tegangan yang diizinkan adalah -10% dari tegangan nominal. Dengan tegangan nominal sebesar 220 V, maka tegangan maksimum yang masih diperbolehkan adalah 231 V ($220+5$), sedangkan tegangan minimum yang diizinkan adalah 198 V ($220-10$) (Hamid, Sukoco, and Nugroho 2020).

Menurut standar perusahaan umum listrik Negara (SPLN) 72 tahun 1987, jatuh tegangan yang diijinkan pada masing-masing jenis sambungan, sebagai berikut :

1. Jatuh tegangan pada jaringan tegangan menengah (JTM) dibolehkan:
 - a. 2% dari tegangan kerja sebagaimana tercantum pada ayat 22 bagi sistem yang tidak memanfaatkan STB (yaitu sistem Spindel dan Gugus).
 - b. 5% dari tegangan kerja bagi sistem yang memanfaatkan STB yaitu sistem radial di atas tanah dan sistem simpul.
2. Jatuh tegangan pada transformator distribusi dibolehkan 3% dari tegangan kerja.
3. Jatuh tegangan pada sambungan tegangan rendah (STR) dibolehkan sampai 4% dari tegangan kerja tergantung kepadatan beban.
4. Jatuh tegangan pada sambungan rumah (SR) dibolehkan 1% dari tegangan nominal.

Besar kecilnya drop tegangan dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya : (Hamid, Sukoco, and Nugroho 2020)

1. Tahanan saluran
2. Arus saluran
3. Impedansi
4. Panjang saluran
5. Diameter saluran

2.5 Pembangkit Tersebar (Distribution Generation)

Saat ini, berbagai negara di Eropa dan Amerika telah banyak mengembangkan konsep *Distributed Generation* (DG) sebagai bagian dari upaya pemenuhan kebutuhan energi listrik. DG merupakan sistem pembangkitan listrik berskala kecil yang ditempatkan dekat dengan pusat-pusat beban. *International Council on Large Electric Systems* (CIGRE) mendefinisikan DG sebagai unit pembangkit dengan kapasitas maksimum hingga sekitar 50 MW yang terhubung ke jaringan distribusi. Sementara itu, *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) menyatakan bahwa DG adalah pembangkitan listrik dengan kapasitas lebih kecil dibandingkan pembangkit konvensional dan dapat diintegrasikan pada hampir setiap titik dalam sistem tenaga listrik. Adapun *International Energy Agency* (IEA) mendefinisikan DG sebagai unit pembangkit energi yang berada di sisi konsumen atau dalam jaringan distribusi lokal. (Ackermann, Andersson, and Söder 2001)

Sumber energi listrik pada *Distributed Generation* (DG) dapat berasal dari pemanfaatan energi baru terbarukan, seperti energi air, angin, surya, biomassa, dan sumber sejenis lainnya, maupun dari energi tidak terbarukan, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Kinerja dan dampak penerapan DG dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain karakteristik jaringan distribusi, jenis atau tipe DG, serta

kondisi pengoperasian saat DG terhubung secara paralel dengan sistem. Faktor-faktor tersebut dapat memengaruhi kapasitas sistem, perubahan *current rating*, serta peningkatan harmonisa. Apabila aspek kualitas daya tidak diperhatikan dengan baik, kondisi ini berpotensi menimbulkan permasalahan yang merugikan, baik bagi penyedia tenaga listrik maupun konsumen. (Gubanski et al. 2015).

Pembangkit listrik konvensional memiliki beberapa keterbatasan, antara lain biaya pembangkitan yang relatif tinggi serta dampak lingkungan yang kurang ramah karena masih bergantung pada sumber energi tidak terbarukan atau berbasis fosil. Selain itu, pembangkit jenis ini umumnya berkapasitas besar dan berlokasi jauh dari pusat beban, sehingga membutuhkan sistem penyaluran energi yang panjang (Subrahmanyam 2009).

Kondisi tersebut menuntut penggunaan saluran distribusi yang relatif panjang untuk menyalurkan energi listrik menuju beban. Akibatnya, rugi-rugi daya pada jaringan distribusi dapat mencapai sekitar 10–13% dari total daya yang dibangkitkan. Untuk mengurangi kerugian tersebut, dilakukan pemasangan atau interkoneksi *Distributed Generation* (DG) yang ditempatkan dekat dengan pusat beban. Agar pemanfaatan jaringan distribusi dapat berlangsung secara optimal dan efisien, diperlukan integrasi yang tepat antara konfigurasi ulang jaringan serta penentuan lokasi penempatan DG yang sesuai (Ghijselen and Van den Bossche 2005).

Klasifikasi *distributed generation* berdasarkan kapasitas pembangkitan yang dimilikinya seperti dalam tabel 2.1 (Dani et al. 2022).

