

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi Tiga Fasa

Disebut motor induksi karena tegangan rotor, yang menghasilkan arus rotor kemudian medan magnet rotor, merupakan hasil induksi elektromagnetik dari kumparan stator, sehingga motor induksi tidak memerlukan arus medan pada kumparan rotornya. Meskipun suatu mesin induksi dapat difungsikan sebagai motor maupun generator, umumnya hanya digunakan sebagai motor. Motor ini dapat bekerja dengan kecepatan relatif konstan pada beban mekanis nol sampai beban penuh.

2.1.1 Konstruksi Motor Induksi

Motor induksi terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator yang diam dan rotor yang berputar dan dipisahkan oleh suatu celah udara sempit 0.4 mm sampai 4 mm [8], tergantung pada kapasitas daya motor tersebut.

Stator terdiri dari kerangka berbentuk silinder berongga yang tersusun atas lapisan-lapisan baja tipis. Kumparan stator motor induksi terdistribusi pada alur-alur disekeliling kerangka tersebut.

Jenis rotor motor induksi ada dua, yaitu rotor belitan (*wound rotor*) dan rotor sangkar (*squirrel cage rotor*). Kumparan rotor motor induksi dengan rotor belitan menyerupai kumparan statornya dan terdistribusi pada alur-alur rotor. Rotornya tersusun atas lapisan-lapisan baja tipis untuk mengurangi rugi-rugi arus pusar (*eddy current*).

Rotor dari motor induksi rotor sangkar menyerupai sangkar tupai, terdiri dari batang-batang konduktor yang tersusun sedemikian rupa dan dihubungkan singkat di ujung-ujungnya dengan menggunakan cincin penghubung (*shorting rings*). Motor jenis ini konstruksinya sederhana, sehingga sering menjadi pilihan untuk berbagai aplikasi di dunia industri.

2.1.2 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

Kumparan stator motor induksi dicatu dengan tegangan tiga fasa, sehingga mengalir arus yang memiliki beda fasa 120° tiap fasanya. Arus yang mengalir dalam kumparan stator ini menghasilkan medan magnet putar, dengan kecepatan putar sinkron:

$$\omega_s = 2\pi \cdot f_e \quad (2.1)$$

ω_s : kecepatan putar sinkron (rad/detik)

f_e : frekuensi tegangan sumber arus bolak-balik (Hertz)

atau

$$n_s = \frac{120 \cdot f_e}{P} \quad (2.2)$$

n_s : kecepatan sinkron (rpm = radian per menit)

P : jumlah kutub motor induksi

Medan magnet putar memotong batang-batang konduktor rotor, sehingga timbul tegangan induksi lawan pada kumparan rotor sebesar :

$$E_{ind} = 4,44 \cdot f_e \cdot k \cdot N \cdot \phi \text{ Volt} \quad (2.3)$$

E_{ind} : gaya gerak listrik induksi (Volt)

N : jumlah lilitan kumparan rotor

k : konstanta lilitan stator

ϕ : fluks magnet (Weber/m²)

Karena merupakan rangkaian tertutup, pada kumparan rotor mengalir arus yang berinteraksi dengan medan magnet putar stator, menimbulkan gaya dan torsi pada rotor. Jika torsi yang ditimbulkan lebih besar dari torsi beban yang dipikulnya, maka rotor akan berputar. Kecepatan putar rotor (n_r) selalu lebih kecil dari kecepatan medan magnet putar stator (n_s). Perbedaan kecepatan putar rotor dan medan magnet putar stator disebut *slip* (s) yang besarnya:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.4)$$

n_s : kecepatan medan magnet putar stator (rpm)

n_r : kecepatan putar rotor (rpm)

2.1.3 Teori Kerangka Acu

Model matematis motor induksi yang banyak digunakan saat ini adalah model motor dua fasa, yang merupakan persamaan dinamis motor induksi yang diwakili oleh dua sumbu aksis yaitu sumbu ril dan sumbu imajiner. Nilai ekivalensi model motor tiga fasa ke dua fasa diperoleh dari transformasi model motor tiga fasa yang ekivalen dengan model motor dua fasa.

