# BAB II
# TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

## 2.1. Penelitian yang Relevan (*State of the Art*)

Eskalasi riset di bidang optimasi sistem tenaga listrik dalam satu dekade terakhir menunjukkan pergeseran fokus yang masif, beralih dari manajemen jaringan radial statis konvensional menuju kerangka *Active Distribution Network* (ADN) yang adaptif dan dinamis. Penetrasi energi terbarukan, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), telah menjadi subjek penelitian yang ekstensif mengingat dampak gandanya terhadap keandalan pasokan [11].

Meskipun injeksi PLTS membawa dampak positif, intermitensi cuaca memicu anomali pasokan. Merespons celah tersebut, penelitian ekstensif oleh Wong *et al*. [7] meletakkan fondasi krusial melalui pembuktian empiris bahwa penempatan *Battery Energy Storage System* (BESS) yang dikalibrasi secara optimal pada simpul-simpul kritis mampu mereduksi dampak distorsi beban (*duck curve*) secara signifikan.

Di sisi lain, kompleksitas topologi jaringan distribusi perkotaan, khususnya yang berkonfigurasi *looping* (interkoneksi tertutup), menghadirkan tantangan komputasi tersendiri. Penelitian oleh Pasculescu *et al.* [12] menyoroti bahwa manuver rekonfigurasi jaringan (pembukaan dan penutupan saklar) yang dieksekusi bersamaan dengan injeksi BESS dapat memperbaiki indeks keandalan sistem secara drastis. Kendati demikian, tinjauan pustaka mengungkap sebuah celah literatur *(research gap)* di mana aspek rekonfigurasi saklar topologis sangat jarang disimulasikan secara ko-optimasi dengan pencarian titik EBT. Imran *et al.* [13] mencoba mengisi kekosongan ini dengan menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk menyelaraskan manuver saklar dan penempatan pembangkit terdistribusi secara simultan guna meminimalkan susut daya.

Dalam konteks pengembangan jaringan distribusi cerdas, inovasi kebaruan terkait pemulihan pasokan juga terus didorong. Kajian oleh Chen *et al.* [14] memvalidasi urgensi evaluasi keandalan sistem distribusi cerdas *(Smart Grid)* dan metode restorasi otomatisnya guna memitigasi dampak pemadaman. Sementara itu, Sirait *et al.* [15] [16]telah mengembangkan dan memvalidasi keandalan sistem *Maximum Power Point*

*Tracking* (MPPT) yang esensial untuk menjaga stabilitas daya PV saat terjadi *partial shading*. Studi literatur fundamental oleh Gönen [17] semakin mempertegas konklusi bahwa sinkronisasi antara kapasitas penyimpanan daya dan rekonfigurasi topologi tertutup (manuver *Tie-Switch*) adalah kunci arsitektural utama dalam menekan sirkulasi arus sesat *(Circulating Current)* yang memicu pemborosan rugi-rugi *(losses)* pada jaringan interkoneksi distribusi.

## 2.2. Sistem Tenaga Listrik dan Jaringan Distribusi

Sistem tenaga listrik merupakan interkoneksi infrastruktur berskala masif yang bertugas mengubah energi primer menjadi energi listrik, menaikkan tegangannya untuk efisiensi transmisi jarak jauh, dan menurunkannya kembali agar aman dikonsumsi oleh pelanggan akhir. Jaringan Distribusi memegang peranan sebagai tulang punggung (*backbone*) penyaluran akhir yang menghubungkan Gardu Induk (GI) transmisi dengan berbagai sentra beban, baik itu kawasan residensial, komersial, maupun kawasan industri menengah [17]. Di Indonesia, spesifikasi teknis jaringan distribusi sekunder pada umumnya beroperasi pada level Tegangan Menengah (TM) 20 kV, sesuai dengan regulasi standar PT PLN (Persero).

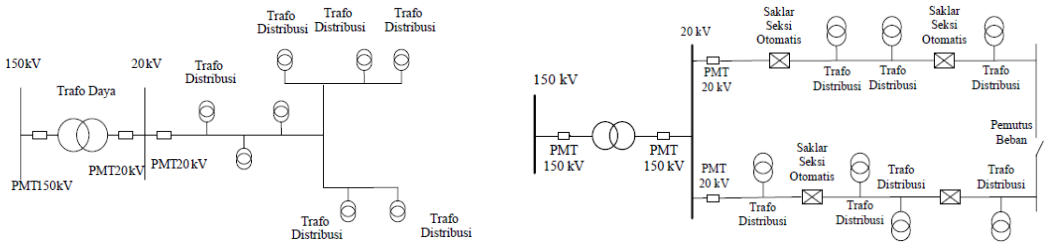
### 2.2.1. Topologi Jaringan Distribusi

Keandalan, kontinuitas suplai, dan efisiensi susut daya (*losses*) pada suatu penyulang (*feeder*) distribusi sangat didikte oleh desain topologinya. Secara arsitektural, sistem kelistrikan TM 20 kV dapat diklasifikasikan ke dalam tiga konfigurasi dasar:

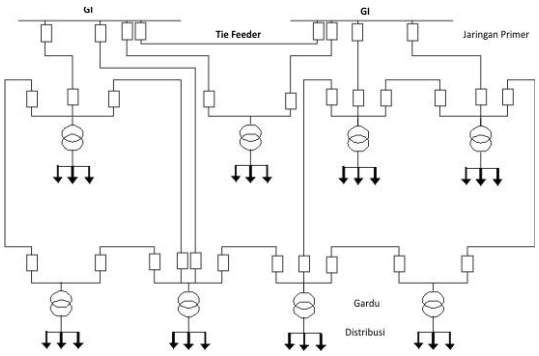
1. Sistem Radial: Topologi ini merupakan desain paling fundamental dan paling banyak diaplikasikan karena biaya investasinya yang murah dan koordinasi relai proteksi yang sangat sederhana [18]. Pada sistem radial, aliran daya mengalir secara searah dari Gardu Induk tunggal menuju beban-beban di sepanjang penyulang tanpa adanya percabangan yang menyatu kembali. Kelemahan fatal dari konfigurasi ini adalah kerentanannya terhadap pemadaman (*blackout*).
2. Sistem *Loop* (Tertutup): Sistem *loop* didesain untuk menjembatani kelemahan sistem radial dengan cara menghubungkan dua atau lebih ujung penyulang yang berbeda sumber melalui sebuah saklar pemisah (*Tie-Switch*). Konfigurasi cincin ini memberikan fleksibilitas tinggi berupa kemampuan suplai daya dua arah [18]. Ketika

terjadi gangguan pada satu rute suplai utama, beban di daerah terdampak dapat dialihkan ke penyulang tetangga dengan menutup *Tie-Switch*, sehingga indeks SAIDI dapat dipertahankan.

3. Sistem *Mesh* (Jaring): Merupakan bentuk paling kompleks di mana berbagai Gardu Induk dan simpul penyulang saling terhubung silang secara permanen . Sistem ini menawarkan reliabilitas tingkat tinggi, namun menuntut investasi infrastruktur relai proteksi diferensial berarah yang sangat mahal.




A b




c

Gambar 2.1 Konfigurasi Dasar Topologi Jaringan Distribusi: (a) Sistem Radial, (b) Sistem *Loop*, dan (c) Sistem *Mesh*

Bentuk visual dari ketiga konfigurasi topologi tersebut direpresentasikan melalui skema struktural pada Gambar 2.1 secara berurutan. Pertama, sistem radial ditunjukkan pada Gambar 2.1(a), di mana struktur jaringan dibentuk menyerupai ranting pohon tunggal. Pada bentuk ini, aliran daya hanya disalurkan melalui satu rute searah dari sumber utama (Trafo Daya) menuju setiap titik gardu trafo distribusi, tanpa adanya percabangan yang disatukan kembali. Kedua, sistem *loop* (tertutup) diilustrasikan pada

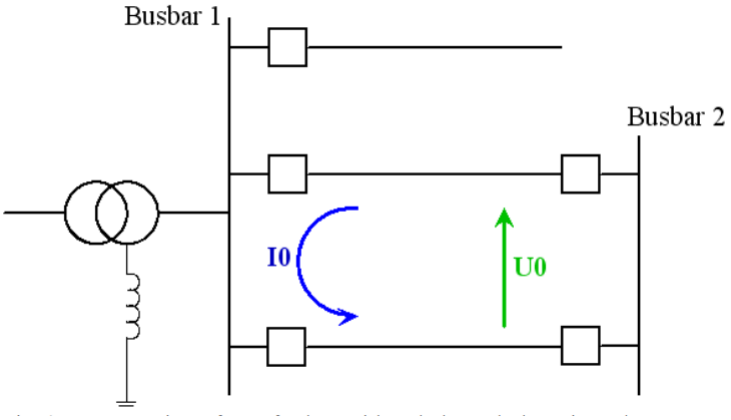
Gambar 2.1(b), yang mana dua ujung jalur penyulang dipertemukan dan dijembatani oleh sebuah saklar pemutus beban (*Tie-Switch*). Oleh keberadaan saklar pada ujung sirkuit inilah, fleksibilitas pada jaringan diberikan agar suplai daya dari arah alternatif dapat diterima apabila gangguan dialami pada jalur utama. Ketiga, sistem *mesh* (jaring) ditampilkan pada Gambar 2.1(c), di mana bentuk interkoneksi arsitektur yang jauh lebih kompleks dapat diamati. Pada gambar tersebut, beberapa simpul penyulang yang disuplai dari berbagai Gardu Induk (GI) berbeda dihubungkan silang secara permanen melalui jalur *tie feeder*, sehingga rute suplai daya majemuk dibentuk dan keandalan tingkat tinggi pada setiap gardu distribusi dapat dijamin.

### 2.2.2. Filosofi Operasi Distribusi *Looping* Menjadi Radial

Kawasan perkotaan berdensitas tinggi seperti ULP Ujungberung pada dasarnya telah dikonstruksi secara fisik menggunakan topologi interkoneksi *Loop* untuk mengamankan suplai daya darurat. Namun, terdapat batasan filosofis operasi jaringan yang krusial: Sistem distribusi tegangan menengah secara universal dilarang keras untuk dioperasikan dalam mode *loop*ing tertutup penuh (*closed-loop*) pada kondisi normal (*steady-state*) [17][18].

