

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. PRINSIP KERJA GENERATOR SINKRON

Generator merupakan mesin elektrik yang digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan menggunakan medan magnet sebagai media. Konstruksi generator terbagi menjadi dua yaitu bagian diam atau stator dan bagian berputar atau rotor. Pembangkitan tegangan oleh fluks hingga menghasilkan tegangan terminal pada generator dalam hal ini generator sinkron yang bekerja berdasarkan hukum induksi Faraday yang menyatakan kuantitatif induksi tegangan oleh waktu-perubahan medan magnetik adalah sebagai berikut.

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (1)$$

Dimana:

$e =$ Tegangan Eksitasi

$d\lambda =$ Perubahan Fluks Bocor

$dt =$ Perubahan Waktu

Urutan gambaran pembangkitan generator adalah sebagai berikut, ketika kumparan rotor yang berputar terhadap sumbu diberikan arus eksitasi (I_f) maka akan timbul induktansi diri pada kumparan rotor dan induksi bersama kumparan rotor-stator. Induktansi bersama kumparan rotor-stator berubah secara periodik terhadap sudut θ diantara sumbu magnetik kumparan rotor dan kumparan stator. Dengan celah gaya gerak magnet dan celah udara, distribusi fluks diasumsikan

sinusoidal sempurna¹, induktansi bersama kumparan rotor L_{af} dan phasa a berubah sebagai $\cos \theta$

$$L_{af} \cos \theta \quad (2)$$

Dimana:

L_{af} = Induk tan si bersama kumparan rotor – stator

θ = Sudut diantara sumbu magnetik kumparan rotor – stator

Dengan kumparan rotor berputar pada kecepatan sinkron ω

$$\theta = \omega t + \theta_0 \quad (3)$$

Dimana:

θ_0 = sudut ketika kumparan rotor pada posisi waktu $t=0$

Dengan arus eksitasi (I_f) pada kumparan stator, menghasilkan fluks bocor pada phasa a

$$\lambda_{af} = L_{af} I_f \cos(\omega t + \theta_0) \quad (4)$$

Dimana:

λ_{af} = fluks bocor Induk tan si bersama kumparan rotor – stator

Sementara itu induktansi kumparan stator sendiri bersifat konstan, sehingga induktansi diri kumparan stator dapat dituliskan seperti berikut

$$L_{aa} = L_{aa0} + L_{al} \quad (5)$$

Dimana:

L_{aa} = induk tan si diri kumparan stator phasa a

L_{aa0} = induk tan si diri kumparan stator phasa a fluks celah udara

L_{al} = induk tan si diri kumparan stator phasa a fluks bocor jangka

¹ Diasumsikan berupa gelombang sinusoidal sempurna, dengan mengabaikan cacat gelombang semisal dikarenakan oleh harmonisa

Dan induktansi bersama fase-fase kumparan stator dapat dituliskan $-\frac{1}{2}L_{aa0}$

Sehingga fluks bocor fase a kumparan jangka dapat dituliskan seperti berikut;

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al})i_a - \frac{1}{2}L_{aa0}(i_b + i_c) + \lambda_{af} \quad (6)$$

Dengan arus kumparan stator tiga fase setimbang $i_a + i_b + i_c = 0$, sehingga persamaan fluks bocor pada fase a kumparan stator dapat ditulis sebagai berikut:

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al})i_a - \frac{1}{2}L_{aa0}i_a + \lambda_{af} = \left(\frac{3}{2}L_{aa0} + L_{al}\right)i_a + \lambda_{af} \quad (7)$$

$$\lambda_a = L_s i_a + \lambda_{af} \quad (8)$$

Dimana:

$\lambda_a =$ fluks bocor Induk tan si kumparanstator phasaa

$L_s =$ induk tan si sin kron

$$L_s = \left(\frac{3}{2}L_{aa0} + L_{al}\right)$$

$\lambda_{af} =$ fluks bocor Induk tan si bersamakumparanrotor – stator phasaa

L_s induktansi sinkron sesungguhnya adalah induktansi efektif fase a kumparan stator pada kondisi tiga fase setimbang pada kondisi mesin bekerja secara normal.