Model matematis motor induksi yang digunakan pada tesis ini adalah model *space* vektor. Model *space* vektor erat hubungannya dengan model dq atau $\alpha\beta$. Sumbu riil dan imajiner model *space* vektor dapat dianggap sama dengan sumbu dq. Sumbu d atau α sebagai sumbu riil yaitu *direct axis* dan sumbu q atau β adalah *quadratic axis* sebagai sumbu imajiner-nya.

Hubungan antara dq0 dan abc dalam kerangka acu bebas adalah [9]:

$$f_{dq0} = [T_{abc}] f_{abc} \quad (2.5)$$

$$[T_{abc}] = k \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

dengan f mewakili variabel bebas seperti tegangan, arus dan fluks, sedangkan k merupakan konstanta.

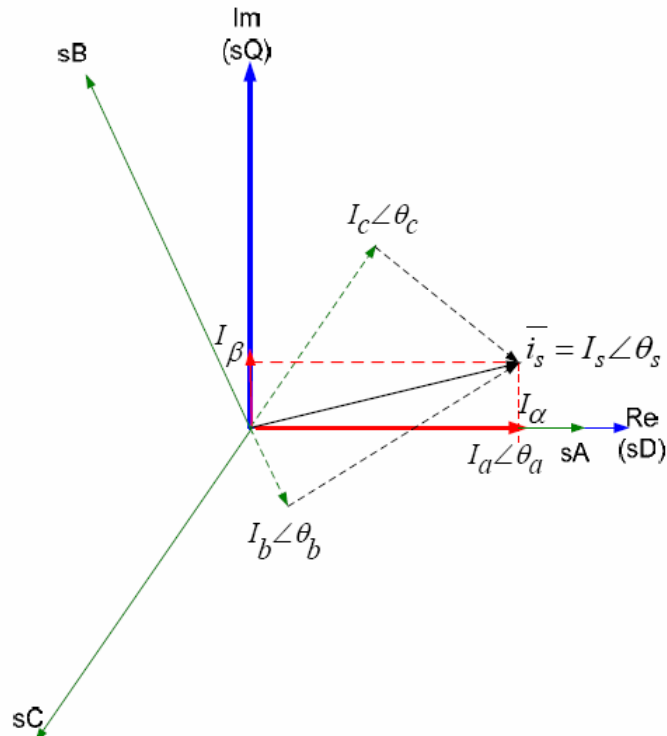
Sebaliknya transformasi dari dua fasa ke tiga fasa dalam acuan bebas dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$f_{abc} = [T_{abc}]^{-1} f_{dq0} \quad (2.7)$$

dengan

$$[T_{abc}]^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Matriks-matriks di atas mewakili kerangka acuan bebas. Bila ditransformasikan ke kerangka acuan stator dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.1 Proyeksi arus pada rangkaian stator

Persamaan vektor arus stator adalah sebagai berikut [9]:

$$\bar{i}_s = i_\alpha(t) + ji_\beta(t) \quad (2.9)$$

dengan $i_\alpha(t)$ merupakan bagian riil yang merupakan komponen d-axis sedangkan $i_\beta(t)$ adalah bagian imajiner yang merupakan komponen q-axis.

Komponen riil merupakan penjumlahan dari arus tiga fasa i_a , i_b , dan i_c untuk bagian riil dan begitupula untuk komponen imajiner yaitu penjumlahan dari arus tiga fasa i_a , i_b , dan i_c untuk bagian imajinernya. Persamaan arus tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$\text{Re}(\bar{i}_s) = i_\alpha = K [\text{Re}(I_a \angle \theta_a) + \text{Re}(I_b \angle \theta_b) + \text{Re}(I_c \angle \theta_c)] = K \left[i_a \quad -\frac{1}{2}i_b \quad -\frac{1}{2}i_c \right] \quad (2.10)$$

$$\text{Im}(\bar{i}_s) = i_\beta = K [\text{Im}(I_a \angle \theta_a) + \text{Im}(I_b \angle \theta_b) + \text{Im}(I_c \angle \theta_c)] = K \left[\frac{\sqrt{3}}{2}I_b \quad -\frac{\sqrt{3}}{2}I_c \right] \quad (2.11)$$

Dalam bentuk matriks, transformasi tiga fasa ke dua fasa dapat dituliskan:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{au} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

dengan:
$$C_{au} = K \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

K adalah suatu konstanta transformasi. Untuk sistem *power-invariant* K bernilai $\sqrt{2/3}$ dan untuk sistem *non-power invariant* K= 2/3. Pada tesis ini digunakan sistem power invariant.

