

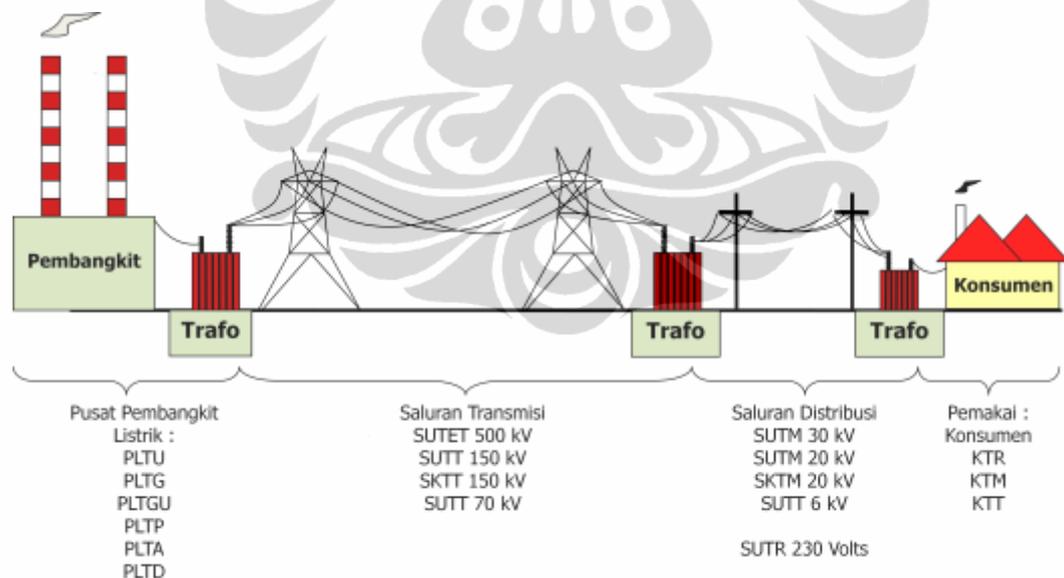
BAB II KONSEP DASAR

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Secara umum sistem tenaga listrik dapat dikatakan terdiri dari tiga bagian utama, yaitu:

- pembangkit tenaga listrik,
- penyaluran tenaga listrik dan
- distribusi tenaga listrik.

Sistem tenaga listrik modern merupakan sistem yang kompleks yang terdiri dari pusat pembangkit, saluran transmisi dan jaringan distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Untuk memenuhi tujuan operasi sistem tenaga listrik, ketiga bagian yaitu pembangkit, penyaluran dan distribusi tersebut satu dengan yang lainnya tidak dapat dipisahkan seperti terlihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram satu garis sistem tenaga listrik

Energi listrik dibangkitkan oleh pembangkit tenaga listrik, disalurkan melalui saluran transmisi dan kemudian didistribusikan ke beban. Sistem tenaga listrik sering pula hanya disebut dengan sistem tenaga, bahkan kadangkala cukup hanya dengan sistem. Penamaan suatu sistem tenaga listrik biasanya menggunakan daerah cakupan yang dilistriki, misalnya Sistem Tenaga Listrik Jawa Bali (STLJB) atau Sistem Jawa Bali (SJB) berarti sistem tenaga listrik yang mencakup Pulau Jawa, Madura dan Bali.

2.2. Tujuan Operasi Sistem Tenaga Listrik

Dalam mencapai tujuan dari operasi sistem tenaga listrik^[3] maka perlu diperhatikan tiga hal berikut ini, yaitu :

- a. Ekonomi (*economy*),
- b. Keandalan (*security*),
- c. Kualitas (*quality*).

Ekonomi (*economy*) berarti listrik harus dioperasikan secara ekonomis, tetapi dengan tetap memperhatikan keandalan dan kualitasnya.

Keandalan (*security*) merupakan tingkat keamanan sistem terhadap kemungkinan terjadinya gangguan. Sedapat mungkin gangguan di pembangkit maupun transmisi dapat diatasi tanpa mengakibatkan pemadaman di sisi konsumen.

Kualitas (*quality*) tenaga listrik yang diukur dengan kualitas tegangan dan frekuensi yang dijaga sedemikian rupa sehingga tetap pada kisaran yang ditetapkan.

Sebagai gambaran dari tujuan operasi sistem tenaga listrik dapat dilihat seperti pada gambar 2.2. dibawah ini.



Gambar 2.2 Tujuan operasi sistem tenaga listrik

Didalam pelaksanaan pengendalian operasi sistem tenaga listrik, urutan prioritas dari sasaran diatas bisa berubah-ubah tergantung pada kondisi *real time*. Pada saat terjadi gangguan, maka keamanan adalah prioritas utama sedangkan mutu dan ekonomi bukanlah hal yang utama. Demikian juga pada saat keamanan dan mutu sudah bagus, maka selanjutnya ekonomi harus diprioritaskan.

Efisiensi produksi tenaga listrik diukur dari tingkat biaya yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Hal yang paling mudah dalam optimasi biaya produksi tenaga listrik adalah dengan sistem *Merit Order*. *Merit order* ini adalah suatu metode dimana pembangkit dengan biaya yang paling murah akan diprioritaskan untuk beroperasi dibandingkan dengan yang lebih mahal, sampai beban tenaga listrik tercukupi.

2.3. Kondisi Operasi Sistem Tenaga Listrik

Kondisi-kondisi yang mungkin terjadi dalam menjalankan sistem tenaga listrik^[4] adalah sebagai berikut :

- a. Normal,
- b. Siaga,
- c. Darurat,
- d. Pemulihan.

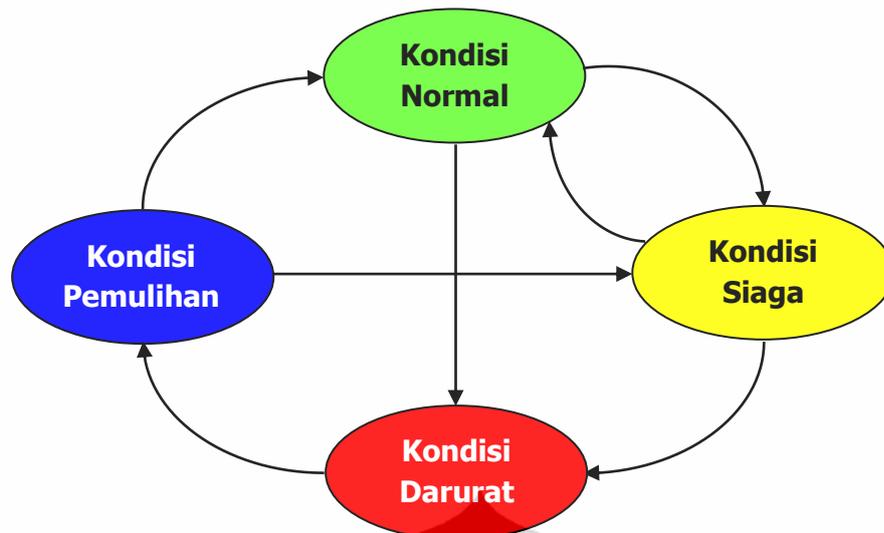
Normal adalah seluruh konsumen dapat dilayani, kendala operasi teratasi dan sekuriti sistem dapat dipenuhi.

