

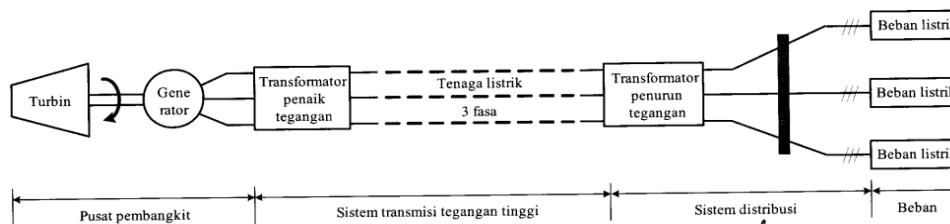
BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan seluruh bagian atau komponen-komponen yang menghubungkan sumber energi listrik sampai ke konsumen. Komponen-komponen tersebut seperti generator, saluran transmisi, saluran distribusi, transformator, serta beban. Semua komponen tersebut dihubungkan menjadi sebuah sistem (Ramadoni, 2017).

Secara garis besar sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga bagian yang terdiri dari sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi. Suatu sistem dapat saling terhubung dari beberapa sub sistem yang biasa disebut sistem interkoneksi. Skema sistem tenaga listrik ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema Sistem Tenaga Listrik
(Sumber: Cekmas Cekdin, 2013)

Tenaga listrik dibangkitkan di pusat-pusat pembangkit tenaga listrik seperti PLTU, PLTA, PLTN, PLTS dan PLTG. Pemberian nama tersebut diberikan kepada unit pembangkit listrik di lingkungan PT. PLN (Persero) berdasarkan sumber tenaga yang digunakan. PLTA misalnya dimana mesin pembangkit listrik atau generator digerakan atau diputar oleh suatu turbin penggerak yang diputar oleh

pergerakan aliran air. Tegangan yang dihasilkan pembangkit umumnya berkisar 6 kV sampai 20 kV. Sebelum masuk ke saluran transmisi tegangan akan dinaikan menjadi tegangan tinggi yang berkisar 70 kV sampai 150 KV oleh transformator penaik tegangan.

Saluran transmisi merupakan saluran penghubung pembangkit dengan gardu induk. Saluran transmisi berbentuk kawat-kawat yang dipasang pada menara atau tiang dan ada juga yang melalui kabel tanah (Zuhal, 2000). Umumnya saluran transmisi di Indonesia disalurkan menggunakan saluran udara tegangan tinggi yang disingkat SUTT dan saluran udara ekstra tinggi yang disingkat SUTET. SUTT adalah saluran transmisi yang memiliki nilai tegangan 70 kV dan 150 kV, sedangkan, SUTET memiliki nilai tegangan 500 kV.

Setelah tenaga listrik disalurkan melalui saluran transmisi, tenaga listrik akan masuk ke gardu induk (GI) sebagai pusat beban. Pada gardu induk (GI) tegangan diturunkan menjadi tegangan menengah atau tegangan tegangan distribusi primer. Tegangan distribusi primer yang digunakan PT. PLN (Persero) adalah 20 KV, 12 KV dan 6 KV. Jaringan distribusi primer berbentuk berupa saluran kabel udara dan saluran kabel tanah yang sering disebut jaringan tegangan menengah yang disingkat JTM. Kemudian, tegangan akan diturunkan lagi menjadi tegangan rendah yaitu 380/220 Volt untuk pemakaian beban rumah atau industri kecil. melalui suatu sarana yang disebut sabungan rumah. Energi listrik yang dipakai oleh pelanggan akan tercatat pada KWH meter.

2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi adalah seluruh komponen sistem jaringan tenaga listrik yang menghubungkan energi listrik dari pusat pembangkit listrik ke pusat-pusat beban atau konsumen (Dicky, 2020). Sistem distribusi berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk ke kelompok beban pada pelanggan. Komponen pada sistem distribusi antara lain:

1. Gardu induk

Gardu induk merupakan unit penerima sumber energi listrik dari sistem transmisi dengan tegangan 150 sampai 500 kV dan tegangan tersebut akan diturunkan menjadi tegangan menengah yaitu 20 kV, kemudian akan diteruskan ke jaringan distribusi.

2. Gardu hubung

Gardu hubung merupakan unit penerima sumber energi listrik yang telah diturunkan menjadi tegangan menengah dari gardu induk dan kemudian membagi energi listrik menuju gardu atau transformator distribusi melalui jaringan distribusi primer.

3. Gardu distribusi

Gardu distribusi merupakan suatu unit yang di dalamnya terdapat alat-alat seperti transformator distribusi, pemutus, pemutus dan penghubung untuk menyalurkan energi listrik ke konsumen. Peralatan-peralatan ini menunjang tercapainya pendistribusian tenaga listrik baik sampai ke konsumen. Pada gardu distribusi tegangan diturunkan menjadi tegangan rendah yaitu 220 V atau 380 V menggunakan transformator distribusi.

4. Penyulang utama

Penyulang utama merupakan serangkaian saluran yang menghubungkan dan menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke gardu-gardu distribusi.

2.2.1 Klasifikasi Jaringan Distribusi Berdasarkan Nilai Tegangan

Klasifikasi jaringan distribusi tenaga listrik berdasarkan nilai tegangan diklasifikasikan menjadi dua yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder.

1. Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer adalah sistem jaringan listrik yang terletak diantara gardu induk dengan gardu distribusi, dimana sistem jaringan distribusi primer memiliki tegangan yang lebih tinggi dari pada tegangan yang terpakai oleh pelanggan. Menurut Standar Perusahaan Listrik Negara (SPLN) No. 72 tahun 1987, sistem ini memiliki standar tegangan 6 kV, 10 kV, dan 20 kV.