Secara praktis, saklar interkoneksi (*Tie-Switch*) antara dua penyulang harus selalu dipertahankan dalam status Terbuka (*Normally Open* / NO). Hal ini didasari oleh dua justifikasi teknis utama:

- Koordinasi Proteksi Relai: Pada sistem radial, pengaturan waktu jeda (*time-grading*) relai proteksi arus lebih dapat dilakukan dengan mudah berdasarkan jarak dari sumber gardu induk [19]. Jika sistem di-*close-loop*, arah aliran arus gangguan menjadi bias (datang dari dua arah), menyebabkan relai gagal mendeteksi letak hubung singkat dan berujung pada mal-operasi pemutusan.
- Sirkulasi Arus Sesat (*Circulating Current*): Jika *Tie-Switch* ditutup, perbedaan marjinal pada profil tegangan antara Gardu Induk A dan B akan memicu pergerakan arus listrik bertegangan tinggi yang hanya berputar-putar di dalam sirkuit *loop* tersebut [19]. Arus sesat ini tidak menyuplai daya aktif ke pelanggan, melainkan memicu pemborosan energi berupa rugi-rugi tembaga berskala ekstrem seperti ditunjukan gambar 2.2.




Gambar 2.2 Ilustrasi Fenomena Sirkulasi Arus Sesat (*Circulating Current*) pada Pengoperasian Jaringan Distribusi *Close*d-*Loop*.

Oleh karena itu, algoritma komputasional pada penelitian ini (PSO) bertugas menentukan kombinasi formasi *Tie-Switch* mana saja yang harus dibuka secara presisi, agar sirkuit tetap mematuhi hukum radial sambil mencari rute impedansi paling minim, tanpa membiarkan satu pun gardu pelanggan mengalami pemadaman permanen (*islanding operation*) yang tidak terencana [13].

## 2.3. Kualitas, Keandalan, dan Profil Beban Jaringan

Evaluasi kinerja sebuah sistem distribusi cerdas (*Active Distribution Network*) tidak dapat hanya ditinjau dari kapabilitas dasarnya dalam menyalurkan arus listrik kepada konsumen. Lebih komprehensif dari hal tersebut, parameter keberhasilan sebuah jaringan dinilai berdasarkan tingkat efisiensi (yakni representasi dari minimisasi rugi-rugi disipasi daya di sepanjang saluran penghantar) serta tingkat keandalannya (yakni representasi dari minimisasi frekuensi dan durasi interupsi pasokan energi bagi pelanggan). Kedua parameter teknis tersebut saling diinteraksikan secara dinamis sehingga sebuah profil kualitas layanan dapat dibentuk, yang pada akhirnya dijadikan penentu utama bagi tingkat profitabilitas dan reputasi utilitas kelistrikan..

### 2.3.1. Susut Daya Distribusi (*Power Losses*)

Susut daya (*power losses*) pada dasarnya diklasifikasikan sebagai komponen kerugian teknis fisis di dalam operasi sistem tenaga listrik. Kondisi ini didefinisikan sebagai fenomena terdisipasinya sebagian energi listrik umumnya terbuang ke udara bebas

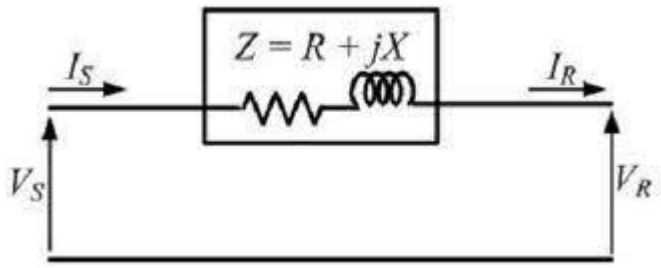
menjadi energi panas selama proses transmisi daya dari Gardu Induk menuju sentra-sentra beban pelanggan berlangsung. Fenomena ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisis resistansi konduktor penghantar kelistrikan. Semakin panjang bentangan fisik kabel saluran dan semakin besar beban arus listrik yang dialirkan, maka akumulasi gesekan termal atau rugi-rugi tembaga ($I^2R$) di dalam kabel akan semakin membesar. Melalui proses akumulasi tersebut, penurunan kualitas pasokan berupa jatuh tegangan (*voltage drop*) di titik ujung saluran penerima pada akhirnya akan ditimbulkan.

Dalam jaringan distribusi Tegangan Menengah (TM), gesekan ini direpresentasikan oleh nilai resistansi konduktor (kabel). Rugi-rugi ini didominasi oleh susut daya aktif murni yang terdisipasi (terbuang) ke udara bebas dalam bentuk energi panas. Di kalangan *engineer*, fenomena ini sering disebut sebagai rugi-rugi tembaga. Secara matematis, besaran rugi-rugi ini dirumuskan pada persamaan 2.1 [20]:

$$P_{loss} = I^2 \cdot R \tag{2.1}$$

Di mana $I$ adalah arus beban saluran dalam satuan (Ampere) dan $R$ adalah tahanan atau resistansi konduktor dalam satuan (Ohm).

Berdasarkan persamaan 2.1, kerugian daya akan meningkat secara kuadratik mengikuti besarnya arus. Mengingat topologi jaringan ULP Ujungberung melayani kawasan perumahan padat dengan jarak bentangan penyulang yang berbelas-belas kilometer panjangnya, akumulasi resistansi saluran menjadi sangat besar. Ketika Waktu Beban Puncak (WBP) tiba di malam hari dan arus membesar secara serentak, kabel-kabel saluran udara ini akan mengalami pemanasan yang memicu tingginya susut daya. Energi panas yang menguap ke udara ini adalah energi yang diproduksi oleh pembangkit namun gagal dijual oleh PLN kepada pelanggan, sehingga murni menjadi kerugian finansial, representasi dari impedansi saluran dalam penghantar dapat dilihat pada gambar 2.3.




Gambar 2.3 Diagram ekivalen saluran distribusi pendek yang menunjukkan impedansi seri (R dan X) penyebab susut daya dan jatuh tegangan

### 2.3.2. *Load factor* (LF) dan *Loss Load factor* (LLF)

Karakteristik konsumsi energi masyarakat tidaklah datar, melainkan berfluktuasi setiap jamnya membentuk sebuah kurva yang disebut Kurva Beban Harian. Pada pagi hingga siang hari, konsumsi mungkin berada di level menengah. Pada malam hari (pukul 18.00-22.00) konsumsi melonjak tajam menjadi Beban Puncak karena seluruh pelanggan menyalakan lampu dan peralatan elektronik bersaman, lalu anjlok kembali saat tengah malam.

Dalam perhitungan kerugian finansial akibat susut daya selama satu tahun penuh (8.760 jam), angka pada saat Waktu Beban Puncak saja tidak boleh digunakan. Apabila evaluasi hanya difokuskan pada besaran arus puncak, maka sebuah kondisi di mana kabel PLN terus-menerus memanas secara maksimal selama 24 jam penuh seolah-olah telah diasumsikan. Melalui pendekatan tersebut, kesimpulan yang sangat bias akan dihasilkan sehingga representasi angka kerugian akan dilebih-lebihkan (*over-estimation*).

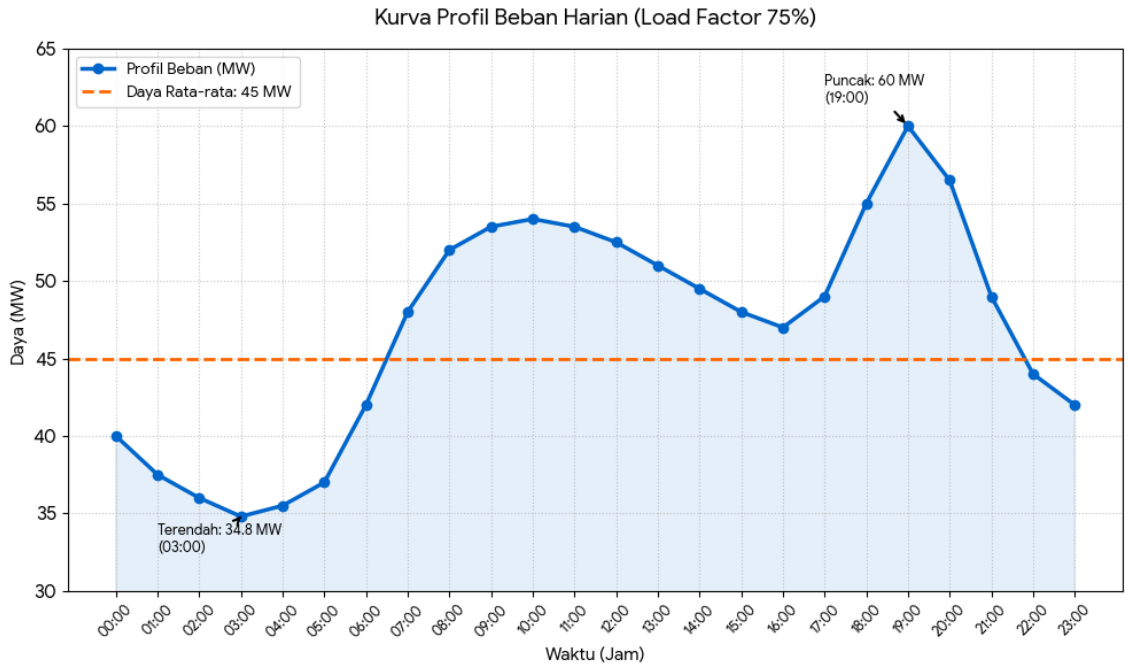
Untuk mengatasi bias tersebut dan membawa perhitungan ke dunia nyata, para perencana kelistrikan menggunakan dua parameter pengali, yaitu *Load factor* (LF) dan *Loss Load factor* (LLF) [17].

- *Load factor* (LF): Adalah rasio antara beban rata-rata dibandingkan dengan beban puncaknya. Secara sederhana, LF mengukur seberapa "rata" konsumsi masyarakat. Semakin mendekati angka 1 (atau 100%), berarti konsumsi masyarakat semakin stabil dan merata sepanjang hari.
- Loss *Load factor* (LLF): Adalah angka konversi matematis untuk mencari rata-rata susut daya aktual di lapangan.