Siaga adalah seluruh konsumen dapat dilayani, kendala operasi dapat dipenuhi, tetapi sekuriti sistem tidak dapat dipenuhi.

Darurat adalah konsumen tidak dapat dilayani, kendala operasi tidak dapat dipenuhi.

Pemulihan adalah peralihan kondisi darurat tenaga listrik yang diukur dengan kualitas tegangan dan frekuensi yang dijaga sedemikian rupa sehingga tetap pada kisaran yang ditetapkan.

Sebagai gambaran hubungan beberapa kondisi operasi sistem tenaga listrik dapat dilihat seperti pada gambar 2.3. dibawah ini.



Gambar 2.3 Kondisi operasi sistem tenaga listrik

2.4. Persoalan-Persoalan Operasi Sistem Tenaga Listrik

Dalam mengoperasikan sistem tenaga listrik ditemui berbagai persoalan^[5]. Hal ini antara lain disebabkan karena pemakaian tenaga listrik selalu berubah dari waktu ke waktu, biaya bahan bakar serta kondisi alam dan lingkungan.

Berbagai persoalan pokok yang dihadapi dalam pengoperasian sistem tenaga listrik adalah :

a. Pengaturan Frekuensi

Sistem Tenaga Listrik harus dapat memenuhi kebutuhan akan tenaga listrik dari para konsumen dari waktu ke waktu. Untuk ini daya yang dibangkitkan dalam sistem tenaga listrik harus selalu sama dengan beban sistem, hal ini diamati melalui frekuensi sistem. Kalau daya yang dibangkitkan dalam sistem lebih kecil dari pada beban sistem maka frekuensi turun dan sebaliknya apabila daya yang dibangkitkan lebih besar dari pada beban maka frekuensi naik.

b. Pemeliharaan Peralatan

Peralatan yang beroperasi dalam sistem tenaga listrik perlu dipelihara secara periodik, dan juga perlu segera diperbaiki apabila mengalami kerusakan.

c. Biaya Operasi

Biaya operasi khususnya biaya bahan bakar adalah biaya yang terbesar dari suatu perusahaan listrik, sehingga perlu dipakai teknik-teknik optimasi untuk menekan biaya ini

d. Perkembangan Sistem

Beban selalu berubah sepanjang waktu dan juga selalu berkembang seiring dengan perkembangan kegiatan masyarakat yang tidak dapat dirumuskan secara eksak, sehingga perlu diamati secara terus menerus agar dapat diketahui langkah pengembangan sistem yang harus dilakukan agar sistem selalu dapat mengikuti perkembangan beban sehingga tidak akan terjadi pemadaman tenaga listrik dalam sistem.

e. Gangguan dalam Sistem

Gangguan dalam sistem tenaga listrik adalah sesuatu yang tidak dapat sepenuhnya dihindarkan. Penyebab gangguan yang paling besar adalah petir, hal ini sesuai dengan isoceraunic level yang tinggi di tanah air kita.

f. Tegangan dalam Sistem

Tegangan merupakan salah satu unsur kualitas penyediaan tenaga listrik dalam sistem, oleh karenanya perlu diperhatikan dalam pengoperasian sistem.

2.5. Manajemen Operasi Sistem Tenaga Listrik

Operasi sistem tenaga listrik menyangkut berbagai aspek yang luas, khususnya biaya yang tidak sedikit dalam penyediaan tenaga listrik bagi masyarakat luas dan mempengaruhi hajat hidup orang banyak. Oleh karena itu operasi sistem tenaga listrik memerlukan manajemen yang baik.

Dari uraian 2.4 di atas, maka untuk dapat mengoperasikan sistem tenaga listrik dengan baik perlu ada beberapa hal sebagai berikut^[5] :

a. Perencanaan Operasi

Yaitu pemikiran mengenai bagaimana sistem tenaga listrik akan dioperasikan untuk jangka waktu tertentu. Pemikiran ini mencakup perkiraan beban, koordinasi pemeliharaan peralatan, optimasi, keandalan serta mutu tenaga listrik.

b. Pelaksanaan dan Pengendalian Operasi

Yaitu pelaksanaan dari Rencana Operasi serta pengendaliannya apabila terjadi hal-hal yang menyimpang dari Rencana Operasi.

c. Analisa Operasi

Yaitu analisa atas hasil-hasil operasi untuk memberikan umpan balik bagi Perencanaan Operasi maupun bagi Pelaksanaan dan Pengendalian Operasi. Analisa Operasi juga diperlukan untuk memberikan saran-saran bagi pengembangan sistem serta penyempurnaan pemeliharaan instalasi.

2.6. Pembangkit Tenaga Listrik

Pembangkit listrik memasok tenaga listrik ke sistem tenaga listrik yang terdiri dari generator dan penggerak mula, adapun penggerak mula berupa mesin pemutar poros generator yang merubah suatu bentuk energi menjadi energi mekanik.

Jenis penggerak mula bermacam-macam, sesuai dengan sumber tenaga yang menghasilkan gerak tersebut antara lain :

1. Mesin diesel,
2. Turbin gas,
3. Turbin uap,
4. Turbin air,
5. Kincir Angin, dll.

Tenaga listrik diperoleh dari generator arus bolak-balik dengan frekuensi tertentu. Generator-generator di sistem tenaga listrik di Indonesia menggunakan frekuensi 50 Hertz (Hz), dengan kapasitas yang beragam dari beberapa ratus kiloWatt (kW) sampai ratus MegaWatt (MW).

Pembangkit-pembangkit dalam suatu sistem tenaga listrik dibagi dalam 2 kelompok besar, yaitu kelompok pembangkit listrik termal dan kelompok pembangkit listrik tenaga air atau hidro. Pembangkit listrik termal dapat berupa Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pusat Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU), dan sebagainya.