Terlihat bahwa matriks transformasi tiga fasa ke dua fasa untuk kerangka acuan stator dapat pula diperoleh dengan mensubsitusikan nilai $\theta=0$ pada matriks transformasi kerangka acuan bebas dengan tetap memperhatikan urutan fasanya..

2.1.4 Pemodelan Dinamis Motor Induksi Tiga Fasa

Pada tesis ini dibuat model matematis motor induksi tiga fasa dalam sumbu acuan $\alpha\beta$ yang merupakan kerangka acuan stator. Parameter model motor induksi tiga fasa yang digunakan adalah arus stator dengan arus rotor[10], sedangkan sebagai model *observer* digunakan parameter arus stator dan fluks rotor.

Model umum persamaan tegangan stator dan tegangan rotor motor induksi [11]:

$$\overline{v}_s = R_s \overline{i}_s + \frac{d}{dt} \overline{\psi}_s + j\omega \overline{\psi}_s \quad (2.13)$$

$$\overline{v}_r = R_r \overline{i}_r + \frac{d}{dt} \overline{\psi}_r + j(\omega - \omega_r) \overline{\psi}_r \quad (2.14)$$

Persamaan fluks stator dan fluks rotor dapat ditunjukkan dengan persamaan:

$$\overline{\psi}_s = L_s \overline{i}_s + L_r \overline{i}_r \quad (2.15)$$

$$\overline{\psi}_r = L_r \overline{i}_r + L_m \overline{i}_s \quad (2.16)$$

sehingga dari Persamaan (2.16) didapat:

$$\overline{i}_r = \frac{\overline{\psi}_r - L_m \overline{i}_s}{L_r} \quad (2.17)$$

Simbol “aksen” pada persamaan menunjukkan variabel berada pada kerangka acuan stator, maka ω bernilai nol, sehingga Persamaan tegangan (2.13) dan (2.14) menjadi:

$$\overline{v}_s = R_s \overline{i}_s + \frac{d}{dt} \overline{\psi}_s \quad (2.18)$$

$$\overline{v}_r = R_r \overline{i}_r + \frac{d}{dt} \overline{\psi}_r - j\omega_r \overline{\psi}_r \quad (2.19)$$

Motor induksi tiga fasa yang digunakan adalah *squirrel-cage* yang dihubung singkat sehingga tegangan rotor bernilai nol ($\overline{v}_r = 0$). Jika Persamaan (2.19) disubstitusi dengan Persamaan (2.17), dan tegangan rotor bernilai nol maka persamaannya menjadi:

$$0 = R_r \left(\frac{\overline{\psi}_r - L_m \overline{i}_s}{L_r} \right) + \frac{d}{dt} \overline{\psi}_r - j\omega_r \overline{\psi}_r$$

$$\frac{d}{dt} \overline{\psi}_r = \frac{d}{dt} \overline{\psi}_r = \left(-\frac{R_r}{L_r} + j\omega_r \right) \overline{\psi}_r + \left(\frac{R_r}{L_r} L_m \right) \overline{i}_s \quad (2.20)$$

sedangkan Persamaan (2.18) bila disubstitusikan Persamaan (2.15) akan menjadi

$$\overline{v}_s = \left(R_s + \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} \right) \overline{i}_s + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{d}{dt} \overline{i}_s + \left(\frac{L_m j\omega_r}{L_r} - \frac{L_m R_r}{L_r^2} \right) \overline{\psi}_r \quad (2.21)$$

dari Persamaan (2.21) diperoleh persamaan turunan arus stator yaitu:

$$\frac{d}{dt} \overline{i}_s = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \left[\left(-R_s - \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} \right) \overline{i}_s + \left(\frac{L_m R_r}{L_r^2} - j \frac{L_m \omega_r}{L_r} \right) \overline{\psi}_r + \overline{v}_s \right] \quad (2.22)$$

