

BAB II

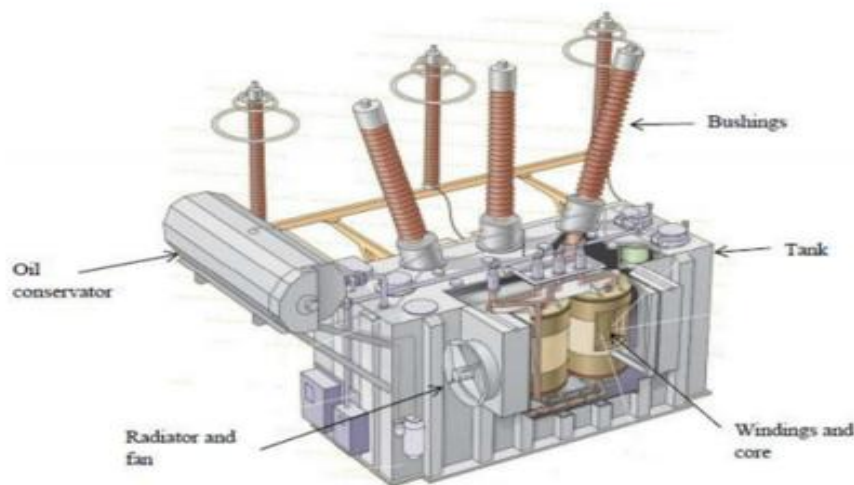
TINJUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator adalah peralatan listrik yang memiliki peran sangat penting dalam sistem tenaga listrik, pada proses penyaluran dan distribusi listrik. Transformator memiliki fungsi utama digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai kebutuhan dengan tidak mengubah nilai dari frekuensinya. Pada transformator terdiri dua buah kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder yang bersifat induktif. Kedua kumparan pada transformator secara elektrik terpisah akan tetapi terhubung secara magnetik dengan melalui jalur reluktansi yang rendah. Pada kumparan primer ketika diberikan arus bolak - balik akan terjadinya fluks bolak - balik pada inti besi. Sehingga kumparan membentuk sirkuit tertutup yang mengakibatkan arus akan mengalir. Fluks yang dihasilkan pada sisi primer pada transformator akan menginduksi tegangan kedua sisi kumparan sehingga menciptakan fluks magnetik pada kumparan sekunder. Pada saat rangkaian pada sisi sekunder diberikan beban maka arus akan mengalir melalui sisi sekunder pada transformator [13].

2.2 Komponen Pada Transformator

Pada transformator terdapat komponen utama yang memiliki peranan penting untuk menunjang kinerja dari transformator terdapat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Komponen Transformator [16]

Terdapat penjelasan mengenai komponen pada gambar 2.1 sebagai berikut :

2.2.1 Kumparan dan inti transformator

Pada transformator terdapat inti besi yang memiliki fungsi media penghantar fluks magnetik yang dihasilkan oleh arus listrik dengan mengalir melalui kumparan. Pada inti besi terdapat lembaran - lembaran tipis yang dilapisi isolasi berfungsi untuk mengurangi panas yang di timbulkan dari arus eddy. Sedangkan kumparan pada transformator yang terbuat dari kawat yang dililit secara spiral pada inti besi. Pada kumparan untuk mencegah terjadinya hubungan langsung antara inti besi diberikan lapisan kawat dengan bahan isolator padat [17].

2.2.2 Bushing Transformator

Bushing merupakan komponen yang berfungsi sebagai penghubung antara kumparan transformator dengan sistem jaringan listrik. Bushing sudah dirancang agar dapat menghantarkan arus listrik dengan tetap memberikan isolasi pada bagian yang bertegangan tinggi. Bushing sendiri terbuat dari bahan keramik karena dapat menahan dari api, suhu, tegangan serta yang memiliki nilai arus yang tinggi [17].

2.2.3 Tangki dan Tangki Konservator

Tangki transformator merupakan sebagai tempat utama untuk menampung minyak isolasi yang digunakan untuk pendinginan transformator. Sedangkan pada tangki konservator sebagai tempat untuk menampung minyak ketika mengalami pemuaian [17].

2.2.4 Minyak Transformator

Pada transformator terdapat minyak transformator yang digunakan untuk pendingin pada transformator dimana minyak transformator sebagai media pendinginnya. Minyak transformator digunakan untuk menjaga suhu transformator agar tidak terjadinya kenaikan suhu. Sehingga minyak transformator digunakan sebagai media pendinginan untuk mencegah terjadinya kerusakan pada transformator terutama pada kumparannya yang diakibatkan dari kenaikan suhu [6].

2.2.5 Pendingin Transformator

Sistem pendingin pada transformator memiliki fungsi sebagai mengalirkan panas yang dihasilkan oleh inti besi dan kumparan untuk dialirkan keluar dapat

mencegah terjadinya kerusakan pada isolasi didalam transformator. Media yang digunakan pada sistem pendinginan transformator berupa minyak air dan udara [18]. Pada transformator terdapat jenis - jenis sistem pendingin yang digunakan oleh transformator sebagai berikut [13].

a. *Oil Natural Air Natural* (ONAN)

Sistem pendinginan transformator *Oil Natural Air Natural* (ONAN) bekerja secara alami tidak adanya bantuan alat mekanis. Prosesnya pada saat pelapasan panas dari transformator dengan memanfaatkan konveksi alami pada minyak pendingin serta memanfaatkan aliran udara sekitarnya. Pada sistem pendinginannya terdapat sirip - sirip logam pada transformator berfungsi untuk melepaskan panas ke udara.

b. *Oil Natural Air Forced* (ONAF)

Pada sistem pendingin *Oil Natural Air Forced* (ONAF) menggunakan sirkulasi minyak alami dengan dibantu kipas untuk menghembuskan udara secara paksa di sirip transformator. Sistem pendingin jenis ONAF banyak digunakan pada transformator distribusi yang memiliki kapasitas yang besar.

c. *Oil Directed Air Forced* (ODAF)