Tabel 2.1 Klasifikasi *Distributed Generation*

NO	Jenis DG	Kapasitas DG
1	<i>Micro Distributed Generator</i>	1 watt – 5 kW
2	<i>Small Distributed Generator</i>	5 kW – 5 MW
3	<i>Medium Distributed Generator</i>	5 MW – 50 MW
4	<i>Large Distributed Generator</i>	50 MW – 300 MW

Teknologi DG yang sering digunakan adalah micro-hydro, panel surya, turbin angin, mesin diesel, sel bahan bakar, dan baterai yang terdiri dari sejumlah modul-modul kecil dan dirakit secara tersendiri oleh pabrik. Hal ini dilakukan untuk mempermudah konstruksi dan implementasi pada lokasi DG. Modul-modul kecil tersebut dapat dipasang dengan sangat cepat pada lokasi akhir dimana pembangkit membutuhkan penghematan waktu yang sangat signifikan bila dibandingkan dengan pembangunan pembangkit tenaga listrik besar yang letaknya terpusat pada suatu lokasi tertentu (Fahira 2015).

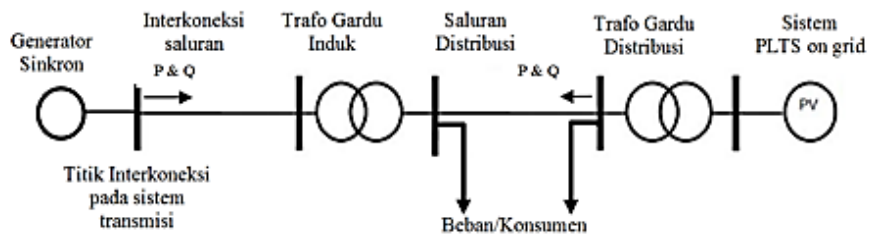
Berdasarkan teknologi pembangkitan yang digunakan, DG dapat diklasifikasikan sebagai berikut : (Fahira 2015)

Tabel 2.2 Klasifikasi DG Berdasarkan Teknologi Pembangkitan

Teknologi DG	Kapasitas per Modul
<i>FOSSIL FUEL</i>	
<i>Combined Cycle Gas Turbine (CCGT)</i>	35-400 MW
<i>Internal combustion engines</i>	5 kW-10 MW
<i>Combustion turbine</i>	1-250 MW
<i>Micro-Turbines</i>	35 kW-1 MW
<i>RENEWABLE RESOURCES</i>	
<i>Small hydro</i>	1-100 MW
<i>Micro hydro</i>	25 kW-1 MW
<i>Wind turbine</i>	200 Watt-3 MW
<i>Photovoltaic arrays</i>	20 Watt-100 kW
<i>Solar terminal, central receiver</i>	1-10 MW
<i>Solar terminal, Lutz system</i>	10-80 MW

<i>Biomass, e.g. based on gastification</i>	100 kW-20 MW
<i>Fuel cells, phosacid</i>	200 kW-2 MW
<i>Fuel cells, solid oxide</i>	250 kW-2 MW
<i>Geothermal</i>	5-100 MW
<i>Ocean energy</i>	100 kW – 1 MW
<i>Stirling engine</i>	2 – 10 kW
<i>Battery storage</i>	500kW – 5 MW

2.5.1 Pengaruh DG pada Sistem Distribusi



Gambar 2.13 Interkoneksi DG dengan sistem distribusi

Pada gambar 2.13 diatas merupakan contoh interkoneksi antara *Distributed Generation* (DG) berbasis PLTS *On-Grid* pada jaringan distribusi. Pengaruh pemasangan Renewable Energy pada system distribusi sangatlah signifikan. Salah satunya dapat memperbaiki profil tegangan serta meminimalisir Rugi-rugi daya (*Losses*) yang disebabkan oleh panjangnya saluran distribusi. Dampak pemasangan *Distributed Generation* (DG) ini sendiri juga dapat meningkatkan stabilitas tegangan. Hal ini juga dapat menjadi alternative saat pembangkit utama mengalami gangguan. Karena pemasangan *Distributed Generation* (DG) dapat langsung aktif ketika sedang dibutuhkannya daya tambahan (Baqaruzi and Muhtar 2020).

Interkoneksi (DG) kedalam jaringan distribusi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kualitas jaringan distribusi tenaga listrik yang meliputi Aliran Daya, perbaikan profil tegangan, peningkatan keandalan, dan penurunan rugi-rugi daya. Sebagian besar jaringan distribusi tenaga listrik dirancang sedemikian rupa sehingga aliran daya mengalir dalam satu arah. Penerapan (DG) memberikan sumber energi tambahan pada suatu jaringan distribusi tenaga listrik (Baqaruzi and Muhtar 2020).

Teknologi (DG) sangat diperlukan di sisi jaringan distribusi karena sistem tersebut dapat mengurangi rugi daya pada sistem dan memperbaiki kualitas tegangan dan juga memperbaiki efisiensi, sehingga dapat mempengaruhi performa dari pusat tenaga listrik dan sistem pendistribusian listrik.