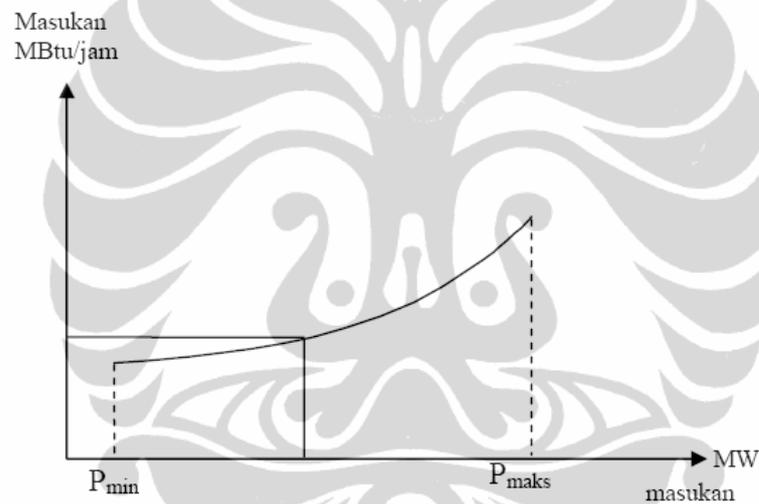
2.6.1 Kurva Masukan Keluaran

Karakteristik suatu pembangkit ditunjukkan oleh kurva masukan keluarannya. Kurva masukan keluaran menggambarkan besarnya masukan yang harus diberikan kepada pembangkit listrik sebagai fungsi dari keluarannya. Kurva

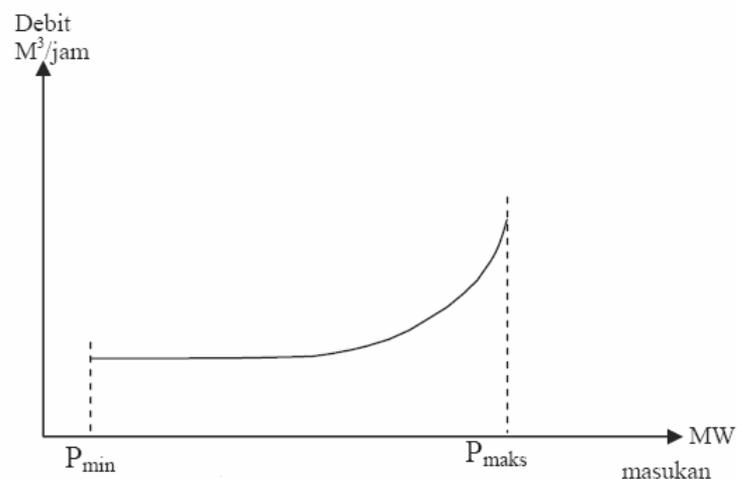
ini didapat melalui test pembebanan terhadap unit dari minimum sampai beban maksimum.

Pada pembangkit listrik termal, masukannya adalah bahan bakar yang dinyatakan dalam satuan energi per jam dengan keluaran daya yang dibangkitkan (MW). Sedangkan untuk pembangkit hidro atau tenaga air, masukannya adalah jumlah air yang masuk dinyatakan dalam m^3 /jam dan keluarannya adalah daya yang dibangkitkan dalam MW.

Kurva masukan keluaran tidak melalui titik nol karena adanya biaya putar pembangkit pada beban nol. Kurva^[6] masukan dan keluaran pembangkit listrik termal dan hidro dapat dilihat seperti gambar 2.4 dan 2.5 dibawah ini :



Gambar 2.4. Kurva masukan keluaran pembangkit listrik termal



Gambar 2.5. Kurva masukan keluaran pembangkit listrik hidro

2.6.2 Frekuensi Pembangkit Listrik

Frekuensi sistem tenaga listrik (selanjutnya disebut frekuensi) merupakan salah satu besaran yang digunakan untuk menyatakan mutu tenaga listrik. Frekuensi berlaku sama di setiap bagian sistem, artinya pada suatu saat yang bersamaan besarnya relatif sama meskipun diukur pada tempat berbeda di dalam sistem.

Frekuensi adalah jumlah gelombang sinusoida dari tegangan atau arus listrik dalam rentang waktu satu detik. Satuan yang digunakan menyatakan ukuran frekuensi adalah Hertz (Hz). Satu Hertz berarti satu siklus per detik (*cycle/second*)

Didalam pembangkitan tenaga listrik, frekuensi menunjukkan jumlah putaran elektrik mesin pembangkit. Satu putaran elektrik dapat diwakilkan oleh satu gelombang sinusoida. Sistem tenaga yang di kelola PLN menggunakan frekuensi 50 Hz yang setara dengan 50 putaran elektrik per detik atau 3000 putaran per menit.

Frekuensi juga dapat dipakai sebagai ukuran kesetimbangan sesaat antara daya nyata (MW) yang di konsumsi oleh konsumen (selanjutnya disebut beban) dengan daya nyata pasokan dari pembangkit tenaga listrik. Pada keadaan keduanya setimbang, frekuensi 50 Hz, bila frekuensi kurang dari 50 Hz berarti pasokan daya nyata dari pembangkit kurang. Sebaliknya jika pasokan daya nyata dari pembangkit berlebih, menyebabkan frekuensi lebih dari 50 Hz.

Nilai frekuensi sistem tenaga selalu berubah-ubah, karena dari waktu ke waktu daya nyata yang dikonsumsi oleh konsumen (beban) bersifat acak, sedangkan alat pengatur kecepatan (*speed governer*) pada tiap mesin pembangkit masing-masing bekerja sendiri. Hampir tidak ada kemungkinan pasokan daya nyata unit pembangkit terus menerus tepat sama dengan beban sistem.

Frekuensi sistem yang memenuhi standar dan telah ditentukan dalam Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa – Madura – Bali^[7] (OC1.1) adalah sebesar $50 \pm 0,2$ Hz,

2.6.3 Peran Pembangkit Dalam Operasi Sistem

Berdasarkan peran untuk memenuhi pasokan bagi sistem tenaga listrik, unit pembangkit biasanya dapat dikategorikan sebagai salah satu dari tiga jenis pembangkit, yaitu :

1. Pembangkit pemikul beban dasar (base load power plant),
2. Pembangkit pemikul beban menengah (mid range power plant),
3. Pembangkit pemikul beban puncak (peaking unit).

Pembangkit pemikul beban dasar (base load) adalah pembangkit dengan 5000 jam operasi rata-rata pertahun (capacity factor > 57%). Pembangkit dalam kategori ini memiliki daya keluaran besar, biaya kapital tinggi dan biaya operasi rendah. Pembangkit tenaga uap berbahan bakar batubara dan pembangkit tenaga panas bumi biasanya digunakan sebagai pemikul beban dasar.