2. Jaringan Distribusi Sekunder

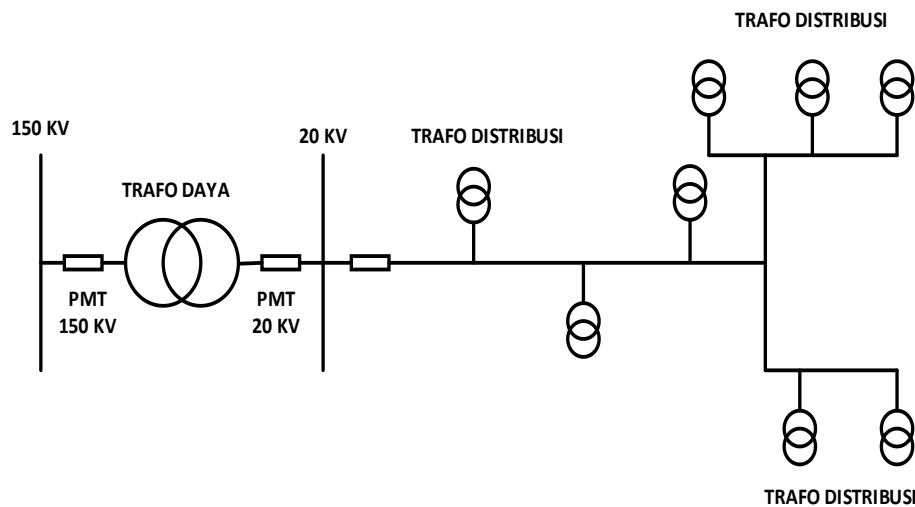
Jaringan distribusi sekunder merupakan jaringan yang berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik dari gardu distribusi ke titik beban yang ada pada pelanggan. Tegangan sistem jaringan distribusi sekunder adalah 127/220 Volt untuk sistem lama, dan 220/380 Volt untuk sistem baru, serta 440/550 Volt untuk kebutuhan industri. Berdasarkan PUIL, Besar tegangan maksimum yang diizinkan berkisar 3 – 4% dari teganan nominal, sedangkan nilai maksimum jatuh tegangan adalah 10%. Pembatasan tersebut agar stabilitas penyaluran tenaga listrik ke pelanggan tidak terganggu.

2.2.2 Klasifikasi Jaringan Distribusi Berdasarkan Bentuk Jaringan

Pada jaringan distribusi dikenal sebagai macam bentuk jaringan distribusi, bentuk jaringan distribusi ini sangat diperlukan dalam memenuhi tingkat kontinuitas pelayanan pada pelanggan. Secara umum, terdapat lima model jenis jaringan distribusi. yaitu Jaringan Distribusi Radial, Jaringan Distribusi Hantaran Penghubung (*Tie Line*), Jaringan Distribusi Lingkaran (*Loop*), Jaringan Distribusi Spindel dan Sistem Gugus atau Kluster (Daman, 2009).

1. Jaringan Radial

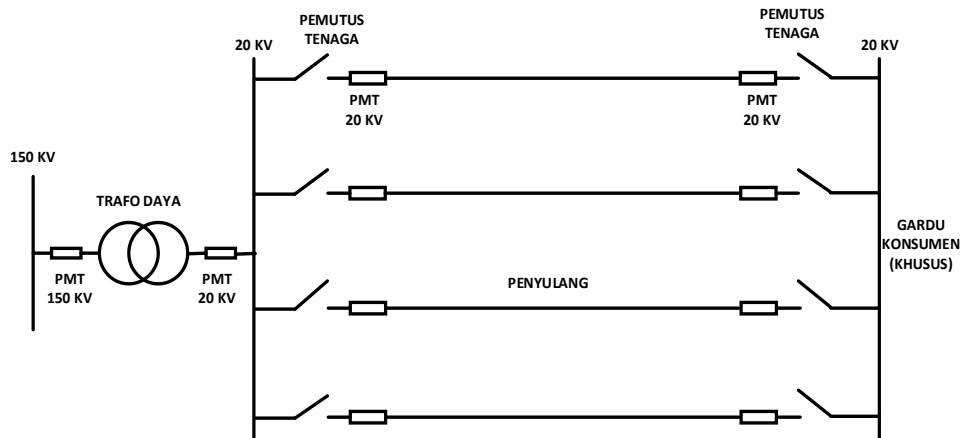
Jaringan radial adalah sistem jaringan distribusi yang hanya memiliki satu sumber energi listrik dan terdapat beberapa penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi. Keuntungan bentuk jaringan radial adalah sangat sederhana dan paling ekonomis, karena material yang digunakan lebih sedikit sehingga tidak rumit dan murah. Namun, sistem ini memiliki tingkat keandalan yang lebih rendah dibandingkan sistem yang lainnya. Kurangnya keandalan sistem ini disebabkan penyaluran tenaga listrik ke gardu distribusi hanya dilakukan menggunakan satu jalur utama, hal ini menyebabkan seluruh gardu akan padam dan membutuhkan waktu yang lebih lama untuk memperbaiki, jika jalur utama mengalami gangguan. Kerugian lainnya adalah gardu distribusi yang berada paling ujung saluran akan memiliki kualitas daya yang buruk karena nilai jatuh tegangan akan lebih besar. Skema jaringan radial ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Skema Jaringan Radial

2. Jaringan Hantaran Penghubung (*Tie Line*)

Sistem jaringan *tie line* merupakan pengembangan dari sistem jaringan radial. Pada *tie line* minimal terdapat dua penyulang yang terhubung. Tenaga listrik disalurkan oleh dua penyulang ke titik beban dengan tambahan *automatic transfer switch / automatic change over switch* yang digunakan sebagai control otomatis, sehingga salah satu penyulang mengalami gangguan, maka penyulang lainnya akan menggantikannya dalam menyalurkan tenaga listrik, sehingga tidak perlu pemadaman. Sistem jaringan distribusi *tie line* memiliki tingkat keandalan yang baik dan dapat melayani beban maksimum (*peak load*). Dimana, kedua penyulang dapat melayani titik beban secara bersama-sama, namun biasanya titik beban hanya dilayani oleh salah satu penyulang saja. Maka, sistem ini umumnya digunakan untuk pelanggan penting yang tidak boleh padam seperti rumah sakit, bandara, dan lain-lain. Skema jaringan hantaran penghubung (*tie line*) ditunjukkan pada Gambar 2.3.