Persamaan turunan arus stator (2.22) dan Persamaan turunan fluks rotor (2.20) diubah dalam bentuk sumbu $\alpha\beta$ menjadi sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt}i_{s\alpha} = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \left(-R_s - \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} \right) i_{s\alpha} + \frac{L_m}{(\sigma L_s L_r T_r)} \psi_{r\alpha} + \frac{L_m \omega_r}{(\sigma L_s L_r)} \psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{s\alpha} \quad (2.23)$$

$$\frac{d}{dt}i_{s\beta} = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \left(-R_s - \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} \right) i_{s\beta} - \frac{L_m \omega_r}{(\sigma L_s L_r)} \psi_{r\alpha} + \frac{L_m}{(\sigma L_s L_r T_r)} \psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{s\beta} \quad (2.24)$$

$$\frac{d}{dt}\psi_{r\alpha} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \psi_{r\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta} \quad (2.25)$$

$$\frac{d}{dt}\psi_{r\beta} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\beta} + \omega_r \psi_{r\alpha} - \frac{1}{T_r} \psi_{r\beta} \quad (2.26)$$

dengan $\frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} = \frac{1}{\sigma L_s}$ dan $T_r = \frac{L_r}{R_r}$

Persamaan umum torsi yaitu:

$$T_e = N_p L_m (i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad (2.27)$$

Persamaan arus rotor dalam sumbu $\alpha\beta$ adalah sebagai berikut:

$$i_{r\alpha} = \frac{\psi_{r\alpha} - L_m i_{s\alpha}}{L_r} \quad \text{dan} \quad i_{r\beta} = \frac{\psi_{r\beta} - L_m i_{s\beta}}{L_r}$$

Persamaan umum torsi (2.27) dengan mensubstitusi persamaan arus rotor $\alpha\beta$ adalah sebagai berikut:

$$T_e = N_p L_m \left(\frac{\psi_{r\alpha} i_{s\beta}}{L_r} - \frac{\psi_{r\beta} i_{s\alpha}}{L_r} \right) \quad (2.28)$$

Persamaan umum kecepatan rotor adalah

$$\frac{d}{dt}\omega_r = \frac{(T_e - T_l)}{J} \quad (2.29)$$

Dengan mensubstitusi Persamaan (2.28) maka Persamaan (2.29) menjadi:

$$\frac{d}{dt}\omega_r = \frac{N_p L_m}{J} \left(\frac{\psi_{r\alpha} i_{s\beta}}{L_r} - \frac{\psi_{r\beta} i_{s\alpha}}{L_r} \right) - \frac{T_l}{J} \quad (2.30)$$

dengan persamaan posisi rotor adalah:

$$\frac{d}{dt}\theta_r = \omega_r \quad (2.31)$$

Persamaan (2.23), (2.24), (2.25), dan (2.26) dapat ditulis dalam bentuk matriks, yaitu:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix}$$

dengan :

$$\begin{aligned} a_{11} = a_{22} &= \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \left(-R_s - \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} \right) & a_{13} = a_{24} &= \frac{L_m}{(\sigma L_s L_r T_r)} \\ a_{12} = a_{21} = a_{32} = a_{41} &= 0 & a_{14} = -a_{23} &= \frac{L_m \omega_r}{(\sigma L_s L_r)} \\ a_{31} = a_{42} &= \frac{L_m}{T_r} & a_{33} = a_{44} &= -\frac{1}{T_r} \\ a_{34} = -a_{43} &= \omega_r & b_{12} = b_{21} = b_{31} = b_{41} = b_{42} &= 0 \\ b_{11} = b_{22} &= \frac{1}{\sigma L_s} \end{aligned}$$

sedangkan vektor keluarannya dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$I_s = CX$$