2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit energi listrik yang memanfaatkan radiasi matahari melalui proses konversi pada sel fotovoltaik. Sistem fotovoltaik berfungsi mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Besarnya daya listrik yang dihasilkan panel surya sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari (*irradiance*), di mana semakin tinggi tingkat iradiasi yang diterima sel fotovoltaik, semakin besar pula daya listrik yang dihasilkan (Rachmi et al. 2020).

Produksi energi listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu tingkat iradiasi matahari, suhu modul surya, *shading*, tingkat kebersihan modul, serta sudut kemiringan dan orientasi

pemasangan modul surya. Pertama, energi listrik yang dihasilkan modul surya akan menurun seiring dengan berkurangnya intensitas iradiasi matahari. Kedua, peningkatan suhu modul surya juga menyebabkan penurunan keluaran energi, yang besarnya bergantung pada koefisien suhu modul. Secara umum, kenaikan suhu sebesar 1°C dapat menurunkan produksi energi sekitar 0,4%. Ketiga, adanya objek di sekitar PLTS yang menghalangi penyinaran matahari (*shading*) akan mengurangi iradiasi yang diterima modul surya. Keempat, kotoran yang menempel pada permukaan modul surya dapat menghambat penyerapan radiasi matahari, sehingga menurunkan produksi energi. Kelima, sudut kemiringan dan orientasi panel surya berpengaruh signifikan terhadap kemampuan modul dalam menyerap radiasi matahari, di mana setiap lokasi memiliki sudut kemiringan optimal untuk memaksimalkan penerimaan iradiasi (Gunawan, Kumara, and Irawati 2019).

Dalam menghitung dan merencanakan sebuah pembangkit berbasis tenaga surya (PLTS) diperlukan perhitungan untuk menentukan berapa lahan yang diperlukan untuk membangun pembangkit bertenaga surya, dalam menentukan hal tersebut maka diperlukan persamaan sebagai berikut: (Dedi Wiriastika, Setiawan, and Sukerayasa 2022)

Untuk menghitung jumlah energi listrik tahunan yang dihasilkan oleh suatu sistem PLTS menggunakan persamaan berikut :

$$Tsh = \frac{Gh}{1000 \left[\frac{W}{m^2} \right] \times 365 \text{ Hari}} \quad (2-5)$$

Dimana :

Tsh = Total Energi Listrik Tahunan (kWh/tahun)

G_h = Energi Surya Yang Diterima Selama Satu Tahun ($Wh/m^2/tahun$)

Untuk menentukan kapasitas puncak (Kwp) sistem panel surya berdasarkan kebutuhan energi harian dan iradiasi harian di lokasi pemasangan menggunakan persamaan berikut :

$$\text{Menentukan Kwp} = \frac{\text{Energi Harian (Wh)}}{\text{Iradiasi Harian } (\frac{kWh}{m^2})} \quad (2-6)$$

Dimana :

Energi Harian (Wh) = Total Energi Listrik Yang Dibutuhkan Dalam Satu Hari.

Iradiasi Harian = Jumlah Energi Surya Yang Diterima Oleh Setiap Meter Persegi Permukaan Panel Per Hari

Setelah mengetahui kebutuhan kapasitas panel, maka dapat ditentukan jumlah panel yang akan digunakan dengan spesifikasi panel. Untuk mengetahui hal tersebut dapat menggunakan persamaan berikut :

$$\eta_m = \frac{C_{PV}}{C_m} \quad (2-7)$$

Dimana :

η_m = Jumlah Modul

C_{PV} = Capacity PV (kWp)

C_m = Capacity Modul Spesification

Kemudian dapat menentukan jumlah panel seri yang akan digunakan dengan cara membagi tegangan VDC pada sistem SCC dengan tegangan panel yang terdapat pada spesifikasi panel surya seperti dinyatakan pada persamaan berikut :

$$\eta_{sm} = \left[\frac{V_{dc}}{V_{mp}} \right] \quad (2-8)$$

Dimana :

η_{sm} = Jumlah modul seri

V_{dc} = Tegangan total DC (V)

V_{mp} = *Voltage at Maximum Power* (V)

Selanjutnya dapat menentukan jumlah panel paralel yang akan digunakan dengan cara membagi jumlah modul yang akan digunakan dan jumlah panel yang diserikan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\eta_{pm} = \frac{\eta_m}{\eta_{sm}} \quad (2-9)$$

Dimana :

η_{pm} = Jumlah modul paralel

η_m = Jumlah modul

η_{sm} = Jumlah modul seri

Pada perancangan sistem PLTS, tegangan total ditentukan berdasarkan konfigurasi sambungan panel surya. Pada sambungan seri, tegangan total merupakan hasil penjumlahan tegangan maksimum daya (V_{mp}) dari setiap panel dalam rangkaian dengan menggunakan persamaan berikut :

$$V_{maks} = V_{mp} \times \eta_{pm} \quad (2-10)$$

Dimana :

V_{maks} = Tegangan total sistem (V)

V_{mp} = *Voltage at Maximum Power* (V)