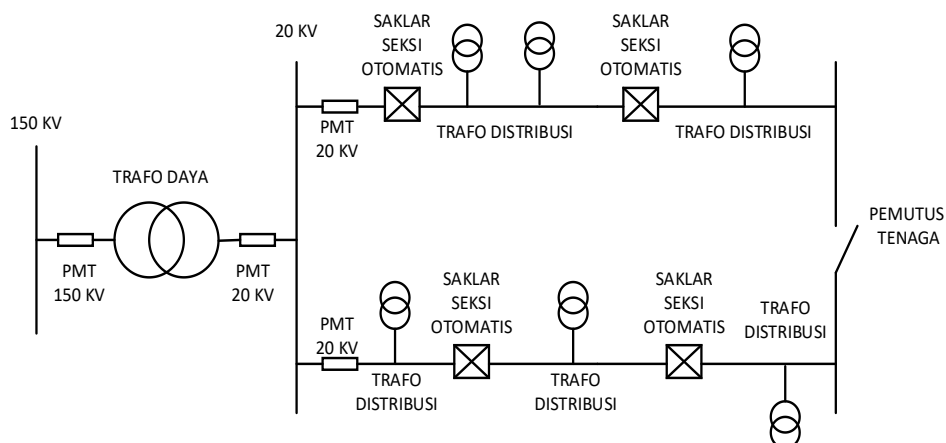
Gambar 2.3 Skema Jaringan Hantaran Penghubung (Tie Line)

3. Jaringan Lingkaran (*Loop*)

Jaringan distribusi lingkaran merupakan suatu sistem yang menyalurkan tenaga listrik melalui dua atau lebih saluran yang membentuk rangkaian berbentuk lingkaran dan memungkinkan memiliki lebih dari satu gardu induk untuk menyuplai daya listriknya sehingga memiliki tingkat keandalan yang baik.

Pada gambar dapat dilihat bahwa titik beban dapat dilayani dari dua saluran penyulang, sehingga kualitas keandalan akan lebih baik, karena jatuh tegangan dan rugi daya menjadi lebih kecil. Skema jaringan lingkaran (*loop*) ditunjukkan pada Gambar 2.4. Bentuk jaringan lingkaran terbagi menjadi dua jenis yaitu:

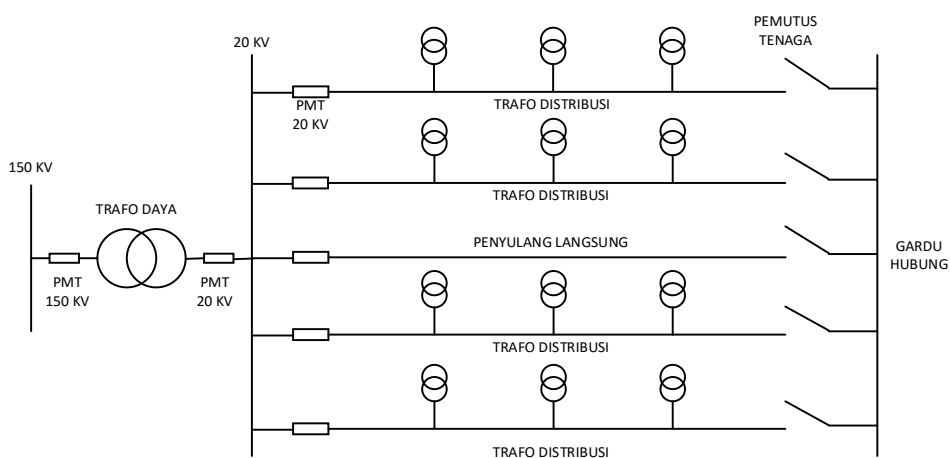
1. Bentuk *open-loop*, bila dilengkapi *normally open switch*, maka dalam keadaan normal rangkaian akan selalu terbuka.
2. Bentuk *close-loop*, bila dilengkapi *normally close switch*, maka dalam keadaan normal rangkaian akan selalu tertutup.



Gambar 2.4 Skema Jaringan Lingkaran (loop)

4. Jaringan Spindel

Sistem jaringan spindel merupakan gabungan antara jaringan radial dan jaringan lingkaran. Sistem jaringan ini terdiri dari beberapa penyulang yang tegangannya bersumber dari gardu induk dan terhubung dengan transformator distribusi untuk kebutuhan pelanggan. Ujung dari semua penyulang akan terhubung dengan gardu hubung, yang mana gardu hubung terhubung langsung dengan penyulang aktif dan penyulang cadangan. Skema jaringan spindel ditunjukkan pada Gambar 2.5.

