

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian yang telah dilakukan mengenai pemanfaatan *feedforward neural network* dengan algoritma *backpropagation* dalam melakukan peramalan harga emas. Didapatkan hasil penelitian bahwa terdapat beberapa tahap dalam pembentukan *feedforward neural network* dengan algoritma *Backpropagation* pada data *time series*, yaitu (1) menentukan input, (2) melakukan pembagian data, (3), normalisasi data, (4) membuat arsitektur jaringan, (5) denormalisasi, dan (6) uji kesesuaian model. (Kusumadewi, 2014).

Penelitian yang telah dilakukan mengenai peramalan kebutuhan energi listrik jangka panjang di Indonesia sampai tahun 2022. Dalam perkiraan kebutuhan energi listrik jangka panjang mengacu pada data statistik masa lalu, yaitu data tahun 2004 sampai 2012. Perhitungan peramalan menggunakan logika *fuzzy* menunjukkan bahwa kebutuhan energi listrik di Indonesia pada tahun 2022 sebesar 215.203 GWh dengan nilai kesalahan (*error*) yaitu 8,2413%. Sedangkan nilai peramalan kebutuhan energi listrik yang dilakukan oleh jaringan syaraf tiruan *backpropagation* pada tahun 2022 adalah sebesar 242.120 GWh dengan *error* sebesar 2,8027%. (Nurkholiq, Sukmadi & Nugroho, 2014).

Penelitian yang telah dilakukan mengenai peramalan beban listrik jangka panjang di Provinsi D.I. Yogyakarta menggunakan *neural network backpropagation*. Didapatkan bahwa peramalan beban listrik Provinsi D.I. Yogyakarta menghasilkan rata-rata kelajuan data sebesar 8,1007% setiap tahunnya. Komparasi hasil peramalan beban listrik menggunakan *neural network backpropagation* dengan hasil peramalan beban listrik RUPTL PT. PLN 2015-2024 menghasilkan rata-rata persentase perbedaan data sebesar 9,882%. (Pratama & Anifah, 2016).

Dalam suatu penelitian memprediksi beban listrik Pulau Bali menggunakan metode jaringan syaraf tiruan *backpropagation*. Diperoleh bahwa metode *backpropagation*

ini menggunakan beberapa layer tersembunyi dan target yang kemudian diperbandingkan dengan output serta menggunakan fungsi aktivasi model sigmoid biner dengan range antara 0 – 1. Dari hasil analisa dengan MATLAB, metode backpropagasi menghasilkan prediksi beban listrik Pulau Bali sampai tahun 2035 mencapai 25431 GWh. (Fitriyah & Istardi, 2011).

Dalam suatu penelitian yang berjudul *Energy Forecasting using Artificial Neural Networks*, dihasilkan bahwa data input dan output aktual yang tercatat berpengaruh signifikan terhadap konsumsi energi yang digunakan dalam pelatihan, proses validasi dan pengujian. Prediksi telah dilakukan selama tahun 2005-2008, 2010, 2012 dan 2015 dengan hasil yang dihasilkan mendekati kenyataan yang sebenarnya, jauh lebih akurat daripada yang diperoleh dengan model regresi linier. Pendekatan yang diusulkan dapat berguna dalam penerapan kebijakan energi yang efektif. Hal ini dikarenakan prediksi konsumsi energi yang tepat mempengaruhi investasi modal, kualitas lingkungan, analisis pendapatan, manajemen riset pasar, sekaligus menghemat keamanan pasokan. (Tamizharasi, Kathiresan & Sreenivasan, 2014).

Penelitian yang telah dilakukan mengenai peramalan beban listrik menggunakan jaringan syaraf tiruan metode kohonen. Dapat disimpulkan bahwa peramalan beban listrik menggunakan metode gabungan *backpropagation* dengan kohonen menghasilkan tingkat keakuratan peramalan lebih baik dibanding menggunakan metode gabungan *counterpropagation* dengan kohonen. (Syeto, Fariza & Setiawardhana, 2010).

Dalam penelitian terhadap peramalan beban listrik harian Jawa Tengah dan DIY menggunakan metode *Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average* (SARIMA). Diperoleh bahwa metode SARIMA cocok digunakan untuk meramalkan besarnya beban listrik harian, terutama untuk hari kerja (hari Senin sampai Kamis) dan hari libur akhir pekan (hari Sabtu dan Minggu) dengan nilai *error* yang tergolong kecil yaitu pada hari Senin, 23 April 2012 (nilai *error* 1,308%) dan hari Minggu, 29 April 2012 (nilai *error* 0,668%). Akan tetapi, untuk peramalan beban listrik pada hari khusus seperti hari raya Idul Fitri dan tahun baru, metode SARIMA dirasa kurang cocok. Hal ini dibuktikan dari nilai *error* pada hari raya

Idul Fitri tahun 2012 mencapai 5,422% dan tahun baru 2012 dengan nilai *error* 5,752% yang tergolong cukup besar (di atas 5%). (Harmawan, 2013).

Menurut Cahyandi, Q. W. (2017) dalam penelitian terhadap evaluasi kemampuan transformator tenaga pada Gardu Induk Kentungan 150 KV. Pada tahun 2016 beban trafo II 60 MVA sudah melebihi batas maksimal beban optimal trafo sebesar 52,21 MVA (87%), kemudian pada tahun 2027 sebesar 54,16 MVA (90%). Dengan ketersediaan kapasitas trafo II sebesar 60 MVA, maka trafo II masih mampu melayani beban dan tidak harus melakukan penggantian trafo dengan daya yang lebih besar atau menambah trafo baru di GI Kentungan. Perawatan dan pengawasan berkala yang intens perlu dilakukan agar trafo tetap bekerja secara ideal dalam menghadapi peningkatan signifikan beban tiap tahunnya.

Menurut Nugroho, F.A (2016) dalam penelitian terhadap pertumbuhan beban transformator Gardu Induk 150 KV Cilegon Lama. Perhitungan perkiraan beban transformator menggunakan metode regresi linier diperoleh data bahwa pada tahun 2030 perkiraan beban trafo I 56 MVA Gardu Induk 150 KV Cilegon Lama sebesar 59,24 MVA. Sedangkan perkiraan beban trafo II 60 MVA Gardu Induk 150 KV Cilegon Lama pada tahun 2030 mencapai 47 MVA.

Dalam penelitian yang telah dilakukan mengenai perkiraan konsumsi energi listrik APJ Cilacap tahun 2011-2016 dengan menggunakan *software* LEAP. Dihasilkan bahwa pertumbuhan rata-rata jumlah pelanggan dan konsumsi energi listrik skenario BAU di UPJ Cilacap Kota Untuk sektor rumah tangga, sektor komersial, industri, dan umum pertumbuhan rata-ratanya masing-masing sebesar 0,41 %, 5,39%, 2,33% dan 4,60% per tahun. Nilai pertumbuhan di UPJ Sidareja, UPJ Kroya, dan UPJ Majenang sama dengan persentase pertumbuhan di UPJ Cilacap Kota. Sedangkan di UPJ Kebumen dan Gombong, nilai pertumbuhan sektor rumah tangga, komersial, industri, dan umum berturut-turut adalah 0,51% 4,27%, 7,40%, dan 4,48%. (Pradana, Windarto & Winardi, 2012)

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Jaringan Syaraf Tiruan

Jaringan syaraf tiruan (JST) merupakan sistem kecerdasan tiruan dengan kemampuan belajar dan menghimpun pengetahuan hasil pembelajaran dalam

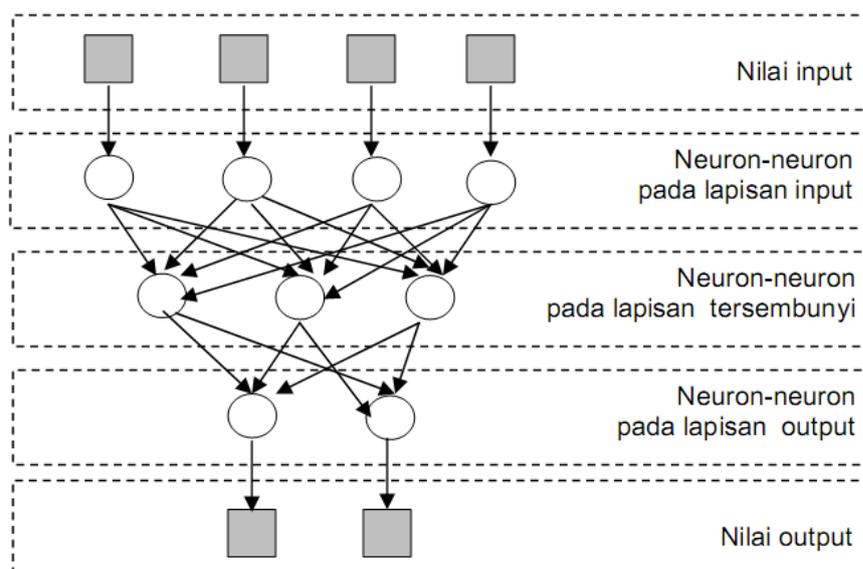
jaringan selnya (neuron) sehingga memungkinkan jaringan secara keseluruhan semakin cerdas merespon masukan/input yang diberikan. Kemampuan belajar dan mengakumulasi pengetahuan ini memungkinkan sistem jaringan syaraf tiruan untuk dapat beradaptasi dengan lingkungan yang memberikan input kepadanya. Layaknya otak manusia dalam merespon kondisi lingkungan berbeda-beda, peranan JST dalam bidang penelitian dan pengembangan sangat penting di masa mendatang yang menuntut aspek otomatisasi dan aspek interaktif antara alat dan manusia. (Muis, 2017).