η_{pm} = Jumlah modul seri

Dalam konfigurasi paralel, arus total adalah hasil penjumlahan arus dari setiap rangkaian seri. Berdasarkan spesifikasi panel, arus maksimum daya (I_{mp}) satu panel dengan menggunakan persamaan berikut :

$$I_{maks} = I_{mp} \times \eta_{pm} \quad (2-11)$$

Dimana :

I_{maks} = Arus total sistem (A)

I_{mp} = *Current at Maximum Power* (A)

η_{pm} = Jumlah Modul Paralel

Daya total (P_{maks}) dari sistem PLTS dihitung berdasarkan tegangan total dan arus total yang dihasilkan oleh konfigurasi panel surya dengan menggunakan persamaan berikut :

$$P_{maks} = V_{maks} \times I_{maks} \quad (2-12)$$

Dimana :

P_{maks} = Daya Total Sistem

V_{maks} = Tegangan Total Sistem

I_{maks} = Arus Total Sistem

Untuk menentukan kebutuhan luas area yang akan digunakan setelah kita mengetahui total nilai kapasitas sistem PLTS yang akan kita gunakan. Untuk menghitung kebutuhan luas are PV area maka menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$PV \text{ Area} = \frac{E_L}{G_{AV} \times \eta_{PV} \times TCF \times \eta_{OUT}} \quad (2-13)$$

Dimana :

E_L = Pemakaian Energi (kWh/hari)

G_{AV} = Insolasi harian matahari rata-rata (kWh/m²/hari)

η_{PV} = Efisiensi Panel Surya

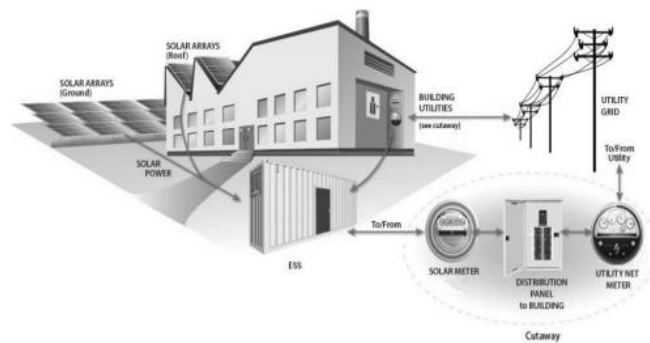
TCF = *Temperature Correction Factor*

η_{OUT} = Efisiensi Inverter

2.6.1 Jenis – Jenis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

1. PLTS *On Grid*

Sistem PLTS terinterkoneksi (*On-Grid*) atau yang disebut dengan *Grid Connected PV System* adalah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan listrik. Dan sesuai dengan namanya, maka sistem ini akan dihubungkan dengan jaringan PLN dengan mengoptimalkan pemanfaatan energi matahari melalui modul surya atau photovoltaic modul yang menghasilkan listrik semaksimal mungkin. Sistem ini juga dianggap ramah lingkungan dan bebas emisi. Sistem PLTS terinterkoneksi juga merupakan sebuah solusi green energi bagi masyarakat perkotaan baik perkantoran maupun perumahan yang bertujuan untuk dapat memperkecil tagihan rekening listrik dari PLN dan dapat memberikan nilai tambah kepada pemiliknya. Pada gambar 2.14 dibawah ini menunjukan PLTS *On-Grid* ke jaringan penyedia listrik (Hasanah, Koerniawan, and Yuliansyah 2019).

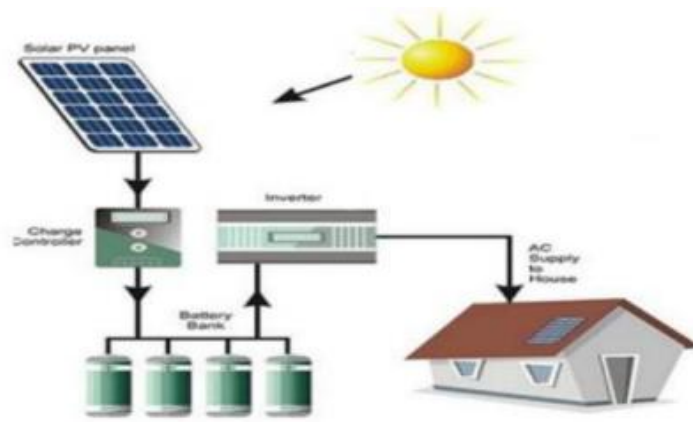
Gambar 2.14 PLTS *On-Grid*

(Sumber : (Hasanah, Koerniawan, and Yuliansyah 2019))

2. PLTS *Off-Grid*

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya terpusat (*off-grid*) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan radiasi matahari dan beroperasi tanpa terhubung dengan jaringan PLN. Pada sistem ini, sumber energi listrik sepenuhnya berasal dari radiasi matahari yang dikonversi oleh panel surya atau sel fotovoltaik. PLTS *off-grid* umumnya diterapkan pada wilayah yang belum terjangkau oleh pasokan listrik PLN, seperti daerah pedesaan atau terpencil. Konfigurasi PLTS *off-grid*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.15, dilengkapi dengan baterai yang berfungsi sebagai penyimpan energi sekaligus

backup untuk menjamin kontinuitas suplai listrik.