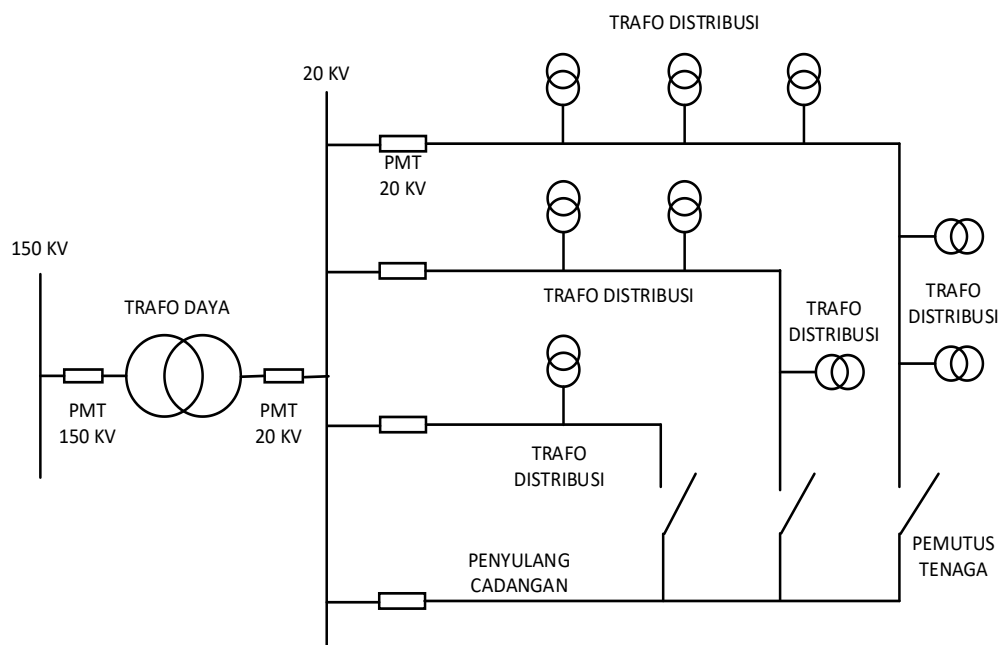


Gambar 2.5 Skema Jaringan Spindel

Pada sistem jaringan ini umumnya menggunakan saluran kabel tegangan menengah yang sangat efektif digunakan pada daerah-daerah yang memiliki kepadatan tinggi serta memiliki kapasitas dan kontinuitas pelayan yang sangat baik.

5. Sistem Gugus atau Kluster

Sistem jaringan gugus atau kluster merupakan sistem jaringan distribusi yang menyerupai sistem jaringan spindel, dimana sistem ini memiliki saklar pemutus beban dan penyulang cadangan. Penyulang cadangan ini berfungsi menggantikan menyalurkan tenaga listrik jika terjadi gangguan pada penyulang aktif. Skema Jaringan gugus atau kluster ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Skema Jaringan Gugus atau Kluster

2.3 *Distributed generation*

Distributed Generation (DG) merupakan sebuah pembangkit tenaga listrik diluar dari sistem pembangkit pusat dengan kapasitas kecil yang dihubungkan langsung pada jaringan distribusi, dan umumnya diletakkan dekat dengan beban (Ackermann et al., 2001). DG seringkali disebut juga dengan istilah *Embedded Generation*, *Dispersed Generation*, *Decentralised Generation* dan *on-site generation*.

DG merupakan suatu hal baru dalam sistem pembangkit tenaga listrik yang memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap konsep konvensional pembangkit tenaga listrik terpusat. Saat ini DG terus mengalami perkembangan, DG diterapkan di berbagai sektor seperti industri, perumahan dan sebagainya. Perkembangan DG juga didukung oleh adanya perubahan kebijakan energi listrik dari sistem monopoli menjadi lebih korporatif, dimana kebijakan ini memungkinkan masyarakat memiliki aset pembangkit sehingga diharapkan harga listrik menjadi lebih. Kebijakan lainnya adalah kebijakan lingkungan yang berkelanjutan, dimana pemanfaat DG diharapkan dapat mengurangi gas emisi karbon dan ketergantungan pada bahan bakar fosil sebagai sumber energi pembangkitan listrik.

DG memiliki potensi keuntungan yang besar, DG dimanfaatkan sebagai pembangkit cadangan yang memberi sumber energi pada sistem tenaga listrik saat beban puncak, mengurangi rugi-rugi daya dan dapat meningkatkan keandalan sistem distribusi (Yadav & Srivastava, 2014). Hal ini dapat meningkatkan kualitas penyaluran dan pelayanan tenaga listrik ke konsumen.

Pemanfaatan DG tidak lepas dari permasalahan teknis, saat ini para ahli belum memiliki persamaan konsep yang pasti mengenai DG diantaranya konsep mengenai batas ukuran/kapasitas dan penempatan lokasi DG.

Menurut Ackermann et al. DG dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis dan kapasitas pembangkitan seperti pada Tabel. 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Klasifikasi DG Berdasarkan Besaran Kapasitas Pembangkitan

Jenis DG	Kapasitas Pembangkitan
Micro DG (DG Mikro)	1 Watt – 5Kw
Small DG (DG Kecil)	5kW – 5MW
Medium DG (DG sedang)	5MW – 50 MW
Large DG (DG Besar)	50MW – 300 MW

Sumber energi pembangkit tenaga listrik DG umumnya menggunakan sumber energi terbarukan, seperti matahari, angin, air, biomasa dan lainnya. Hal ini dikarenakan jenis pembangkit tersebut memiliki kapasitas kecil sehingga cocok untuk di tempatkan dekat dengan pusat beban. Klasifikasikasi DG berdasarkan teknologi pembangkitan dan kapasitas pembangkitan seperti pada Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2.2 Klasifikasikasi 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 energi</i>	100 kW – 1 MW
<i>Stirling engine</i>	2 – 10 kW
<i>Battery storage</i>	500kW – 5 MW

2.3.1 Dampak Pemasangan DG pada jaringan Distribusi Radial

Pemasangan DG dapat mempengaruhi perubahan aliran daya, rugi-rugi daya dan profil tegangan pada jaringan (Purchala et al., 2006). Nilai rugi-rugi daya pada jaringan dipengaruhi oleh arus yang mengalir dan besar hambatan pada saluran. Pemasangan DG pada jaringan distribusi radial membuat arah aliran daya terbagi menjadi dua arah, hal tersebut mempengaruhi nilai arus yang mengalir pada saluran sehingga mempengaruhi rugi-rugi daya pada jaringan.

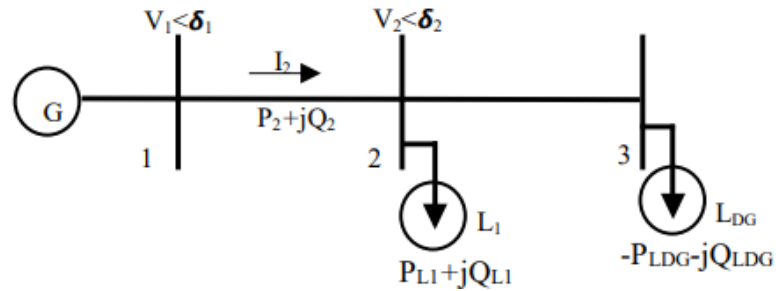
Penentuan lokasi pemasangan serta kapasitas DG sangat penting dalam mengurangi besar rugi-rugi daya serta memperbaiki profil tegangan. Nilai tegangan dapat meningkat ketika DG yang memiliki kapasitas besar dipasang pada beban yang kecil (Viawan, 2006). Sehingga DG yang memiliki kapasitas besar lebih baik dipasang pada daerah yang memiliki beban besar.