Menurut Jong Jek Siang (2009), sistem jaringan syaraf tiruan ditentukan oleh 3 hal

- a. Pola hubungan antar neuron atau biasa disebut arsitektur jaringan.
- b. Metode untuk menentukan bobot penghubung (disebut metode *training/ learning/ algoritma*).
- c. Fungsi aktivasi

2.2.1.1 Arsitektur Jaringan

Di dalam JST, neuron-neuron akan dikumpulkan menjadi lapisan (*layer*) yang disebut *neuron layer*. Masing-masing *layer* akan dihubungkan satu sama lain, baik dengan *layer* sebelum maupun sesudahnya. Informasi akan dirambatkan dari satu *layer* ke *layer* berikutnya, mulai dari *input layer* sampai ke *output layer* melalui *hidden layer*. (Haidaroh, 2013)

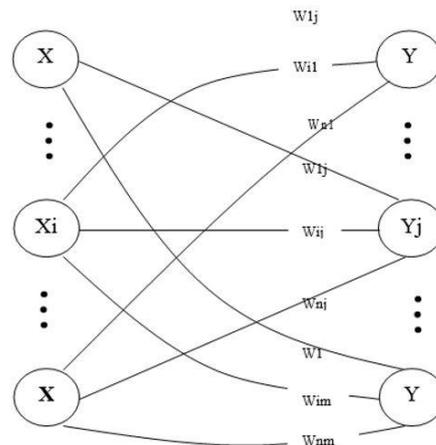


Gambar 2.1 Contoh arsitektur jaringan syaraf tiruan
(Sumber : Haidaroh, 2013)

Menurut Jong Jek Siang (2009), arsitektur jaringan syaraf tiruan yang sering digunakan antara lain :

a. Jaringan layar tunggal (*single layer network*)

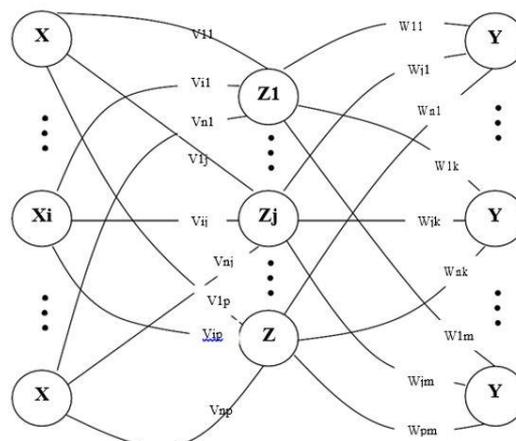
Dalam jaringan ini, sekumpulan input neuron dihubungkan langsung dengan sekumpulan outputnya, meskipun dengan bobot yang berbeda-beda. Tidak ada unit input yang dihubungkan dengan unit input lainnya. Demikian pula dengan unit output



Gambar 2.2 Arsitektur jaringan layar tunggal

b. Jaringan layar jamak (*multi layer network*)

Dalam jaringan ini, selain unit input dan output, terdapat juga layar tersembunyi. Jumlah layar tersembunyi dapat lebih dari satu. Sama seperti pada unit input dan output, unit-unit dalam satu layar tidak saling berhubungan.



Gambar 2.3 Arsitektur jaringan layar jamak

(Sumber : <http://okkyibrohim.com/index.php/2016/10/19/arsitektur-jaringan-syaraf-tiruan/>)

Jaringan ini didesain agar dapat menyelesaikan masalah yang lebih kompleks dengan layar tunggal, meskipun membutuhkan waktu lebih lama dalam proses pelatihannya.

c. Jaringan *Recurrent*

Model jaringan ini mirip dengan jaringan layar tunggal ataupun ganda. Hanya saja, ada neuron output yang memberikan sinyal pada unit input yang disebut *feedback loop*

2.2.1.2 Fungsi Aktivasi

Jong Jek Siang (2009) memaparkan bahwa fungsi aktivasi dipakai untuk menentukan keluaran suatu neuron. Berikut adalah fungsi aktivasi yang sering dipakai :

a. Fungsi *threshold* (batas ambang)

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \geq a \\ 0 & \text{jika } x \leq a \end{cases}$$

Untuk beberapa kasus, fungsi *threshold* yang dibuat tidak bernilai 0 atau 1, tapi bernilai 1 atau -1 (sering disebut *threshold bipolar*)

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \geq a \\ -1 & \text{jika } x \leq a \end{cases}$$

b. Fungsi sigmoid

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$$

Fungsi sigmoid sering dipakai karena nilai fungsinya yang terletak antara 0 dan 1 serta dapat diturunkan dengan mudah.

$$f'(x) = f(x) (1-f(x))$$

c. Fungsi identitas

$$f(x) = x$$

Fungsi identitas sering dipakai apabila diinginkan keluaran jaringan berupa bilangan riil (bukan hanya pada range [0, 1] atau [1, -1]).

2.2.1.3 Algoritma *Backpropagation*

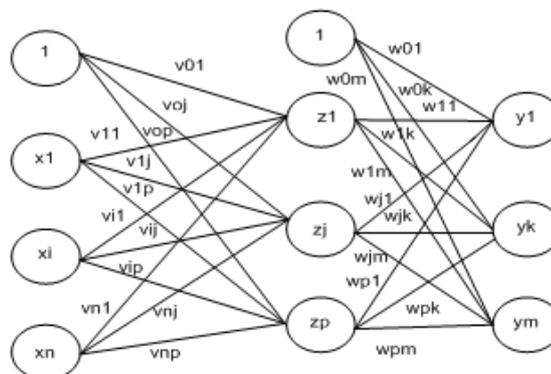
Backpropagation merupakan algoritma pembelajaran yang terawasi dan biasanya digunakan oleh *perceptron* dengan banyak lapisan untuk mengubah bobot-bobot yang terhubung dengan neuron-neuron yang ada pada lapisan tersembunyinya. Algoritma *backpropagation* menggunakan *error* output untuk mengubah nilai bobot-bobotnya adalah arah mundur (*backward*). Untuk mendapatkan *error* ini, tahap perambatan maju (*forward propagation*) harus dikerjakan terlebih dahulu. (Kusumadewi, 2004).

Secara garis besar, mengapa algoritma ini disebut sebagai propagasi balik, karena ketika JST diberikan pola masukan sebagai pola pelatihan maka pola tersebut menuju ke unit-unit pada lapis tersembunyi untuk diteruskan ke unit-unit lapis keluaran. Kemudian unit-unit lapis keluaran memberikan tanggapan yang disebut sebagai keluaran JST. Saat keluaran JST tidak sama dengan keluaran yang diharapkan maka keluaran akan disebarkan mundur (*backward*) pada lapis tersembunyi diteruskan ke unit pada lapis masukan. Oleh karenanya maka mekanisme pelatihan tersebut dinamakan *backpropagation* (propagasi balik). (Purnomo dan Kurniawan, 2006).

Menurut Jong Jek Siang (2009), standar algoritma *backpropagation* adalah

a. Arsitektur *backpropagation*

Backpropagation memiliki beberapa unit yang ada dalam satu atau lebih layar tersembunyi (hidden layer). Gambar 2.4 adalah arsitektur *backpropagation* dengan n buah masukan (ditambah sebuah bias), sebuah layar tersembunyi yang terdiri dari p unit (ditambah sebuah bias), serta m unit keluaran.



Gambar 2.4 Arsitektur *backpropagation*

Sumber : <http://fauzi.me/2010/08/09/neural-network-jaringan-syaraf-tiruan/>

V_{ij} merupakan bobot garis dari unit masukan x_i ke unit layar tersembunyi z_j (v_{0j} merupakan bobot garis yang menghubungkan bias di unit masukan ke unit layar tersembunyi z_j). w_{jk} merupakan bobot dari unit layar tersembunyi z_j ke unit keluaran y_k (w_{0k} merupakan bobot dari bias di layar tersembunyi ke unit keluaran y_k).

b. Fungsi aktivasi

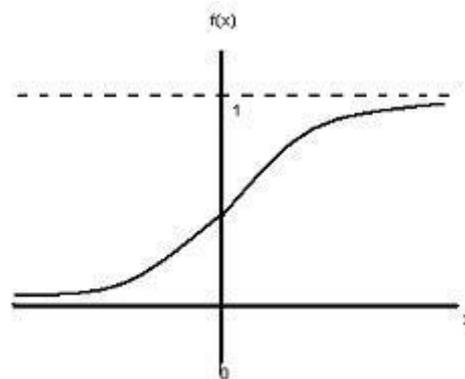
Dalam *backpropagation*, fungsi aktivasi yang dipakai harus memenuhi beberapa syarat yaitu: kontinu, terdiferensial dengan mudah dan merupakan fungsi yang tidak turun. Salah satu fungsi yang memenuhi ketiga syarat tersebut sehingga sering dipakai adalah fungsi sigmoid biner yang memiliki range (0, 1).