Hubungan empiris antara kemerataan beban (LF) dengan rata-rata kerugian (LLF) umumnya dirumuskan melalui pendekatan polinomial kuadratik yang diakui secara luas oleh industri utilitas global [17]:

$$LLF = k \cdot LF + (1 - k) \cdot LF^2 \quad (2.2)$$

Di mana konstanta $k$ ditetapkan bernilai 0,3 untuk jaringan distribusi kawasan campuran (residensial dan komersial) seperti Ujungberung. Angka LLF yang dihasilkan dari rumus inilah yang kemudian digunakan sebagai skalar pengali (peredam) yang adil. Angka ini mengekstrapolasi susut daya sesaat (kW) menjadi akumulasi kerugian energi tahunan (kWh) yang presisi, sehingga nilai evaluasi keekonomian (Rupiah) yang dihasilkan oleh algoritma cerdas nantinya bisa dipertanggungjawabkan secara komersial, gambaran terkait ilustrasi *load factor* residensial pada beban distribusi bisa dilihat pada gambar 2.4




Gambar 2.4 Kurva Profil Beban Harian (*Load Curve*) yang mengilustrasikan titik Beban Puncak, Beban Rata-rata, dan Area Konsumsi Energi

### 2.3.3. Indeks Keandalan (SAIDI dan SAIFI)

Keandalan (*reliability*) sistem distribusi didefinisikan sebagai probabilitas sistem untuk menyuplai energi listrik secara kontinu tanpa adanya interupsi kepada pelanggan. Mengacu pada standar internasional IEEE Std 1366-2012 [21], performa keandalan

secara universal dievaluasi melalui dua indikator probabilistik utama yang mengukur durasi dan frekuensi pemadaman:

1. SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*): Parameter ini mendefinisikan rata-rata durasi total pemadaman yang dialami oleh setiap pelanggan dalam satu periode evaluasi (umumnya dievaluasi per tahun). Secara matematis, SAIDI dirumuskan pada persamaan 2.3 sebagai rasio antara total durasi pemadaman seluruh pelanggan terhadap jumlah total pelanggan yang dilayani oleh sistem [22]:

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_i \, N_i}{N_T} \tag{2.3}$$

Di mana $U_i$ adalah durasi pemadaman rata-rata tahunan pada titik beban ke-$i$, $N_i$ adalah jumlah pelanggan yang terdampak pada titik beban tersebut, dan $N_T$ adalah jumlah total pelanggan pada sistem.

2. SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*): Parameter ini mengkuantifikasi frekuensi atau jumlah kejadian pemadaman rata-rata yang dialami oleh setiap pelanggan selama satu tahun. Secara analitik, SAIFI diformulasikan pada persamaan 2.4 [22]:

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i \, N_i}{N_T} \tag{2.4}$$

Di mana $\lambda_i$ adalah tingkat kegagalan (failure rate / frekuensi pemadaman) pada titik beban ke-$i$. Apabila nilai SAIDI dan SAIFI sebuah kawasan melewati ambang batas wajar (SLA) yang ditetapkan, utilitas kelistrikan dianggap gagal mempertahankan keandalan pasokan, dan diwajibkan menanggung konsekuensi operasional serta penalti mutu layanan.

### 2.3.4. *Energy Not Supplied* (ENS) dan Perbaikan Keandalan via BESS

*Energy Not Supplied* (ENS) atau Energi Tak Tersalurkan adalah parameter kritikal yang bertindak sebagai jembatan untuk mengonversi kelemahan teknis (durasi pemadaman) menjadi kerugian finansial. Secara definisi, ENS mengkuantifikasi total volume energi listrik (dalam satuan kWh atau MWh) yang gagal dijual oleh utilitas

kepada masyarakat akibat terputusnya pasokan [22]. Sebagai contoh, jika sebuah sentra beban mengalami mati lampu, putaran *metering* energi akan terhenti, yang secara langsung memotong potensi pendapatan masuk (*cash inflow*) utilitas.

Secara analitik matematis, volume ENS dasar pada suatu jaringan dikalkulasi melalui persamaan 2.5 [22]:

$$ENS_{base} = \sum_{i=1}^{n} P_{avg,i} \cdot U_i \tag{2.5}$$

Di mana $P_{avg,i}$ adalah rata-rata beban daya aktif (kW) yang padam pada titik beban $i$, dan $U_i$ adalah durasi pemadaman di titik tersebut. Dalam kerangka makro kawasan, durasi agregat pemadaman ini setara dengan parameter SAIDI sistem.

Untuk mengatasi kerugian ini, kehadiran *Battery Energy Storage System* (BESS) pada Active Distribution Network difungsikan sebagai cadangan daya (*backup power*). Saat pasokan utama dari Gardu Induk terputus akibat gangguan hubung singkat, BESS akan mengambil alih menyuplai beban secara mandiri dalam mode pulau mikro (islanding mode).

Besaran penyelamatan energi atau perbaikan keandalan ( $\Delta ENS$ ) yang berhasil diwujudkan oleh BESS diformulasikan secara matematis pada persamaan 2.6 [22]:

$$\Delta ENS = P_{BESS} \cdot t_{backup} \tag{2.6}$$

Di mana $P_{BESS}$ adalah daya aktif (kW) yang dikerahkan oleh baterai untuk memikul beban yang padam. Mengingat kapasitas penyimpanan baterai bersifat terbatas, durasi pencadangan ( $t_{backup}$ ) dibatasi mutlak oleh perbandingan antara kapasitas baterai terpasang ($E_{BESS}$ dalam kWh) terhadap beban yang dipikul, atau tidak melebihi durasi maksimal pemadaman (SAIDI). Batasan waktu ini dirumuskan pada persamaan 2.7 [12]:

$$t_{backup} = \min\left(SAIDI, \frac{E_{BESS}}{P_{BESS}}\right) \tag{2.7}$$

Melalui rumusan persamaan 2.7, algoritma komputasi dapat memproyeksikan secara presisi berapa volume *Energy Not Supplied* yang berhasil diselamatkan dari kegagalan suplai. Volume energi yang diselamatkan inilah yang selanjutnya dikonversi ke dalam

nilai moneter (Rupiah) untuk menjustifikasi kelayakan ekonomi pembelian dan penempatan modul BESS.

## 2.4. Pembangkit Terdistribusi (*Distributed Generation*)

Secara tradisional, arsitektur sistem tenaga listrik dibangun dengan konsep terpusat (*centralized*), di mana listrik diproduksi oleh pembangkit berskala besar yang lokasinya jauh dari pusat beban. Konsep ini berkembang dengan hadirnya Pembangkit Terdistribusi atau *Distributed Generation* (DG), yaitu unit pembangkitan skala kecil hingga menengah yang dihubungkan langsung pada jaringan distribusi di dekat lokasi pelanggan [23]. Dalam kerangka modernisasi jaringan distribusi aktif (*Active Distribution Network* / ADN), dua komponen utama yang lazim dipadukan sebagai unit pembangkit terdistribusi hibrida adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan *Battery Energy Storage System* (BESS).

### 2.4.1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan teknologi energi terbarukan yang mengonversi radiasi sinar matahari langsung menjadi energi listrik arus searah (*Direct Current* / DC) dengan memanfaatkan efek *fotovoltaik* pada material semikonduktor [24]. Arus DC yang dihasilkan oleh modul surya kemudian dialirkan menuju perangkat *inverter* untuk diubah menjadi arus bolak-balik (*Alternating current* / AC) agar tegangannya sesuai dan dapat disinkronkan dengan jaringan Tegangan Menengah 20 kV milik PLN.

Dalam batasan studi utilitas, PLTS seringkali diandalkan sebagai sumber pasokan daya aktif yang terintegrasi pada simpul (*bus*) jaringan distribusi untuk memberikan suplai energi lokal guna mereduksi beban yang harus disalurkan oleh konduktor dari hulu Gardu Induk, di mana representasi visual dari hamparan instalasi modul fotovoltaik tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.5.

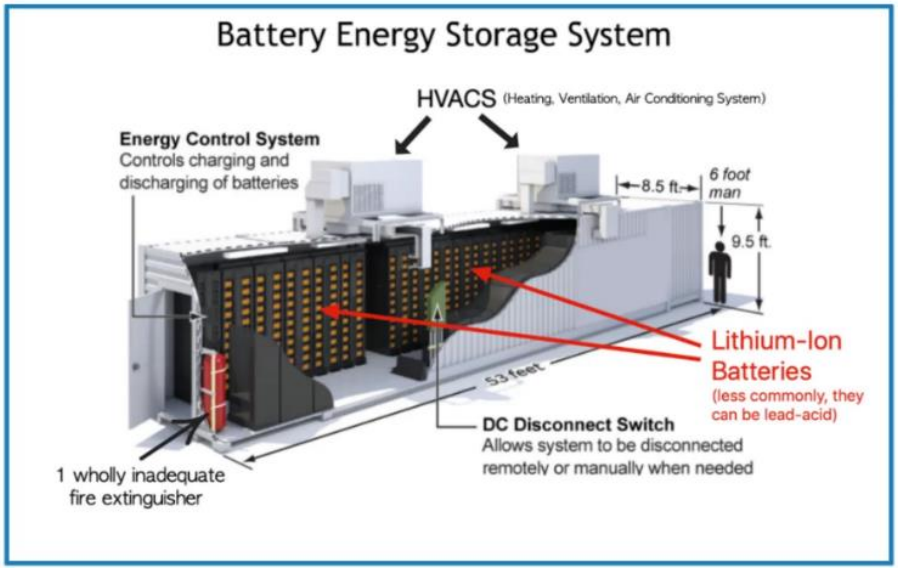


Gambar 2.5 Panel surya komponen utama pada PLTS

### 2.4.2. *Battery Energy Storage System* (BESS)

*Battery Energy Storage System* (BESS) adalah sistem penyimpanan energi elektrokimia yang terdiri dari rangkaian sel baterai (seperti Litium-ion), *Battery Management System* (BMS), serta *Power conversion system* (PCS/*Inverter* dua arah) [25]. BESS memiliki kemampuan dua arah, yaitu menyerap energi dari jaringan (*charging*) dan melepaskan kembali energi tersebut (*discharging*) saat dibutuhkan.

Dalam kerangka perbaikan keandalan utilitas kelistrikan, BESS sangat diandalkan sebagai sumber daya cadangan darurat (*backup power*). Ketika terjadi gangguan di penyulang utama yang menyebabkan pasokan dari Gardu Induk terputus, BESS dapat difungsikan untuk memikul beban di sekitarnya secara mandiri. Peran BESS ini secara langsung berdampak krusial pada pemangkasan durasi pemadaman dan penyelamatan volume *Energy Not Supplied* (ENS), di mana representasi visual dari BESS tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.5.