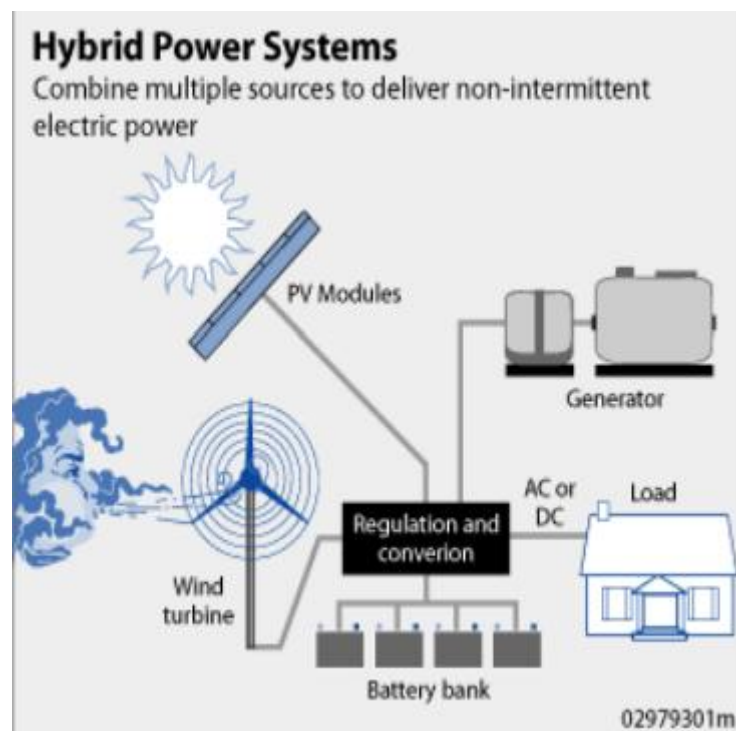
Gambar 2.15 PLTS *Off-Grid*
(Sumber : (Ramadhana et al. 2022))

3. PLTS *Hybird*

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Hybrid* didefinisikan sebagai sistem pembangkit listrik yang memadukan energi surya dengan sumber energi lainnya. Sumber energi pendukung tersebut dapat berasal dari berbagai jenis pembangkit, seperti PLTA, PLTG, PLTD, PLTB, maupun sumber energi lainnya. Sistem ini disebut *hybrid* karena mengombinasikan lebih dari satu sumber energi, seperti gas, panas bumi, angin, dan diesel, untuk meningkatkan keandalan pasokan listrik.

Dalam pengertian tertentu, PLTS *hybrid* mengintegrasikan sistem PLTS dengan pembangkit energi baru terbarukan lainnya guna menjaga keberlanjutan pasokan energi dan memaksimalkan pemanfaatan energi ramah lingkungan. Pada konsep ini, sistem *hybrid* hanya memanfaatkan sumber energi terbarukan tanpa bergantung pada bahan bakar fosil seperti minyak, gas, atau batu bara.

Definisi lain menyatakan bahwa PLTS *hybrid* merupakan sistem penyediaan energi listrik yang mengombinasikan panel surya, jaringan listrik PLN, serta generator set (*genset*). Dengan konfigurasi ini, PLTS *hybrid* menggabungkan keunggulan sistem *on-grid* dan *off-grid* sekaligus. Sistem *on-grid* terhubung dengan jaringan PLN namun tidak dilengkapi penyimpanan energi, sedangkan sistem *off-grid* tidak terhubung ke PLN tetapi memiliki baterai sebagai media penyimpanan energi. Melalui integrasi kedua sistem tersebut, PLTS *hybrid* mampu menutup keterbatasan masing-masing sistem dan meningkatkan keandalan pasokan listrik. Gambar 2.16 menunjukkan konfigurasi PLTS berbasis *hybrid* yang memanfaatkan lebih dari satu sumber energi (Wahyu Bagus Rahmatulloh and Aris Heri Andriawan 2024).



Gambar 2.16 PLTS *Hybird*
(Sumber : (Kunaifi 2011))

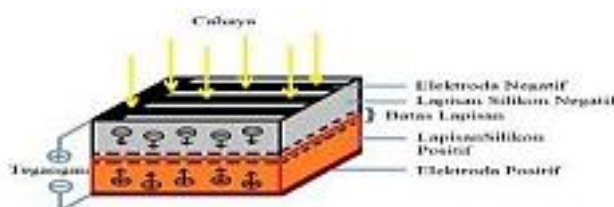
2.6.2 Komponen Utama Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Fotovoltaik adalah suatu alat yang dapat mengubah energi surya (foton) menjadi listrik arus searah. Kemudian listrik arus searah diubah menjadi arus bolak-balik sesuai dengan sistem tegangan dan frekuensi setempat. Suatu PLTS memiliki komponen utama yaitu:

1. Panel Surya

Panel surya merupakan perangkat yang digunakan untuk mengonversi energi matahari menjadi energi listrik. Panel ini tersusun dari sel fotovoltaik yang umumnya terbuat dari material semikonduktor, terutama silikon, yang dilapisi dengan bahan tambahan tertentu. Ketika cahaya matahari mengenai sel fotovoltaik, elektron pada atom silikon akan terlepas dan bergerak membentuk aliran listrik, sehingga energi listrik dapat dihasilkan.