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$$

dengan turunan

$$f'(x) = f(x) (1-f(x))$$

Grafik fungsinya tampak pada gambar 2.5



Gambar 2.5 Grafik fungsi sigmoid biner

Sumber : <https://sammypatikawa.wordpress.com/2013/01/15/fungsi-sigmoid-biner-untuk-jaringan-saraf-tiruan-backpropagation/>

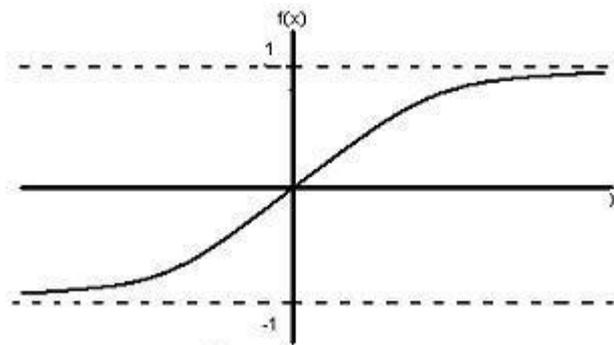
Fungsi lain yang sering dipakai adalah fungsi sigmoid bipolar yang bentuk dan fungsinya mirip dengan fungsi sigmoid biner, tapi dengan range (-1, 1).

$$f(x) = \frac{2}{1+e^{-x}} - 1$$

dengan turunan

$$f'(x) = \frac{(1+f(x)) (1-f(x))}{2}$$

Grafik fungsinya tampak pada gambar 2.6



Gambar 2.6 Grafik fungsi sigmoid bipolar

Sumber : <https://jalanwaktu.wordpress.com/jaringan-syaraf-tiruan/>

Fungsi sigmoid memiliki nilai maksimum =1. Maka untuk pola yang targetnya >1 , pola masukan dan keluaran harus terlebih dahulu ditransformasikan sehingga semua polanya memiliki range yang sama seperti fungsi sigmoid yang dipakai. Alternatif lain adalah menggunakan fungsi aktivasi sigmoid hanya pada layar yang bukan layar keluaran. Pada layar keluaran, fungsi aktivasi yang dipakai adalah fungsi identitas: $f(x) = x$.

c. Pelatihan standar *backpropagation*

Pelatihan *Backpropagation* meliputi 3 fase. Fase pertama adalah fase maju. Pola masukan dihitung maju mulai dari layar masukan hingga layar keluaran menggunakan fungsi aktivasi yaditentukan. Fase kedua adalah fase mundur. Selisih antara keluaran jaringan dengan target yang diinginkan merupakan kesalahan yang terjadi. Kesalahan tersebut dipropagasikan mundur, dimulai dari garis yang berhubungan langsung dengan unit-unit di layar keluaran. Fase ketiga adalah modifikasi bobot untuk menurunkan kesalahan yang terjadi.

Algoritma pelatihan untuk jaringan dengan satu layar tersembunyi (dengan fungsi aktivasi sigmoid biner) adalah sebagai berikut :

Langkah 0 : inialisasi semua bobot dengan bilangan acak kecil

Langkah 1 : jika kondisi penghentian belum terpenuhi, lakukan langkah 2-9

Langkah 2 : untuk setiap pasang data pelatihan, lakukan langkah 3-8

Fase I : Propagasi maju

Langkah 3 : tiap unit masukan menerima sinyal dan meneruskannya ke unit tersembunyi di atasnya

Langkah 4 : hitung semua keluaran di unit tersembunyi z_j ($j = 1, 2, \dots, p$)

$$z_{net_j} = v_{j0} + \sum_{i=1}^n x_i v_{ji}$$

$$z_j = f(z_{net_j}) = \frac{1}{1 + e^{-z_{net_j}}}$$

Langkah 5 : hitung keluaran jaringan di unit y_k ($k = 1, 2, \dots, m$)

$$y_{net_k} = w_{k0} + \sum_{j=1}^p z_j w_{kj}$$

$$y_k = f(y_{net_k}) = \frac{1}{1 + e^{-y_{net_k}}}$$

Fase II : Propagasi mundur

Langkah 6 : hitung faktor δ unit keluaran berdasarkan kesalahan di setiap unit keluaran y_k ($k = 1, 2, \dots, m$)

$$\delta_k = (t_k - y_k) f'(y_{net_k}) = (t_k - y_k) y_k (1 - y_k)$$

δ_k merupakan unit kesalahan yang akan dipakai dalam perubahan bobot layar dibawahnya

Hitung suku perubahan bobot w_{kj} (yang akan dipakai nanti untuk merubah bobot w_{kj}) dengan laju percepatan a

$$\Delta w_{kj} = \alpha \delta_k z_j \quad ; k = 1, 2, \dots, m ; j = 0, 1, \dots, p$$

Langkah 7 : hitung faktor δ unit tersembunyi berdasarkan kesalahan di setiap unit tersembunyi z_j ($j = 1, 2, \dots, p$)

$$\delta_{net_j} = \sum_{k=1}^m \delta_k w_{kj}$$

Faktor δ unit tersembunyi :

$$\delta_j = \delta_{net_j} f'(z_{net_j}) = \delta_{net_j} z_j (1 - z_j)$$

Hitung suku perubahan bobot v_{ji} (yang akan dipakai nanti untuk merubah bobot v_{ji})

$$\Delta v_{ji} = \alpha \delta_j x_i \quad ; j = 1, 2, \dots, p ; i = 0, 1, \dots, n$$

Fase III : Perubahan Bobot

Langkah 8 : hitung semua perubahan bobot

Perubahan bobot garis yang menuju ke unit keluaran :

$$w_{kj}(\text{baru}) = w_{kj}(\text{lama}) + \Delta w_{kj} \quad (k = 1, 2, \dots, m ; j = 0, 1, \dots, p)$$

Perubahan bobot garis yang menuju ke unit tersembunyi :

$$v_{ji}(\text{baru}) = v_{ji}(\text{lama}) + \Delta v_{ji} \quad (j = 1, 2, \dots, p ; i = 0, 1, \dots, n)$$

Setelah pelatihan selesai dilakukan, jaringan dapat dipakai untuk pengenalan pola. Dalam hal ini, hanya propagasi maju (langkah 4 dan 5) saja yang dipakai untuk menentukan keluaran jaringan. Apabila fungsi aktivasi yang dipakai bukan sigmoid biner, maka langkah 4 dan 5 harus disesuaikan. Demikian juga turunannya pada langkah 6 dan 7.

2.2.1.4 Algoritma *Training* Jaringan Pada MATLAB

MATLAB menyediakan fitur neural network yang memudahkan penggunaannya dalam membangun suatu jaringan syaraf tiruan. Dalam membangun suatu jaringan syaraf tiruan, perlu dilakukan tahap pelatihan (*training*). Terdapat beberapa algoritma *training* jaringan yang terdapat pada MATLAB, antara lain :

1. `trainlm` (*Levenberg-Marquardt*)

`trainlm` adalah fungsi pelatihan jaringan yang memperbarui nilai bobot dan bias sesuai dengan pengoptimalan *Levenberg-Marquardt*. `trainlm` biasanya merupakan algoritma *backpropagation* tercepat di *toolbox* untuk melatih jaringan syaraf tiruan berukuran sedang, namun algoritma ini memerlukan lebih banyak penyimpanan daripada algoritma lainnya.

2. `trainbfg` (*BFGS Quasi-Newton*)

`trainbfg` adalah fungsi pelatihan jaringan yang memperbarui nilai bobot dan bias sesuai dengan metode *Quasi-Newton BFGS*. Algoritma ini

membutuhkan lebih banyak perhitungan pada setiap iterasi dan memerlukan penyimpanan lebih besar daripada metode gradien konjugasi, walaupun biasanya konvergensi dalam iterasi lebih sedikit.

3. `trainrp` (*Resilient Backpropagation*)

`trainrp` adalah fungsi pelatihan jaringan yang memperbarui nilai bobot dan bias sesuai dengan algoritma *backpropagation* tangguh. Tujuan dari algoritma pelatihan tangguh *backpropagation* adalah untuk menghilangkan efek berbahaya dari besaran turunan parsial.

4. `trainscg` (*Scaled Conjugate Gradient*)

`trainscg` adalah fungsi pelatihan jaringan yang memperbarui nilai bobot dan bias sesuai dengan metode gradien konjugasi skala.

5. `traincgb` (*Conjugate Gradient with Powell/Beale Restarts*)

`traincgb` adalah fungsi pelatihan jaringan yang memperbarui nilai bobot dan bias sesuai dengan *backpropagation* gradien konjugasi dengan perulangan *Powell-Beale*.

6. `traincgf` (*Fletcher-Powell Conjugate Gradient*)

`traincgf` adalah fungsi pelatihan jaringan yang memperbarui nilai bobot dan bias sesuai dengan konvergensi gradien *backpropagation* dengan *update Fletcher-Reeves*. Algoritma gradien konjugasi biasanya jauh lebih cepat daripada variabel *learning rate backpropagation*, dan kadang lebih cepat dari pada `trainrp`, walaupun hasilnya bervariasi untuk beberapa kondisi. Algoritma gradien konjugasi hanya memerlukan sedikit penyimpanan daripada algoritma yang lebih sederhana. Oleh karena itu, algoritma ini bagus untuk jaringan dengan sejumlah besar bobot.