Gambar 2. 6 ilustrasi *Container* yang berisikan baterai sebagai komponen utama BESS

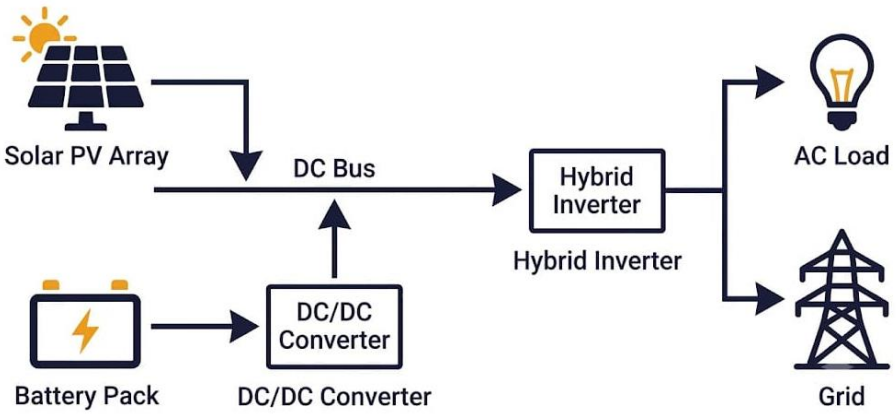
### 2.4.3. Integrasi dan Alur Manajemen Daya Sistem Hibrida PLTS-BESS

Sistem hibrida dalam kerangka pembangkitan terdistribusi mengintegrasikan unit PLTS dan BESS secara berdampingan pada satu simpul kelistrikan yang sama atau yang lazim dikenal sebagai *Point of Common Coupling* (PCC) di jaringan distribusi tegangan menengah. Secara arsitektural, penggabungan kedua entitas teknologi ini tidak bersifat pasif. Keduanya dikoordinasikan secara terpadu oleh sebuah pusat kendali cerdas yang disebut *Energy Management System* (EMS) [12]. Kehadiran EMS memastikan bahwa daya yang dihasilkan oleh PLTS dapat diharmonisasikan dengan kapasitas penyimpanan BESS, sehingga sistem hibrida ini dapat dilihat oleh jaringan utama (grid) sebagai satu kesatuan sumber daya lokal yang tangguh dan stabil.

Secara fisis perangkat keras, modul surya yang menghasilkan arus DC dihubungkan ke jaringan AC melalui perangkat *unidirectional inverter* (*inverter* satu arah). Di sisi lain, sistem baterai dihubungkan melalui *bidirectional inverter* atau *Power conversion system* (PCS). Penggunaan perangkat PCS inilah yang memungkinkan kelenturan aliran daya bergerak ke dua arah; yakni menyerap daya dari jaringan atau PLTS (proses *charging*) dan menyuntikkan daya kembali ke jaringan (proses *discharging*) [26].

Sinergi alur daya di dalam sistem hibrida ini dirancang untuk saling melengkapi tanpa memerlukan intervensi manual. Melalui skema integrasi perangkat keras dan algoritma kendali inilah, sistem hibrida PLTS-BESS mampu secara efektif menjalankan fungsinya

sebagai penyokong kelistrikan kawasan, sekaligus menjadi instrumen utama utilitas dalam meminimalisasi kerugian energi tidak tersalurkan (ENS) saat terjadi pemadaman mendadak [27].




Gambar 2.7 Blok Skema Diagram Integrasi Sistem Hibrida PLTS-BESS (Modul Surya, *Inverter*, Baterai, PCS, dan EMS) Terintegrasi pada Bus Jaringan Distribusi 20 kV

Bentuk integrasi fisik antara komponen PLTS dan BESS dijabarkan secara terurut pada Gambar 2.7. Pada tahap pemrosesan awal, energi listrik arus searah (DC) yang dihasilkan oleh modul surya (*Solar PV Array*) dialirkan secara langsung menuju titik kumpul DC Bus. Secara berdampingan, modul penyimpanan energi (*Battery Pack*) turut dihubungkan ke DC Bus yang sama melalui perantara perangkat DC/DC *Converter*. Melalui perangkat konverter ini, aliran daya dua arah difasilitasi sehingga arus daya dapat diserap saat proses pengisian (*charging*) maupun disuntikkan kembali saat proses pelepasan (*discharging*) oleh baterai ke dalam sistem. Selanjutnya, akumulasi daya yang terkumpul pada DC Bus diteruskan menuju komponen sentral, yakni *Hybrid Inverter*. Pada tahapan akhir ini, arus searah dikonversi secara utuh menjadi arus bolak-balik (AC), untuk kemudian didistribusikan secara paralel guna menyuplai beban kelistrikan lokal (*AC Load*) serta disinkronisasikan dengan infrastruktur jaringan listrik utama (*Grid*).

## 2.5. Rekonfigurasi Jaringan Distribusi (*Distribution Network Reconfiguration*)

### 2.5.1. Konsep Dasar Rekonfigurasi Jaringan

Rekonfigurasi Jaringan Distribusi atau *Distribution Network Reconfiguration* (DNR) didefinisikan sebagai proses manipulasi topologi struktur sirkuit jaringan untuk mengatur ulang rute aliran daya listrik dari gardu induk menuju pusat-pusat beban pelanggan [28]. Secara teknis dan operasional, bermanuver dalam jaringan listrik dicapai dengan cara merubah status kondisi dua jenis instrumen saklar pemutus sirkuit utama, yaitu:

1. *Sectionalizing Switch* (Saklar Pembagi): Merupakan saklar yang pada kondisi operasi normal berstatus tertutup (*Normally Closed* / NC). Saklar ini berfungsi untuk menghubungkan antar ruas segmen kabel di dalam satu penyulang yang sama.
2. *Tie-Switch* (Saklar Interkoneksi): Merupakan saklar yang pada kondisi operasi normal berstatus terbuka (*Normally Open* / NO). Saklar ini dirancang sebagai jembatan cadangan yang menghubungkan antara dua penyulang yang berbeda atau antar cabang di dalam satu sistem *loop*.

Dalam mekanisme proses DNR, penutupan satu *Tie-Switch* secara otomatis akan menghubungkan dua sirkuit dan membentuk siklus interkoneksi tertutup (*loop*). Untuk mengembalikan dan mempertahankan sifat radial jaringan, penutupan tersebut harus segera dikompensasi dengan pembukaan satu *Sectionalizing Switch* pada area *loop* yang baru saja terbentuk tersebut.

### 2.5.2. Tujuan dan Manfaat Eksekusi DNR

Objektif fundamental dari eksekusi DNR adalah upaya mencari rute penyaluran daya baru dengan nilai resistansi atau impedansi ekuivalen sekecil mungkin. Mengingat nilai resistansi kabel berbanding lurus dengan panjang konduktornya, memutar rute arus listrik secara cerdas akan memberikan multi-manfaat fisis bagi sistem kelistrikan utilitas [29]:

- Reduksi Susut Daya (*Loss Reduction*): DNR memungkinkan pemerataan beban distribusi (*load balancing*). Dengan mengalihkan sebagian arus dari penyulang yang mengalami pembebanan berat (*heavily loaded*) ke penyulang tetangga yang kapasitasnya masih longgar (*lightly loaded*), arus listrik tidak menumpuk pada satu kabel. Hal ini dapat mereduksi kerugian disipasi energi panas atau rugi-rugi tembaga secara drastis.

- Perbaikan Profil Tegangan (*Voltage Profile Improvement*): Dengan berkurangnya penumpukan arus, maka jatuh tegangan (*voltage drop*) akibat panjangnya saluran dapat diminimalisasi, sehingga level tegangan di ujung saluran (*end-of-line*) dapat terangkat kembali ke batas standar operasi.
- Solusi Efisiensi Tanpa Biaya Modal (*Zero-CAPEX Solution*): Berbeda dengan skenario peningkatan keandalan lainnya seperti pembangunan trafo gardu baru atau penggantian diameter kabel (rekonduktoring) yang menyerap dana miliaran rupiah, DNR beroperasi murni dengan mengandalkan instrumen saklar yang sudah eksisting di lapangan. Hal ini menjadikannya primadona optimasi sebagai solusi efisiensi tanpa pengeluaran modal belanja aset (*Zero-Capital Expenditure*).

### 2.5.3. Konstrain Operasional dan Kompleksitas Komputasi

Walaupun menawarkan potensi efisiensi jaringan yang sangat masif, manuver DNR diikat oleh konstrain fisis mutlak yang tidak boleh dilanggar. Jika algoritma mesin melanggar konstrain ini, maka sistem utilitas dapat mengalami malfungsi. Dua aturan utama tersebut meliputi [30]:

1. Konstrain Radialitas: Setelah saklar dipindah, sirkuit jaringan harus tetap mempertahankan bentuk hierarki radial (bercabang tanpa arus berbalik). Konstrain fisis ini wajib dipenuhi mutlak agar sistem relai proteksi arus lebih (*overcurrent relay*) pada gardu induk dapat mendeteksi arah gangguan secara presisi, sekaligus memblokir munculnya aliran sirkulasi arus sesat (*Circulating Current*).
2. Konstrain Keterhubungan (*Connectivity*): Seluruh simpul beban (gardu pelanggan) harus tetap mendapatkan pasokan listrik dari gardu induk. Kombinasi pembukaan saklar yang salah dapat memicu terisolasinya suatu area dan menciptakan pemadaman sebagian (*islanding operation*) yang tidak terencana.

Secara matematis, pencarian perpaduan saklar terbaik ini merupakan hal yang sangat menantang. Keberadaan puluhan hingga ratusan saklar di jaringan perkotaan berskala masif (seperti ULP Ujungberung) membuat pencarian konfigurasi ini berubah menjadi permasalahan optimasi kombinatorial diskrit (*NP-Hard problem*) [31]. Jumlah probabilitas formasi buka-tutup jaringan tumbuh secara eksponensial seiring bertambahnya saklar. Oleh sebab itu, pencarian solusi *master plan* rekonfigurasi di dunia

nyata tidak lagi mampu diselesaikan menggunakan hitungan rumus analitik linier konvensional, melainkan membutuhkan intervensi algoritma kecerdasan buatan tingkat tinggi (seperti metaheuristik) untuk menyisir ruang pencarian ruang solusi dengan cepat dan efisien.

## 2.6. Analisis Aliran Daya (*Load Flow Analysis*)

Analisis aliran daya, atau yang sering disebut dengan studi aliran beban (*load flow study*), merupakan landasan paling fundamental dalam rekayasa dan perencanaan sistem tenaga listrik. Analisis ini adalah proses komputasi numerik yang bertujuan untuk mengevaluasi parameter fisis kelistrikan suatu jaringan pada kondisi operasi mantap (*steady-state*). Melalui studi aliran daya, perencana sistem dapat mengetahui secara presisi nilai tegangan pada setiap titik simpul (bus), sudut fasa, aliran daya aktif dan reaktif pada setiap segmen penghantar, hingga total susut daya murni yang terdisipasi di seluruh jaringan [20].