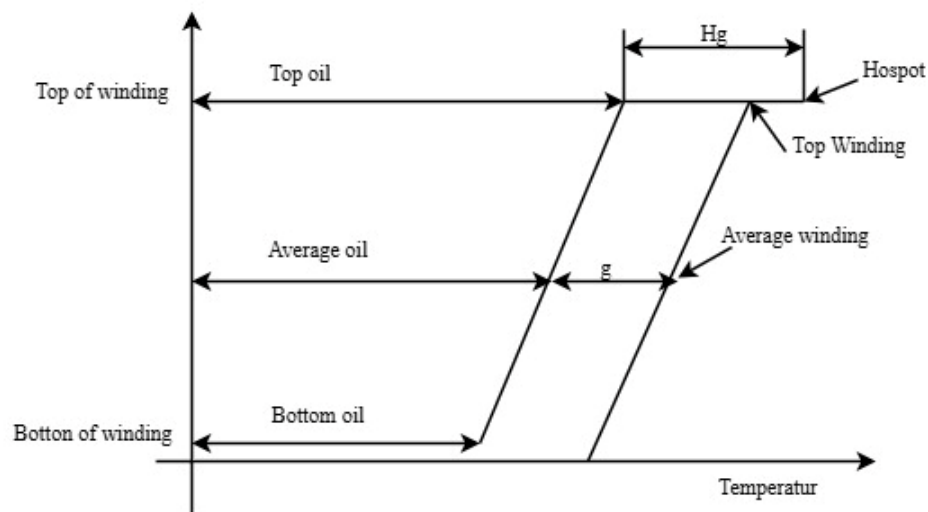
Pada sistem pendinginan *Oil Directed Air Forced* (ODAF) sistem pendingin menggunakan pompa untuk mengarahkan sirkulasi minyak secara paksa pada bagian transformator yang panas. Serta terdapat kipas untuk mengarahkan udara ke radiator atau sirip pada bagian pendinginan transformator. Pada pendingin jenis tersebut banyak digunakan pada transformator daya dengan kapasitas yang besar untuk memberikan pendinginan yang efektif pada transformator.

2.3 Suhu dan Pembebanan Transformator

Suhu pada transformator mengalami peningkatan dipengaruhi oleh pembebanan yang digunakan serta jenis dari sistem pendingin yang digunakan dan suhu lingkungan yang dapat mempengaruhi suhu dari transformator. Ketika suhu meningkat secara berlebih dapat meningkatkan kerusakan material isolasi berbahan kertas pada transformator yang melapisi bagian dalamnya. Pembebanan berlebih dapat meningkatkan suhu di area belitan sering disebut sebagai *temperatur hotspot*.

Pada saat suhu minyak meningkat secara terus-menerus dapat menurunkan kualitas isolasi pada transformator. Sehingga dapat mengakibatkan kerusakan bagian dalam transformator serta dapat mengakibatkan penurunan performanya [19].

Pembebanan yang diberikan pada transformator secara berlebih dapat menyebabkan terjadinya overhiting yang dapat menurunkan umur pemakaian dari transformator. Sehingga dengan menjaga suhu transformator dalam batas aman dan tidak memberikan beban berlebih pada transformator untuk meningkatkan umur transformator. Tingkatan pembebanan pada transformator dapat mempengaruhi kenaikan suhu di dalamnya. Sehingga dapat mengetahui kenaikan pada transformator dengan pendekatan diagram termal pada gambar 2.2 [2].



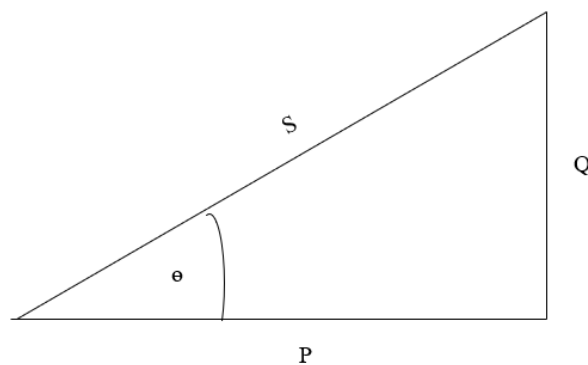
Gambar 2. 2 Diagram Termal Transformator [20]

Minyak bagian atas (*Top oil*) merupakan bagian minyak transformator yang berada diatas atau tertinggi pada sistem pendingin didalam tangki. Minyak bagian atas memiliki suhu yang lebih tinggi karena panas yang dihasilkan pada saat sirkulasi minyak mengakibatkan panas bergerak kearah atas. Sedangkan minyak bagian bawah (*botton oil*) merupakan minyak bagian bawah yang umumnya memiliki suhu yang paling rendah [1], [20]. Pada gambar 2.2 Terdapat rata rata suhu minyak (*average oil*) merupakan perbandingan dari suhu minyak atas dan suhu minyak bawah. Selanjutnya pada gambar 2.2 *temperatur hospot* yang merupakan titik suhu terpanas didalam transformator yang terletak pada kumparan. Titik ini sangat penting ketika suhunya terlalu tinggi dapat mengakibatkan kerusakan isolasi yang

dapat mempercepat penurunan umur transformator. Berdasarkan standar PLN dan IEC *temperature hotspot* sebaiknya tidak lebih dari 98 °C. Kenaikannya dipengaruhi oleh pembebanan dengan presentase yang tinggi pada transformator. Pada gambar 2.2 g merupakan simbol digunakan untuk menunjukkan suhu rata rata minyak. Sedangkan pada simbol Hg merupakan penunjuk suhu titik *hotspot* berada di bagian atas kumparan [1], [20]. Nilai H merupakan faktor koreksi untuk *hotspot*, berdasarkan standar IEC 60076-7 untuk transformator distribusi bernilai 1,1 sedangkan untuk transformator daya bernilai 1,3 [21], [22].

2.4 Segitiga Daya

Daya dapat diartikan sebagai jumlah energi yang digunakan untuk melakukan usaha atau kerja. Pada sistem tenaga listrik daya merupakan untuk menunjukkan seberapa besar energi listrik yang digunakan dalam proses kerja. Satuan daya yang digunakan pada daya listrik yaitu Watt. Pada daya listrik pada sistem AC terbagi menjadi tiga jenis yaitu daya aktif, daya reaktif dan daya semu. Untuk menggambarkan hubungan pada ketiga daya tersebut dengan digunakannya segitiga daya yang terdapat pada gambar 2.2 [23].



Gambar 2. 3 Segitiga Daya [23]

Adapun pengertian ketiga jenis daya listrik pada sistem AC sebagai berikut ;

2.4.1 Daya aktif

Daya aktif bisa disebut sebagai daya nyata, karena merupakan jenis daya dapat menghasilkan energi nyata seperti pada energi panas, gerak maupun cahaya. Daya aktif dapat digunakan secara langsung pada peralatan listrik yang dirubah dalam bentuk kerja. Persamaan 2.1 merupakan yang digunakan daya aktif dengan satuan Watt sebagai berikut [23].

$$P = V \cdot I \cdot \cos \theta \quad (2.1)$$

Keterangan :

P = Daya aktif

V = Tegangan

I = Arus

$\cos \theta$ = Faktor daya

2.4.2 Daya reaktif

Daya aktif merupakan bagian dari daya listrik yang digunakan untuk membangkitkan medan magnet di perangkat listrik. Pada medan magnet tersebut kemudian menghasilkan fluks magnetik yang terdapat pada peralatan seperti transformator, motor listrik dan lain - lain. Daya reaktif tersebut tidak menghasilkan daya nyata akan tetapi sangat penting pada sistem listrik. Pada daya reaktif terdapat pada persamaan 2.2 dengan satuan yang digunakan VAR sebagai berikut [23].