Tegangan terminal fase a kumparan stator adalah penjumlahan tegangan jatuh tahanan kumparan stator $R_a I_a$ dan tegangan induksi, sehingga dapat dituliskan seperti persamaan berikut:

$$v_a = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = R_a i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + \frac{d\lambda_{af}}{dt} \quad (9)$$

Berdasarkan persamaan 1, hubungan tegangan e_{af} adalah;

$$e_{af} = \frac{d\lambda_{af}}{dt} = \omega L_{af} I_f \cos\left(\omega t + \theta_0 + \frac{\pi}{2}\right) \quad (10)$$

Dimana e_{af} adalah tegangan yang dibangkitkan dari fluks yang dihasilkan oleh perputaran kumparan rotor dan didefinisikan sebagai tegangan eksitasi, tegangan eksitasi mendahului fluks bocor λ_{af} sebesar 90° dan nilai rms nya adalah E_{af} :

$$E_{af} = \frac{\omega L_{af} I_f}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

Persamaan untuk tegangan rms yang dibangkitkan pada fasa kumparan stator oleh gelombang fluks berputar. Dalam keadaan tanpa beban arus jangka tidak mengalir pada kumparan stator, karena tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluksi hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f).

$$E_{af} = \sqrt{2} \pi f k_w N_{ph} \phi_{af} \quad (12)$$

Dimana:

E_{af} = Tegangan eksitasi rms

ϕ_{af} = Fluks per kutub

N_{ph} = putaran per fasa

K_w = faktor distribusi

Faktor distribusi diperlukan karena kumparan stator tidak terletak didalam satu sisi, melainkan terdistribusi dalam beberapa slot per fasa . Oleh karena beban ggl stator merupakan fungsi dari fluks magnet

Dari persamaan diatas jika arus penguat medan diatur besarnya, maka akan diikuti kenaikan fluks dan akhirnya juga pada kumparan stator pengaturan arus penguat medan pada keadaan besarnya akan didapatkan besar ggl kumparan stator tanpa beban dalam keadaan saturasi.

Besarnya ggl yang dibangkitkan bergantung pada laju pemotongan garis gaya atau dalam hal generator, besarnya ggl bergantung pada kuat medan dan kecepatan rotor. Kecepatan yang konstan akan membangkitkan ggl yang bergantung pada eksitasi medan. Hal ini berarti ggl yang dibangkitkan dapat dikendalikan dengan mengatur besarnya eksitasi medan yang diberikan pada generator. Dimana eksitasi medan dapat dikendalikan dengan mengubah tegangan eksitasi yang diberikan pada medan generator.

Pada kondisi berbeban arus stator mengalir pada kumparan stator (I_a), dengan adanya arus tersebut akan timbul fluks putar jangka yang bersifat mengurangi atau menambah fluks putar yang dihasilkan oleh kumparan rotor. Hal ini tergantung pada faktor daya beban .

Bila faktor daya (pf) sama dengan satu, berarti arus jangkar sefase dengan tegangan beban. Pada keadaan ini fluks tertinggal 90

Sehingga tegangan terminal fasa a v_{ia} dan arus kumparan jangka i_a dapat dituliskan dalam bentuk phasor seperti persamaan berikut:

$$\hat{V}_{ia} = -R_a \hat{I}_a - jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad (13)$$

Dimana:

$$X_s = \omega L_s = \text{reak tan si sin kron}$$

$$X_s = \omega L_s = \omega L_{al} + \omega \left(\frac{3}{2} L_{aa0} \right) = X_{al} + X_A$$

$$\omega L_{al} = X_{al} = \text{reak tan si bocor kumparanstator}$$

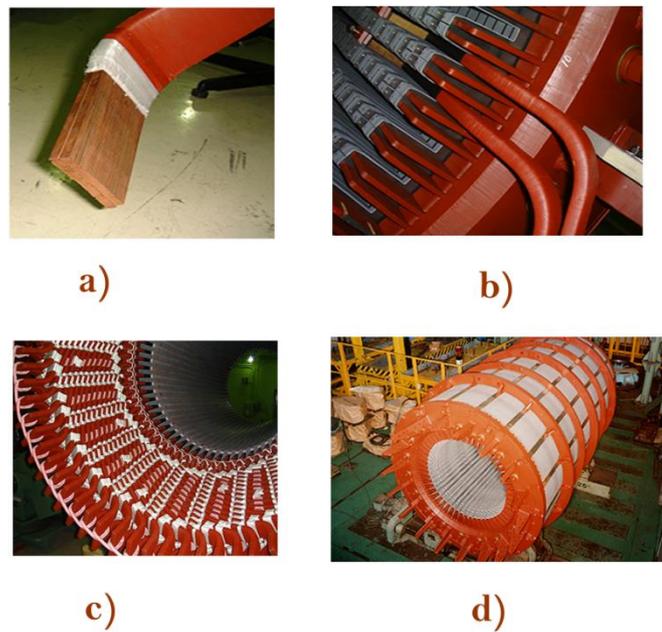
$$\omega \left(\frac{3}{2} L_{aa0} \right) = X_A = \text{reak tan si reaksikumparanstator}$$