Dalam konteks modernisasi jaringan distribusi cerdas yang diinjeksi oleh unit *Distributed Generation* (seperti PLTS) dan *Energy Storage* (seperti BESS), aliran daya tidak lagi bersifat linier atau pasif. Adanya daya yang disuntikkan secara tersebar dari berbagai simpul memaksa perhitungan profil tegangan menjadi lebih dinamis. Oleh karena itu, simulasi aliran daya merupakan instrumen mutlak untuk memvalidasi apakah suatu manuver topologi (buka-tutup saklar) atau injeksi EBT baru akan menyebabkan pelanggaran batas operasional seperti tegangan jatuh (*voltage drop*) di luar standar yang diizinkan atau arus yang melebihi ambang batas termal kabel (*line overload*) [32].

### 2.6.1. Pendekatan Metode Newton-Raphson

Secara matematis, jaringan tenaga listrik direpresentasikan oleh serangkaian persamaan aljabar non-linier yang sangat kompleks. Jumlah persamaan ini akan tumbuh secara eksponensial seiring dengan bertambahnya jumlah bus dan cabang penghantar (konduktor). Untuk menyelesaikan persamaan non-linier berdimensi besar ini, dunia kelistrikan mengenal beberapa metode komputasi iteratif, seperti metode Gauss-Seidel, Fast-Decoupled, dan Newton-Raphson.

Pada penelitian tesis ini, penyelesaian aliran daya dikonstruksi sepenuhnya menggunakan metode Newton-Raphson [20]. Pemilihan metode numerik ini dilandaskan pada justifikasi teknis bahwa Newton-Raphson memiliki karakteristik konvergensi berkecepatan kuadratik yang sangat kuat dan tangguh (*robust*). Berbeda dengan metode Gauss-Seidel yang konvergensinya lambat dan rentan gagal menemukan solusi apabila dihadapkan pada jaringan berarsitektur kompleks, Newton-Raphson mampu berkonvergensi (menemukan jawaban akhir) hanya dalam hitungan 3 hingga 5 iterasi, terlepas dari seberapa masif ukuran sirkuit maupun kerumitan interkoneksinya (termasuk pada struktur *meshed-loop* eksisting yang lazim ditemui di penyulang Ujungberung).

### 2.6.2. Matematis dan Matriks Jacobian

Persamaan fundamental aliran daya aktif ($P_i$) dan daya reaktif ($Q_i$) yang disuntikkan menuju sebuah bus $i$ dalam metode Newton-Raphson dapat dituliskan sebagai fungsi dari magnitudo tegangan dan sudut fasa pada persamaan 2.8 dan 2.9 berikut [20]:

$$P_i = \sum_{j=1}^{N} |V_i|\,\left|V_j\right|\left|Y_{ij}\right|\cos\left(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j\right) \tag{2.8}$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{N} |V_i|\,\left|V_j\right|\left|Y_{ij}\right|\sin\left(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j\right) \tag{2.9}$$

Keterangan:

$|V_i|, \left|V_j\right|$ = Magnitudo tegangan pada bus $i$ dan bus $j$.

$\left|Y_{ij}\right|$ = Magnitudo admitansi saluran (elemen matriks $Y_{bus}$) antara bus $i$ dan $j$.

$\theta_{ij}$ = Sudut admitansi saluran.

$\delta_i, \delta_j$ = Sudut fasa tegangan pada bus $i$ dan $j$.

Karena persamaan 2.8 dan 2.9 bersifat trigonometri non-linier, metode Newton-Raphson menyelesaikan permasalahan dengan cara mengekspansi persamaan tersebut menggunakan deret Taylor dan mengabaikan suku berderajat tinggi. Proses ini melahirkan sebuah matriks diferensial turunan parsial berskala besar yang sangat terkenal di kalangan *engineer*, yaitu Matriks Jacobian ($J$) yang ditunjukan pada persamaan 2.10. Hubungan linier antara kesalahan perkiraan daya (*power mismatch*) dengan pembaruan

koreksi tegangan dan sudut fasa direpresentasikan dalam persamaan bentuk matriks 2.10 berikut [20]:

$$[\Delta P\ \Delta Q] = [J_1 \quad J_2\ J_3 \quad J_4][\Delta\delta\ \Delta|V|] \tag{2.10}$$

Di mana $\Delta P$ dan $\Delta Q$ adalah selisih (kesalahan) antara daya yang disuplai aktual dengan daya hasil hitungan iterasi sementara. Elemen-elemen sub-matriks $J_1, J_2, J_3$, dan $J_4$ berisi turunan parsial daya terhadap sudut fasa ($\delta$) dan magnitudo tegangan ($|V|$). Siklus iterasi akan terus dieksekusi oleh mesin komputasi untuk memperbarui tebakan awal tegangan hingga nilai $\Delta P$ dan $\Delta Q$ mendekati angka nol mutlak (berada di bawah batas toleransi, misalnya 0,0001). Tercapainya kondisi ini menandakan sistem telah setimbang (konvergen).

### 2.6.3. Integrasi Metode Newton-Raphson pada Simulator Fisis

Pada eksekusi penelitian kecerdasan buatan (AI) lintas platform ini, ribuan tebakan kombinasi topologi saklar dan variasi kapasitas injeksi hibrida dibangkitkan oleh algoritma PSO. Untuk mengevaluasi parameter fisis dari setiap tebakan tersebut, metode Newton-Raphson digunakan untuk menyelesaikan perhitungan aliran daya secara berulang. Secara matematis, metode ini dioperasikan melalui proses pembalikan (inversi) Matriks Jacobian yang merepresentasikan kondisi kelistrikan jaringan. Apabila proses inversi matriks berskala puluhan MegaWatt dari penyulang Ujungberung tersebut dikodekan dan dihitung murni dari nol (*scratch*) di dalam Python pada setiap tebakan, maka waktu komputasi (CPU) yang sangat ekstrem akan dihabiskan. Selain itu, risiko tingginya kesalahan pembulatan angka (*floating-point error*) akibat kerumitan kalkulasi juga sangat rentan ditimbulkan.

Oleh karena itu, penyelesaian kalkulasi matriks Newton-Raphson ini secara arsitektural didelegasikan dan dipercayakan sepenuhnya kepada *solver* tingkat industri (ETAP). Python bertugas berpikir dan mengirimkan variabel beban, sedangkan matriks fisis aliran dayanya dieksekusi di belakang layar oleh ETAP. Pendelegasian simulasi fisis terintegrasi ini menjamin bahwa setiap hasil efisiensi susut daya (kW) maupun kualitas profil tegangan (kV) yang ditawarkan oleh algoritma memiliki validitas perhitungan yang setara dengan presisi departemen perencanaan utilitas (PLN) di dunia nyata.

## 2.7. Algoritma dan Kecerdasan Komputasional

Penyelesaian studi rekonfigurasi jaringan yang digabungkan dengan penetapan kapasitas injeksi Pembangkit Terdistribusi menciptakan dimensi ruang pencarian (*search space*) berskala jutaan kemungkinan. Dalam ilmu matematika komputasi, permasalahan ini diklasifikasikan sebagai *NP-Hard (Non-deterministic Polynomial-time Hard) problem* [33]. Artinya, pendekatan analitik linier atau pencarian kombinasi satu per satu (*exhaustive search*) tidak mungkin lagi dilakukan karena akan memakan waktu prosesor hingga berhari-hari bahkan berminggu-minggu. Oleh karena itu, intervensi algoritma heuristik berbasis kecerdasan komputasional mutlak diperlukan untuk menyisir ruang solusi tersebut secara cepat, cerdas, dan efisien.

### 2.7.1. *Particle Swarm Optimization* (PSO)

*Particle Swarm Optimization* (PSO) adalah algoritma optimasi metaheuristik berbasis populasi yang pertama kali diperkenalkan oleh Dr. Russell Eberhart dan Dr. James Kennedy pada tahun 1995. Algoritma ini terinspirasi dari keajaiban koreografi biologis kawanan burung (*flock of birds*) atau kawanan ikan (*school of fish*) ketika mereka bergerak mencari sumber makanan secara bersama-sama [10].

Dalam konteks algoritma, "sumber makanan" direpresentasikan sebagai titik nilai objektif terbaik (misalnya rugi-rugi daya terkecil atau *Net Present Value* terbesar). PSO bekerja dengan menebarkan puluhan agen pencari yang disebut "partikel" ke dalam ruang masalah. Setiap partikel mewakili satu tebakan solusi (kombinasi saklar dan kapasitas baterai). Keunggulan utama PSO terletak pada kemampuannya untuk menyeimbangkan antara eksplorasi (mencari area baru) dan eksploitasi (mempertajam pencarian di area yang sudah terbukti bagus) melalui dua jenis memori kognitif:

1. *Personal Best* (pBest): Rekam jejak solusi (lokasi) terbaik yang pernah dicapai oleh partikel itu sendiri selama ia berterbangan.
2. *Global Best* (gBest): Solusi (lokasi) paling juara yang pernah ditemukan oleh siapapun di dalam seluruh kawanan tersebut.

Secara matematis, setiap partikel memperbarui kecepatan (*velocity*) dan posisi (*position*) tebakannya pada setiap iterasi menggunakan dua persamaan 2.11dan 2.12 berikut [10]:

$$v_i^{t+1} = w \cdot v_i^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (pBest_i - x_i^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gBest - x_i^t) \quad (2.11)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (2.12)$$

Keterangan Parameter:

$v_i^t$ = Kecepatan partikel ke-$i$ pada iterasi ke-$t$.

$x_i^t$ = Posisi (tebakan solusi) partikel ke-$i$ pada iterasi ke-$t$.