Kinerja sel fotovoltaik sangat bergantung pada intensitas radiasi matahari yang diterima. Panel surya menghasilkan arus listrik yang dapat dimanfaatkan, antara lain, untuk mengisi baterai. Apabila intensitas cahaya matahari menurun, seperti pada kondisi berawan, mendung, atau hujan, maka arus listrik yang dihasilkan juga akan berkurang. Gambar 2.17 menunjukkan susunan lapisan yang terdapat pada panel surya (Usman 2020).



Gambar 2.17 Lapisan Panel Surya
(Sumber : (Manab et al. 2022))

Berdasarkan teknologinya, jenis sel surya dikategorikan sebagai berikut

a. *Monocrystalline*



Gambar 2.18 Panel Surya *Monocrystalline*

(Sumber : (Widharma 2021))

Pada gambar 2.18 diatas menunjukkan komponen panel surya dengan jenis *monocrystalline*. Sesuai dengan namanya, sel surya kristal tunggal atau mono dibuat dari silikon kristal tunggal melalui proses yang disebut Czochralski, atau pemurnian bahan dilakukan dengan proses kristalisasi. Kristal silikon dipecah menjadi bagian yang lebih kecil dan lebih tipis selama proses pembuatan. Sel surya jenis ini lebih mahal dan memerlukan berbagai perawatan karena produksi kristal tunggal ini memerlukan proses "rekristalisasi". Sel surya jenis ini memiliki kekurangannya, ketika dirakit menjadi panel surya, itu bulat atau segi delapan, tergantung pada bentuk batang kristal silikon, meninggalkan tempat kosong. Efisiensi sel surya monokristalin berkisar antara 17% hingga 8%.

b. *Polycrystalline*



Gambar 2.19 Panel Surya *Poly-Crystalline*

(Sumber : (Widharma 2021))

Pada gambar 2.19 diatas merupakan komponen panel surya dengan jenis *poly-crystalline*. Sel surya silikon polikristalin juga disebut silikon polikristalin dan silikon polikristalin. Sebuah sel tunggal modul surya polikristalin biasanya terdiri dari sejumlah kristal berbeda yang disatukan. Pemurnian kimia dan proses metalurgi kelas silikon digunakan untuk menghasilkan teknologi pemrosesan sel surya polikristalin yang lebih hemat biaya. Setelah itu, silikon yang tidak dicairkan dituangkan ke dalam cetakan persegi, dilebur, didinginkan, dan dipotong menjadi wafer persegi. Jenis sel surya yang paling banyak digunakan saat ini adalah yang satu ini. Dengan 48% produksi global, sel surya polikristalin mendominasi pasar sel surya pada tahun 2008. Pemadatan cairan silikon menghasilkan pembentukan banyak struktur

kristal. Meskipun lebih murah daripada panel surya monokristalin silikon, efisiensinya hanya 12% - 14%.

c. *Thin Film Solar Cell*



Gambar 2.20 Panel surya Thin Film
(Sumber : (Manab et al. 2022))

Pada gambar 2.20 diatas menunjukkan salah satu contoh komponen panel surya dengan jenis *thin film*. Kebanyakan sel surya film tipis dan silikon amorfous adalah sel surya generasi kedua, dan lebih ekonomis daripada sel surya wafer silikon generasi pertama. Lapisan penyerapan cahaya maksimum sel wafer silikon adalah 350 μm , sedangkan lapisan penyerapan cahaya sel surya film tipis sangat tipis, biasanya 1 μm . Sistem PV film tipis tiga simpul, yang mengungguli panel lain dengan daya yang sama dengan listrik yang dihasilkan oleh udara berawan 45 persen lebih tinggi, adalah inovasi film tipis terbaru. *Silikon amorf* (a-Si), *cadmium telluride* (CdTe), dan *copper indium gallium selenium* (CIGS) adalah tiga jenis sel surya film tipis.