7. `traincgp` (*Polak-Ribiere Conjugate Gradient*)

`traincgp` adalah fungsi pelatihan jaringan yang memperbarui nilai bobot dan bias sesuai dengan *backpropagation* gradien konjugasi dengan *update Polak-Ribière*.

8. `trainoss` (*One-Step Secant*)

`trainoss` adalah fungsi pelatihan jaringan yang memperbarui nilai bobot dan bias berdasarkan metode *One-Step Secant*. Metode *One-Step*

Secant adalah upaya untuk menjembatani kesenjangan antara algoritma gradien konjugasi dan algoritma kuasi-Newton (*secant*). Algoritma ini membutuhkan lebih sedikit penyimpanan dan perhitungan per iterasi dibandingkan algoritma BFGS dan algoritma gradien konjugasi.

9. `traingdx` (*Variable Learning Rate Backpropagation*)

`traingdx` adalah fungsi pelatihan jaringan yang memperbarui nilai bobot dan bias berdasarkan momentum penurunan gradien dan *adaptive learning rate*. Algoritma ini merupakan penggabungan antara algoritma *gradient descent with adaptive learning* (`traingda`) dan algoritma *gradient descent with momentum* (`traingdm`).

2.2.2 Sistem Distribusi

Sistem distribusi merupakan sistem jaringan yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*bulk power source*) sampai ke pelanggan. Sistem distribusi memiliki peranan sebagai pembagi tenaga listrik ke beberapa area pelanggan, atau dapat dikatakan sistem distribusi berperan sebagai catu daya/ penyuplai daya pada beban-beban konsumen.

Secara umum, bagian dari sistem distribusi memiliki urutan mulai dari gardu induk, jaringan distribusi primer, transformator distribusi, jaringan distribusi sekunder hingga terakhir pelayanan pelanggan.

2.2.2.1 Gardu Induk

Gardu induk dapat didefinisikan sebagai suatu instalasi listrik yang tersusun atas beberapa peralatan listrik yang berfungsi untuk :

- a. Mentransformasikan tenaga listrik tegangan tinggi ke tegangan menengah
- b. Sebagai pengukuran, pengawasan operasi serta dijalankannya fungsi proteksi pada sistem
- c. Pengaturan daya ke gardu-gardu induk lain melalui tegangan tinggi dan transformator distribusi melalui penyulang tegangan menengah (Tanzil, 2007).

Dalam istilah lain Gardu Induk (GI) merupakan suatu stasiun pengumpul energi listrik dari sistem pembangkitan atau sistem transmisi yang terdiri dari alat-

alat transformator daya, pemutus tenaga, saklar pemisah, bus station, reactor pembatas arus, transformator arus, transformator tegangan, kapasitor kopling, transformator tegangan kapasitor, lightning arrester, rele proteksi, baterai, dan alat pendukung lainnya. (Syahputra, 2017)

Menurut konstruksi pemasangannya, gardu induk dapat diklasifikasikan menjadi 5 jenis yaitu :

- a. Gardu induk pasangan luar (*outdoor*), adalah gardu induk dimana sebagian besar peralatannya dipasang di luar (udara terbuka) kecuali peralatan kontrol, pengukur, proteksi dan instrumen-instrumen lain yang biasa ditempatkan di dalam bangunan
- b. Gardu induk pasangan dalam (*indoor*), adalah gardu induk dimana semua peralatan penunjangnya mulai dari transformator, peralatan kontrol, instrumen pengukur, proteksi dan lainnya dipasang/ditempatkan di dalam suatu bangunan tertutup
- c. Gardu induk pasangan bawah tanah (*underground*), adalah gardu induk dimana sebagian besar peralatannya berada di bawah tanah. Hanya terkadang ada beberapa peralatan/instrumen yang berada di atas permukaan tanah seperti alat pendingin dan peralatan kontrol
- d. Gardu induk pasangan sebagian bawah tanah (*semi underground*), adalah gardu induk dimana sebagian peralatan seperti transformator daya dipasang di bawah tanah, sedangkan sebagian peralatan yang lain berada di atas tanah
- e. Gardu induk mobil (*mobile*), adalah gardu induk dimana peralatannya diletakkan di atas *truck*, sehingga gardu induk ini dapat dipindahkan secara *mobile* ke tempat yang membutuhkan.

Dalam suatu gardu induk, pengadaan peralatan penunjang yang ada dapat memperhatikan hal-hal seperti jenis gardu induk, fungsi dan tujuan serta tingkat sistem proteksi yang diinginkan pada gardu induk tersebut. Berdasarkan esensinya, secara garis besar peralatan penunjang utama yang ada pada gardu induk adalah sebagai berikut :

a. Transformator daya

Transformator daya merupakan piranti yang digunakan untuk mentransformasikan daya listrik dengan cara menaikkan atau menurunkan tegangan listrik, namun dengan frekuensi yang tetap di sisi primer dan sisi sekunder. Pada transformator daya ini terdapat *Neutral Current Transformer* (NCT) yang berfungsi sebagai proteksi dari *earth fault* dengan cara mengukur arus yang mengalir di titik netral dari transformator daya.



Gambar 2.7 Transformator daya

Sumber : <https://www.indiamart.com/vijay-electricals-bengaluru/>

Pembebanan transformator atau sering disebut faktor beban transformator didapatkan melalui hasil pembagian antara prakiraan beban puncak dengan kapasitas transformator. Nilai kapasitas transformator dapat dilihat langsung pada *datasheet* transformator yang digunakan.

$$LF = \frac{\text{beban puncak}}{\text{kapasitas transformator}} \times 100\%$$

Idealnya faktor beban suatu transformator berkisar antara 60% - 80% yaitu dikategorikan dalam beban optimal. Berikut adalah tabel kategori faktor beban transformator

Tabel 2.1 Kategori faktor beban transformator

< 60%	Beban ringan
60% - 80%	Beban optimal
80% - 100%	Beban berat
> 100%	Beban lebih (<i>overload</i>)

b. Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB)

Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB) berfungsi untuk memutuskan aliran arus listrik apabila terjadi gangguan dan akan beroperasi bergantung pada rele proteksi. CB merupakan salah satu bagian dari sistem proteksi, untuk mencegah terjadinya kerusakan pada peralatan sistem dan mempertahankan sistem ketika terjadi gangguan, sehingga kontinuitas pelayanan dapat dipertahankan.

**Gambar 2.8** Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB)

Sumber <http://www.lacasamorett.com/foxgallery/circuit-breaker-in-substation.html>

c. Rele proteksi

Rele proteksi adalah piranti yang berfungsi mendeteksi adanya gangguan pada suatu sistem. Selain itu, piranti ini memerintahkan pemutus tenaga atau CB untuk memutuskan aliran listrik guna memisahkan bagian yang terkena gangguan dengan sistem yang masih normal. Berdasarkan karakteristik hubungan tanggap waktu *delay* dan arus, rele dibagi menjadi 2 yaitu *definite time relay* dan *inverse time relay*.

d. Trafo Pengukuran

Trafo pengukuran terdiri dari *Potential transformer* (PT) dan *Current transformer* (CT). PT atau trafo tegangan berfungsi untuk menurunkan tegangan di saluran dengan rasio tertentu agar menjadi tegangan rendah dan dapat terbaca pengukur tegangan untuk kemudian dihubungkan ke rele proteksi. Sedangkan CT atau trafo arus adalah transduser arus yang akan memberikan sinyal arus yang berbanding lurus dengan besaran dan fasa arus yang mengalir pada sisi primer. (Laughton & Warne, 2003). Kedua trafo ini digunakan sebagai trafo instrumen. Besaran tegangan dan arus yang diperoleh dijadikan sebagai parameter pengukuran dan proteksi pada sistem.



(a)



(b)

Gambar 2.9 Trafo Pengukuran

(a) *current transformer*, sumber : https://en.wikipedia.org/wiki/Current_transformer
 (b) *potentio transformer*, sumber : <http://www.electronicshub.org/potential-transformers/>

e. *Lightning Arrester* (LA)

Lightning Arrester (LA) atau biasa disebut penangkal petir. Piranti ini berfungsi menangkal gelombang berjalan dari petir yang akan masuk ke instalasi pusat. *Lightning Arrester* (LA) akan bekerja pada tegangan tertentu di atas tegangan operasi untuk membuang muatan listrik dari surja petir dan akan berhenti beroperasi pada tegangan tertentu di atas tegangan operasi agar tidak terjadi arus ikutan pada tegangan operasi. Perbandingan dua tegangan ini disebut rasio proteksi *arrester*.



Gambar 2.10 *Lightning Arrester*

Sumber : <http://www.inmr.com/optimizing-arrester-designs-using-high-energy-metal-oxide-varistors/5/>

Lightning Arrester (LA) harus ditempatkan sedekat mungkin dengan transformator. Hal ini dikarenakan transformator memiliki grounding (sebagai ujung terbuka) yang akan menarik surja petir untuk merambat sehingga gelombang pantulannya akan saling memperkuat dengan gelombang yang datang. Hal tersebut mengakibatkan transformator dapat mengalami surja dua kali besarnya tegangan gelombang surja yang datang.

f. *Disconnecting Switch* (DS)

Disconnecting Switch (DS) atau biasa disebut pemisah adalah saklar pemutus yang dioperasikan secara manual dan didesain untuk tidak dapat terbuka pada saat jaringan masih dalam keadaan terbeban. Oleh karena itu, *Disconnecting Switch* (DS) dapat bekerja setelah CB memutuskan arus pada jaringan. Dalam GI, biasanya *Disconnecting Switch* (DS) dipakai pada *transformator bay* (TR Bay), *transformator line bay* (TL Bay), *Busbar* dan *Bus couple*.