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \theta \quad (2.2)$$

Keterangan :

Q = Daya reaktif

V = Tegangan

I = Arus

2.4.3 Daya semu

Daya semu merupakan total dari daya pada sistem listrik AC yang memiliki satuan VA. Daya reaktif merukan hasil dari perkalian pada tegangan dengan arus atau hasil penjumlahan daya aktif dengan daya reaktif menggunakan prinsip trigonometri [23].

$$S = V \cdot I \quad (2.3)$$

Keterangan :

S = Daya semu

V = Tegangan

I = Arus

2.5 Perhitungan Usia Pemakaian Transformator

Untuk mengetahui sisa usia pemakaian transformator akibat dari pengaruh

pembeban dengan melakukan perhitungan. Langkah awal pada perhitungan dengan mencari nilai daya semu dengan menggunakan persamaan 2.4. Pada perhitungan daya semu didapatkan dengan menggunakan prinsip trigonometri pada segitiga daya sebagai berikut [14], [24].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.4)$$

Keterangan :

S = Daya semu

P = Daya aktif

Q = Daya reaktif

Rasio pembebanan adalah perbandingan antara beban yang diterima oleh transformator dengan kapasitas nominalnya. Pada rasio pembebanan dapat digunakan dengan menggunakan persamaan 2.5 sebagai berikut [14], [24].

$$K = \frac{S}{S_r} \quad (2.5)$$

Keterangan :

S = Daya semu

S_r = Kapasitas transformator

Rugi tembaga merupakan kerugian energi yang terjadi akibat arus pembebanan melalui belitan pada transformator. Pada transformator terdapat dua jenis utama yaitu rugi inti dan rugi tembaga. Rugi inti timbul akibat adanya dua fenomena yaitu rugi hysteresis dan rugi arus eddy. Rugi hysteresis muncul karena fluks magnet yang berubah - ubah secara bolak - balik pada inti besi. Sedangkan arus eddy terjadi akibat timbulnya arus kecil yang berputar didalam inti besi ketika terjadinya perubahan fluks magnet. Besarnya rugi inti didapatkan pada saat pengujian tidak berbeban. Pada rugi tembaga berbanding lurus dengan pembebanan yang dimana pada saat pembebanan yang semakin besar nilai rugi tembaga juga akan semakin besar. Pada pencarian rugi - rugi tembaga dapat menggunakan persamaan 2.6 sebagai berikut [22].

$$P_{cu} = I_p^2 \times R_1 + I_s^2 \times R_2 \quad (2.6)$$

Keterangan :

P_{cu} = Rugi tembaga

I_p = Arus primer

I_s = Arus sekunder

R_1 = Resistansi primer

R_2 = Resistansi sekunder

Sehingga dari penurunan rumus pada persamaan 2.6 perhitungan yang digunakan menggunakan persamaan 2.7 mencari rugi tembaga pada saat pembebanan secara nyata sebagai berikut [14], [25].

$$Pt_2 = K^2 \times Pt_1 \quad (2.7)$$

Keterangan :

Pt_2 = Rugi tembaga beban aktual Watt

K^2 = Rasio pembebanan pada transformator

Pt_1 = Rugi tembaga beban penuh (*Rated load Losses*) Watt

Perbandingan rugi pada transformator merupakan ukuran yang menunjukkan besaran kerugian akibat dari arus beban (rugi tembaga) dibandingkan dengan transformator tidak berbeban. Sehingga dapat menggunakan perhitungan dengan persamaan 2.8 sebagai berikut [14], [25].

$$d = \frac{\text{Rugi tembaga } (Pt_2)}{\text{Rugi beban nol}} \quad (2.8)$$

Keterangan :

d = Perbandingan rugi transformator

Kenaikan suhu minyak atas pada transformator berbanding lurus dengan suhu minyak atas pada saat kondisi beban tertentu. Nilainya dikalikan dengan rasio total kerugian dipangkatkan dengan konstanta x . kenaikan suhu minyak atas ($\Delta\theta_{br}$) pada sistem pendingin ONAN, ONAF dan ODAF yaitu 50 °C berdasarkan spesifikasi pada transformator. Sehingga perhitungan mencari nilai kenaikan suhu minyak atas dengan menggunakan persamaan 2.9 berdasarkan IEC 60076-7 sebagai berikut [8], [14], [19], [26].

$$\Delta\theta_b = \Delta\theta_{br} \left(\frac{1 + dk^2}{1 + d} \right)^x \quad (2.9)$$

Keterangan :

$\Delta\theta_b$ = Kenaikan suhu minyak atas °C

$\Delta\theta_{br}$ = Kenaikan *temperatur top oil* (°C)

d = Perbandingan rugi transformator

k = Rasio pembebanan

x = 0,8 (ONAN/ONAF), 1,0 (ODAF).

Selisih suhu minyak dengan kumparan merupakan perbedaan antara suhu minyak transformator dengan suhu pada kumparan transformator. Sehingga perhitungannya dengan menggunakan pada persamaan 2.10 berdasarkan IEC 60076-7 sebagai berikut [8], [14], [19], [26].

$$\Delta\theta_{wo} = \Delta\theta_k - \Delta\theta_m \quad (2.10)$$

Keterangan :

$\Delta\theta_{wo}$ = Selisih antara suhu pada minyak dengan kumparan (°C)

$\Delta\theta_k$ = Kenaikan suhu kumparan (°C)

$\Delta\theta_m$ = Kenaikan suhu minyak (°C)

Kenaikan suhu *hospot* pada transformator dapat dihitung dengan mempertimbangkan kenaikan suhu minyak atas ($\Delta\theta_{br}$) berdasarkan spesifikasi sebesar 50 °C, serta ditambahkan dengan hasil dari perkalian faktor *hospot* dengan selisih rata - rata suhu kumparan dan minyak. Sehingga perhitungan mencari kenaikan suhu kenaikan *hospot* dengan menggunakan persamaan 2.11 berdasarkan IEC 60076-7 sebagai berikut [8], [14], [19], [26].

$$\Delta\theta_{cr} = \Delta\theta_{br} + 1,3 \Delta\theta_{wo} \quad (2.11)$$

Keterangan :

$\Delta\theta_{cr}$ = Kenaikan *temperatur hotspot* (°C)

$\Delta\theta_{br}$ = Kenaikan suhu minyak atas (°C)

$\Delta\theta_{wo}$ = Selisih rata-rata suhu pada minyak dengan kumparan

Selisih *temperatur hospot* terhadap suhu minyak atas didapatkan pengurangan antara kenaikan *temperatur hospot* dengan kenaikan suhu minyak atas. Hasilkan pengurangan dikalikan dengan rasio pembebanan pada transformator dipangkatkan dengan konstanta y , sesuai dengan jenis pendinginnya. Sehingga perhitungan mencari nilai ($\Delta\theta_{td}$) dengan persamaan 2.12 berdasarkan IEC 60076-7 sebagai berikut [8], [14], [19], [26].