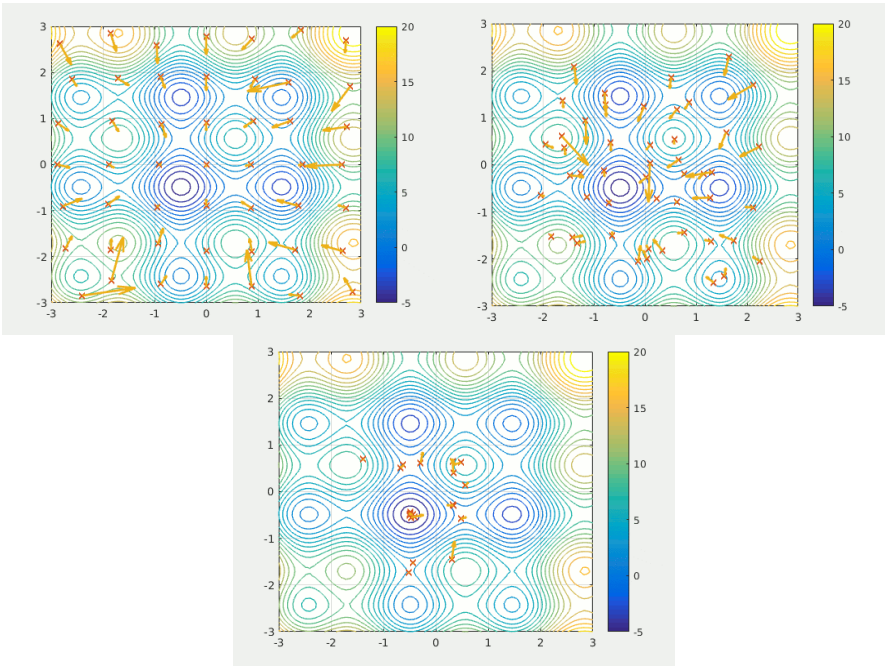
$w$ = Bobot inersia (*inertia weight*), berfungsi menjaga momentum partikel agar tidak mudah terjebak di solusi lokal.

$c_1$ = Konstanta kognitif, menentukan seberapa kuat partikel percaya pada ingatan kesuksesannya sendiri ($pBest$).

$c_2$ = Konstanta sosial, menentukan seberapa kuat partikel terpengaruh untuk mengikuti pemimpin kawanan ($gBest$).

$r_1, r_2$ = Angka acak (*random*) antara 0 hingga 1 untuk memberikan sifat stokastik (kejutan) pada pencarian.

Melalui interaksi matematis yang berulang-ulang dari iterasi ke iterasi, seluruh partikel secara bertahap akan bergerak mengerucut (berkonvergensi) menuju satu titik keseimbangan optimum, menghasilkan keputusan konfigurasi jaringan yang paling efisien, seperti di ilutrasikan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Ilustrasi Vektor Pergerakan Partikel PSO menuju pBest dan gBest

### 2.7.2. Teori Graf (*Graph Theory*) sebagai Filter Radialitas

Pada pengaplikasian algoritma PSO di sistem tenaga listrik, sebuah kelemahan struktural dapat diidentifikasi: kombinasi saklar akan diacak oleh partikel secara stokastik tanpa batasan operasional (*unconstrained*). Melalui pengacakan tersebut, tebakan konfigurasi topologi yang tidak memenuhi standar keamanan dan prinsip dasar operasi kelistrikan sangat rentan dihasilkan. Ketidaksesuaian ini dibuktikan dengan terbentuknya struktur *closed-loop* murni (sirkulasi arus sesat) atau terputusnya suatu area beban dari suplai utama sama sekali (pemadaman/*islanding*).

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, algoritma PSO kemudian diintegrasikan (digabungkan) dengan Teori Graf (*Graph Theory*) pada penelitian ini. Teori Graf adalah cabang matematika diskrit di mana pola interaksi dan struktur koneksi antar setiap titik komponen di dalam suatu ruang jaringan dipelajari secara sistematis. Melalui pendekatan pemodelan ini, infrastruktur kelistrikan direpresentasikan ke dalam bentuk graf $G = (V, E)$ [34], di mana:

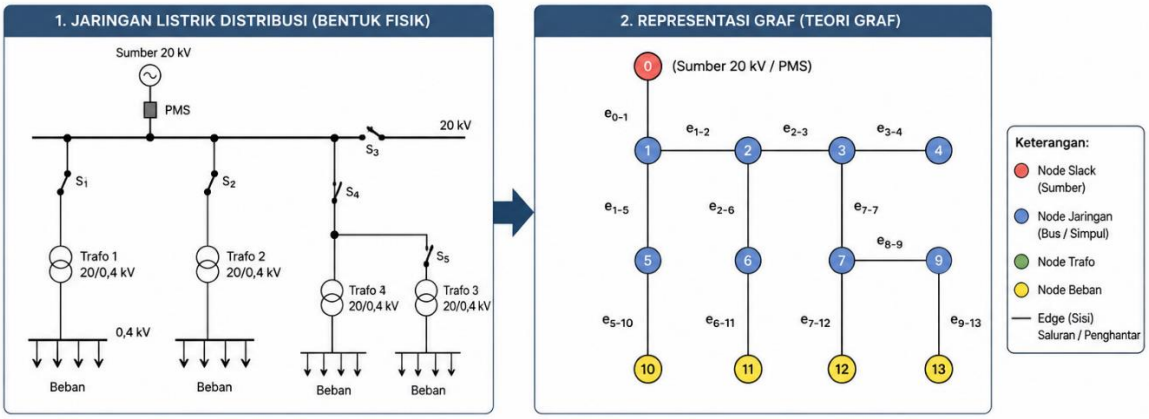
- V (*Vertices*/Simpul): Merepresentasikan seluruh peralatan distribusi seperti Gardu Distribusi, penghantar, beban *lump load* pengganti beban sisi tegangan rendah.
- E (*Edges*/Sisi): Merepresentasikan saklar pemutus sirkuit (CB, PMT, Re*closer*).

Sebelum matriks tebakan saklar dari partikel dikirimkan ke simulator ETAP, tahapan validasi topologi menggunakan algoritma Teori Graf harus dilewati pada latar belakang (*background*) sistem. Pada proses ini, sebuah matriks yang memetakan status koneksi langsung antar titik komponen jaringan (*adjacency matrix*) akan dipindai oleh algoritma guna menjalankan dua fungsi deteksi krusial::

1. Deteksi Siklus (*Cycle Detection*): Memastikan tidak ada simpul yang membentuk rute melingkar (*looping*). Sistem distribusi harus berbentuk menyerupai struktur ranting pohon (*Spanning Tree*).
2. Deteksi Keterhubungan (*Connectivity Check*): Memastikan bahwa meskipun banyak saklar yang dibuka, seluruh bus beban (simpul) tetap terhubung ke setidaknya satu sumber (Gardu Induk).

Apabila tebakan partikel PSO terdeteksi ilegal oleh Teori Graf (misalnya menyebabkan padamnya suatu area), tebakan tersebut akan langsung digugurkan dan

dipaksa untuk bermutasi kembali. Perpaduan PSO dan Teori Graf inilah yang menjamin bahwa komputasi mesin AI tetap berjalan agresif tanpa pernah menyalahi postulat proteksi dan keselamatan (*safety constraint*) kelistrikan operasional. Representasi pengaplikasian teori graf pada jaringan listrik distribusi 20 KV seperti yang ditunjukan pada gambar 2.9.




Gambar 2.9 Skema Representasi Jaringan Listrik ke dalam Bentuk *Node* (Simpul) dan *Edge* (Sisi) berbasis Teori Graf

## 2.8. Perangkat Lunak dan Integrasi *Co-Simulation*

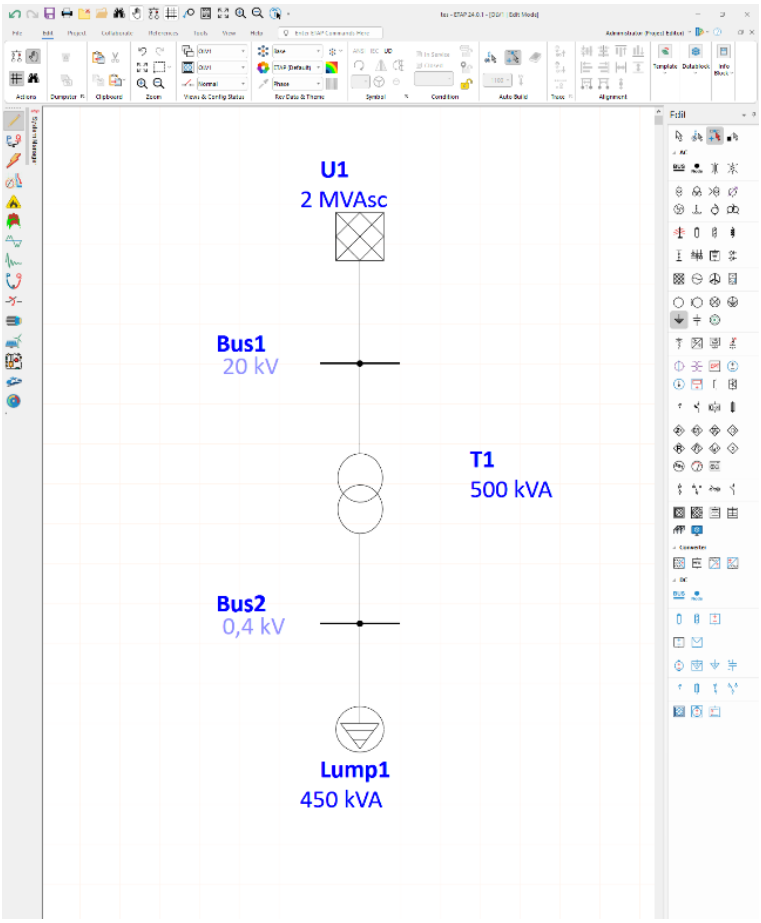
Menyelesaikan permasalahan optimasi non-linier berdimensi tinggi (*NP-Hard problem*) pada sistem kelistrikan utilitas berskala nyata tidak dapat dilakukan menggunakan satu perangkat lunak tunggal. Perangkat lunak simulasi kelistrikan umumnya tidak dibekali algoritma kecerdasan buatan (AI) yang mumpuni untuk eksplorasi metaheuristik, sementara bahasa pemrograman murni tidak memiliki mesin penghitung fisis (seperti matriks *Jacobian* Newton-Raphson) bawaan. Oleh karena itu, penelitian ini mengadopsi pendekatan *Co-Simulation* (Simulasi Kooperatif) yang mensinergikan keunggulan analitik dari dua platform berbeda, yaitu ETAP dan Python.

### 2.8.1. ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*)

Sebagai perangkat lunak analitik komprehensif tingkat industri, ETAP dirancang secara khusus untuk kebutuhan desain, simulasi, operasi, dan otomasi sistem tenaga listrik [33]. Perangkat lunak ini digunakan secara global oleh perusahaan utilitas (termasuk PT PLN) serta berbagai institusi konsultan rekayasa, di mana lingkungan pemodelan yang

terintegrasi penuh untuk sistem arus bolak-balik (AC) maupun arus searah (DC) ditawarkan di dalamnya. Melalui antarmuka pengguna grafis (*Graphic User Interface* / GUI) yang interaktif dan mudah dioperasikan, model *Single Line Diagram* (SLD) dapat dibangun secara visual. Pada proses tersebut, setiap komponen fisis jaringan seperti transformator, kabel, saklar, dan beban direpresentasikan secara komprehensif lengkap beserta parameter kelistrikan aslinya.