Gambar 2.11 *Disconnecting Switch*

Sumber : <http://electrical-engineering-portal.com/purpose-of-disconnect-switches-in-hv-substation>

g. Trafo Pemakaian Sendiri (TPS)

Trafo pemakaian sendiri memiliki prinsip kerja yang sama seperti trafo pada umumnya, yaitu mentransformasikan besaran daya listrik dengan mengubah suatu *rate* tegangan ke *rate* tegangan lain. Trafo ini digunakan sebagai penurun tegangan menjadi 220/380 volt AC. Sumber tegangan 220/380 volt AC ini digunakan sebagai penyuplai daya bagi peralatan-peralatan yang ada di dalam lingkup gardu induk seperti instalasi penerangan, pompa air dan *air conditioner*.

h. Rel (*busbar*)

Rel (*busbar*) ini digunakan sebagai titik temu atau penghubung antar komponen/peralatan yang ada di gardu induk. Sebagai contoh penghubung antara saluran transmisi dengan transformator daya, serta antar komponen lainnya.



Gambar 2.12 *Busbar*

Sumber : <https://www.wmwa.net/metal-products/aluminum/aluminum-bar/>

i. Konduktor & Isolator

Konduktor merupakan bahan yang memungkinkan dapat mengalirkan listrik. Kebanyakan konduktor ini berupa logam yang memiliki sifat konduktansi. Sedangkan isolator merupakan bahan yang tidak memungkinkan adanya perpindahan aliran listrik, isolator ini berfungsi mengisolasi bagian yang bertegangan dengan yang tidak bertegangan (*ground*) baik secara elektrik maupun mekanik.

j. Gedung Kontrol

Gedung kontrol merupakan gedung pusat pengoperasian serta pengontrolan segala peralatan yang ada di gardu induk. Tugas pengontrolan dan pengoperasian adalah tanggung jawab dari operator yang bertugas di gardu induk. Dalam gedung kontrol terdapat beberapa panel atau komponen, yaitu panel kontrol, panel proteksi, sumber dc gardu induk dan *cubicle* 20 KV.

2.2.2.2 Klasifikasi Jaringan Distribusi

Penurunan tegangan yang telah dilakukan di gardu induk pada umumnya menghasilkan tegangan 20 kV. Tegangan 20 kV ini merupakan tegangan kerja dari wilayah pelayanan distribusi. Daya listrik yang telah ditransformasikan oleh transformator daya pada gardu induk kemudian didistribusikan kepada pelanggan melalui jaringan pelayanan yang biasa disebut jaringan distribusi. Berdasarkan klasifikasi letak jaringan terhadap posisi gardu induk, jaringan distribusi terbagi menjadi 2, yaitu :

a. Jaringan distribusi primer (jaringan distribusi tegangan menengah)

Jaringan distribusi primer merupakan jaringan yang terletak dari sisi sekunder transformator daya gardu induk hingga menuju ke sisi primer transformator distribusi. Pada umumnya tenaga listrik yang disalurkan mempunyai tegangan 20 kV.

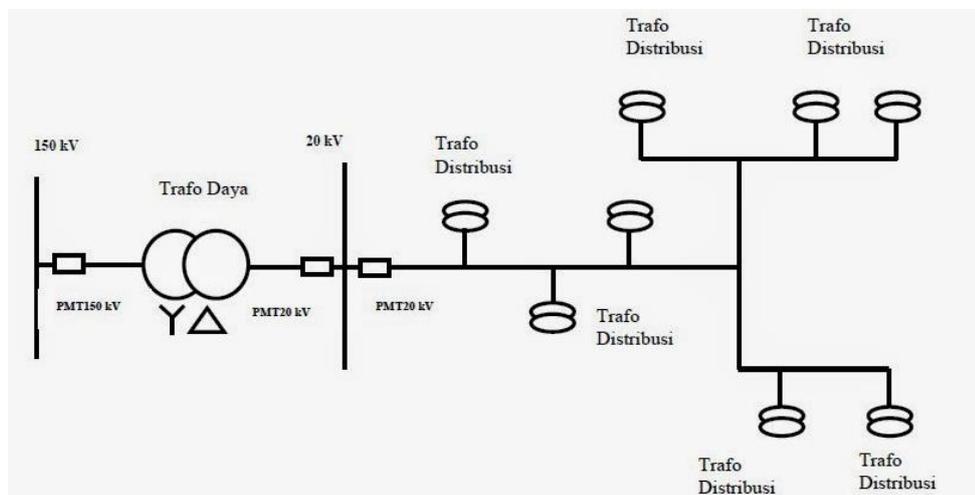
b. Jaringan distribusi sekunder (jaringan distribusi tegangan rendah)

Jaringan distribusi sekunder merupakan jaringan yang terletak pada sisi sekunder transformator distribusi. Jaringan ini berhubungan langsung dengan pelanggan, dimana berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan rendah yaitu 220 V atau 380 V.

Jaringan distribusi juga dapat diklasifikasikan berdasarkan konfigurasi jaringan. Berdasarkan hal tersebut, pada umumnya sistem jaringan distribusi dapat dikategorikan menjadi 3 macam, yaitu sistem jaringan distribusi radial, loop dan spindel.

a. Sistem jaringan distribusi radial

Sistem ini merupakan sistem jaringan paling sederhana. Sistem ini memiliki bentuk jaringan yang hanya bersumber dari satu titik / penyulang, kemudian dari titik tersebut dibuat percabangan ke titik-titik beban yang dilayani. Kondisi penyaluran pada sistem radial ini adalah satu arah. Hal ini akan mengakibatkan kontinuitas pelayanan tenaga listrik yang relatif buruk, sebab penyaluran daya hanya bergantung pada satu titik penyulang dimana apabila terjadi gangguan pada suatu titik, maka keseluruhan jaringan akan mengalami pemadaman selama gangguan belum dihilangkan.

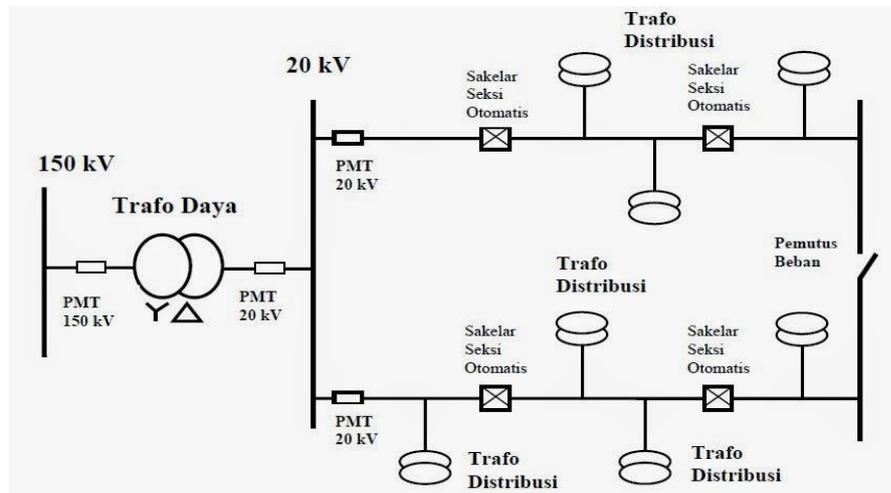


Gambar 2.13 Sistem jaringan distribusi radial

Sumber : <http://tentanglistrikkita.blogspot.co.id/2014/05/sistem-tenaga-listrik-distribusi.html>

b. Sistem jaringan distribusi loop

Sistem ini memiliki struktur jaringan yang berbentuk lingkaran/ring. Jaringan ini merupakan jaringan tertutup, dimulai dari gardu induk kemudian melewati beberapa transformator distribusi kemudian kembali lagi menuju titik awal. Jaringan loop ini memiliki kontinuitas pelayanan daya yang lebih baik, karena apabila terjadi gangguan maka gangguan tersebut dapat diisolir sehingga tidak berdampak pada keseluruhan jaringan. Hal ini disebabkan oleh adanya pemutus (PMT) atau pemisah (PMS) pada masing-masing ujung saluran.



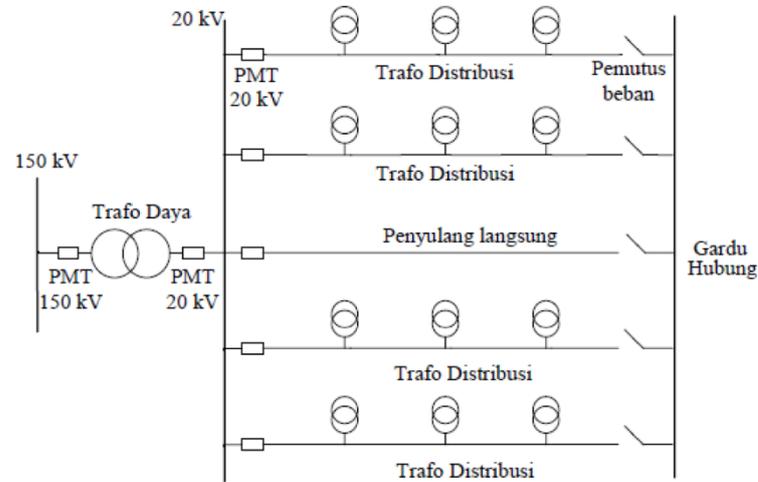
Gambar 2.14 Sistem jaringan distribusi *loop*

Sumber : <http://tentanglistrikkita.blogspot.co.id/2014/05/sistem-tenaga-listrik-distribusi.html>

c. Sistem jaringan distribusi spindel

Sistem jaringan distribusi spindel merupakan hasil dari penggabungan antara sistem jaringan radial dan loop. Struktur jaringan ini terdiri dari beberapa penyulang utama dan memiliki penyulang langsung (*express feeder*). Penyulang langsung berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik darurat apabila terjadi gangguan pada penyulang utama. Seluruh penyulang (baik penyulang utama maupun langsung) ditemukan pada satu titik yaitu gardu hubung.