Ada beberapa jenis DG yang dapat membangkitkan daya reaktif sendiri, seperti mikro hidro dan diesel, sehingga saat DG menyuplai daya aktif yang besar, DG dapat menyerap daya reaktif yang besar. Ketika DG dapat menyerap daya reaktif yang besar, maka tegangan yang berlebih dapat diatasi (Viawan, 2006). Selanjutnya, ketika DG yang dipasang tidak dapat membangkitkan daya reaktif seperti *solar cell*, maka DG dioperasikan dalam keadaan *unity power factor* samapi tegangan pada DG mencapai tegangan maksimum.

Nilai jatuh tegangan dapat berubah ketika DG menyerap atau memberi daya reaktif. Jika DG menyerap terlalu besar maka nilai jatuh tegangan akan semakin besar, sehingga mengakibatkan rugi-rugi sistem akan bertambah. Perubahan pola aliran daya pada akibat pemasangan DG pada jaringan berdampak pada nilai rugi-rugi sistem.

2.3.2 Pemodelan DG sebagai Negative PQ Load

DG mengakibatkan aliran arus dan daya pada jaringan menjadi dua arah. Apabila DG dimodelkan sebagai *negative PQ load*, maka dapat diartikan DG merupakan beban dengan nilai daya aktif (P) dan daya reaktif (Q), tanda negative berate menginjeksi daya ke bus. DG yang dimodelkan sebagai *negative PQ load* tidak dapat meregulasi daya reaktif sehingga tidak dapat mempertahankan nilai tegangan yang diinginkan. Gambar 2.7 merupakan contoh pemodelan DG sebagai *negative PQ load* (Sirait, 2018).



Gambar 2.7 Pemodelan DG Sebagai *Negative PQ Load*

(sumber: Sirait, 2018)

Gambar 2.7 menunjukkan DG terletak pada bus 3. $-P_{LDG}$ dan $-Q_{LDG}$ merupakan daya injek DG pada sistem dan memiliki tanda negatif yang menunjukan DG sebagai *negative PQ load*. Pada bus 2 terdapat beban L_1 sebesar P_{L1} dan Q_{L1} total daya pada bus 2 dapat dihitung menjadi: (Sirait, 2018)

$$P_2 + jQ_2 = P_{L1} + j(Q_{L1} - Q_{LDG}) \quad (2.1)$$

2.3.3 Pemodelan DG sebagai PV Model

DG sebagai PV model dapat menentukan tegangan pada bus yang terhubung, karena daya reaktif DG akan diregulasikan untuk mencapai nilai bus yang diinginkan. Apabila pada Gambar 2.7 dihubungkan pada bus 2, maka besar daya reaktif yang harus diinjeksikan DG adalah sebagai berikut: (Sirait, 2018)

Daya total bus 2:

$$P_2 + jQ_2 = V_2 \cdot I_2^* \quad (2.2)$$

$$I_2 = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} \quad (2.3)$$

Dengan,

$$I_2 = \frac{|V_1| < \delta_1 - |V_2| < \delta_2}{R + jX} \quad (2.4)$$

Jika persamaan 2.4 disubstitusikan dengan persamaan 2.4 maka:

$$P_2 - jQ_2 = \frac{(|V_1| < -\delta_1) \cdot (|V_1| < \delta_1 - |V_2| < \delta_2)}{R + jX} \quad (2.5)$$

$$P_2 - jQ_2 = \frac{|V_2||V_1| < (\delta_1 - \delta_2) - |V_2||V_2|(\delta_2 - \delta_2)}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (2.6)$$

Karena Q adalah komponen imajiner maka perhitungan yang diperlukan hanya komponen imajiner pada persamaan 2.6.

$$Q_2 = \frac{|V_2||V_1| \sin(\theta - \delta_1 - \delta_2) - |V_2||V_2| \sin \theta}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (2.7)$$

Dari persamaan 2.7 didapatkan nilai Q_2 sebagai daya reaktif total pada bus 2.

2.3.4 Interkoneksi DG

Beberapa jenis teknologi DG yang dapat dikembangkan di Indonesia adalah mikrohidro, bahan bakar nabati, biomassa, energi angin, tenaga surya, pasang surut, dan panas bumi. Secara garis besar, interkoneksi pada DG terbagi atas tiga komponen, yaitu:

1. Sumber Energi Utama (*Prime Energy Source*)

Hal ini menunjuk pada jenis sumber energi pembangkitan listrik yang digunakan DG seperti energi surya, angin, mikrohidro, pasang surut dan biomassa. Setiap jenis sumber energi DG memiliki karakter yang berbeda-beda dalam pembangkitan energi listrik, misalnya DG yang bersumber energi yang dihasilkan oleh PV berupa *direct current* atau wind turbin yang energi listriknya berupa *alternative current*.