B. KONSTRUKSI GENERATOR SINKRON

Pada konstruksi generator bagian medan yang berputar dikatakan rotor sedangkan lilitan jangkar sebagai bagian yang diam disebut stator. Konstruksi medan berputar dan lilitan jangkar diam menyederhanakan masalah isolasi generator.

B.1. STATOR

Bagian generator yang tidak bergerak dan terdiri dari rangka besi cor atau baja, inti magnetik stator, dan kumparan. Tipe yang dipakai adalah lilitan rangkaian terbuka yang terbentuk dari kumparan yang terisolasi. Lilitan yang disusun adalah hubungan Y, karena menimbulkan tegangan tinggi. Jika lilitan terdistribusi yang melebihi distribusi yang merata maka hasilnya adalah pembangkitan gelombang ggl yang lebih baik.



Gambar 1 Konstruksi Stator generator 125.5 MVA PLTU Tarahan.(Atas kebaikan PLTU Tarahan,2 pole air cooled turbine generator.ppt oleh Fuji elektrik e-Front Runner)

B.2 ROTOR

Bagian generator yang bergerak/berputar yang mempunyai jenis *salient-pole* dengan lilitan mengelilingi kutub-kutub medan yang berada pada sekeliling inti yang berlapis. Kumbaran yang terpasang pada poros diberi isolasi agar tidak terjadi hubung singkat.

Ada dua tipe rotor yang dipakai suatu generator, yaitu:

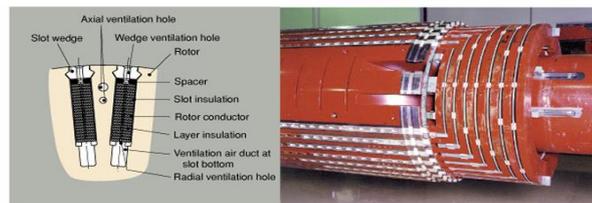
1. Tipe kutub sepatu (*salient*)
2. Tipe silindris

Dua tipe ini memiliki perbedaan dalam hal ketahanan terhadap tekanan dan kecepatan pada rotor. Pada kutub sepatu mempunyai rugi – rugi angin yang tinggi pada kecepatan tinggi, sedangkan pada silindris rugi-rugi angin rendah pada

kecepatan rendah. Pada pembangkit listrik tenaga gas dan uap menggunakan tipe silindris.



a)



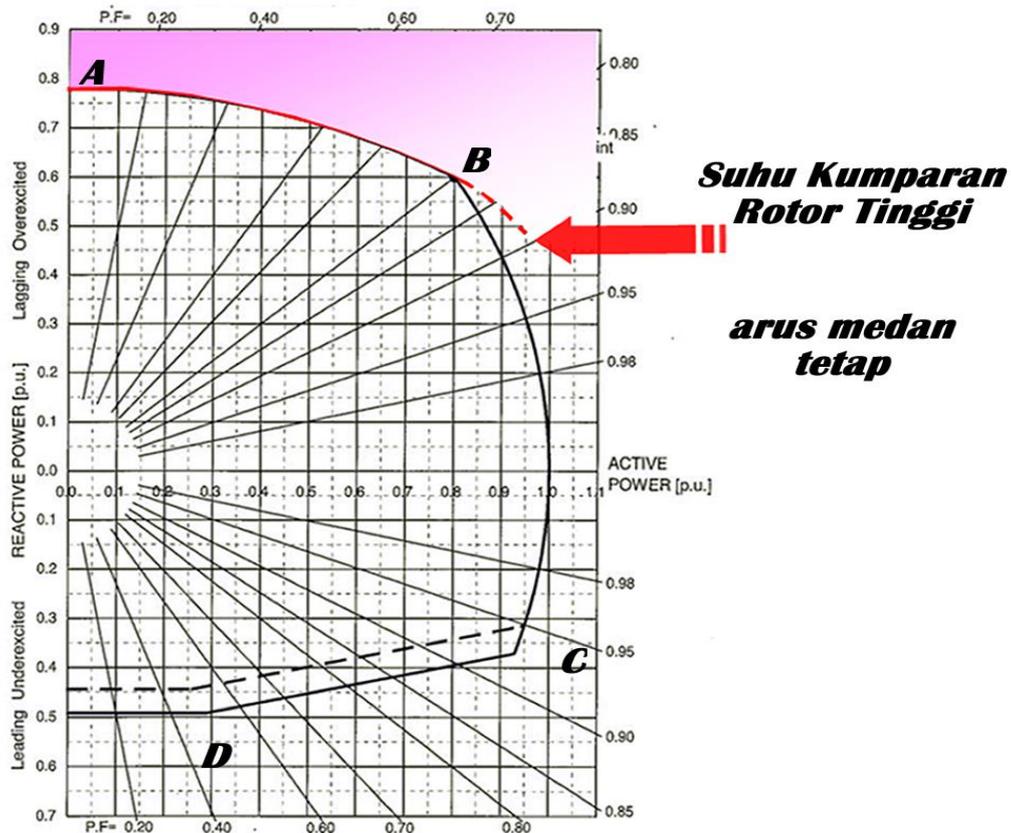
b)