Dalam keadaan normal, penyulang langsung tidak dibebani serta semua ujung saluran di gardu hubung difungsikan terbuka sehingga setiap saluran bekerja secara radial. Apabila salah satu seksi dari penyulang utama mengalami gangguan, maka saklar beban di kedua ujung seksi yang terganggu dibuka. Seksi-seksi yang berada dekat dengan gardu induk disuplai dari gardu induk. Sedangkan seksi-seksi gardu hubung mendapat suplai dari gardu hubung melalui penyulang langsung.



Gambar 2.15 Sistem jaringan distribusi spindle
 Sumber : <http://oneforallindo.blogspot.co.id/2015/09/distribusi-tegangan-menengah.html>

2.2.2.3 Transformator Distribusi

Transformator distribusi merupakan transformator yang berfungsi sebagai penyesuai level tegangan agar sesuai dengan kebutuhan pelanggan, yaitu 220 V untuk listrik 1 *phase* dan 380 V untuk listrik 3 *phase*. Pada sisi primer transformator distribusi terhubung dengan jaringan distribusi primer (tegangan menengah 20 kV) dan pada sisi sekundernya disalurkan pada jaringan distribusi sekunder (tegangan rendah 220V/380V).

Pemilihan kapasitas daya transformator distribusi disesuaikan dengan beberapa aspek, seperti banyaknya jumlah beban yang dilayani dan perkiraan penambahan beban di masa mendatang. Besarnya kapasitas transformator distribusi berpengaruh pada konstruksi tiang penyangga yang digunakan sebagai penopang transformator tersebut. Berdasarkan kapasitasnya, transformator distribusi terbagi menjadi 3 tipe, antara lain :

- a. Tipe tembok : di atas 555 kVA sampai 1 MVA
- b. Tipe dua tiang : di atas 200 kVA sampai 555 kVA
- c. Tipe satu tiang : dengan kapasitas 200 kVA atau lebih rendah

2.2.2.4 Pelayanan Pelanggan

Menurut berbagai sumber (PLN atau perusahaan listrik swasta) pelanggan listrik di Indonesia dapat dibedakan sebagai berikut :

a. Konsumen rumah tangga

Konsumen daya listrik untuk rumah tangga berkisar antara 450 VA sampai dengan 4400 VA. Secara umum menggunakan sistem tegangan rendah 220 V / 380 V.

b. Penerangan jalan umum

Penerangan jalan umum termasuk dari sarana yang sangat diperlukan oleh masyarakat. Beban lampu yang terpasang biasanya berkisar antara 50 VA sampai dengan 250 VA bergantung pada jenis jalan yang dipasang penerangan. Sistem tegangan yang digunakan biasanya tegangan rendah 220 V / 380 V.

c. Konsumen pabrik

Kebutuhan daya pabrik cenderung besar, biasanya dalam kisaran kVA. Penggunaan untuk pabrik berskala kecil menggunakan sistem tegangan rendah 220 V / 380 V, namun untuk pabrik berskala besar menggunakan sistem 3 *phase* tegangan menengah 20 kV.

d. Konsumen komersial

Konsumen komersial merupakan konsumen di area atau instansi publik yang meliputi stasiun, terminal, hotel, sekolah, mall, stadion olahraga dan lainnya. Pada umumnya, konsumen tipe ini menggunakan sistem 3 *phase*. Penggunaan untuk kapasitas kecil menggunakan tegangan rendah, sedangkan konsumen berkapasitas besar menggunakan tegangan menengah

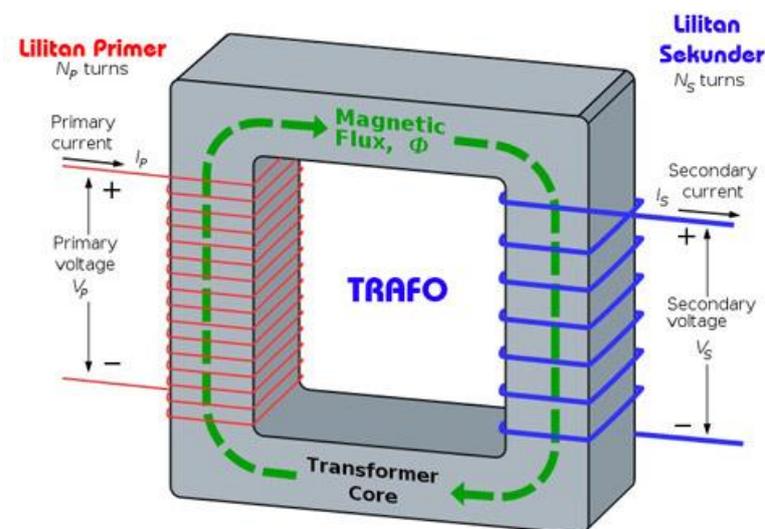
2.2.3 Transformator

Transformator merupakan piranti yang digunakan untuk mentransformasikan daya listrik dengan cara menaikkan atau menurunkan tegangan listrik, namun dengan frekuensi yang tetap di sisi primer dan sisi sekunder. Transformator merupakan piranti elektromagnetik yang mempunyai prinsip kerja berdasarkan hukum Faraday. Dimana hukum Faraday adalah hukum dasar elektromagnetisme

yang melibatkan hubungan arus listrik dalam menghasilkan medan magnet ataupun sebaliknya yang biasa disebut induksi elektromagnetik.

2.2.3.1 Konstruksi Transformator

Pada dasarnya, transformator memiliki 3 bagian utama, yaitu kumparan primer, inti besi dan kumparan sekunder. Ketika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan AC maka fluks bolak-balik akan timbul dalam inti besi, karena kumparan tersebut membentuk rangkaian tertutup maka mengalirlah arus primer. Adanya fluks bolak-balik juga mengalir menuju kumparan sekunder, kumparan yang terkena fluks akan menghasilkan tegangan induksi AC. Dimana besar kecilnya tegangan yang dihasilkan kumparan sekunder bergantung pada jumlah lilitannya.



Gambar 2.16 Konstruksi dasar transformator

Sumber : <http://skemaku.com/prinsip-kerja-transformator/>

Selain bagian utama, terdapat juga beberapa bagian/instrumen yang tidak kalah pentingnya dalam praktek penggunaan transformator.

a. Minyak trafo

Minyak trafo berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Dikarenakan kumparan-kumparan dan inti besi transformator secara aktif membangkitkan energi panas, maka perlu didinginkan dengan cara direndam dalam minyak trafo.

b. *Bushing*

Bushing merupakan konduktor yang diselubungi isolator yang berfungsi sebagai titik hubung antara kumparan transformator dengan jaringan luar. Secara umum, bushing tersusun atas beberapa bagian utama, yaitu konduktor, isolator, klem koneksi dan aksesoris.



Gambar 2.17 Bushing transformator

Sumber : <http://ilhamwidianfatari.blogspot.co.id/2012/04/>

c. Tangki konservator

Tangki ini berfungsi untuk menampung bagian-bagian trafo yang terendam minyak. Tangki ini dilengkapi konservator, yang bertujuan untuk mengantisipasi adanya pemuaiian minyak trafo yang mengakibatkan bertambahnya volume minyak. Adanya perubahan volume minyak ini maka akan berbanding lurus dengan kebutuhan volume udara yang masuk dalam konservator. Udara yang akan masuk ke dalam konservator akan difilter terlebih dulu melalui *silica gel*. Hal ini bertujuan agar minyak trafo tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar.

d. Pendingin

Kumparan trafo dan inti besi dapat secara aktif menimbulkan panas. Perlu diketahui, seiring bertambahnya suhu baik pada kumparan maupun inti besi maka suhu minyak trafo juga ikut bertambah. Dalam jangka waktu yang lama, minyak trafo tersebut akan mengalami penurunan mutu dalam mengisolasi dan mendinginkan kumparan dan inti besi bahkan dapat berakibat kerusakan pada fungsi isolasi. Oleh karena itu, perlu adanya alat/sistem pendingin tambahan untuk menyalurkan panas keluar transformator sehingga dapat mengurangi suhu di dalam transformator.