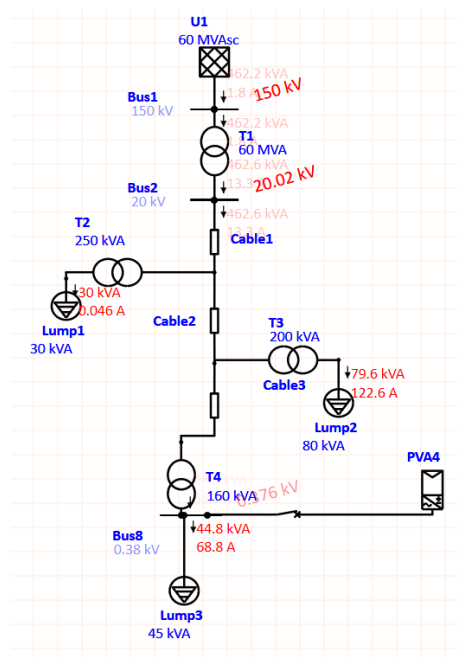
2. Inverter

Inverter adalah alat elektronika yang berfungsi untuk mengubah dari sumber tegangan arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) dengan besaran

tegangan dan frekuensinya dapat diatur. Input dari inverter ialah sumber – sumber arus DC seperti baterai (accu) atau sel surya (solar cell). Dalam memilih Inverter perlu memperhatikan beberapa hal yaitu memperhatikan kapasitas daya beban yang terpasang, pemilihan inputan DC yang harus sama dengan sumber yaitu DC 12 V atau 24 V, bentuk gelombang keluaran inverter, sine wave maupun square wave untuk tegangan *output* AC dimana pemilihan ini disesuaikan dengan nilai efisiensi inverter (Galuh Prawestri Citra Handani, Binar Surya Gumilang, and Afidah Zuroida 2023).

2.7 Simulasi PLTS *On-Grid*

Pada Gambar 2.21 dibawah menunjukan simulasi injeksi PLTS *On-Grid* ke jaringan distribusi. Dimana nantinya didalam simulasi dapat terlihat profil tegangan dan rugi rugi daya pada jaringan distribusi dengan atau tanpa adanya *Distributed Generation* (DG) berbasis PLTS *On-Grid*.



Gambar 2.21 Simulasi Injeksi PLTS ke Jaringan Distribusi

((Sumber : Dokumentasi Pribadi))

Dengan hasil tersebut bisa dilakukan analisa perbandingan dengan atau tanpa adanya DG. Perbandinganya sebagai berikut :

1. Tanpa *Distributed Generation* (DG) PLTS *On-Grid*

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) dan rugi-rugi daya (*losses*) yang terjadi pada jaringan distribusi dikarenakan jauhnya sumber dengan konsumen (pusat beban).

2. Dengan *Distributed Generation* (DG) PLTS *On-Grid*

Dengan *Distributed Generation* (DG) PLTS *On-Grid* terinjeksi dengan jaringan sistem distribusi dapat meningkatkan profil tegangan dan meminimalisir losses melebihi standar di beberapa bus ketika suatu penyulang berada dibeban puncak.

2.8 Penelitian Terkait

Tabel 2.3 Penelitian Terkait

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal	Kebaruan Penelitian
1.	Integrasi <i>Distributed Generation</i> (Dg) Pada Sistem Distribusi 20 Kv Sebagai Upaya Mengurangi Losses Dan Meningkatkan Profil Tegangan	Taufik Hidayat, Lauhil Mahfudz Hayusman dan Rachmadi Setiawan	Program Studi Teknologi Listrik DIII, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang (2018)	Penelitian ini membahas pemodelan DG (PLTMH dan PLTS) yang akan diinjeksikan ke bus-bus yang kritis yang memiliki nilai tegangan dibawah standar operasi jaringan. Analisis dilakukan dengan 4 kondisi pengujian yaitu kondisi awal sistem, kondisi injeksi PLTMH Seloliman, kondisi Injeksi PLTS, kondisi injeksi PLTMH dan PLTS secara bersamaan. Hasil yang diperoleh menunjukan kondisi yang optimal pada saat PLTMH Seloliman dan PLTS di injeksikan, dimana dapat meningkatkan nilai tegangan pada bus-bus beban yang kritis jaringan dilevel standar nilai tegangan operasi yaitu 20 kV.	Perbedaan penelitian ini dengan penelitian terkait adalah penelitian ini berfokus pada dampak dari <i>Distributed Generation</i> (DG) berbasis PLTS on-grid guna dapat memperbaiki dan meminimalisir dampak dari Rugi-Rugi Daya (Losses) dan Jatuh Tegangan yang terjadi pada jaringan distribusi 20kV. Dengan melakukan beberapa skenario pembebanan dengan atau tanpa Interkoneksi <i>Distributed Generation</i> (DG) dan disimulasikan menggunakan <i>software</i> ETAP 19.0.1
2.	Analisa Penempatan <i>Distributed Generation</i> pada	Rizky Pratama Putra, Ontoseno Penangsang	Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi	Jurnal ini membahas mengenai bagaimana DG dapat mempengaruhi faktor daya pada jaringan yang telah ada dan	Perbedaan penelitian ini dengan penelitian terkait adalah penelitian ini berfokus pada dampak dari <i>Distributed</i>