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})k^{2y} \quad (2.12)$$

Keterangan :

$\Delta\theta_{td}$ = Selisih kenaikan *temperatur hotspot* dengan *top oil* (°C)

$\Delta\theta_{cr}$ = Kenaikan *temperatur hotspot* (°C)

- $\Delta\theta_{br}$ = Kenaikan suhu minyak atas ($^{\circ}\text{C}$)
 k = Rasio pembebanan
 y = 1,3 (ONAN/ONAF), 2 (ODAF)

Temperatur hospot merupakan titik paling kritis pada transformator, karena suhu yang berlebih dapat menyebabkan kerusakan pada isolasi dan mempercepat penurunan umur transformator. Berdasarkan standar IEC yang dipakai oleh PLN *temperatur hospot* tidak melebihi dari 98°C . Sehingga mencari nilai dari *Temperatur hospot* dengan menggunakan persamaan 2.13 berdasarkan IEC 60076-7 sebagai berikut [8], [14], [19], [26].

$$\theta_c = \theta_a + \Delta\theta_b + \Delta\theta_{td} \quad (2.13)$$

Keterangan :

- θ_c = *Temperatur hotspot* ($^{\circ}\text{C}$)
 θ_a = Suhu lingkungan sekitar ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_b$ = Kenaikan suhu minyak ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_{td}$ = Selisih *temperatur hotspot* dengan *top oil* ($^{\circ}\text{C}$)

Laju penuaan thermal merupakan ukuran seberapa cepat proses penuaan isolasi transformator terjadi akibat suhu tinggi, yang terutama disebabkan oleh panas dari pembebanan. Parameter ini menjadi indikator penting untuk memperkirakan umur transformator. Laju penuaan thermal dipengaruhi oleh *temperatur hospot* merupakan titik terpanas didalam transformator. Sehingga perhitungan laju penuaan termal dengan menggunakan persamaan 2.14 berdasarkan IEC 60076-7 sebagai berikut [6], [8], [14].

$$V = 10^{\theta_c - 98^{\circ}\text{C}/19,93} \quad (2.14)$$

Keterangan :

- V = Laju Penuaan termal relative
 θ_c = *Temperatur hotspot* ($^{\circ}\text{C}$)

Susut pada transformator sangat dipengaruhi oleh peningkatan pembebanan yang diterima. Semakin tinggi beban yang diterapkan transformator semakin besar susut yang terjadi. Sebaliknya, ketika pembebanan menurun nilai susut transformator akan mengecil. Sehingga mencari nilai dari susut transformator dengan menggunakan persamaan 2.15 berdasarkan IEC 60076-7 sebagai berikut [6], [8], [14].

$$L = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N V \quad (2.15)$$

Keterangan :

L = Laju umur relatif (susut umur)

t = Jumlah dari tiap-tiap interval waktu

N = Jumlah total interval waktu ekivalen

Berdasarkan standar *International Electrotechnical Commission* (IEC) *temperatur hotspot* yang di izinkan sebesar 98 °C serta usia maksimal selama 30 tahun digunakan sebagai umur dasar transformator [6], [7]. Untuk mengetahui sisa umur transformator digunakan persamaan 2.16 sebagai berikut [19], [26].

$$n = \left(\frac{8760 - (L \times 365)}{8760} \right) \times (30 - \text{Lama masa pakai}) \quad (2.16)$$

Keterangan :

n = Sisa umur transformator (tahun)

Umur dasar = Umur dasar transformator (30 tahun)

Lama masa Pakai = Penggunaan transformator dari waktu ke waktu (tahun)

Susut Umur (L) = Laju umur relative

365 = Jumlah hari dalam satu tahun

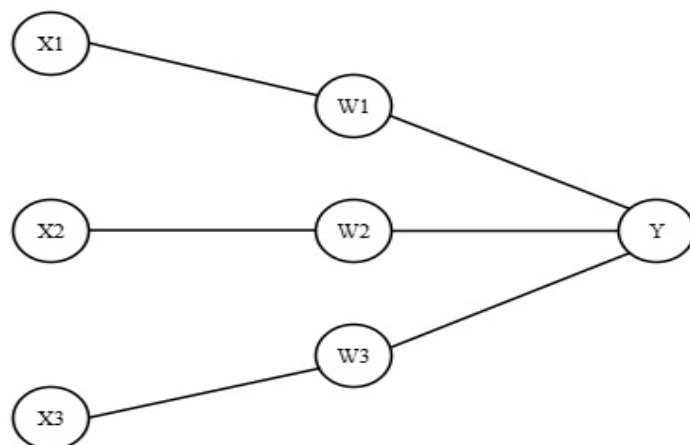
8760 = Merupakan konversi pertahun dalam jam

2.6 Jaringan saraf Tiruan

Jaringan syaraf tiruan merupakan salah satu dari kecerdasan buatan dengan meniru konsep kerja jaringan syaraf biologis pada manusia Jaringan syaraf tiruan dapat melakukan pengolahan data dan informasi yang cara kerjanya meyerupai mekanisme sistem syaraf pada manusia. Dalam penerapannya jaringan syaraf tiruan digunakan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan dengan melalui proses pelatihan (*training*). Pada proses pelatihannya melibatkan data masukan dan data keluran yang dioleh secara simultan. Data masukan berfungsi sebagai data pelatih, sedangkan pada keluarannya merupakan *output* yang dihasilkan setelah proses pelatihan. Jaringan syaraf tiruan dikembangkan dengan prinsip kerjanya menyerupai pola pikir manusai dengan elemen dasarnya berupa neuron. Pada jaringan syaraf tiruan sinyal - sinyal yang mengalir di antara neuron dihubungkan melalui bobot tertentu. Bobot - bobot ini berfungsi untuk mengatur seberapa besar

pengaruh sinyal terhadap neuron berikut berdasarkan hasil penjumlahan masukan yang diterima. Nilai bobot tersebut dapat menentukan keluaran akhir pada jaringannya. Secara umum jaringan syaraf tiruan dibangun berdasarkan tiga komponen utama sebagai berikut [15] :

1. Arsitektur jaringan, merupakan pola hubungan antara neuron dalam jaringan syaraf tiruan.
2. Metode penyesuaian bobot merupakan teknik yang digunakan untuk menentukan nilai bobot pada setiap hubungan antara neuron.
3. Fungsi aktivasi merupakan matematis yang digunakan untuk menentukan keluaran neuron, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4. Simbol Y mempresentasikan neuron yang menerima masukan berupa X1, X2 dan X3, masing masing dihubungkan dengan W1, W2 dan W3. Penjumlahan dari setiap implus yang diterima neuron tersebut dapat dinyatakan melalui persamaan 2.17 sebagai berikut [15].