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix}$$

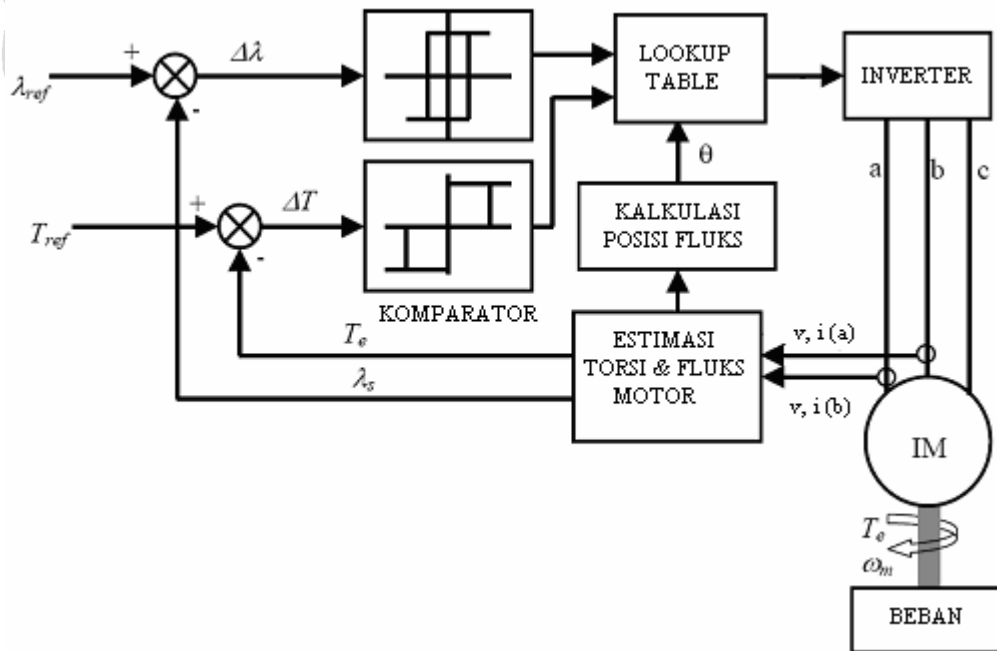
Parameter motor induksi tiga fasa yang digunakan adalah:

- | | |
|--|--------------------------------------|
| R_s, R_r = Resistansi stator dan rotor (Ohm) | N_p = Jumlah pasang kutub |
| L_s, L_r = Induktansi stator dan rotor (H) | T_e = Torsi elektromagnetik (Nm) |
| L_m = Induktansi magnetik (H) | ω_r = Kecepatan rotor (rad/s) |

2.2 Metode Kendali Torsi Langsung

Kendali Torsi Langsung (KTL) atau biasa disebut dengan *Direct Torque Control* (DTC) adalah metode pengendalian torsi secara langsung berdasarkan kondisi elektromagnetik dari motor induksi. Pada KTL dimungkinkan untuk dilakukan pengendalian langsung torsi dan fluks stator dengan penentuan pemilihan vektor tegangan. Terdapat beberapa kekurangan dari metode KTL yaitu kemungkinan terjadinya masalah dengan adanya riak / *ripple* yang cukup besar pada torsi dan fluks dalam keadaan tunak[3-7]. Dalam tesis ini akan dilakukan perbaikan terhadap kondisi riak yang terjadi pada torsi dan fluks stator.

Rangkaian sistem KTL meliputi pengendali komparator histerisis, estimator untuk torsi, nilai magnitud fluks dan posisi fluks stator, dan pemilihan vektor tegangan (*voltage selector*) sebagai masukan inverter sumber tegangan atau biasa disebut dengan *Voltage Source Inverter* (VSI) [11]. Proses implementasi KTL pada motor induksi tiga fasa dapat digambarkan dalam blok diagram sebagai berikut:



Gambar 2.2 Rangkaian Dasar Kendali Torsi Langsung

Pada Gambar 2.2 ditunjukkan metode KTL menggunakan komparator histerisis yang akan dilakukan perbandingan antara nilai acuan fluks stator dan

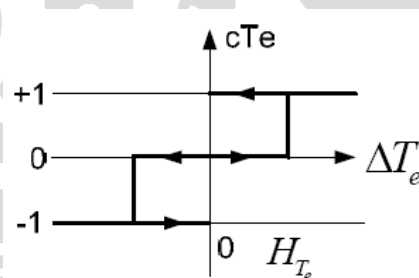
torsi dengan nilai hasil estimasi fluks stator dan torsi dari motor. Pada komparator histerisis ini terdapat kondisi fluks dan torsi, dan dengan posisi fluks stator akan digunakan untuk menentukan pemilihan vektor tegangan.