Pembangkit pemikul beban menengah (mid range) adalah pembangkit dengan jam operasi lebih besar dari 2000 jam pertahun dan lebih kecil dari 5000 jam operasi rata-rata pertahun (23% > capacity factor > 57%). Pembangkit combined cycle, pembangkit berbahan bakar gas dan pembangkit tua yang kurang efisien digunakan sebagai pemikul beban menengah.

Pembangkit pemikul beban puncak (peakers) dioperasikan untuk memenuhi beban pada waktu beban maksimum (beban puncak). Periode beban puncak tidak selalu sama. Pembangkit ini beroperasi kurang dari 2000 jam rata-rata pertahun dan (capacity factor < 23%), sehingga Pembangkit yang dipilih biasanya yang berbiaya kapital rendah dan biaya operasi tinggi. Pembangkit tenaga berbahan bakar minyak, air, pump storage dan mesin diesel digunakan sebagai pemikul beban puncak.

2.6.4 Biaya Pembangkit

Biaya pokok produksi pembangkitan tenaga listrik^[4] atau biaya operasi terdiri dari dua jenis, yaitu :

1. Biaya tetap (fixed cost)
2. Biaya variabel (variable cost)

Biaya tetap adalah biaya yang selalu ada walaupun unit pembangkit tidak dalam kondisi beroperasi (tidak ada produksi kWh). Biaya ini terdiri dari: biaya pegawai, biaya administrasi, biaya bunga, biaya modal, dan perubahan nilai tukar mata uang asing terhadap rupiah yang disebut komponen A, serta biaya tetap operasi dan pemeliharaan yang disebut komponen B.

Biaya variabel adalah biaya yang muncul ketika unit pembangkit beroperasi, yaitu biaya bahan bakar dan biaya pemeliharaan. Besarnya biaya

variabel ini tergantung kepada banyaknya produksi kWh. Biaya variabel ini dapat dinyatakan dalam satuan Rp./kWh. Istilah lain untuk biaya variabel ini adalah biaya energi atau harga energi. Biaya variabel bahan bakar adalah biaya untuk pembelian bahan bakar atau disebut komponen C. Sedangkan biaya variabel pemeliharaan disebut komponen D.

Besarnya energi tiap satuan waktu yang digunakan untuk membangkitkan daya listrik disebut heat rate (H). Persamaan heat rate^[6] adalah :

$$H = a + bP + cP^2 \quad (2.1)$$

dimana : H = heat rate (Mbtu/jam)
 P = daya keluaran (MW)
 a, b & c = konstanta

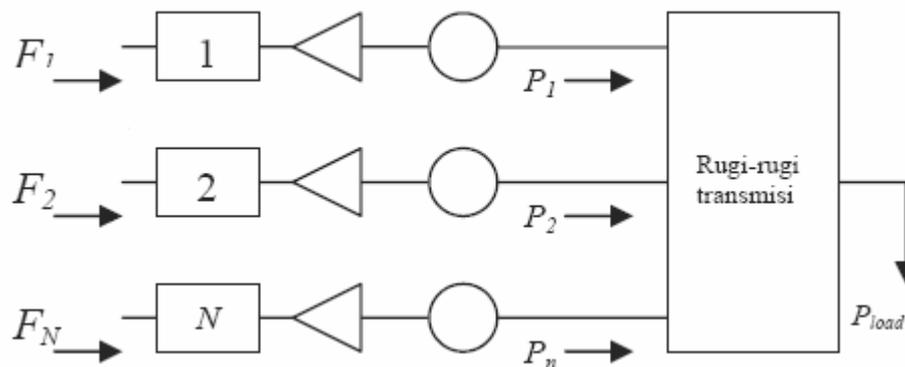
Jika persamaan dikalikan dengan biaya bahan bakar (C), maka akan didapat biaya per satuan waktu F(P).

$$\begin{aligned} F(P) &= H(P) \times C \\ &= C(a + bP + cP^2) \end{aligned} \quad (2.2)$$

dimana : F(P) = biaya produksi per jam
 C = harga bahan bakar (R/MBtu)

2.6.5 Pengiriman Ekonomis

Sebuah sistem tenaga listrik^[6] yang terdiri dari beberapa unit pembangkit yang terhubung pada rel tunggal untuk melayani beban P_{load} seperti pada gambar 2.6. P_i merupakan daya keluaran unit ke i dengan biaya (cost rate) F_i , total biaya sistem adalah jumlah dari biaya masing masing unit. Kendala yang mendasar dari pengoperasian sistem tenaga listrik adalah bahwa total keluaran dari pembangkit harus sama dengan kebutuhan beban.



Gambar 2.6 N buah unit termal yang melayani beban P_{load}

Secara matematis dapat dikatakan permasalahannya sangat mendasar bahwa fungsi obyektif dari F_T sama dengan biaya total untuk mensuplai beban. Permasalahannya adalah bagaimana meminimalkan F_T , terhadap kendala bahwa jumlah daya yang dibangkitkan harus sama dengan yang dibutuhkan beban. Apabila rugi rugi transmisi diabaikan dan pembebanan tidak keluar dari batas batas operasi normal, maka :

$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_N \quad (2.3)$$

$$= \sum_{i=1}^N F_i(P_i)$$

$$\phi = 0 = P_{load} + P_{loss} - \sum_{i=1}^N P_i \quad (2.4)$$

Permasalahan kendala operasi dapat diselesaikan dengan benar menggunakan fungsi Lagrange.

$$\mathcal{L} = F_T + \lambda \phi \quad (2.5)$$

Dihasilkan dari turunan pertama dari fungsi Lagrange terhadap setiap variabel dan menetapkan turunan tersebut sama dengan nol, dalam hal ini terdapat $N + 1$ variabel yaitu variabel keluaran P_i ditambah pengali Lagrange yang belum diketahui λ . Turunan fungsi Lagrange terhadap λ hanya akan memberikan persamaan kendala lagi. Disisi lain N persamaan yang dihasilkan dari turunan parsial fungsi Lagrange terhadap daya akan menghasilkan :

$$\mathcal{L} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \lambda \left(1 - \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} \right) = 0 \quad (2.6)$$

atau

$$\frac{dF_i(P_i)}{dP_i} + \lambda \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = \lambda \quad (2.7)$$

Pengiriman ekonomis tercapai pada nilai lambda (λ) yang sama.