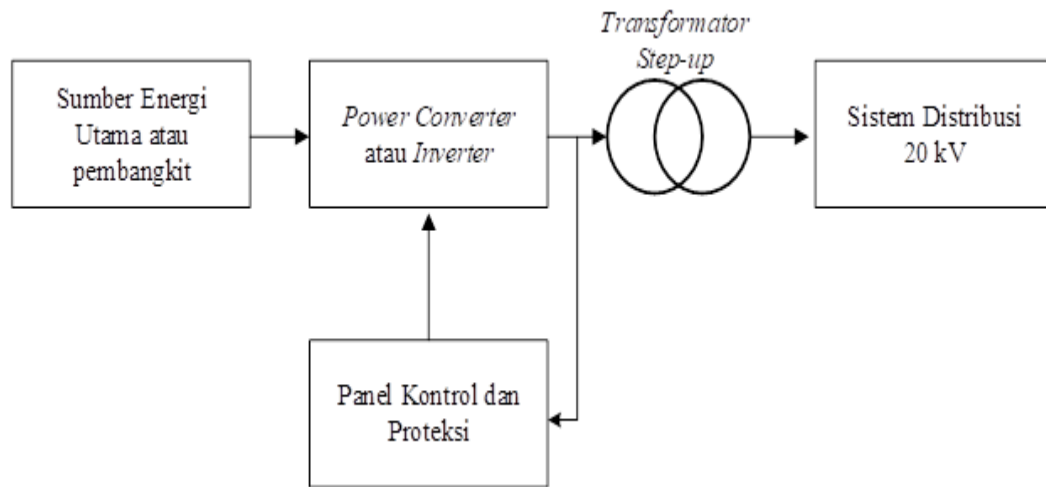
2. *Power Converter*

Power converter dalam interkoneksi, berfungsi untuk mengubah energi listrik dari sumber energi utama (*prime energy resources*) menjadi energi listrik dengan level frekuensi tertentu (50Hz - 60Hz). Ada 3 kategori *power converter* yang digunakan dalam interkoneksi, yaitu: generator sinkron, generator induksi dan *static power converter*.

Generator sinkron dan generator induksi mengkonversi putaran energi mekanis ke dalam tenaga listrik dan sering disebut dengan *rotating power converter*. *Static power converter* (biasa dikenal dengan inverter) tersusun atas *solid-device* seperti transistor. Pada inverter, transistor mengkonversi energi dari sumber menjadi energi dengan frekuensi 50-60Hz dengan *switching* (*switch on-off*).

3. Sistem *Interface* dan Peralatan Proteksi

Peralatan ini ditempatkan sebagai penghubung antara terminal *output* dari *power converter* dan jaringan primer. Komponen interkoneksi ini biasanya terdiri atas *step-up transformer*, metering kadang ditambahkan controller dan relay proteksi. Adapun beberapa DG yang sering digunakan adalah micro-hydro, panel surya, turbin angin, mesin diesel, 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. Skema interkoneksi DG ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut:



Gambar 2.8 Skema Interkoneksi DG

2.4 Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya merupakan hal yang penting dalam studi atau analisis suatu sistem tenaga listrik. Analisis aliran daya digunakan untuk memperoleh data dan informasi terkait kondisi suatu sistem tenaga listrik. Data dan informasi yang didapatkan berguna untuk menganalisa besaran-besaran pada suatu sistem tenaga listrik, penggunaan beban, jatuh tegangan dan rugi-rugi daya. Kegunaan lainnya adalah untuk perencanaan serta pengembangan sistem agar menjadi lebih baik. Dalam melakukan analisis aliran daya dibutuhkan data dan informasi mengenai objek sistem tenaga listrik, seperti data saluran dan data beban.

Tujuan dari analisis aliran daya adalah untuk mengetahui besaran vektor tegangan dan aliran daya pada tiap cabang suatu jaringan pada kondisi beban tertentu. Hasil perhitungan dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah pada jaringan tersebut (Zuhair et al., 2019).

Dalam menganalisa aliran daya fokus utama tertuju pada busnya dan bukan pada generatornya. Menurut Saadat (1999) dalam analisis aliran daya, bus diklasifikasikan menjadi tiga yaitu:

a. *Slack bus* atau *swing bus*

Bus yang mempunyai besaran tegangan (V) dan sudut fasa tegangan (δ).

Selama perhitunganan aliran daya, besaran V dan δ akan tetap dan tidak berubah.

b. *Voltage controlled bus*

Bus yang sudah diketahui daya aktif (P) dan tegangan (V).

c. *Load bus*

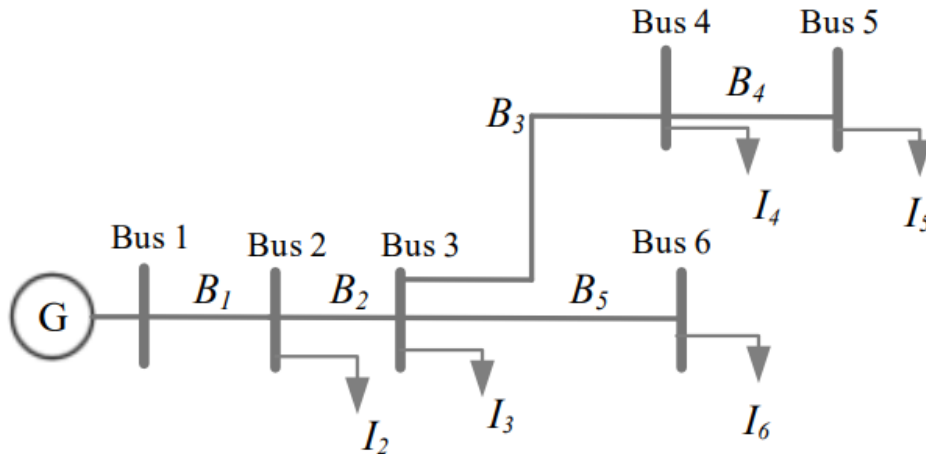
Bus yang sudah diketahui daya aktif beban (PL) dan daya reaktif beban (QL).

Setiap bus mempunyai empat besaran , setiap besaran hanya mempunyai dua besaran yang ditentukan, sedangkan dua besaran lainnya merupakan hasil akhir dari perhitungan aliran daya. Slack bus berfungsi untuk memenuhi kekurangan daya seluruhnya yaitu daya aktif (P) dan daya reaktif (Q).

2.4.1 Metode *Backward-Forward Sweep*

Metode aliran daya Newton Raphson merupakan metode yang dalam penyelesaian aliran dayanya menggunakan prinsip hukum Kirchoff. Metode ini dapat meberikan solusi dari masalah aliran daya dengan menggunakan dua tahap yaitu *backward sweep* dan *forward sweep*. Pertama, menghitung arus yang mengalir pada saluran, dari bus pertama sampai bus terakhir yang disebut tahap *backward sweep*. Kedua, menghitung nilai drop tegangan pada setiap bus saluran dengan mengkalikan nilai arus yang sudah dihitung sebelumnya dengan nilai

impedansi saluran yang disebut dengan tahapan *forward sweep*. Berikut merupakan contoh perhitungan aliran daya pada jaringan distribusi radial dengan metode *backward-forward sweep*.