Terdapat beberapa macam media yang digunakan pada sistem pendingin, yaitu udara/gas, minyak dan air. Dalam sirkulasi pendinginannya dapat dilakukan secara alamiah (*natural*) atau tekanan/paksa (*forced*). Berikut adalah macam-macam sistem pendingin transformator berdasarkan media dan metode sirkulasinya :

Tabel 2.2 Macam-macam sistem pendingin

No	Macam sistem pendingin	Media			
		Di dalam trafo		Di luar trafo	
		Sirkulasi alami	Sirkulasi paksa	Sirkulasi alami	Sirkulasi paksa
1	AN	-	-	Udara	-
2	AF	-	-	-	Udara
3	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7	OFWF	-	Minyak	-	Air
8	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 4			
9	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10	ONAN/OFAF	Kombinasi 4 dan 6			
11	ONAN/OFWF	Kombinasi 6 dan 7			

e. Perubahan tap (*tap changer*)

Dalam pemenuhan kebutuhan tenaga listrik, tegangan kerja sistem distribusi harus berada dalam kondisi ideal. Maka dari itu, dalam sebuah transformator perlu adanya penyesuaian tegangan sekunder agar tetap ideal meskipun tegangan primer berubah-ubah. Untuk memenuhi hal tersebut maka dibutuhkan *tap changer*. *Tap changer* adalah suatu alat dapat merubah rasio perbandingan transformator guna mendapatkan tegangan sekunder yang lebih ideal meskipun nilai tegangan pada sisi primer tidak konstan. Menurut ada

atau tidaknya beban dalam pengoperasiannya, tap changer dibagi menjadi 2 yaitu *off load tap changer* (tanpa beban) dan *on load tap changer* (berbeban).

f. Alat pernapasan

Dalam realitanya, minyak trafo dapat mengalami perubahan suhu yang disebabkan oleh perubahan beban transformator dan perubahan suhu udara luar. Kenaikan suhu menyebabkan minyak memuai sehingga udara dalam transformator terdesak keluar, sedangkan penurunan suhu menghasilkan penyusutan volume minyak trafo sehingga udara luar akan mengisi kekosongan dalam tangki. Proses diatas disebut sebagai pernapasan transformator.

Dalam menunjang proses pernapasan transformator ini, maka pada ujung pipa penghubung udara luar dipasang tabung berisi zat *hygroskopis*. Hal ini guna mencegah adanya singgungan antara minyak dengan udara luar yang dapat menyebabkan penurunan tegangan tembus minyak trafo.

g. NGR (*Neutral Grounding Resistance*)

NGR digunakan untuk sistem *ground power* dengan cara memasang sebuah tahanan antara netral dan *ground* transformator. Alat ini berfungsi untuk memperkecil arus gangguan akibat kesalahan pembumian. Selain itu, NGR juga dapat mencegah adanya tegangan transien.

h. Indikator

Menurut KBBI, indikator adalah sesuatu yang dapat memberikan petunjuk dan keterangan. Indikator pada sebuah transformator berperan menyampaikan informasi yang dapat dijadikan parameter pengawasan performa transformator, apakah transformator dalam kondisi baik atau tidak. Beberapa indikator yang terdapat pada transformator antara lain indikator suhu minyak, permukaan minyak, suhu belitan dan perubahan tap.

2.2.3.2 Diagram Vektor Transformator

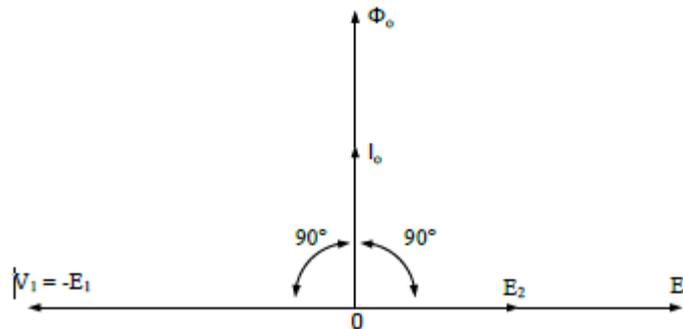
Diagram vektor merupakan penggambaran hubungan antara tegangan, arus yang mengalir dan fluks magnetik dalam bentuk vektor. Hubungan yang terdapat di antara nilai-nilai satuan tersebut dipengaruhi oleh sifat beban, rugi-rugi transformator serta impedansi lilitan

1. Transformator tanpa beban

Apabila transformator tidak dibebani, arus yang mengalir dalam transformator hanya arus pemagnetan (I_o) saja. Dalam hal ini :

- Fluks magnet (Φ_o) sejajar dengan arus primer tanpa beban (I_o) dan tertinggal 90° terhadap tegangan sumber V_1 .
- Gaya gerak listrik induksi pada sisi primer (E_1) besarnya sama dengan V_1 , namun berbeda fasa 180° terhadap V_1 .
- Gaya gerak listrik induksi pada sisi sekunder ($E_2 = aE_1$), tertinggal 90° terhadap fluks magnet (Φ_o).

Dalam mengilustrasikan diagram vektor ($V_1 = -E_1$) transformator ideal tanpa beban, perlu menganggap rugi-rugi *eddy current* dalam inti, rugi-rugi tahanan kawat tembaga, fluks bocor pada kumparan (primer dan sekunder) tidak ada, maka vektor diagram akan seperti di bawah ini



Gambar 2.18 Diagram vektor transformator ideal tanpa beban

Sumber : Manurung, 2010

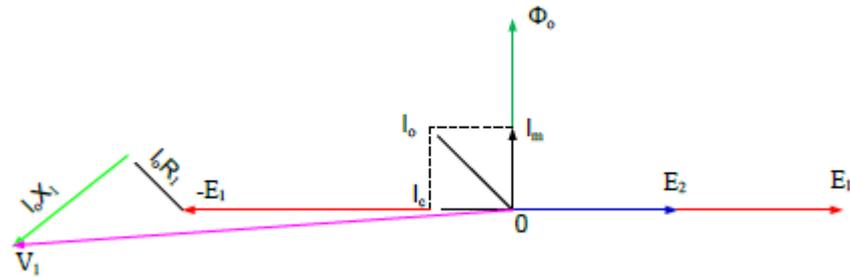
Akan tetapi, keadaan nyata suatu transformator tanpa beban pun tidaklah mungkin ideal. Hal ini dikarenakan adanya rugi-rugi pada transformator, yang dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut :

- Arus primer tanpa beban (I_o) tidak sejajar dengan fluks magnet, yaitu arus primer tanpa beban dapat diuraikan atas

$$I_o = I_m + I_c$$

- Besarnya ggl induksi (E_1) tidak sama dengan V_1 , hal ini disebabkan adanya impedansi kumparan Z_1 .

$$V_1 = -E_1 + I_o (R_1 + jX_1)$$



Gambar 2.19 Diagram vektor tak ideal tanpa beban
Sumber : Manurung, 2010

2. Transformator berbeban

Idealnya, suatu transformator mampu mengubah tegangan sebanding dengan jumlah lilitan dalam kumparannya. Seperti dalam persamaan

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Apabila pada sisi sekunder dihubungkan dengan beban, maka dalam sisi sekunder akan mengalir arus I_2 dan terdapat arus gerak magnet (agm) $N_2 I_2$. Jika agm sekunder ini tidak dilawan pada primer, fluks inti akan berubah secara radikal dan keseimbangan antara tegangan yang diberikan dan tgl balik pada primer akan terganggu. Oleh karena itu, diperlukan adanya agm penyeimbang di primer dan arus I_1 sehingga

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

Maka dari itu, arus gerak magnet I_1 dan I_2 saling berlawanan arah dan saling mengimbangi/meniadakan. Sesuai dengan asumsi bahwa arus peneralan suatu transformator ideal adalah nol

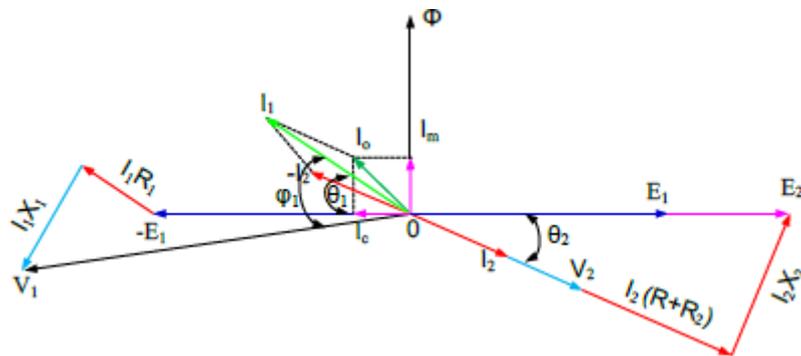
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Jadi suatu transformator ideal memiliki arus yang berbanding terbalik terhadap jumlah lilitan dalam kumparannya. Dengan mengabaikan rugi-rugi daya aktif maupun reaktif maka daya masuk sama dengan daya keluar.