2.7 Penyaluran Tenaga Listrik

Pembangkit listrik kebanyakan dibangun tidak berdekatan dengan pusat beban karena alasan keterbatasan lahan, dampak terhadap lingkungan ataupun karena ketersediaan energi primernya. Kondisi tersebut mengharuskan adanya saluran transmisi untuk menyalurkan energi listrik ke pusat-pusat beban. Sistem tenaga listrik yang besar bisa terdiri dari ratusan atau bahkan ribuan bus.

2.7.1 Saluran Transmisi

Saluran transmisi memegang peranan yang penting dalam pengiriman daya yang aman dan optimal. Keterbatasan kemampuan pada saluran transmisi^[5] akan dapat mengakibatkan :

1. Ketidak sanggupannya mengakses sumber energi terbarukan,
2. Ketidak sanggupannya untuk mendapatkan sumber energi yang bervariasi,
3. Harga listrik mahal,
4. Memerlukan cadangan yang besar,
5. Sejumlah pembangkit menjadi unit harus operasi (*must run*).

2.7.2 Studi Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan bagian yang sangat penting dalam perencanaan sistem tenaga listrik. Beberapa metode^[4] telah dikembangkan dalam studi aliran daya ini yaitu metode *Gauss Seidel*, metode *Newton Raphson* dan metode *Fast Decouple*.

Tujuan utama dari studi aliran daya adalah :

1. Untuk mengetahui daya aktif dan reaktif tiap pembangkit.
2. Untuk mengetahui besar tegangan dan sudut phase pada setiap bus.

3. Untuk mengetahui daya aktif dan daya reaktif yang mengalir pada setiap komponen tenaga listrik (penghantar dan transformator).

Oleh karena itu dalam studi aliran daya diperlukan suatu proses perhitungan yang sistematis melalui model jaringan dan persamaan aliran daya. Berdasarkan hukum Kirchoff untuk arus, maka besar arus yang masuk dan keluar dari suatu titik simpul sama dengan nol.

$$I_i = \sum Y_{ij} \cdot V_j \quad (2.8)$$

dalam bentuk matriks :

$$[I_i] = [Y_{ij}] \cdot [V_j] \quad (2.9)$$

elemen dari Y_{ij} adalah :

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| (\cos \theta_{ij} + j \sin \theta_{ij}) \quad (2.10)$$

tegangan pada bus i dalam bentuk polar :

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (2.11)$$

dan tegangan pada bus j adalah :

$$V_j = |V_j| \angle \delta_j = |V_j| (\cos \delta_j + j \sin \delta_j) \quad (2.12)$$

daya aktif dan reaktif pada bus i adalah:

$$P_i + jQ_i = V_i \cdot I_i^* \quad (2.13)$$

atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.14)$$

dengan mensubstitusikan persamaan 2.14 ke persamaan 2.8

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j ; i = 1, 2, \dots, n \quad (2.15)$$

Dari persamaan diatas terlihat bahwa persamaan aliran daya bersifat tidak linier dan penyelesaiannya adalah dengan metode iteratif. Metode Newton Raphson digunakan untuk penyelesaian daya karena lebih cepat mencapai konvergen tanpa mengabaikan nilai resistansi dari jaringan.

2.7.3 Metode Newton Raphson.

Metode Newton Raphson digunakan untuk menyelesaikan persamaan aliran daya pada persamaan (2.15), untuk menyelesaikan fungsi $f(x) = K$. Didalam metode Newton, x awal disebut dengan x^0 . Kesalahan (error) adalah selisih nilai antara K dengan $f(x^0)$, yang disebut ε , sehingga :

$$f(x^0) + \varepsilon = K \quad (2.16)$$

agar nilai kesalahan ε mendekati nol digunakan metode ekspansi Taylor.

$$f(x^0) + \frac{df(x^0)}{dx} \Delta x + \varepsilon = K \quad (2.17)$$

agar ε menjadi nol,

$$\Delta x = \left(\frac{df(x^0)}{dx} \right) \left(\frac{df(x^0)}{dx} \right)^{-1} [K - f(X^0)] \quad (2.18)$$

Persamaan aliran daya yang merupakan fungsi tidak linier diselesaikan dengan metode Newton Raphson. Bila persamaan hukum arus Kirchoff untuk persamaan (2.8) dituliskan dalam bentuk polar, maka :

$$I_i = \sum |Y_{ij} V_j| \angle (\theta_{ij} + \delta_j) \quad (2.19)$$

daya kompleks pada bus i adalah:

$$P_i - j Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |Y_{ij} V_j| \angle (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.20)$$

daya aktif pada bus i ;

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |Y_{ij} V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.21)$$

daya reaktif pada bus $i =$

$$Q_i = -|V_i| \left| \sum_{n=1}^N Y_{ij} V_j \right| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.22)$$

Persamaan tidak linier diatas dapat diselesaikan dengan menggunakan matriks Jacobian. Matriks Jacobian adalah turunan partial dari persamaan (2.18) dan (2.19) terhadap sudut $\delta^{(k)}$ dan tegangan $|V^k|$ dalam bentuk sederhana dapat ditulis :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{(i)} \\ \Delta Q_{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1_{(i)} & J21_{(i)} \\ J31_{(i)} & J4_{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_{(i)} \\ \Delta V_{(i)} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

dimana :

elemen dari matriks Jacobian untuk $n \neq k$

$$J1_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = V_i Y_{ij} V_j \sin(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j) \quad (2.24)$$

$$J2_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j)$$

$$J3_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -V_i Y_{ij} V_j \cos(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j)$$

$$J4_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j)$$

untuk $n=k$

$$J1_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -V_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N Y_{ij} V_j \sin(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j) \quad (2.25)$$

$$J2_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i Y_{ii} \cos \theta_{ij} + \sum_{n=1}^N Y_{ij} V_n \cos(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j)$$

$$J3_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = V_k \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N Y_{ij} V_n \cos(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j)$$

$$J4_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -V_i Y_{ii} \sin \theta_{ii} + \sum_{n=1}^N Y_{ij} V_n \sin(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j)$$

Perhitungan akan konvergen bila nilai ΔP dan ΔQ lebih kecil dari error yang ditetapkan.

2.8 Prakiraan Beban

Salah satu faktor^[5] yang menentukan dalam membuat rencana operasi Sistem Tenaga Listrik adalah prakiraan beban yang akan dialami oleh sistem tenaga listrik dimasa yang akan datang. Tidak ada rumus pasti dalam prakiraan beban karena besarnya ditentukan oleh para pemakai (konsumen) tenaga listrik secara bebas. Namun karena pada umumnya kebutuhan tenaga listrik seorang konsumen sifatnya periodik maka grafik pemakaian tenaga listrik atau lazim disebut grafik beban dari sistem tenaga listrik juga mempunyai sifat periodik.