Dalam arsitektur *Co-Simulation* pada penelitian ini, perangkat lunak ETAP difungsikan secara murni sebagai simulator deterministik utama di mana seluruh parameter fisis kelistrikan dievaluasi. Secara lebih spesifik, perhitungan pada modul *Load Flow Analysis* (Analisis Aliran Daya) dieksekusi oleh perangkat lunak ini untuk menguji setiap kombinasi matriks saklar dan estimasi kapasitas EBT yang diinstruksikan oleh algoritma optimasi. Seluruh proses perhitungan tersebut dijalankan secara komputasional pada sistem pemrosesan internal (*background processing*), sehingga antarmuka grafis tidak perlu ditampilkan kepada pengguna. Untuk menjamin tingkat akurasi hasil, kalkulasi sistematis diselesaikan melalui penerapan metode Newton-Raphson, yakni sebuah teknik komputasi numerik iteratif yang ditugaskan secara khusus untuk memecahkan matriks persamaan aliran daya non-linier berdimensi besar. Melalui pendekatan tersebut, setiap luaran data kelistrikan (seperti nilai tegangan bus, susut daya aktif, dan arus percabangan) dijamin memiliki validitas fisis dan tingkat presisi yang identik dengan kondisi operasional aktual di lapangan. Sebagai bentuk representasi visual dari lingkungan kerja perangkat lunak analitik tersebut, cuplikan layar antarmuka pemodelan jaringan pada perangkat lunak ETAP ditampilkan secara komprehensif pada Gambar 2.10.



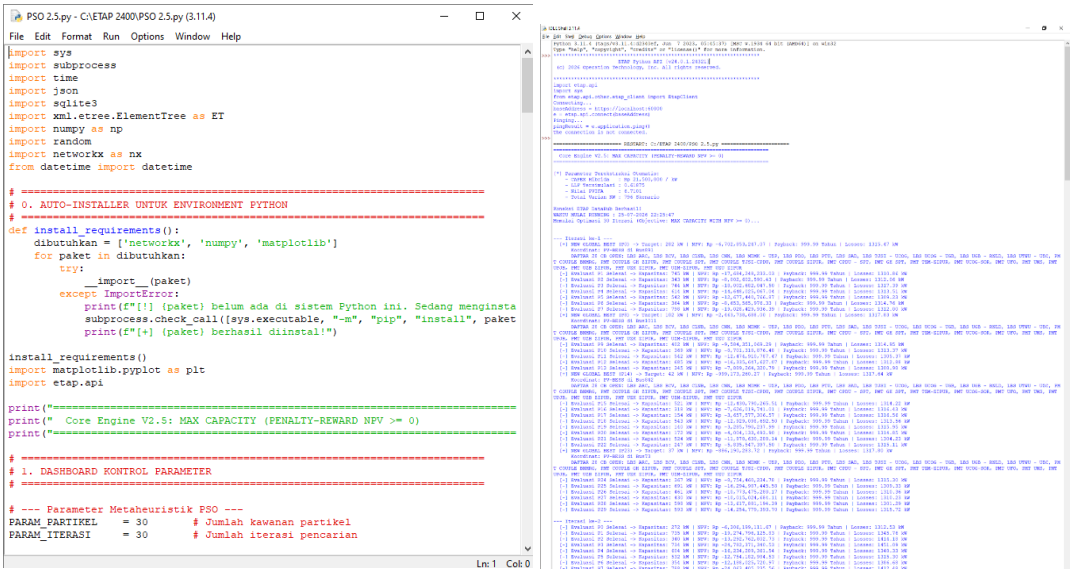

Gambar 2.10 *Screenshot* Antarmuka Perangkat Lunak ETAP

### 2.8.2. Bahasa Pemrograman Python

Sebagai bahasa pemrograman tingkat tinggi berorientasi objek, Python dikenal sangat populer dalam komputasi saintifik, analisis data, dan kecerdasan buatan [34]. Keunggulan utama dari bahasa ini ditemukan pada sintaksnya yang bersih (readable) serta ekosistem pustaka sumber terbuka (*open-source libraries*) masif yang disediakan, seperti NumPy di mana manipulasi matriks numerik difasilitasi, serta NetworkX di mana analisis pemodelan graf dijalankan. Berbeda dengan karakteristik perangkat lunak ETAP yang bersifat deterministik dan terikat pada instruksi manual, tingkat fleksibilitas algoritmik yang tinggi ditawarkan oleh Python, sehingga logika penalaran buatan (*cognitive algorithms*) yang dinamis dapat dibangun secara terprogram.

Pada perancangan penelitian ini, peran sebagai pusat kendali logika komputasi didelegasikan secara penuh kepada Python. Di dalam ekosistem *Integrated Development*

*Environment* (IDE) berbasis Python tersebut, algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) diformulasikan dan dieksekusi. Tebakan acak terhadap status saklar pemutus di sepanjang penyulang dibangkitkan secara terus-menerus oleh algoritma ini. Matriks kombinasi tersebut kemudian diseleksi melalui penerapan filter Teori Graf agar kondisi *islanding* yakni suatu keadaan kegagalan topologi di mana area beban pelanggan terputus sepenuhnya dari suplai sumber Gardu Induk maupun terbentuknya sirkulasi arus tertutup (*looping*) dapat dicegah. Setelah konfigurasi topologi tersebut divalidasi dan dinyatakan memenuhi prasyarat keamanan kelistrikan, instruksi perhitungan aliran daya dikirimkan ke simulator ETAP. Selanjutnya, luaran data kelistrikan ditarik kembali untuk dikonversi menjadi valuasi kelayakan ekonomi (Rupiah) melalui evaluasi fungsi *Penalty-Reward*. Adapun bentuk visual dari antarmuka *Integrated Development Environment* (IDE) Python yang difungsikan sebagai ruang penulisan skrip algoritma tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.11.



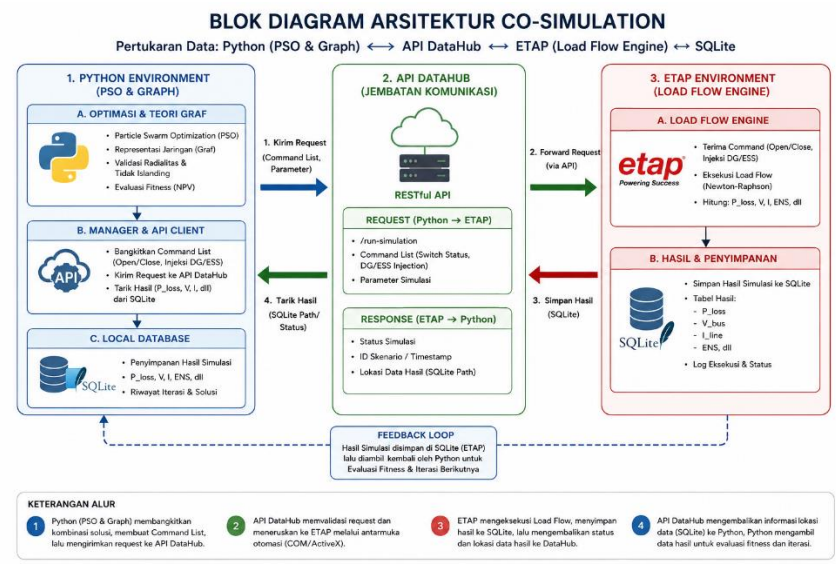

Gambar 2. 11 *Screenshot* Antarmuka Python *Editor* / IDE

### 2.8.3. ETAP-Python API (*Application Programming Interface*)

Untuk menjembatani komunikasi dua arah antara Python dan ETAP secara mulus, dibutuhkan sebuah protokol pertukaran data yang terstandarisasi. Jembatan komunikasi ini difasilitasi oleh antarmuka **ETAP API (DataHub) [35]**. Melalui Antarmuka

Pemrograman Aplikasi (API) ini, batas-batas isolasi antar-perangkat lunak dapat dihilangkan.

API memungkinkan Python bertindak sebagai "pengendali jarak jauh" (*remote control*) bagi ETAP. Melalui layanan berbasis RESTful yang berjalan secara lokal pada *localhost*, skrip Python dapat mengirimkan barisan instruksi (seperti mengubah parameter komponen, membuka/menutup saklar, dan menyuntikkan beban baru) langsung ke inti kanvas ETAP. Setelah menerima instruksi, ETAP akan mengeksekusi perhitungan komputasi di latar belakang (*background execution*) secara instan tanpa perlu memuat ulang atau me-*render* antarmuka grafisnya (GUI). Hasil dari perhitungan fisis tersebut kemudian disimpan secara otomatis ke dalam sebuah *database* berformat SQLite. Siklus komunikasi saling bertukar data ini berjalan sangat cepat dalam orde milidetik, memungkinkan ratusan iterasi pencarian AI diselesaikan secara efisien. Adapun kerangka kerja pertukaran data di dalam arsitektur *Co-Simulation* tersebut direpresentasikan secara komprehensif pada Gambar 2.12.




Gambar 2.12 Blok Diagram Arsitektur *Co-Simulation* yang menunjukkan panah pertukaran data dari Python (PSO & Graph) menuju API DataHub, masuk ke ETAP (*Load Flow Engine*), dan umpan balik ke Python (SQLite)

### 2.8.4. Sintaks Pengendalian API dan Pemodelan Injeksi buskw

Proses pengiriman instruksi dari Python ke ETAP dilakukan menggunakan format teks yang disebut sintaks *Command List*. Untuk mengatur status manuver saklar pemutus sirkuit (*switch/breaker*) secara dinamis di sepanjang jaringan distribusi, algoritma menggunakan perintah fundamental kontrol sirkuit berikut:

- *OPEN* [Nama ID Saklar] : Menginstruksikan ETAP untuk memutus sirkuit (*Normally Closed* diubah menjadi *Normally Open*).
- *CLOSE* [Nama ID Saklar] : Menginstruksikan ETAP untuk menyambung sirkuit (*Normally Open* diubah menjadi *Normally Closed*).

Pendekatan Pemodelan Hibrida PLTS-BESS: Sebuah tantangan teknis komputasional muncul ketika harus mensimulasikan komponen injeksi pembangkit hibrida. Apabila penelitian ini memodelkan PLTS dan BESS secara fisis menggunakan komponen *inverter* komprehensif dari *library* ETAP pada setiap iterasinya, beban kerja CPU (*Central Processing Unit*) akan menjadi sangat berat. Hal ini dapat menyebabkan proses *Co-Simulation* berjalan sangat lambat.