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

Berdasarkan jenis bebannya, maka transformator berbeban terbagi menjadi 3 yaitu beban tahanan murni, beban induktif dan beban kapasitif.

a. Beban tahanan murni



Gambar 2.20 Diagram vektor transformator berbeban tahanan murni
Sumber : Manurung, 2010

Seperti terlihat pada gambar 2.20, bahwa saat transformator berbeban tahanan murni arus yang mengalir pada sisi sekunder transformator (I_2) akan berbeda fasa terhadap E_2 sebesar sudut θ_2

$$V_2 = E_2 - I_2((R_2 + R) + jX_2)$$

$$\operatorname{tg}\theta_2 = \frac{X_2}{R_2 + R}$$

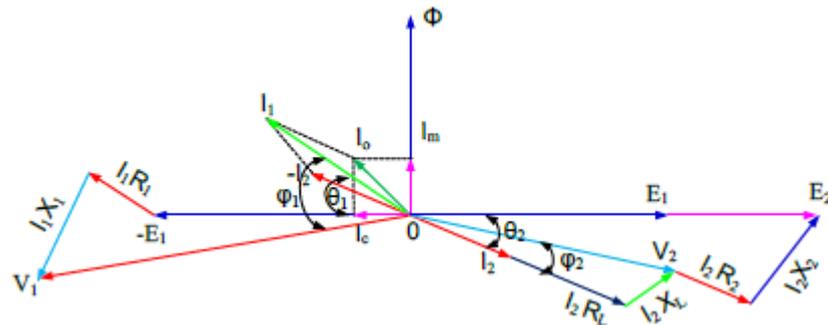
b. Beban induktif

Ketika transformator memiliki beban induktif, maka akan timbul harga $R_2 + jX_2$ dan $R_L + jX_L$. Adanya harga tersebut mengakibatkan pergeseran fasa antara I_2 dan E_2 dengan sudut sebesar θ_2

$$\operatorname{tg}\theta_2 = \frac{X_2 + X_L}{R_2 + R_L}$$

Selain itu, adanya harga $R_2 + jX_2$ dan $R_L + jX_L$ juga menimbulkan pergeseran fasa antara I_2 dan V_2 dengan sudut sebesar φ_2

$$\operatorname{tg}\varphi_2 = \frac{X_L}{R_L}$$



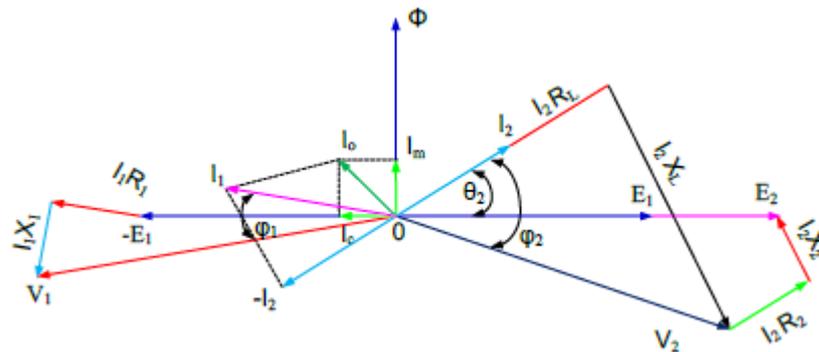
Gambar 2.21 Diagram vektor transformator berbeban induktif
Sumber : Manurung, 2010

c. Beban kapasitif

Apabila transformator diberi beban kapasitif maka akan ada pergeseran fasa antara I_2 dan E_2 sebesar θ_2 , serta pergeseran fasa antara I_2 dan V_2 dengan sudut φ_2

$$tg\theta_2 = \frac{X_L - X_2}{R_L - R_2}$$

$$tg\varphi_2 = \frac{X_L}{R_L}$$



Gambar 2.22 Diagram vektor transformator berbeban kapasitif
Sumber : Manurung, 2010

2.2.4 Peramalan

Menurut Heizer dan Render (2009) bahwa peramalan merupakan proses untuk memperkirakan kejadian/hal pada masa yang akan datang. Peramalan juga merupakan seni dan ilmu memprediksi peristiwa-peristiwa masa depan. Peramalan memerlukan data historis dan memproyeksikannya ke masa depan dengan beberapa model matematis.

Berdasarkan sifat data yang dijadikan objek peramalan, maka secara garis besar peramalan terbagi menjadi kualitatif dan kuantitatif. Peramalan kualitatif berhubungan dengan data yang tidak berbentuk numerik atau lebih bersifat pernyataan/pendapat. Sedangkan peramalan kuantitatif berdasarkan pengukuran menggunakan data yang berbentuk numerik.

Peramalan beban transformator dapat dikategorikan sebagai peramalan kuantitatif. Dimana, peramalan kuantitatif ini dapat diterapkan apabila terpenuhinya 3 syarat kondisi berikut ini :

1. Tersedia informasi tentang masa lalu
2. Informasi tersebut dapat dikuantitatifkan dalam bentuk data numerik
3. Dapat diasumsikan bahwa beberapa aspek pola masa lalu akan terus berlanjut di masa mendatang.

Lebih merujuk pada peramalan kuantitatif, metode ini memiliki 2 jenis model peramalan utama, yaitu model deret berkala dan model kausal.

1. Pada model deret berkala, pendugaan masa depan dilakukan berdasarkan nilai masa lalu dari suatu variabel dan/atau kesalahan masa lalu. Hal ini bertujuan agar dapat menemukan pola dalam deret data historis dan mengekstrapolasikan pola tersebut ke masa depan.
2. Pada model kausal, faktor yang diramalkan menunjukkan suatu hubungan sebab-akibat dengan satu atau lebih variabel bebas. Tujuan dari model kausal ini adalah menemukan bentuk hubungan tersebut dan menggunakannya untuk meramalkan nilai mendatang dari variabel tak bebas.

Kedua model di atas memiliki keunggulan tersendiri bergantung pada kondisi tertentu. Model deret berkala ini baik digunakan untuk melakukan peramalan. Sedangkan model kausal dapat digunakan dengan keberhasilan yang lebih besar untuk pengambilan keputusan dan kebijaksanaan.

2.2.4.1 Peramalan Beban

Hamidie (2009) menyebutkan bahwa di bidang tenaga listrik, peramalan biasanya berupa peramalan beban (*load forecasting*) meliputi peramalan beban puncak (MW) dan peramalan kebutuhan energi listrik (*demand forecasting*) (MWh). Peramalan berdasarkan rentang waktu dapat dikategorikan menjadi tiga :

jangka pendek, jangka menengah dan jangka panjang. Hasil dari peramalan ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk membuat suatu rencana pemenuhan ketersediaan tenaga listrik maupun pengembangan penyediaan tenaga listrik yang sesuai dengan kebutuhan untuk beberapa tahun mendatang.

Secara umum, metode peramalan yang sering digunakan oleh pihak penyedia tenaga listrik terbagi menjadi 5, yaitu :

1. Metode analitis (*End Use*), metode ini disusun berdasarkan data analisis penggunaan akhir energi listrik oleh pelanggan
2. Metode ekonometri, metode ini disusun berdasarkan prinsip-prinsip ekonomi dan statistik.
3. Metode *time series*, metode ini disusun berdasarkan hubungan data historis. Dimana hal ini didasarkan pada kenyataan bahwa peristiwa/data yang telah terjadi akan berulang kembali dengan pola yang sama.
4. Metode gabungan, metode ini tersusun atas beberapa metode (biasanya gabungan antara analitis dan ekonometri). Metode ini mempertimbangkan lebih banyak variabel yang dapat mempengaruhi hasil peramalan seperti aktivitas ekonomi, kemajuan teknologi, kebijakan pemerintah, aktivitas sosial dan demografi.
5. Metode regresi, metode ini memberikan asumsi bahwa faktor yang diramalkan menunjukkan suatu hubungan sebab-akibat dengan satu atau lebih variabel bebas. Tujuan dari hal ini adalah menemukan bentuk hubungan tersebut dan menggunakannya untuk meramalkan nilai mendatang dari variabel tak bebas.

2.2.4.2 Prakiraan Pertumbuhan Penduduk

Dalam membuat prakiraan pertumbuhan penduduk, perlu diketahui asumsi nilai presentase pertumbuhan penduduk tiap tahunnya. Nilai presentase pertumbuhan penduduk dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut :

$$R_{(t-1,t)} = \frac{Penduduk_t - Penduduk_{t-1}}{Penduduk_{t-1}} \times 100\%$$

Dimana,

$R_{(t-1,t)}$: presentase pertumbuhan penduduk (%)

$Penduduk_t$: penduduk tahun t (jiwa)

$Penduduk_{t-1}$: penduduk tahun sebelum t (jiwa)

Asumsi nilai presentase pertumbuhan penduduk dijadikan parameter dalam menghitung perkiraan jumlah penduduk di tahun-tahun mendatang. Perkiraan jumlah penduduk di tahun t dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut :

$$Penduduk_t = (Penduduk_{t-1} \times R_{(t-1,t)}) + Penduduk_{t-1}$$

2.2.4.3 Prakiraan Pertumbuhan PDRB

Dalam membuat prakiraan pertumbuhan PDRB (Produk Domestik Regional Bruto), perlu diketahui asumsi nilai presentase pertumbuhan PDRB tiap tahunnya. Nilai presentase pertumbuhan PDRB dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut

$$R_{(t-1,t)} = \frac{PDRB_t - PDRB_{t-1}}{PDRB_{t-1}} \times 100\%$$

Dimana,

$R_{(t-1,t)}$: presentase pertumbuhan PDRB (%)

$PDRB_t$: PDRB tahun t (jiwa)

$PDRB_{t-1}$: PDRB tahun sebelum t (jiwa)

Asumsi nilai presentase pertumbuhan PDRB dijadikan parameter dalam menghitung perkiraan jumlah PDRB di tahun-tahun mendatang. Perkiraan jumlah PDRB di tahun t dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut :

$$PDRB_t = (PDRB_{t-1} \times R_{(t-1,t)}) + PDRB_{t-1}$$