Gambar 2 Konstruksi Rotor Generator 125.5 MVA PLTU Tarahan. (Atas kebaikan PLTU Tarahan, 2 pole air cooled turbine generator. ppt oleh Fuji elektrik e-Front Runner)

C. Eksitasi

Karena tegangan terminal generator ac banyak berubah dengan berubahnya beban, maka untuk operasi hampir semua peralatan listrik diperlukan usaha untuk menjaga agar tegangannya konstan. Cara ini dapat dilakukan dengan menggunakan alat pembantu yang disebut dengan pengatur tegangan (*voltage regulator*) untuk mengendalikan besarnya eksitasi medan dc yang dicatukan pada generator. Bila tegangan terminal generator turun karena perubahan beban, pengatur tegangan secara otomatis menaikkan pembangkitan medan sehingga tegangan kembali normal. Sama halnya bila tegangan terminal naik karena perubahan beban, maka pengatur mengembalikan nilai tegangan normalnya

dengan mengurangi eksitasi medan. Pengatur tegangan yang digunakan adalah AVR (*Automatic Voltage Regulator*).²



Gambar 3 Kurva kapabilitas pada kumparan Rotor Generator 125.5 MVA PLTU Tarahan. (Atas kebaikan PLTU Tarahan, 2 pole air cooled turbine generator.ppt oleh Fuji elektrik e-Front Runner dengan alih bahasa Inggris ke Indonesia)

D. Getaran & Kurva Kapabilitas pada generator

Objek getaran yang terjadi pada rotor adalah selama getaran dalam batas yang dapat diterima kecepatan operasi dan kondisi beroperasi dibawah kecepatan rata-rata pada kurva capability. Pada gambar 3, A-B adalah batas panas medan, B - C batas panas jangkar. C-D adalah batas logam jangkar dan pemanasan. Secara

² Prinsip kerja dari AVR adalah mengatur arus penguatan pada exciter. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator, maka AVR akan memperbesar arus penguatan pada exciter. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output Generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan pada exciter

umum *kepekaan suhu* tidak berpengaruh ketika daerah B-C atau C-D beroperasi, selama arus medan tidak tinggi dan karena tidak tercapainya suhu rata-rata.

Hal yang sama berlaku juga pada objek getaran yang terjadi pada stator, selama arus jangkar tidak tinggi dan tidak melebihi batasan suhu stator.

Namun, ketika kumparan medan pada titik B, *kepekaan suhu* akan merespon meningkatkan arus medan dengan perubahan getaran tersebut. Perubahan ini mungkin dalam bentuk peningkatan getaran maupun penurunan getaran atau merubahnya sudut fase. Semua medan mempunyai derajat *kepekaan suhu*, namun jika tingkat getaran masih dalam batas yang masih dapat diterima, *kepekaan suhu* akan terjadi secara tidak normal, hal ini akan terjadi ketika level getaran melebihi batas yang masih dapat diterima selama beroperasi pada kurva kapabilitas.