2.2.1 Komparator Histerisis

Pengendalian pada metode KTL dilakukan dengan cara membandingkan torsi hasil estimasi dengan torsi acuannya dan membandingkan fluks hasil estimasi dengan fluks acuannya. Komparator histerisis ini membandingkan kesalahan torsi dan fluks dengan nilai histerisisnya.

2.2.1.1 Komparator Histerisis Torsi Tiga Level

Pada pengendalian torsi digunakan komparator histerisis tiga level untuk torsi. Hal ini berarti terdapat tiga keadaan yang diinginkan untuk torsi (cT_e). (cT_e) akan bernilai 1 jika torsi yang dibutuhkan harus dinaikkan. Jika dibutuhkan penurunan nilai torsi maka (cT_e) akan bernilai -1, sedangkan jika tidak dibutuhkan adanya perubahan nilai torsi, maka nilai (cT_e)= 0.



Gambar 2.3 Komparator Histerisis Torsi Tiga Level

Prinsip kerja komparator histerisis torsi tiga level untuk mengubah keadaan torsi adalah sebagai berikut:

- * Jika selisih dari torsi acuan dengan torsi estimasi **lebih besar sama dengan nilai positif histerisisnya (H_{T_e})** maka kondisi torsi (cT_e) akan bernilai 1.
- * Jika selisih dari torsi acuan dengan torsi estimasi **lebih kecil sama dengan nilai negatif histerisisnya ($-H_{T_e}$)** maka kondisi torsi (cT_e) akan bernilai -1.
- * Jika selisih dari torsi acuan dengan torsi estimasi **diantara nilai positif histerisis (H_{T_e}) dengan nilai negatif histerisisnya ($-H_{T_e}$)** maka harus dilihat kondisi torsi sebelumnya.

* Bila nilai kesalahan berada **antara 0 dan $(-H_{T_e})$** terdapat tiga keadaan torsi yang harus diperhatikan:

** Jika kondisi torsi sebelumnya $(cT_e) = -1$ maka nilai (cT_e) yang baru adalah -1.

** Jika kondisi torsi sebelumnya $(cT_e) = 1$ maka nilai (cT_e) yang baru adalah 0

** Jika kondisi torsi sebelumnya $(cT_e) = 0$ maka nilai (cT_e) yang baru adalah 0

* Jika nilai kesalahan berada **antara 0 dan (H_{T_e})** terdapat tiga keadaan torsi yang juga harus diperhatikan:

** Jika kondisi torsi sebelumnya $(cT_e) = -1$ maka nilai (cT_e) yang baru adalah 0,

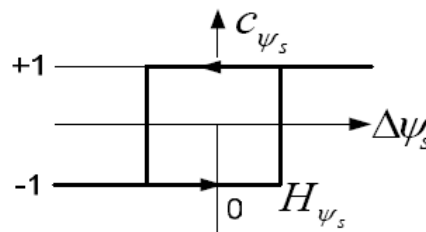
** Jika kondisi torsi sebelumnya $(cT_e) = 0$ maka nilai (cT_e) yang baru adalah 0.

** Jika kondisi torsi sebelumnya $(cT_e) = 1$ maka nilai (cT_e) yang baru adalah 1.

2.2.1.2 Komparator Histerisis Fluks Dua Level

Pada pengendalian fluks digunakan komparator histerisis dua level. Hal ini menunjukkan hanya terdapat dua keadaan atau kondisi yang diinginkan untuk fluks ($c\psi$).

* Jika fluks yang dibutuhkan harus dinaikkan maka $(c\psi)$ akan bernilai 1, sedang bila dibutuhkan penurunan nilai fluks maka $(c\psi)$ akan bernilai -1.



Gambar 2.4 Komparator Histerisis Fluks Dua Level

Cara kerja komparator histerisis fluks dua level lebih sederhana bila dibandingkan dengan komparator histerisis tiga level untuk torsi.

* Jika selisih nilai fluks acuan dengan fluks estimasi **lebih kecil sama dengan nilai negatif histeris fluks ($-H_{fluks}$)**, maka kondisi fluks ($c\psi$) akan bernilai -1,

* Jika selisih nilai fluks acuan dengan fluks estimasi **lebih besar dari nilai positif histerisis (H_{fluks})** maka kondisi fluks ($c\psi$) akan bernilai 1.