Grafik beban secara perlahan-lahan berubah bentuknya baik kuantitatifnya maupun kualitatif, perubahan ini antara lain disebabkan oleh :

1. Bertambahnya jumlah konsumen tenaga listrik,
2. Bertambahnya konsumsi tenaga listrik dari konsumen lama,
3. Cuaca,
4. Kegiatan ekonomi dalam masyarakat,
5. Kegiatan sosial dalam masyarakat.

Beban dapat diperkirakan berdasarkan pengalaman-pengalaman dan pengamatan-pengamatan dimasa lalu kemudian diadakan perkiraan untuk masa yang akan datang. Beberapa metode dapat digunakan untuk memperkirakan beban.

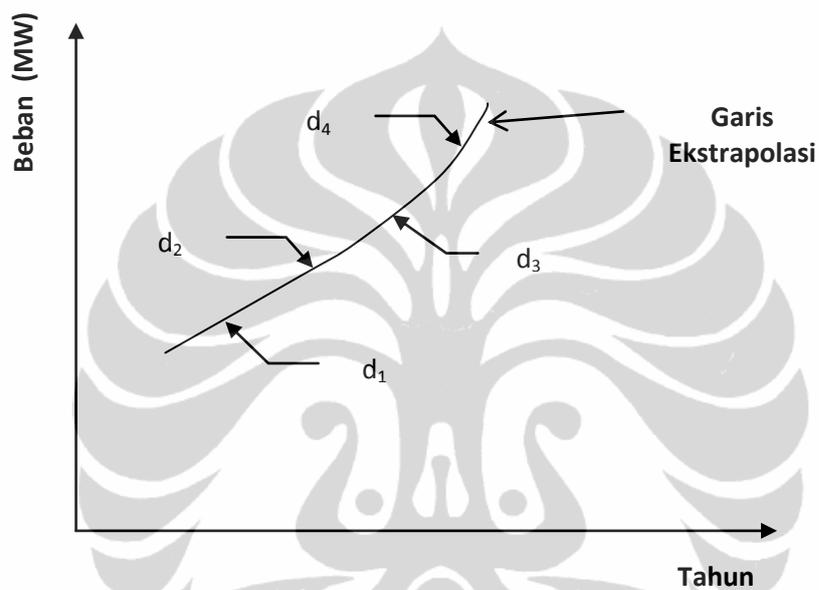
Prakiraan beban^[8] dapat dibagi dalam beberapa periode waktu berdasarkan kebutuhannya, seperti terlihat pada tabel 2.1. dibawah ini.

Tabel 2.1. Prakiraan beban berdasarkan pembagian waktu

Periode	Waktu	Aplikasi
Sangat singkat	detik dan menit	Pembangkitan, distribusi, analisa kontingensi
Singkat	jam	Cadangan putar, rencana pembangkit dan unit komitmen, rencana pemeliharaan
Medium	harian dan mingguan	Rencana pembangkitan
Jangka panjang	bulanan dan tahunan	Rencana pembangkitan

2.8.1 Metode Least Square

Beban dimasa-masa yang silam dicatat dan kemudian ditarik garis ekstrapolasi sedemikian sehingga $d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots$ adalah minimum. Metode ini dapat dipakai untuk memperkirakan beban puncak yang akan terjadi di Sistem Tenaga Listrik untuk beberapa tahun yang akan datang, seperti terlihat pada gambar 2.7. dibawah ini.

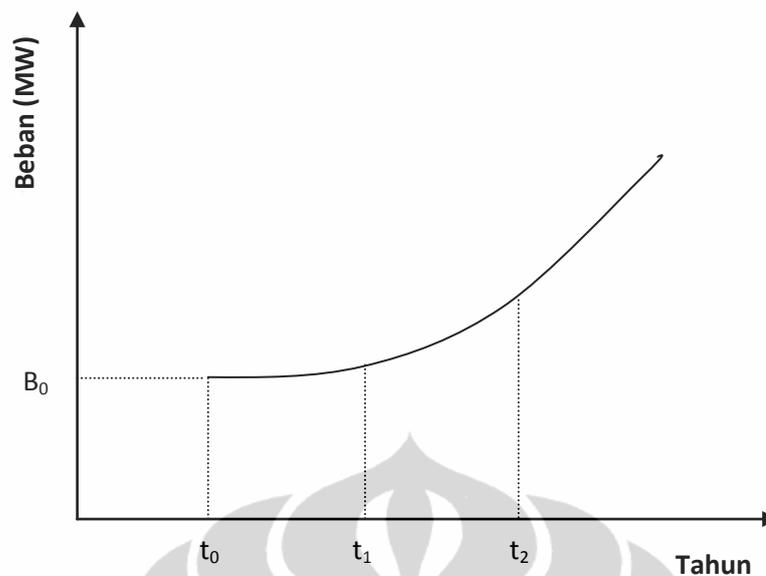


Gambar 2.7 Prakiraan beban dengan metode Least Square

Agar hasil ekstrapolasi untuk masa yang akan datang dapat memberikan hasil yang lebih teliti, perkembangan beban yang terjadi di masa lampau perlu dianalisa sebab-sebabnya dan dipakai sebagai bahan pertimbangan dalam membuat ekstrapolasi ke tahun-tahun yang akan datang.

2.8.2 Metode Eksponensial

Metode ini dapat dipakai apabila sistem tenaga listrik yang dibahas masih jauh dari kejenuhan dan ada suatu target kenaikan penjualan yang digariskan, seperti terlihat pada gambar 2.8. Hal ini terjadi di tempat-tempat yang baru mengalami elektrifikasi.



Gambar 2.8 Prakiraan beban dengan metode Eksponensial

Persamaan matematika untuk beban puncak adalah :

$$B_t = (B_0 + P)^t \quad (2.26)$$

dimana : B_0 = Beban puncak pada saat sekarang
 p = Persentase kenaikan beban per-tahun yang ditargetkan
 t = Jumlah tahun yang akan datang

2.8.3 Metode Curve Fit

Metode ini dapat dipakai apabila sudah terlihat adanya kejenuhan pada sistem tenaga listrik yang dibahas. Kejenuhan bisa terjadi misalnya karena semua orang telah memakai tenaga listrik dan tidak ada pengembangan industri, seperti terlihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Prakiraan beban dengan metode Curve Fit

Persamaan matematika untuk beban puncak adalah :