E. Kegagalan Elektrikal pada Rotor Generator

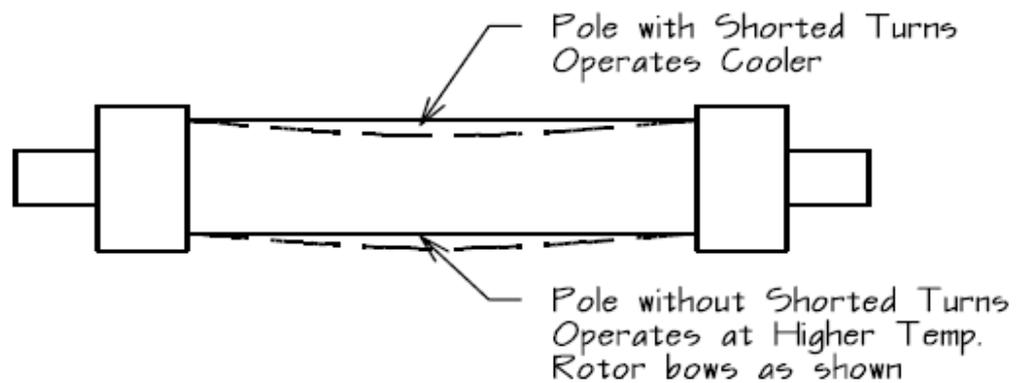
Kegagalan elektrikal rotor generator umumnya adalah kegagalan yang terjadi pada kumparan medan karena terjadinya hubung singkat atau *shorted turn*, *ageing* sistem insulasi yang menurunkan kekuatan dielektrik. Kegagalan ini memiliki keterkaitan dengan faktor lain sebagai berikut:

1. Getaran

Hampir semua permasalahan yang ada selama operasi akibat adanya hubung singkat kumparan medan (*shorted field windings*) menyebabkan getaran berlebih.

Getaran pada rotor dua kutub timbul akibat pemanasan tidak seimbang dari lapisan besi tempa rotor. Ketika hubung singkat kumparan terjadi, menyebabkan

ketidakseimbangan distribusi kumparan aktif diantara kedua kutub, begitu pula rugi-rugi tahanan ($I^2.R$) diantara kedua kutub yang tidak seimbang. Ketidakseimbangan pemanasan ini menyebabkan rotor menyimpang atau bengkok yang menyebabkan getaran berlebih.



Gambar 4 Penyimpangan (pembengkokan) poros rotor akibat hubung singkat kumparan. Sumber Advanced Generator Maintenance Technology Seminar "Generator Field Winding Shorted Turn: Observed Condition and Causes" Albright DJ & DR, Generatortech, Inc.