Gambar 2.9 Contoh Jaringan Distribusi Radial

Sebagai contoh akan dilakukan Analisa aliran daya pada jaringan distribusi seperti Gambar 2.9 menggunakan metode *backward-forward sweep*. Persamaan Arus yang diinjeksi pada tiap bus adalah sebesar:

$$B_5 = I_6 \quad (2.8)$$

$$B_4 = I_5 \quad (2.9)$$

$$B_3 = I_4 + I_5 \quad (2.10)$$

$$B_5 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (2.11)$$

$$B_5 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (2.12)$$

Dari persamaan injeksi arus ke bus, matriks BIBC dapat disusun seperti persamaan 2.13.

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11111 \\ 01111 \\ 00110 \\ 00010 \\ 00001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Pola umum dari persamaan diatas adalah sebagai berikut:

$$[B] = [BIBC][I] \quad (2.14)$$

Tegangan masing-masing bus pada jaringan distribusi seperti Gambar 2.9 dapat ditentukan oleh persamaan berikut:

$$V_2 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} \quad (2.15)$$

$$V_3 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} \quad (2.16)$$

$$V_4 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \quad (2.17)$$

$$V_5 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} \quad (2.18)$$

$$V_6 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{56} \quad (2.19)$$

Dengan demikian besar jatuh tegangan pada jaringan distribusi tersebut dapat ditentukan oleh persamaan berikut:

$$V_1 - V_2 = B_1 \cdot Z_{12} \quad (2.20)$$

$$V_1 - V_3 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} \quad (2.21)$$

$$V_1 - V_4 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} \quad (2.22)$$

$$V_1 - V_5 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} \quad (2.23)$$

$$V_1 - V_6 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{56} \quad (2.24)$$

Dari persamaan 2.20 hingga 2.24 dapat disusun BCBV sistem distribusi diatas, yaitu:

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12}Z_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12}Z_{23}Z_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12}Z_{23}Z_{34}Z_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12}Z_{23} & 0 & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Pola umum persamaan diatas dapat ditulis seperti persamaan 2.26.

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \quad (2.26)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.14 ke persamaan 2.26, maka di peroleh persamaan 2.27.

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBV][I] \quad (2.27)$$

$$[\Delta V] = [DLF][I] \quad (2.28)$$

Apabila bentuk matriks BIBC bila ditranspose komposisinya, maka akan terbentuk matriks yang berkolerasi dengan matriks BCBV.

$$[BIBC^T] = \begin{bmatrix} 10001 \\ 11001 \\ 11100 \\ 11110 \\ 11001 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Apabila matriks $BIBC^T$ dikalikan per komponen dengan matriks impedansi, maka akan didapatkan matriks BCBV sebagai berikut:

$$BCBV = [BIBC^T].Z \quad (2.30)$$

$$BCBV = \begin{bmatrix} 10001 \\ 11001 \\ 11100 \\ 11110 \\ 11001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{12}Z_{23}Z_{34}Z_{45}Z_{36} \\ Z_{12}Z_{23}Z_{34}Z_{45}Z_{36} \\ Z_{12}Z_{23}Z_{34}Z_{45}Z_{36} \\ Z_{12}Z_{23}Z_{34}Z_{45}Z_{36} \\ Z_{12}Z_{23}Z_{34}Z_{45}Z_{36} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$BCBV = [BIBC^T].Zx[BIBC]x[I] \quad (2.32)$$

2.5 Rugi – Rugi Daya

Dalam proses transmisi dan distribusi listrik kerap kali mengalami rugi-rugi daya yang cukup besar. Rugi-rugi daya merupakan perbedaan antara daya yang dibangkitkan atau dikirim dengan daya yang sampai ke pelanggan. Rugi-rugi daya sangat berpengaruh besar terhadap kualitas daya serta tegangan yang dikirim ke sisi beban.

Rugi-rugi daya juga disebabkan oleh beberapa faktor, seperti jauhnya jarak penyaluran energi listrik dari sumber, jatuh tegangan, ketidak seimbangan beban, diameter peralatan dan lain-lain. *Loss situation* dalam jaringan distribusi listrik merupakan suatu kondisi dimana suatu sistem distribusi listrik mengalami rugi-rugi daya yang besar. *Loss situation* dapat diketahui dengan peninjauan ke beberapa daerah yang memiliki pembebanan tinggi karena pada umumnya daerah dengan pembebanan tinggi kemungkinan memiliki rugi-rugi daya yang besar.

2.6 Genetic Algorithm

Genetic algorithm (GA) merupakan sebuah metode optimasi yang bekerja berdasarkan mekanisme seleksi alam yang dikenal dengan proses evolusi. Metode ini ditemukan oleh John Holland pada tahun 1970. GA bekerja dengan cara menyeleksi setiap individu secara acak dari sebuah populasi. Perubahan lingkungan hidup akan mempengaruhi kehidupan individu. Hal ini mengakibatkan individu untuk menyesuaikan atau beradaptasi dengan lingkungan hidupnya. Individu yang tidak beradaptasi akan mati dan sebaliknya jika dapat beradaptasi maka akan menciptakan generasi baru.

Untuk menjalankan GA dibutuhkan sebuah kode yang dapat mempresentasikan suatu persoalan. Kode berupa kromosom yang terdiri dari komponen genetik yang disebut gen. kromosom yang baik akan dipilih melalui manipulasi materi dan sifat gen kromosom. Informasi yang diberikan dari evaluasi berupa nilai *fitness* setiap kromosom. GA memiliki empat dasar kerja yaitu:

1. Mengkodekan parameter permasalahan dan tidak bekerja langsung dengan parameter-parameter tersebut.
2. Mencari solusi masalah dari sejumlah populasi kandidat solusi, tidak hanya memproses satu solusi saja.
3. Hanya memperhitungkan fungsi *fitness* setiap kandidat solusi untuk mendapatkan hasil optimum global.
4. Menggunakan aturan secara transisi secara probabilitik bukan deterministik.