Gambar 2. 4 Contoh Fungsi Aktivasi [33]

Pada gambar 2.4, simbol Y mempresentasikan neuron yang menerima masukan berupa X1, X2 dan X3, masing masing dihubungkan dengan W1, W2 dan W3. Penjumlahan dari setiap implus yang diterima neuron tersebut dapat dinyatakan melalui persamaan 2.17 sebagai berikut [15]. Penjumlahan dari setiap implus yang diterima neuron tersebut dapat dinyatakan melalui persamaan 2.17 sebagai berikut [15].

$$\text{net} = x_1w_1 + x_2w_2 + x_3w_3 \quad (2.17)$$

Sedangkan pada neuron Y, nilai hasil penjumlahan implus yang diterima akan diproses dengan melalui aktifasi dengan persamaan 2.18 sebagai berikut [15].

$$y = f(\text{net}) \quad (2.18)$$

Pada jaringan syaraf tiruan, neuron berperan penting dalam memproses informasi, baik pada tahap masukan maupun tahap keluaran. Setiap neuron diatur dalam kelompok yang disebut dengan lapisan (*layer*), dimana beberapa neuron yang saling berhubungan membentuk struktur jaringan. Lapisan dalam jaringan syaraf tiruan umumnya dibagi menjadi tiga jenis [15] :

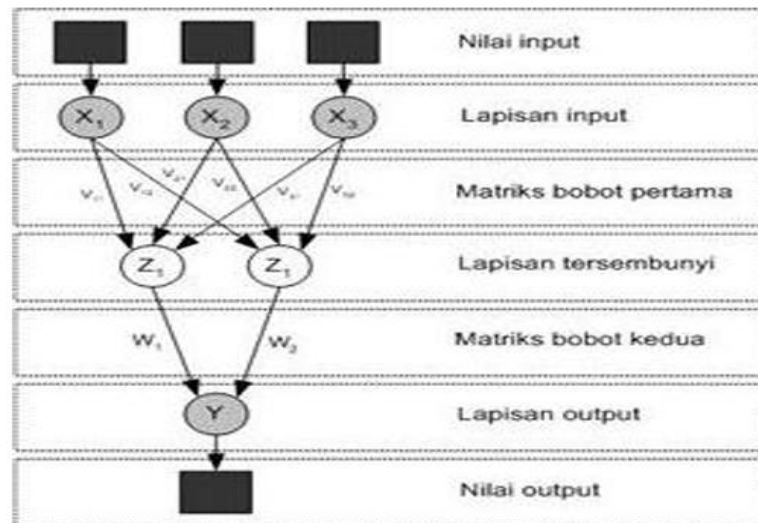
1. Lapisan masukan berfungsi menerima data dari luar sistem, menggambarkan permasalahan yang akan diselesaikan.
2. Lapisan tersembunyi merupakan bagian yang tidak terlihat langsung hasilnya, namun sangat penting karena di sinilah proses pengolahan data terjadi sebelum diteruskan ketahap berikutnya.
3. Lapisan keluaran merupakan hasil *output* akhir dari jaringan.

2.7 Arsitektur Jaringan Saraf Tiruan

Arsitektur jaringan syaraf tiruan merupakan bentuk pemodelan struktur yang meniru cara kerja jaringan syaraf biologis pada manusia. Dalam jaringan syaraf tiruan, terdapat beberapa jenis struktur yang digunakan sebagai berikut [15].

2.7.1 Jaringan menggunakan lapisan tunggal

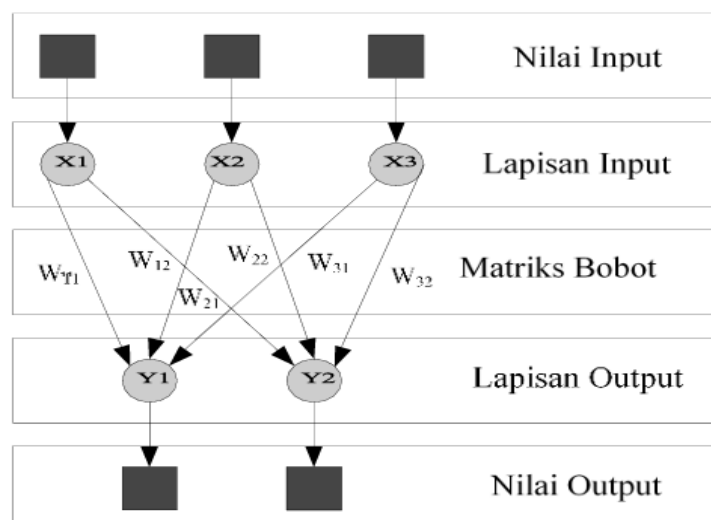
Jaringan lapisan tunggal adalah jenis jaringan syaraf tiruan yang hanya memiliki satu lapisan neuron antara masukan dan keluaran. Pada arsitektur ini, data masukan dapat langsung diproses menghasilkan keluran tanpa melalui lapisan tersembunyi. Pada gambar 2.5 merupakan contoh jaringan dengan lapisan Tunggal, di mana pada setiap neuron masukan x_1 , x_2 dan x_3 terhubung langsung ke neuron keluaran y_1 dan y_2 . Jaringan dengan lapisan tunggal umumnya digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang bersifat sederhana dan linear.



Gambar 2. 5 Jaringan menggunakan lapisan tunggal [15]

2.7.2 Jaringan menggunakan lapisan banyak

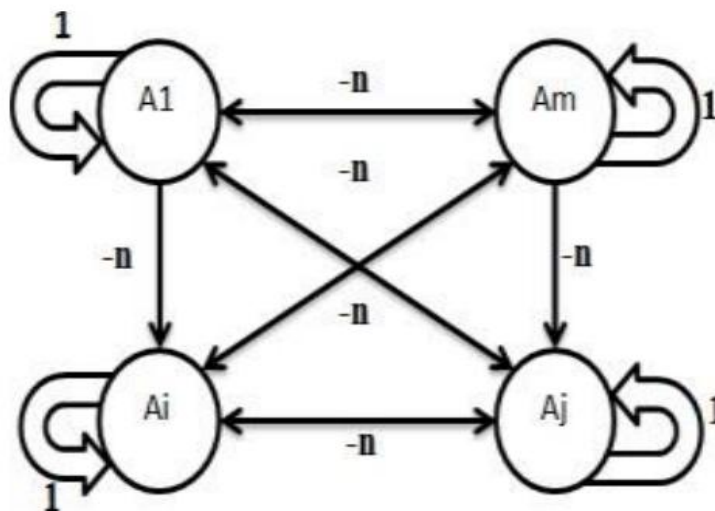
Jaringan lapisan banyak memiliki satu atau lebih lapisan tersembunyi di antara lapisan masukan dan keluaran. Gambar 2.6 menunjukkan contoh arsitektur jaringan dengan lapisan banyak [15]. Lapisan tersembunyi ini memungkinkan jaringan untuk menangani permasalahan yang lebih kompleks dan non linear. Dibandingkan dengan jaringan lapisan tunggal, jaringan berlapis banyak mampu mempelajari pola - pola yang lebih rumit dan menghasilkan solusi yang lebih akurat terhadap permasalahan yang kompleks.