* Jika selisih nilai fluks acuan dengan fluks estimasi **diantara nilai negatif histerisis dan positif histerisis fluks** maka perlu dilihat $(c\psi)$ (kondisi fluks) sebelumnya.

** Jika $(c\psi)$ sebelumnya bernilai -1 maka $(c\psi)$ yang baru adalah -1,

** Jika $(c\psi)$ sebelumnya bernilai 1 maka $(c\psi)$ yang baru adalah 1.

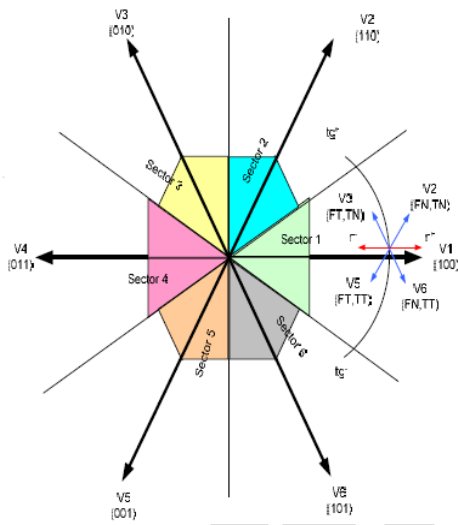
2.2.2 Pemilihan Vektor Tegangan

Pemilihan vektor tegangan bertujuan untuk mengatur tegangan yang akan masuk ke motor induksi tiga fasa dengan vektor kontrol, dengan memilih vektor tegangan stator yang memenuhi kondisi torsi dan fluks yang ditentukan untuk setiap sektor.

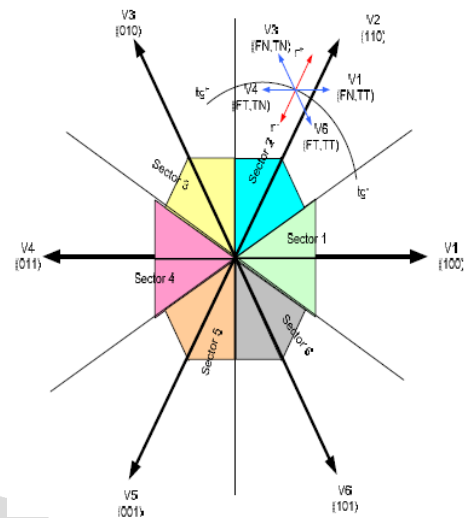
Terdapat enam vektor tegangan dan dua vektor tegangan nol (0) sebagai keluaran inverter, yaitu $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6,$ dan V_7 . KTL menggunakan delapan kemungkinan vektor tegangan stator untuk mengendalikan fluks stator dan torsi untuk memenuhi nilai acuan yang ditentukan. Penentuan pemilihan vektor tegangan stator pada KTL ini dilakukan dengan menempatkan komponen radial dan tangensial pada daerah atau sektor vektor fluks.

Pada penentuan vektor tegangan ini terdapat enam sektor atau daerah dengan sudut tiap sektornya adalah 60° . Pembagian sektor ini dimulai dari sudut $-30^\circ - 30^\circ$ untuk sektor 1, untuk sektor 2 dari sudut $30^\circ - 90^\circ$, begitu seterusnya dengan interval 60° sampai sektor 6 dengan sudut antara $270^\circ - 30^\circ$. Gambar 2.5 yaitu pemilihan vektor tegangan saat fluks stator di sektor 1, tegangan yang tidak digunakan adalah V_1 dan V_4 karena sejajar dengan garis normal. Untuk setiap sektor terdapat kondisi fluks naik (FN), fluks turun (FT), torsi naik (TN), torsi tetap, dan torsi turun (TT) yang dilihat dari sumbu tangensial (tg) dan sumbu normal (n).