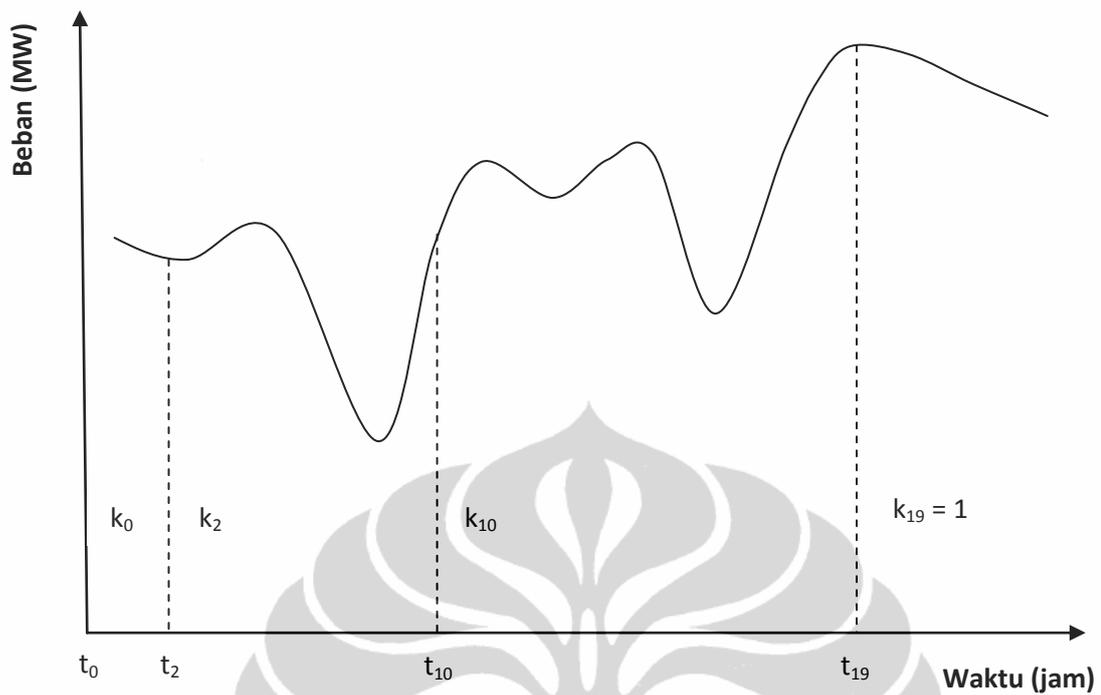
$$B_t = B_0 \cdot \Sigma^{-at} \quad (2.27)$$

dimana : B_0 = Beban puncak pada saat sekarang
 p = Konstanta yang dicari secara coba-coba
 t = Jumlah tahun yang akan datang

2.8.4 Metode Koefisien Beban

Metode ini dipakai untuk memperkirakan beban harian dari suatu sistem tenaga listrik. Beban untuk setiap jam diberi koefisien yang menggambarkan besarnya beban pada jam tersebut dalam perbandingannya terhadap beban puncak. Dengan melihat gambar 2.10, misal $k_2 = 0,6$ ini berarti bahwa beban pada jam 02.00 adalah sebesar 0,6 kali beban puncak yang terjadi pada jam 19.00 ($K_{19} = 1$).

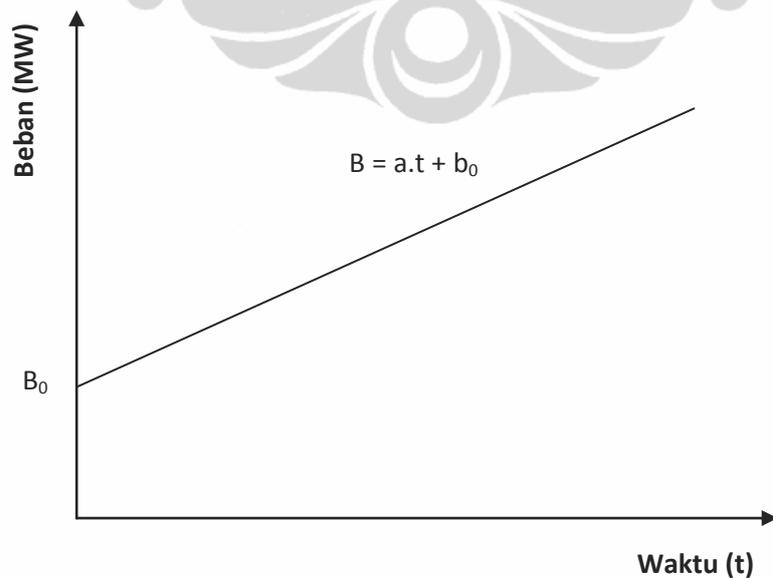
Metode ini dapat digunakan untuk perkiraan beban selama satu tahun, namun masih perlu koreksi berdasarkan informasi-informasi kegiatan masyarakat baik itu kegiatan negara maupun hari-hari penting lainnya.



Gambar 2.10 Prakiraan beban dengan metode Koefisien Beban

2.8.5 Metode Pendekatan Linier

Metode ini hanya dipakai untuk memperkirakan beban beberapa puluh menit kedepan dan biasanya konstanta a juga tergantung ramalan cuaca. Gambar kurva metode Pendekatan Linier dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Prakiraan beban dengan metode Pendekatan Linier

Persamaan matematika untuk metode Pendekatan Linier adalah :

$$B_t = a \cdot t + b_0 \quad (2.28)$$

dimana : B_t = Beban puncak pada saat waktu t

a = Suatu konstanta yang harus ditentukan

t = Jumlah tahun yang akan datang

b_0 = beban pada saat $t = t_0$

konstanta a sesungguhnya tergantung pada waktu t dan besarnya b_0 .

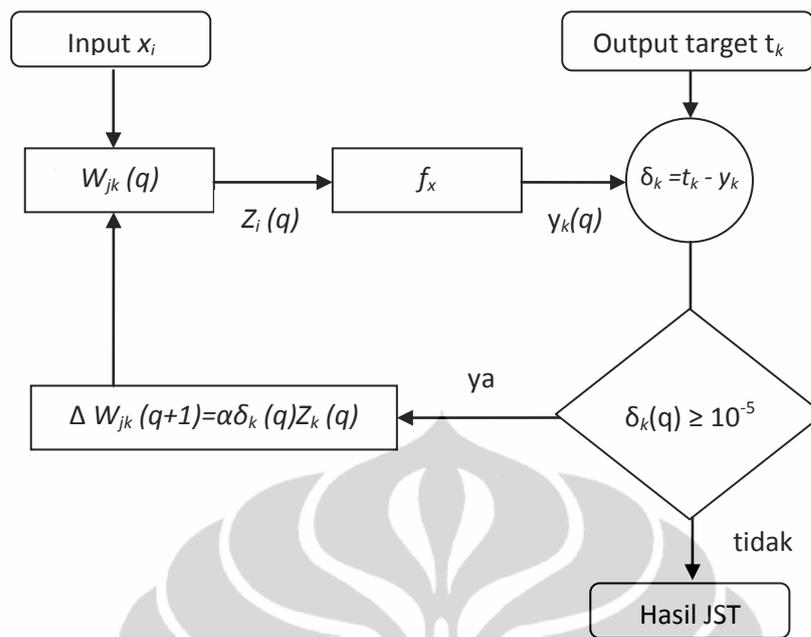
2.8.6 Metode Markov

Metode ini dipakai untuk memperkirakan beban puncak sistem tenaga listrik dalam jangka panjang (tahunan) dengan memperhitungkan kegiatan-kegiatan ekonomi dalam suatu negara secara makro.