Gambar 2. 6 Jaringan menggunakan lapisan Banyak [15]

2.7.3 Jaringan menggunakan lapisan kompetitif

Pada Jaringan saraf kompetitif ditunjukkan pada gambar 2.7, neuron - neuron dalam lapisan keluaran berkompetisi untuk merespon masukan yang diberikan. Pada arsitektur ini tidak semua neuronnya diaktifkan secara bersamaan hanya neuron yang menang dalam kompetisi akan memberikan keluaran. Jaringan dengan lapisan kompetitif lebih sesuai digunakan untuk proses pengelompokan data atau segmentasi berdasarkan pola tertentu dari masukan yang tersedia [15].



Gambar 2. 7 Jaringan menggunakan lapisan Kompetitif [15]

2.8 Algoritma Pembelajaran

Pada jaringan syaraf tiruan terdapat beberapa metode pembelajaran dan pelatihan yang dapat digunakan sebagai berikut [27].

2.8.1 Pembelajaran terawasi

Pada pembelajaran terawasi, jaringan dilatih menggunakan himpunan data yang telah diketahui, baik data masukan maupun keluaran yang diharapkan. Proses pembelajarannya dilakukan dengan menyesuaikan bobot jaringan berdasarkan selisih (*error*) antara keluaran aktual dan keluaran target. Dengan cara tersebut jaringan syaraf tiruan dapat menghasilkan keluaran yang mendekati nilai sebenarnya.

2.8.2 Pembelajaran Tidak Terawasi

Pada pembelajaran tidak terawasi, jaringan syaraf tiruan mengatur bobot sendiri tanpa menggunakan data keluaran sebagai referensi. Pembelajaran ini

bertujuan untuk mengenali pola atau hubungan yang tersembunyi dalam data masukan. Struktur jaringan pada metode ini dibentuk berdasarkan kesamaan atau korelasi antar pola data yang diamati.

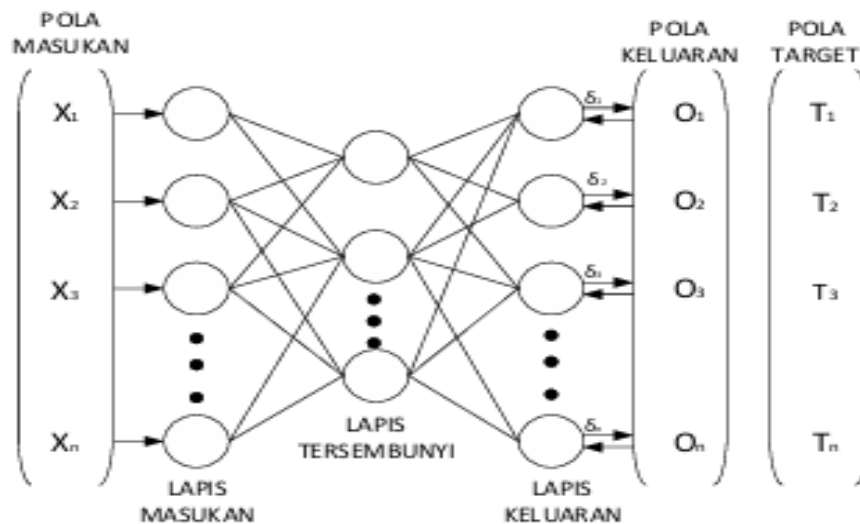
2.8.3 Gabungan pembelajaran terawasi dan tidak terawasi

Metode gabungan ini mengkombinasi prinsip dari pembelajaran terawasi dan tidak terawasi. Dalam pendekatan ini, sebagai bobot jaringan diatur menggunakan data keluaran yang diketahui (terawasi), sementara sebagai lainnya diperbarui berdasarkan pola dari data masukan tanpa panduan keluaran (tidak terawasi). Pendekatan gabungan ini memungkinkan jaringan memanfaatkan kelebihan dan kedua jenis metode pembelajaran.

2.9 *Backpropagation*

Backpropagation adalah algoritma yang digunakan jaringan syaraf tiruan untuk mengoptimalkan kinerja dari jaringan. Algoritma *backpropagation* termasuk kedalam jenis pelatihan terbimbing (*supervised learning*). Pada proses pembelajaran dilakukan dengan cara menyesuaikan bobot untuk meminimalkan kesalahan antara hasil keluaran dari jaringan syaraf tiruan dan target yang diharapkan. *Backpropagation* memiliki fungsi utama dengan melakukan pengoptimalan bobot pada jaringan syaraf tiruan dengan membandingkan hasil keluaran aktual dengan target seharusnya, dengan memperbaiki bobot berdasarkan besar kecilnya *error* yang terjadi. Proses tersebut bertujuan untuk memperkecil kesalahan, sehingga jaringan dapat memprediksi yang lebih akurat [2]. Gambar 2.8 merupakan arsitektur dasar dari jaringan *backpropagation*. Pada arsitektur tersebut, jaringan terdiri dari 3 lapis utama yaitu lapisan masukan, lapisan tersembunyi dan lapisan keluaran. Lapisan tersembunyi dalam arsitektur *backpropagation* berperan penting dalam memperbarui nilai bobot untuk memperbaiki kinerja jaringan. Pada proses kerja jaringan *backpropagation* terdiri dari dua fase utama fase maju dan fase mundur. Pada fase maju data masukan diteruskan dari lapisan masukan ke lapisan tersembunyi, kemudian menuju lapisan keluaran. Pada setiap neuron, nilai masukan dikalikan dengan bobot dan ditambahkan dengan bias. Sedangkan fase mundur dilakukan koreksi terhadap bobot berdasarkan *error* yang dihasilkan pada keluaran. Jika keluaran yang dihasilkan berbeda dengan target, maka bobot di

sepanjang jaringan diperbaiki secara mundur dari lapisan keluaran ke lapisan masukan. Pada jaringan *backpropagation* menghasilkan tingkat kesalahan yang kecil, sehingga lebih efektif menyelesaikan masalah kompleks dan non linear [2], [3].



Gambar 2. 8 Jaringan Backpropagation[2]

2.10 Fungsi Aktivasi

Dalam jaringan syaraf tiruan salah satu komponen penting adalah fungsi aktivasi yang berperan dalam menghasilkan keluaran pada setiap neuron. Fungsi aktivasi menerima masukan berupa nilai net, yaitu kombinasi linear antara nilai masukan dan bobot. Secara matematis nilai net dinyatakan $\sum xiwi$ dimana xi adalah nilai masukan dan wi merupakan bobot yang terhubung pada neuron. Dengan demikian fungsi aktivasi dapat ditulis $f(net) = \sum(xiwi)$. Fungsi aktivasi bertugas memproses hasil dari penjumlahan perkalian antara masukan dan bobot tersebut menghasilkan keluaran pada neuron. Melalui fungsi aktivasi, jaringan syaraf tiruan mampu menentukan bagaimana sinyal akan diteruskan ke neuron berikutnya. Adapun beberapa jenis aktivasi yang umum digunakan sebagai berikut [28].