Sebagai solusi atas kendala komputasional tersebut, sebuah pendekatan rekayasa (*engineering approach*) yang lazim diaplikasikan dan dapat dijustifikasi secara matematis dalam studi aliran beban makro diterapkan pada penelitian ini, yakni pemodelan injeksi EBT sebagai Beban Terpusat Negatif (*Negative Lumped load*). Di dalam properti antarmuka ETAP, parameter buskw umumnya difungsikan agar besaran beban daya aktif (kW) yang diserap oleh suatu *node* (simpul) dapat ditentukan. Apabila atribut bilangan negatif diberikan secara langsung pada nilai buskw ini (sebagai contoh: BUSKW -500 Bus738), maka secara rumusan matematis fisis, fungsi operasional node tersebut dibalik. Melalui inversi matematis ini, node terkait tidak lagi dioperasikan sebagai penyerap beban energi, melainkan dikonversi menjadi titik sumber di mana daya aktif murni sebesar 500 kW diinjeksikan kembali ke dalam sirkuit jaringan.

Pendekatan ekuivalen beban negatif ini sangat representatif dan ideal untuk mensimulasikan sistem injeksi Hibrida PLTS-BESS yang telah disatukan. Hal ini dikarenakan dalam integrasi kelistrikan modern, *Energy Management System* (EMS) dan *inverter* dua arah dari sebuah sistem hibrida didesain untuk beroperasi memberikan

pasokan daya secara stabil dan konstan (*Firm Capacity*) layaknya sebuah injektor daya aktif yang konstan.

Setelah instruksi manuver saklar dan penetapan injeksi ekuivalen beban negatif dieksekusi oleh Python melalui jembatan API, simulasi komputasi aliran daya kemudian dijalankan oleh perangkat lunak ETAP. Selanjutnya, luaran hasil simulasi yang berada di dalam berkas pangkalan data (*database*) SQLite milik ETAP dibaca dan diekstrak secara otonom oleh pustaka Python. Secara spesifik, data komputasi yang ditarik mencakup rekapitulasi nilai kerugian daya kelistrikan yang tersimpan pada struktur tabel khusus bernama LFSumLoss, serta parameter kualitas profil tegangan yang direkam pada tabel pelaporan LFR. Seluruh luaran data fisis tersebut kemudian dievaluasi ke dalam bentuk kelayakan ekonomi melalui matriks kebugaran (*fitness function*) algoritma PSO, agar dapat dijadikan landasan pengambilan keputusan pada siklus iterasi pencarian berikutnya.

### 2.9. Analisis Tekno-Ekonomi Investasi

Sebuah rancangan rekayasa ( *engineering design* ) sistem kelistrikan tidak hanya dituntut untuk beroperasi secara andal dan efisien secara fisis, tetapi juga wajib memberikan nilai tambah secara finansial bagi utilitas. Implementasi *Active Distribution Network* (ADN) yang melibatkan pengadaan teknologi penyimpanan energi berkapasitas besar menuntut pengeluaran biaya modal awal yang sangat masif. Oleh karena itu, penurunan susut daya teknis dan pemulihan *Energy Not Supplied* (ENS) tidak lagi cukup jika hanya dilihat sebagai angka parameter kualitas tegangan; keduanya harus dikonversi menjadi besaran arus kas (*cash flow*) dalam Rupiah guna menjustifikasi kelayakan bisnis dari proyek tersebut.

Dalam kerangka optimasi algoritma kecerdasan buatan, analisis tekno-ekonomi ini diadopsi secara fundamental menjadi "fungsi kebugaran" (*fitness function*). Mesin tidak lagi mencari nilai rugi-rugi teknis (kW) terendah secara buta, melainkan mencari kombinasi kapasitas maksimal yang mampu dibeli namun tetap menghasilkan profitabilitas proyek pada akhir umur pakainya. Terdapat tiga parameter finansial utama yang menjadi landasan teori dalam kajian ini, yaitu: Biaya Pengeluaran (CAPEX/OPEX), *Net Present Value* (NPV), dan *Payback Period* (PP).

### 2.9.1. *Capital Expenditure* (CAPEX) dan Operational Expenditure (OPEX)

Dalam studi investasi fasilitas kelistrikan hibrida, struktur biaya diklasifikasikan ke dalam dua pilar utama, yakni CAPEX dan OPEX [36].

- *Capital Expenditure* (CAPEX): Merupakan biaya modal atau investasi awal yang harus dikeluarkan di muka (pada tahun ke-0) untuk mengadakan dan membangun infrastruktur fisik hingga siap beroperasi. Komponen pembentuk CAPEX sistem hibrida mencakup harga pembelian modul panel surya, sistem baterai, perangkat *inverter*, serta *Balance of System* (BoS). Secara matematis ditunjukan pada persamaan 2.13, total biaya investasi awal diformulasikan sebagai agregasi dari seluruh komponen utama penyusunnya [36]:

$$CAPEX = (C_{PV} \cdot P_{PV}) + (C_{BESS} \cdot E_{BESS}) + (C_{INV} \cdot P_{INV}) + C_{BoS} \quad (2.13)$$

Keterangan:

$C_{PV}$ = Harga satuan modul surya per kWp (Rp/kWp)

$P_{PV}$ = Kapasitas terpasang modul surya (kWp)

$C_{BESS}$ = Harga satuan baterai per kWh (Rp/kWh)

$E_{BESS}$ = Kapasitas penyimpanan baterai (kWh)

$C_{INV}$ = Harga satuan *inverter* dua arah per kW (Rp/kW)

$C_{BoS}$ = Biaya instalasi, lahan, proteksi, dll.

Dalam studi optimasi perencanaan utilitas skala makro, kompleksitas variabel di atas umumnya disederhanakan menjadi sebuah parameter Biaya Unit Komposit (*Composite Unit Cost*), sehingga total investasi dapat dihitung secara proporsional terhadap besaran daya injeksi hibrida ($P_{Hybrid}$) menggunakan perumusan persamaan 2.14 [36]:

$$CAPEX = P_{Hybrid} \cdot C_{Composite} \quad (2.14)$$

Formulasi agregasi inilah yang menjadi landasan justifikasi matematis dalam menetapkan harga ekuivalen terpusat (misalnya Rp 23.000.000,- per kW) untuk kalkulasi beban investasi di dalam skrip algoritma kecerdasan buatan.

Operational Expenditure (OPEX): Merupakan biaya operasional dan pemeliharaan rutin yang harus dikeluarkan utilitas setiap tahunnya untuk menjaga performa perangkat. Untuk sistem PV dan BESS, OPEX mencakup biaya kebersihan modul dari debu (guna menjaga iradiasi), inspeksi termal, kalibrasi sistem kontrol baterai, serta asuransi

perangkat. Besaran OPEX tahunan umumnya diasumsikan dalam bentuk persentase tetap (misalnya 2% hingga 5%) dari nilai total CAPEX investasi awal.

### 2.9.2. *Net Present Value* (NPV)

*Net Present Value* (Nilai Bersih Sekarang) adalah salah satu metode valuasi kelayakan investasi yang paling komprehensif karena mempertimbangkan prinsip nilai waktu dari uang (*time value of money*) [37]. Prinsip ini menyatakan bahwa nilai uang Rp 1 Juta yang kita pegang hari ini memiliki kekuatan daya beli (valuasi) yang lebih tinggi dibandingkan dengan Rp 1 Juta pada 10 atau 20 tahun yang akan datang akibat adanya faktor inflasi dan suku bunga.

Secara konseptual, NPV menghitung selisih antara nilai sekarang dari seluruh proyeksi arus kas masuk (*cash inflow* seperti uang yang dihemat dari penurunan susut daya dan terhindarnya utilitas dari denda ENS) dengan nilai sekarang dari arus kas keluar (*cash outflow*—seperti OPEX bulanan), lalu dikurangi dengan total modal awal (CAPEX). Secara matematis, rumusan NPV direpresentasikan melalui persamaan 2.15 [37]:

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{NCF_t}{(1+i)^t} - CAPEX \tag{2.15}$$

Keterangan:

$NCF_t$ = *Net Cash Flow* atau Arus Kas Bersih (Selisih Inflow dan OPEX) pada tahun ke-$t$.

$i$ = *Discount rate* atau tingkat suku bunga acuan / biaya modal (dalam persentase).

$n$ = Umur ekonomis (masa pakai) proyek atau perangkat baterai/PV dalam satuan tahun.

$t$ = Indeks tahun berjalan (mulai dari tahun ke-1 hingga ke-$n$).

Kriteria Keputusan Investasi:

- Jika $NPV > 0$ (Positif): Nilai proyeksi pendapatan melebihi nilai investasi awal (termasuk biaya bunganya). Skenario infrastruktur kelistrikan dinyatakan Layak (Feasible) untuk dieksekusi.
- Jika $NPV = 0$: Proyek berada pada titik impas (tidak untung namun tidak rugi).
- Jika $NPV < 0$ (Negatif): Nilai investasi awal terlalu mahal dan tidak mampu ditutup oleh penghematan energi yang dicapai. Skenario infrastruktur dinyatakan Tidak

Layak (*Unfeasible*) dan akan menimbulkan kerugian permanen (*stranded asset*) bagi kas utilitas.

### 2.9.3. *Payback Period* (PP)

*Payback Period* atau Periode Pengembalian Modal adalah metode analisis sederhana yang digunakan untuk menghitung seberapa lama waktu (dalam satuan tahun atau bulan) yang dibutuhkan agar sebuah proyek mampu mengembalikan total investasi awal (CAPEX) yang telah disuntikkan dari akumulasi arus kas bersihnya [37].

Berbeda dengan NPV yang menyoroti profitabilitas absolut di akhir umur proyek, *Payback Period* digunakan oleh manajemen utilitas untuk menakar tingkat likuiditas dan risiko. Semakin cepat waktu pengembalian modal, maka semakin rendah risiko proyek tersebut terhadap ketidakpastian kondisi operasional kelistrikan di masa depan. Persamaan dasar *Payback Period* secara sederhana dirumuskan persamaan 2.16 [37]:

$$PP = \frac{CAPEX}{NCF_{rata-rata}} \tag{2.16}$$

Di mana hasil akhir $PP$ merepresentasikan jumlah tahun. Walaupun rumusnya sederhana, *Payback Period* tidak memperhitungkan arus kas yang masuk *setelah* modal kembali, sehingga penggunaannya selalu disandingkan secara paralel dengan analisis *Net Present Value* (NPV) untuk menghasilkan keputusan manajemen perombakan topologi (*Network Reconfiguration*) yang solid dan komprehensif.