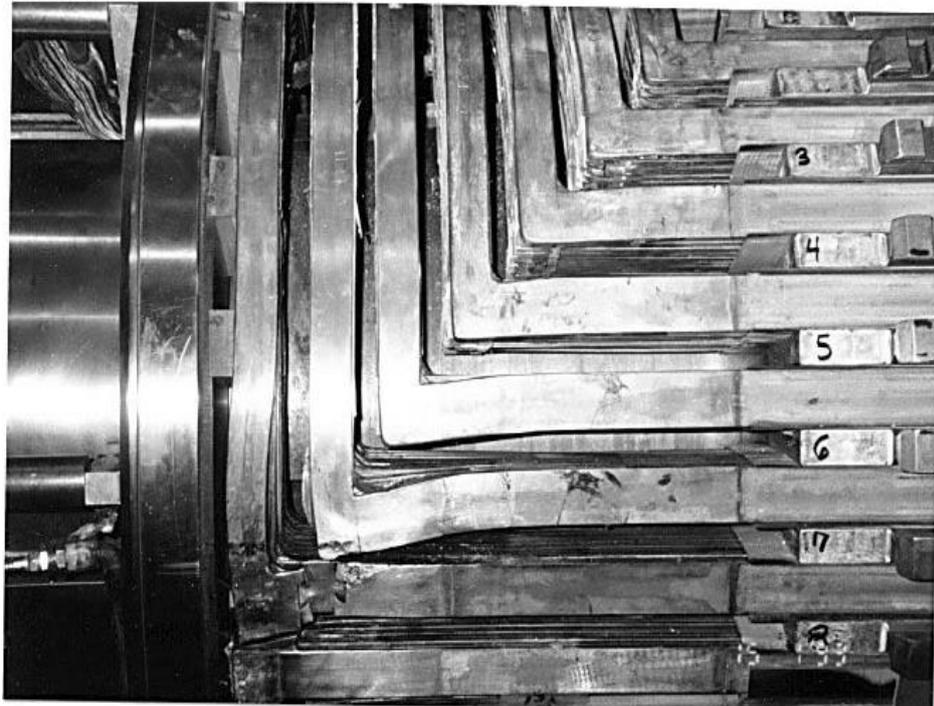
2. Peningkatan Arus Medan /Eksitasi

Hasil keluaran generator adalah berbanding lurus dengan nilai penguatan-belitan (*amp-turns*) pada medan berputar. Setiap pengurangan sejumlah belitan aktif pada medan akan berhubungan dengan peningkatan arus eksitasi, dalam upaya untuk menjaga nilai penguatan-belitan. Peningkatan arus medan berbanding lurus dengan biaya pembangkitan tenaga. Peningkatan arus medan menghasilkan titik panas suhu pada kumparan medan, yang berarti mempercepat kegagalan tembus (*breakdown*) pada sistim isolasi dan mempengaruhi penurunan kumparan

3. Kerusakan Laminasi Cincin penopang

Kondisi sangat serius yang disebabkan oleh hubung singkat kumparan adalah busur api yang merusak cincin penopang, dimana terjadi kontak antara belitan

kumparan teratas dengan batasan belitan kumparan. Busur api akibat kontak ini akan membakar menembus isolasi cincin penahan dan menyebabkan pemburukan pada cincin penopang itu sendiri.



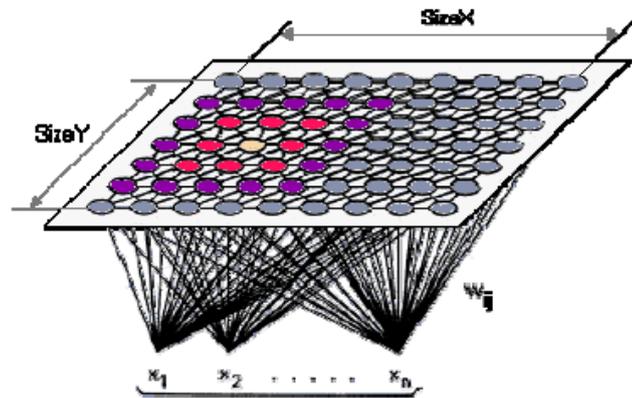
Gambar 5 Hubung singkat kumparan (*shorted turn*). Sumber Advanced Generator Maintenance Technology Seminar “Generator Field Winding Shorted Turn: Observed Condition and Causes” Albright DJ & DR, Generatortech, Inc.

F. JARINGAN SARAF TIRUAN SOM-KOHONEN

Som-kohonen adalah jaringan saraf tiruan yang menggunakan metode pembelajaran *unsupervisory* atau tanpa dari sejumlah N masukan yang bersifat linier yang dipetakan dalam dimensi yang lebih rendah sebagai hasil keluarannya.

Som-kohonen berbeda dari jaringan saraf tiruan lainnya dengan alasan bahwa jaringan saraf tiruan ini menggunakan atau melibatkan fungsi tetangga untuk menjaga property masukan.

Topologi jaringan saraf tiruan som-kohonen terdiri atas dua lapisan yaitu lapisan masukan dan lapisan keluaran yang dihubungkan oleh neuron. Setiap neuron pada lapisan keluaran merepresentasikan kelas dari masukan yang diberikan



Gambar 6 Topologi jaringan saraf tiruan SOM-Kohonen

Som-kohonen memetakan masukan pada lapisan masukan yang berdimensi tinggi ke lapisan keluaran berdimensi rendah (umumnya dua dimensi), seperti pada Gambar 6 dimensi pada lapisan keluaran x dan y, yang dibagi menjadi dalam kelas-kelas yang disebut *clustering* yang berikutnya dicari nilai *super clustering* yang digunakan sebagai nilai hasil.

Som-kohonen menggunakan nilai jarak *ecludian* dalam proses pengelompokan atau pengkelasan atau *clustering* yang menggunakan nilai bobot vector yang terus-menerus dievaluasi hingga dicapai nilai jarak *ecludian* terpendek pada batasan yang ditentukan³ dengan persamaan umum sebagai berikut

$$d(x, W_w) = \min_{1 \leq i \leq n} d(x, W_w) \quad (14)$$

³ Batas evaluasi bobot ditentukan dengan jumlah fase pembelajaran atau dengan menentukan nilai kesalahan pembelajaran .