2.10.1 Fungsi Thershold (batas ambang)

Fungsi threshold atau fungsi batas ambang merupakan salah satu fungsi aktivasi sederhana yang memiliki karakter khusus. Fungsi ini menghasilkan keluaran bernilai 1 apabila nilai (x) lebih besar atau sama dengan nilai ambang tertentu (a). Sebaliknya fungsi ini akan menghasilkan keluaran 0 jika nilai masukan

lebih kecil dari nilai ambangnya. Secara matematis fungsi threshold dapat dinyatakan sebagai berikut [28].

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \geq a \\ 0 & \text{jika } x < a \end{cases} \quad (2.19)$$

Dalam beberapa implementasi fungsi threshold juga dapat menggunakan keluaran berupa nilai -1 dan 1, bukan 0 dan 1. Fungsi ini dikenal sebagai threshold bipolar, yang ditulis dalam bentuk sebagai berikut [28].

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \geq a \\ 0 & \text{jika } x < a \end{cases} \quad (2.20)$$

Fungsi threshold bipolar digunakan pada jaringan syaraf tiruan pada saat situasi diperlukan representasi keluaran negatif dan positif secara eksplisit.

2.10.2 Fungsi Simoid

Fungsi sigmoid merupakan salah satu aktivasi yang menghasilkan keluaran dengan rentang nilai antara 0 dan 1. Fungsi ini banyak digunakan karena keluarannya yang memiliki kemudahan dalam menghitung turunannya yang sangat bermanfaat pada saat proses pelatihan jaringan syaraf tiruan. Fungsi sigmoid secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut [28].

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2.21)$$

Turunan dari fungsi simoid yang sering digunakan dalam proses pelatihan algoritma backpropagation dengan persamaan sebagai berikut [28].

$$f'(x) = f(x)(1 - f(x)) \quad (2.22)$$

2.10.3 Fungsi Idenstitas

Fungsi identitas adalah fungsi aktifasi paling sederhana, di mana nilai keluaran sama persis dengan nilai masukannya. Fungsi identitas sangat cocok digunakan apabila jaringan syaraf tiruan memerlukan keluaran dalam bentuk bilangan riil tanpa batasan pada interval tertentu, seperti [0,1] atau [-1,1]. Fungsi identitas secara matematis dapat ditulis sebagai berikut [28].

$$f(x) = x \quad (2.23)$$

2.11 Algoritma Backpropagation

Algoritma *backpropagation* merupakan sebuah metode yang digunakan dalam sistem jaringan syaraf tiruan untuk mencapai kesetimbangan bobot yang

optimal. Kesetimbangan ini memungkinkan jaringan untuk mengenali pola dari data pelatihan serta menghasilkan keluaran yang akurat terhadap pola tersebut. Dalam penerapannya algoritma *backpropagation* memiliki beberapa tahapan utama sebagai berikut [29].

2.11.1 Bagian Perambatan Maju

Pada bagian perambatan maju terdapat langkah - langkah awal dengan menentukan bobot awal dengan nilai kecil secara acak. Selanjutnya menetapkan nilai *learning rate* (α), Batasan toleransi *error* dan jumlah maksimum iterasi. Komputasi lapisan tersembunyi dengan menjumlahkan sinyal masukan dengan persamaan sebagai berikut.

$$z_{netj} = W_{0j} + \sum_{i=1}^n x_i w_{ij} \quad (2.24)$$

Hasil komputasi tersebut kemudian diproses melalui fungsi aktivasi sigmoid untuk memperoleh keluaran lapisan tersembunyi dengan persamaan sebagai berikut.

$$z_j = f(z_{netj}) = \frac{1}{1 + e^{-z_{netj}}} \quad (2.25)$$

Selanjutnya, dilakukan komputasi pada lapisan keluaran dengan menjumlahkan sinyal dari lapisan tersembunyi yang telah dikalikan bobotnya sebagai berikut.

$$Y_{netk} = V_{0j} + \sum_{i=1}^p z_i v_{jk} \quad (2.26)$$

Keluaran akhir kemudian dihitung menggunakan fungsi aktivasi sigmoid sebagai berikut.

$$Y_k = f(Y_{netk}) = \frac{1}{1 + e^{-Y_{netk}}} \quad (2.27)$$

Setelah proses perambatan maju selesai, tahap berikutnya adalah melakukan perambatan balik.

2.11.2 Bagian Perambatan Balik

Pada tahap perambatan balik, dilakukan perhitungan kesalahan pada unit keluaran berdasarkan perbedaan antara target dan keluaran aktual dengan persamaan sebagai berikut.

$$\delta_k = (t_k - y_k)f'(Y - net_k) = (t_k - y_k)(y_k(1 - y_k)) \quad (2.28)$$

Kemudian, dilakukan penyesuaian bobot antara lapisan tersembunyi dan lapisan keluaran dengan persamaan sebagai berikut

$$\Delta v_{jk} = \alpha \delta_k z_j \quad (2.29)$$

Penyesuaian bias pada lapisan keluaran dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta v_{0k} = \alpha \delta_k \quad (2.30)$$

Untuk unit tersembunyi, akumulasi sinyal kesalahan dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\delta_{\text{net}_j} = \sum_{i=1}^p \delta_k v_{jk} \quad (2.31)$$

Kemudian dihitung nilai kesalahan aktual pada lapisan tersembunyi dengan persamaan sebagai berikut.

$$\delta_j = \delta_{\text{net}_j} f'(z_{\text{net}_j}) = \delta_{\text{net}_j} (z_j (1 - z_j)) \quad (2.32)$$

Selanjutnya, bobot antara lapisan masukan dan lapisan tersembunyi disesuaikan dengan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta w_{ij} = \alpha \delta_k x_i \quad (2.33)$$

Serta perbaikan bias pada lapisan tersembunyi dilakukan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta w_{0j} = \alpha \delta_j \quad (2.34)$$

2.11.3 Bagian Perubahan Bobot dan Bias

Tahapan akhir adalah memperbarui nilai bobot dan bias berdasarkan koreksi yang telah dihitung. Pembaruan bobot lapisan tersembunyi dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$w_{ij}(\text{baru}) = w_{ij}(\text{lama}) + \Delta w_{ij} \quad (2.35)$$

Sedangkan pembaruan bobot antara lapisan tersembunyi dan lapisan keluaran dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$v_{jk}(\text{baru}) = v_{jk}(\text{lama}) + \Delta v_{jk} \quad (2.36)$$

Dengan demikian, proses pembaruan ini bertujuan untuk mengoptimalkan jaringan agar dapat menghasilkan keluaran dengan tingkat kesalahan yang seminimal mungkin.