2.6.1 Parameter *Genetic Algorithm*

Dalam GA terdapat beberapa parameter yang harus diperhatikan. Berikut ini adalah beberapa parameter yang digunakan dalam GA:

1. Ukuran populasi (POPSIZE)

Jika ukuran populasi kecil maka populasi tidak menyediakan materi yang cukup untuk mencakup ruang permasalahan yang mengakibatkan kinerja GA menjadi buruk. Penggunaan populasi yang besar dapat mencegah terjadinya konvergensi pada wilayah lokal.

2. Probabilitas *crossover* (Pc)

Probabilitas *crossover* berfungsi untuk mengendalikan frekuensi operator *crossover*. Pada populasi terdapat kromosom yaitu struktur individu yang

melakukan *crossover*. Semakin besar nilai probabilitas *crossover* maka semakin cepat struktur baru dikenalkan dalam populasi. Namun jika nilai probabilitas *crossover* terlalu kecil maka struktur yang memiliki fungsi objektif baik dapat hilang lebih cepat dari seleksi. Jika probabilitas *crossover* terlalu kecil dapat menghambat proses pencarian pada proses *genetic algorithm*. Michalewicz (1996) berpendapat banyak aplikasi GA menggunakan angka probabilitas *crossover* pada *range* 0.65-1.

3. Probabilitas Mutasi

Probabilitas mutasi berfungsi untuk meningkatkan variasi populasi untuk menentukan nilai mutase. Probabilitas mutasi yang kecil akan mempengaruhi keturunan gen-gen yang tidak dicoba dan sebaliknya jika probabilitas mutasi besar maka akan menyebabkan keturunan akan semakin mirip dengan induknya. Michalewicz (1996) berpendapat banyak aplikasi GA menggunakan angka probabilitas mutasi pada *range* 0.001-0.01.

4. Panjang Kromosom (ncrom)

Panjang kromosom merupakan deret-deret gen yang membentuk satu kromosom. kromosom merupakan parameter dari suatu obyek tersebut. Semakin Panjang ncrom maka hasil yang didapat akan semakin kompleks dan memiliki waktu proses yang lebih lama.

2.6.2 Proses *Genetic Algorithm*

Berikut adalah proses dalam pelaksanaan *genetic algorithm* meliputi:

1. Inisialisasi Populasi

Pertama, dalam melakukan insialisasi, dalam proses ini dilakukan pembuatan suatu populasi awal yang mana jumlah kromosomnya kita sesuaikan dengan kebutuhan dalam pemecahan masalah yang akan dilakukan. Dalam inisialisasi ini kita menggunakan bilangan desimal. Bilangan desimal digunakan untuk memberikan kode kepada setiap individu agar mudah untuk mengetahui *parent* dari setiap individu (Amini et al., 2022). Proses dimulai dengan membuat banyak individu untuk dijadikan suatu populasi. Setiap individu memiliki nilai *fitness* yang akan dicari nantinya. Setiap individu juga dapat disebut sekumpulan gen atau kromosom.

2. Evaluasi Fitness

Kedua, melakukan evaluasi dari nilai *fitness*. Ini dilakukan untuk mengetahui seberapa baik nilai *fitness* yang dihasilkan dari individu atau kromosom yang telah diinisialisasi. Untuk mencari nilai *fitness* tersebut dapat menggunakan persamaan .

Nilai maksimal:

$$\text{fungsi fitnes} = \text{fungsi tujuan} \quad (2.33)$$

Nilai minimum:

$$\text{fungsi fitnes} = \frac{1}{\text{fungsi tujuan} + \text{Bilangan kecil}} \quad (2.34)$$

3. Seleksi

Ketiga, melakukan seleksi hasil. Dalam proses ini kita akan mencari kandidat *parent* atau orang tua untuk dilanjutkan ke proses selanjutnya dengan mengurutkan nilai *fitness*. Dengan menggunakan metode seleksi *Tournament Selection*. Nilai *fitness* tertinggi akan diambil untuk digunakan di proses *crossover* (Machrani, 2022).

4. Pindah Silang (*Crossover*)

Keempat, melakukan pindah silang kromosom atau perkawinan antar kromosom. Dalam proses penyilangan dua kromosom ini diharapkan agar membentuk suatu kromosom baru yang mana secara *value* atau nilai *fitness*-nya lebih baik dari pada *parent*-nya. Dalam terjadinya *crossover* ini didasarkan pada probabilitas *crossover* yang ditentukan di awal. Probabilitas *crossover* ini yang akan menyatakan peluang kromosom mengalami *crossover*.

5. Mutasi

Kelima, melakukan proses mutasi gen pada kromosom. Mutasi yang dilakukan adalah mengganti gen acak dengan suatu nilai baru dan menghasilkan kromosom dengan hasil mutasi. Namun hasil dari mutasi tersebut tidak akan selalu menjumpai kromosom dengan *fitness* yang terbaik (Amini et al., 2022).

6. *Etilisme*

Keenam, melakukan proses *etilisme*. Dalam prosesnya nanti proses ini dapat melakukan penyalinan kromosom dari kromosom terbaik ke sebuah populasi sementara yang mana nantinya populasi tersebut akan dipindahkan juga ke populasi yang baru. Proses ini merupakan proses untuk mempertahankan

individu terbaik agar ketika melalui proses genetis seperti *crossover* dan mutasi individu tersebut tidak berubah ataupun hilang (Machrani, 2022).

7. Pergantian Populasi

Terakhir, melakukan pergantian populasi, populasi pertama yang diinisialisasi akan digantikan oleh generasi selanjutnya. Generasi baru merupakan generasi yang telah menyelesaikan proses dari inisialisasi sampai *etilisme*. Generasi baru ini yang nantinya akan digunakan lagi di iterasi selanjutnya hingga nilai *fitness* yang dianggap cocok dan terbaik dari hasil proses melakukan metode algoritma genetika ini atau setelah mencapai batas maksimal dari generasi yang telah ditetapkan di awal (Amini et al., 2022).