Dimana

$d(x, W_w)$ = Jarak antara vektor masukan x dan bobot pemenang W

n = Jumlah node

x = Vektor masukan

W_w = Bobot vektor pemenang

Jarak diantara vektor masukan x dan bobot vektor dari neuron pemenang ke- i W_i dapat dihitung dengan menggunakan definisi persamaan yang berbeda sebagai berikut:

$$d(x, W_i) = \|x - W_i\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - W_{ij})^2} \quad (15)$$

Yang mana persamaan Euclidean diatas menjadi faktor perhitungan evaluasi bobot selama fase pembelajaran.

$$W_j(t + 1) = W_j(t) + \eta(t)[x_i - W_j(t)] \quad (16)$$

Dimana

$W_j(t + 1)$ = Bobot evaluasi yang akan datang

$W_j(t)$ = Bobot sekarang

$\eta(t)$ = Kecepatan pembelajaran

$[x_i - W_j(t)]$

= Jarak Euclidean antara vektor masukan ke i dengan bobot pemenang

Disekitar neuron pemenang, topologi tetangga diasumsikan sebagai radius tak terbatas yang berkurang pada proses pembelajaran. Neuron pemenang dan semua neuron yang berada dalam area tetangga mengalami proses adaptasi, mengalami evaluasi bobot vektor masing masing terhadap sejumlah vektor masukan x , seperti pada persamaan 16

Sejumlah neuron pemenang secara berturut-turut yang merepresentasikan vektor masukan x menghasilkan algoritma yang dikenal sebagai WTA (*Winner Take All*) yang mana hanya neuron pemenang yang mengalami proses evaluasi bobot.

Pada perkembangan berikutnya, som-kohonen menggunakan algoritma WTM (*Winner Take Most*) yang berbeda dari algoritma sebelumnya. Pada algoritma ini semua neuron mengalami pembaharuan bobot pada proses evaluasi, dengan catatan semakin jauh neuron tetangga dari neuron pemenang maka evaluasi bobot akan semakin kecil. Proses evaluasi bobot seperti persamaan berikut:

$$W_i \leftarrow W_i + \eta_i G(i, x)[x - W_i] \quad (17)$$

Untuk semua neuron ke $-i$ yang menjadi tetangga dari neuron pemenang. Pada persamaan 17 koefisien pembelajaran η_i dari setiap neuron terpisah dari jaraknya dengan mengacu terhadap vektor x , termasuk menggunakan fungsi tetangga $G(i, x)$ yang didefinisikan sebagai berikut:

$$G(i, x) = \begin{cases} 1 & \text{untuk } i = n \\ 0 & \text{untuk } i \neq n \end{cases} \quad (18)$$

Dimana dari persamaan 18, neuron tetangga akan aktif selama neuron tersebut berada pada jumlah tetangga neuron pemenang yang berada pada batasan radius tetangga pemenang, dan tidak aktif untuk neuron yang berada diluar jumlah

neuron pemenang yang berada diluar radius tetangga neuron pemenang. Sehingga fungsi tetangga juga dapat dituliskan sebagai berikut:

$$G(i, x) = \begin{cases} 1 & \text{untuk } d(i, w) \leq \lambda \\ 0 & \text{untuk yang lainnya} \end{cases} \quad (19)$$

Dimana dari persamaan diatas bahwa bobot neuron tetangga akan ikut aktif dalam evaluasi selama jarak Euclidean neuron ke-I terhadap bobot pemenang masih berada pada radius tetangga yang semakin memusat selama fase pembelajaran. Fungsi tetangga pada som-kohonen adalah type Gaussian ⁴ yang sebagai berikut:

$$G(i, x) = \exp\left(-\frac{d^2(i, w)}{2\lambda^2}\right) \quad (20)$$

Sehingga persamaan evaluasi bobot selama fase pembelajaran dengan som-kohonen dapat dituliskan seperti persamaan berikut.

$$W_i(k+1) = W_i(k) + \eta \exp\left(-\frac{d^2(i, w)}{2\lambda^2}\right) (x - W_i(k)) \quad (21)$$

⁴ Persamaan Gaussian pada persamaan 20 merupakan bentuk lain persamaan Gaussian dengan penulisan selisih $(x - w)$ kedalam bentuk euclidean dari persamaan asli Gaussian sebagai berikut:

$$f(x) = Ae^{-\frac{d(i-w)^2}{2\lambda^2}}$$