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal	Kebaruan Penelitian
	Jaringan Distribusi 20kV	dan Adi Soeprijanto	Sepuluh Nopember (ITS) (2012)	gangguan apa saja yang dapat terjadi sehingga dapat dilakukan tindakan pencegahan terhadap gangguan yang terjadi di masa yang akan datang. Setelah dilakukan analisis load flow, direncanakan penempatan DG pada beberapa bus untuk membandingkan tingkat kualitas daya yang paling baik. DG yang digunakan berupa wind turbine dengan generator induksi. Penyelesaian permasalahan dalam tugas akhir ini dibatasi hanya menggunakan DG yang dipasang pada bus 1, bus 4, bus 23, bus 48 dan bus 69 dengan level tegangan 20 kV.	<i>Generation</i> (DG) berbasis PLTS on-grid guna dapat memperbaiki dan meminimalisir dampak dari Rugi-Rugi Daya (Losses) dan Jatuh Tegangan yang terjadi pada jaringan distribusi 20kV. Dengan melakukan beberapa skenario pembebanan dengan atau tanpa Interkoneksi <i>Distributed Generation</i> (DG) dan disimulasikan menggunakan <i>software</i> ETAP 19.0.1
3.	Analisis Jatuh Tegangan dan Rugi-rugi Akibat Pengaruh Penggunaan <i>Distributed Generation</i> Pada	Syamsyarief Baqaruzi dan Ali Muhtar.	Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Sumatera (2020)	Jurnal ini membahas pengaruh penggunaan <i>Distributed Generation</i> Pada Sistem Distribusi Primer 20 KV. Penelitian ini dilakukan analisis perbandingan interkoneksi penggunaan atau tanpa penggunaan DG, guna menghasilkan kualitas daya energi	Perbedaan penelitian ini dengan penelitian terkait adalah penelitian ini berfokus pada dampak dari <i>Distributed Generation</i> (DG) berbasis PLTS on-grid guna dapat memperbaiki dan meminimalisir dampak dari Rugi-Rugi Daya (Losses) dan

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal	Kebaruan Penelitian
	Sistem Distribusi Primer 20 KV			listrik pada saluran. Serta mendapatkan besar nilai rugi energi yang dinyatakan dalam bentuk rupiah. Tahapan analisis yang dilakukan ialah memasukan data saluran, data pembebanan, dan pembuatan single line diagram, sehingga didapat perhitungan analisis.	Jatuh Tegangan yang terjadi pada jaringan distribusi 20kV. Dengan melakukan beberapa skenario pembebanan dengan atau tanpa Interkoneksi <i>Distributed Generation</i> (DG) dan disimulasikan menggunakan <i>software</i> ETAP 19.0.1
4.	Rencana Pemasangan <i>Distributed Generation</i> Pada Jaringan Distribusi Serta Pengaruhnya Terhadap Profil Tegangan Dan Rugi-Rugi Daya	A. A. T. B. Artawan, I W. Sukerayasa dan W. G. Ariastina	Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana (2020)	Jurnal ini membahas mengenai memperbaiki jatuh tegangan dan rugi daya dengan pemasangan <i>Distributed Generation</i> (DG). Dimana, pemasangan DG pada Penyulang Jatiluwih disesuaikan dengan potensi sumber energi yang tersedia di sekitar lokasi Penyulang yaitu, pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis profil tegangan dan rugi daya terkait dengan pemasangan DG.	Perbedaan penelitian ini dengan penelitian terkait adalah penelitian ini berfokus pada dampak dari <i>Distributed Generation</i> (DG) berbasis PLTS on-grid guna dapat memperbaiki dan meminimalisir dampak dari Rugi-Rugi Daya (Losses) dan Jatuh Tegangan yang terjadi pada jaringan distribusi 20kV. Dengan melakukan beberapa skenario pembebanan dengan atau tanpa Interkoneksi <i>Distributed Generation</i> (DG) dan disimulasikan menggunakan <i>software</i> ETAP 19.0.1.

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal	Kebaruan Penelitian
5.	Analisis Performa Interkoneksi PLTS Pada Sistem Kelistrikan 20 kVLombok Nusa Tenggara Barat	Irrine Budi S, I Made Wartana, dan Cholis Setiawan	Teknik Elektro S1 ITN Malang, Malang (2023)	Jurnal ini bertujuan untuk meningkatkan performa sistem akibat interkoneksi DG jenis pembangkit energi surya (PLTS-DG) pada saluran distribusi yang dipresentasikan sebagai peningkatan profil tegangan sekaligus penurunan rugi rugi daya. Uji simulasi dilakukan pada sistem uji IEEE 14-bus dan pada sistem kelistrikan 20 kV Lombok, Nusa Tenggara Barat (NTB) yang terhubung DG menggunakan software ETAP Power Station.	Perbedaan penelitian ini dengan penelitian terkait adalah penelitian ini berfokus pada dampak dari <i>Distributed Generation</i> (DG) berbasis PLTS on-grid guna dapat memperbaiki dan meminimalisir dampak dari Rugi-Rugi Daya (Losses) dan Jatuh Tegangan yang terjadi pada jaringan distribusi 20kV. Dengan melakukan beberapa skenario pembebanan dengan atau tanpa Interkoneksi <i>Distributed Generation</i> (DG) dan disimulasikan menggunakan <i>software</i> ETAP 19.0.1