2.8.7 Metode Jaringan Syaraf Tiruan

Jaringan Syaraf Tiruan (JST)^[9] atau Artificial Neural Network (ANN) merupakan bagian dari sistem kecerdasan buatan (Artificial Intelligence, AI) yang merupakan salah satu representasi buatan dari otak manusia yang selalu mencoba untuk mensimulasikan proses pembelajaran pada otak manusia. Istilah tiruan atau buatan dimaksudkan karena jaringan syaraf ini diimplementasikan dengan menggunakan program komputer yang mampu menyelesaikan sejumlah proses perhitungan selama proses pembelajaran. JST dimaksudkan untuk membuat model sistem komputasi yang dapat menirukan cara kerja jaringan syaraf biologis.

Model JST yang digunakan dalam penelitian untuk peramalan beban jangka panjang biasanya menggunakan Propagasi Balik (Back Propagation, BP), dimana JST mampu untuk “belajar” dari contoh yang diberikan. Algoritma pembelajaran yang digunakan adalah algoritma propagasi balik, yaitu algoritma yang menggunakan sinyal referensi dari luar (sebagai pengajar) dibandingkan dengan sinyal keluaran JST, hasilnya berupa sinyal kesalahan (error). dasar algoritma ini adalah memodifikasi bobot interkoneksi antar komponen pada jaringan sehingga sinyal kesalahan mendekati nol. Blok diagram JST propagasi balik dapat dilihat pada Gambar 2.12. dibawah ini.



Gambar 2.12 Blok Diagram Ilustrasi Algoritma Pembelajaran Propagasi Balik

Keterangan gambar :

- x_i : sinyal masukan pembelajaran,
- w_{jk} : bobot koneksi antara sel j ke sel k,
- z_j : sinyal keluaran unit tersembunyi,
- f_k : fungsi aktivasi,
- y_k : sinyal keluaran pembelajaran,
- t_k : sinyal keluaran target (referensi),
- δ_k : sinyal kesalahan (*error*),
- α : konstanta laju pembelajaran,
- q : iterasi ke- q .

Langkah – Langkah Pelatihan Propagasi Balik :

Feed Forward

- a. Tiap-tiap unit masukan (X_i , $i=1,2,3,\dots,n$) menerima sinyal masukan X_i dan meneruskan sinyal tersebut ke semua unit pada lapisan yang ada di atasnya (lapisan tersembunyi).
- b. Tiap-tiap unit tersembunyi (Z_j , $j=1,2,3,\dots,p$) menjumlahkan sinyal-sinyal masukan terbobot :

$$z_{in_j} = v_{0j} + \sum_{i=1}^n x_i v_{ij} \quad (2.29)$$

Gunakan fungsi aktivasi untuk menghitung sinyal keluarannya:

$$z_j = f(z_in_j) \quad (2.30)$$

dan kirimkan sinyal tersebut ke semua unit di lapisan atasnya (unit-unit output).

- c. Tiap-tiap unit keluaran (Y_k , $k=1,2,3,\dots,m$) menjumlahkan sinyal-sinyal masukan terbobot :

$$y_in_k = w_{0k} + \sum_{i=1}^p z_j w_{jk} \quad (2.31)$$

gunakan fungsi aktivasi untuk menghitung sinyal keluarannya :

$$y_k = f(y_in_k) \quad (2.32)$$

dan kirimkan sinyal tersebut ke semua unit di lapisan atasnya (unit-unit output).

Propagasi Balik

- d. Tiap-tiap unit keluaran (Y_k , $k=1,2,3,\dots,m$) menerima target referensi (berupa data target), untuk dihitung informasi *error*nya :

$$\delta_k = (t_k - y_k) f'(y_in_k) \quad (2.33)$$

kemudian hitung koreksi bobot (yang nantinya akan digunakan untuk memperbaiki nilai w_{jk}) :

$$\Delta w_{jk} = \alpha \delta_k z_j \quad (2.34)$$

hitung juga koreksi bias (yang nantinya akan digunakan untuk memperbaiki nilai w_{0k}) :

$$\Delta w_{0k} = \alpha \delta_k \quad (2.35)$$

kirimkan δ_k ini ke unit-unit yang ada di lapisan bawahnya.

- e. Tiap-tiap unit tersembunyi (Z_j , $j=1,2,3,\dots,p$) menjumlahkan delta masukannya (dari unit-unit yang berada pada lapisan atasnya) :

$$\delta_{in_j} = \sum_{k=1}^m \delta_k w_{jk} \quad (2.36)$$

fungsi aktivasinya untuk menghitung informasi error :

$$\delta_j = \delta_{in_j} f'(z_{in_j}) \quad (2.37)$$

kemudian hitung koreksi bobot (yang nantinya akan digunakan untuk memperbaiki nilai v_{ij}) :

$$\Delta v_{ij} = \alpha \delta_j \cdot x_i \quad (2.38)$$

hitung juga koreksi bias (yang nantinya akan digunakan untuk memperbaiki nilai v_{oj}) :

$$\Delta v_{oj} = \alpha \delta_j \quad (2.39)$$

f. Tiap-tiap unit keluaran ($Y_k, k=1,2,3,\dots,m$) memperbaiki bias dan bobotnya ($j=1,2,3,\dots,p$) :

$$w_{jk} (\text{baru}) = w_{jk} (\text{lama}) + \Delta w_{jk} \quad (2.40)$$

Tiap-tiap unit tersembunyi ($Z_j, j=1,2,3,\dots,p$) memperbaiki bias dan bobotnya ($i=0,1,2,3,\dots,n$) :

$$v_{ij} (\text{baru}) = v_{ij} (\text{lama}) + \Delta v_{ij} \quad (2.41)$$

g. Tes kondisi berhenti.