2.12 Noramalisasi dan Denormalisasi

Pada jaringan syaraf tiruan normalisasi adalah proses transformasi masukan data agar berada dalam rentang nilai tertentu. Proses normalisasi sangat penting untuk memastikan bahwa nilai data sesuai dengan rentang fungsi aktivasi yang

digunakan dalam jaringan syaraf tiruan. Pada algoritma *backpropagation* fungsi aktivasi umumnya adalah fungsi sigmoid biner, sehingga data masukan perlu ditransformasikan kedalam rentang [0,1]. Normalisasi membantu mempercepat konvergensi pelatihan serta mencegah nilai masukan yang terlalu besar atau terlalu kecil yang dapat menghambat proses pembelajaran jaringan. Proses normalisasi dapat menggunakan persamaan sebagai berikut [17].

$$\text{Normalisasi} = \frac{x - \text{Min}(x)}{\text{Max}(x) - \text{Min}(x)} \quad (2.37)$$

Keterangan

x = Data awal

$\text{Min}(x)$ = Nilai minimum pada data awal

$\text{Max}(x)$ = Nilai maximum pada data awal

Setelah proses pelatihan selesai, untuk mendapatkan nilai data kembali dalam bentuk aslinya, dilakukan proses denormalisasi. Denormalisasi adalah proses pengembalian nilai data yang telah dinormalisasi ke skala data sebenarnya. Denormalisasi dapat dilakukan menggunakan persamaan sebagai berikut [17].

$$\text{Denormalisasi} = x (\text{Max}(x) - \text{Min}(x)) + \text{Min}(x) \quad (2.38)$$

Keterangan

x = Data keluaran

$\text{Min}(x)$ = Nilai minimum pada data awal

$\text{Max}(x)$ = Nilai maximum pada data awal

2.13 Akurasi Pengukuran Prediksi

Pada proses prediksi menggunakan jaringan syaraf tiruan, penting untuk mengevaluasi akurasi hasil prediksi. Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan prediksi adalah *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) adalah ukuran yang digunakan untuk mengetahui besarnya kesalahan prediksi dengan membandingkan nilai aktual dan nilai prediksi. Persamaan perhitungan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dengan persamaan sebagai berikut [28].

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - Y'_i|}{Y_i} \times 100\% \quad (2.39)$$

Keterangan

Y_i = Nilai aktual

Y'_i = Nilai hasil perkiraan

N = Banyak data

Selain MAPE, *Root Meant Square Error* (RMSE) juga digunakan untuk mengukur rata - rata kuadrat dari *error* dalam prediksi. *Root Meant Square Error* (RMSE) adalah hasil rata - rata dari kuadrat perbedaan antara nilai aktual dan prediksi. Persamaan *Root Meant Square Error* (RMSE) ditulis sebagai berikut.

$$MSE = \frac{\sum e^2}{\text{Jumlah record}} \quad (2.40)$$

Keterangan

e = Selisih antara nilai target dengan nilai prediksi (*error*)

Error absolut merupakan untuk mengetahui selisih hasil prediksi dengan target.

Perhitungan dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\text{Error absolut} = \frac{(\text{Target} - \text{Prediksi})}{\text{Target}} \times 100 \quad (2.41)$$

Setelah mengetahui *error absolut*, akurasi jaringan syaraf tiruan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$MSE = 100 - \left(\frac{\text{Error absolut}}{\text{hasil Prediksi}} \right) \times 100 \quad (2.42)$$

2.14 Kajian Pustaka

Penelitian yang dilakukan prediksi umur transformator yang sudah diteliti pada penelitian sebelumnya. Berbagai penelitian tersebut digunakan menjadi acuan penting dalam pelaksanaan penelitian baik dari segi teori, metode serta pendekatan analisa data. Hasil sebelumnya dijadikan dasar untuk memahami hubungan antara pembebanan, suhu dan proses penuaan transformator. Adapun referensi pada kajian pustaka yang digunakan sebagai rujukan dalam penelitian sebagai berikut.

Pada penelitian pertama menganalisa tentang umur transformator tenaga 150 kV di Gardu Induk Isimu. Hasil penelitiannya melakukan perhitungan secara manual untuk prediksi *temperatur hospot* pada saat kondisi beban maksimal. Pada saat diberikan beban 100 % *temperatur hospot* mencapai 112,75 °C, melebihi batas yang di tentukan sebesar 98 °C. Sehingga hasil prediksi umur transformator sebesar 5,27 tahun dari umur dasar 30 tahun. Pada penelitian perhitungan dengan

menggunakan standar yang telah ditentukan. Kelemahan pada penelitiannya tidak menggunakan data suhu kumparan dan suhu minyak secara real [6].

Pada penelitian kedua yang berkaitan tentang pengaruh pembebanan terhadap umur transformator. Pada penelitian terdapat variasi pembebanan ketika pembebanan 100 % prediksi umur transformator sebesar 4,03 tahun. Sedangkan pada saat pembebanan 80 % prediksi usia pemakianya sebesar 54,55 tahun. Pada penelitian menggunakan data real suhu lingkungan serta pada perhitungan mencakup pada suhu minyak, kumparan dan pembebanan. Kelemahan penelitian hanya menggunakan data pembebanan selama satu hari yang tidak mencerminkan tren pembebanan jangka panjang [12].

Pada penelitian ketiga Pengaruh pembebanan terhadap umur transformator distribusi. Penelitian menggunakan data selama satu minggu dengan perhitungan berdasarkan standar IEC sebagai acuan. Hasil dari penelitian suhu *hospot* tertinggi masih dibawah 98 °C dengan laju penuaan termal yang rendah sehingga prediksi usia pemakaian transformator lebih dari 8 tahun. Kelemahan penelitian hanya menggunakan data selama satu minggu serta tidak menggunakan suhu kumparan dan suhu minyak secara real [13].

Pada penelitian keempat pengaruh pembebanan pada transformator daya di PLTGU Keramasan, Palembang. Penelitiannya dengan digunakan berupa parameter pembebanan, suhu kumparan, suhu minyak dan suhu lingkungan secara real selama satu hari. Hasil dari penelitian suhu *hospot* tertinggi diangka 77,31 °C yang masih dibawah batas sebesar 98°C, sehingga prediksi sisa usia transformator sebesar 17,42 tahun. Kekurangan penelitian hanya menggunakan data selama satu hari dan belum menggunakan *neural network* untuk melakukan prediksi umur transformator [14].

Pada penelitian kelima untuk melakukan prediksi umur transformator dengan menggunakan *neural network* dengan menggunakan data selama satu hari. Hasil penelitian yang dilakukan memiliki akurasi yang baik sebesar 96,94 % sampai 97,81 persen. Kekurangan penelitiannya tidak mempertimbangkan suhu kumparan, suhu minyak atas dan suhu lingkungan [2].