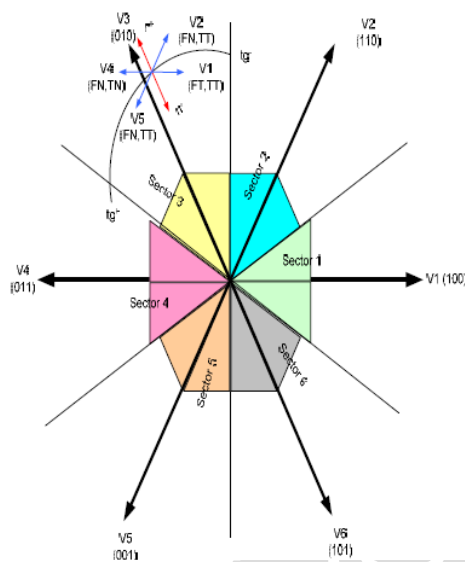
Vektor tegangan searah dengan sumbu normal positif (n+) adalah kondisi fluks naik (FN). Vektor tegangan searah dengan sumbu normal negatif (n-) adalah kondisi fluks turun (FT). Vektor tegangan searah dengan sumbu tangensial positif (tg+) adalah kondisi torsi naik (TN). Vektor tegangan searah dengan sumbu tangensial negatif (tg-) adalah kondisi torsi turun (TT). Penentuan untuk sektor selanjutnya juga sama seperti sektor 1 hanya tergantung dari sumbu tangensial dan garis normal pada masing-masing sektor tersebut, Berikut keenam gambar pemilihan vektor tegangan pada daerah fluks stator.



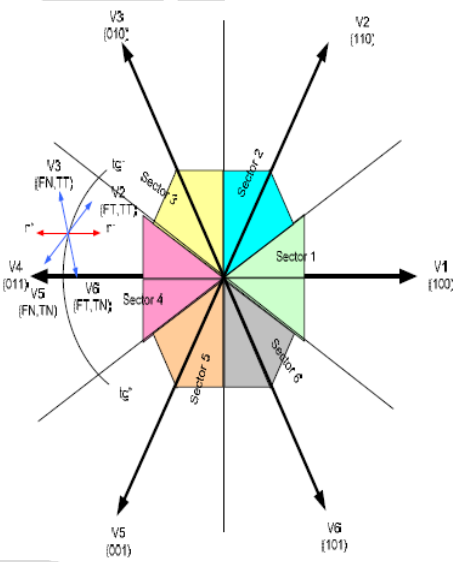
Gambar 2.5 Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 1



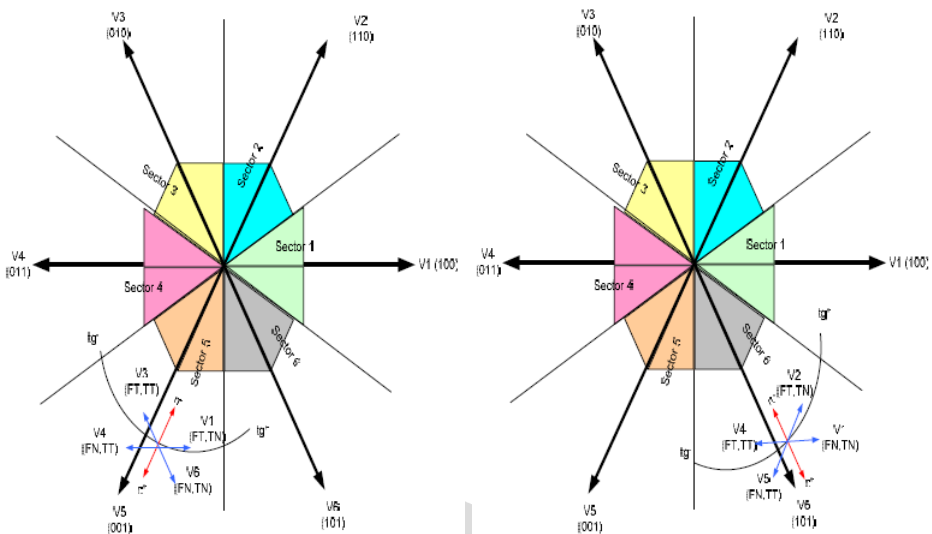
Gambar 2.6 Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 2



Gambar 2.7 Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 3



Gambar 2.8 Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 4



Gambar 2.9 Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 5

Gambar 2.10 Vektor tegangan saat fluks stator dalam sektor 6

Dari keenam gambar pemilihan vektor tegangan masing-masing sektor dapat dituliskan menjadi pensaklaran sebagai berikut:

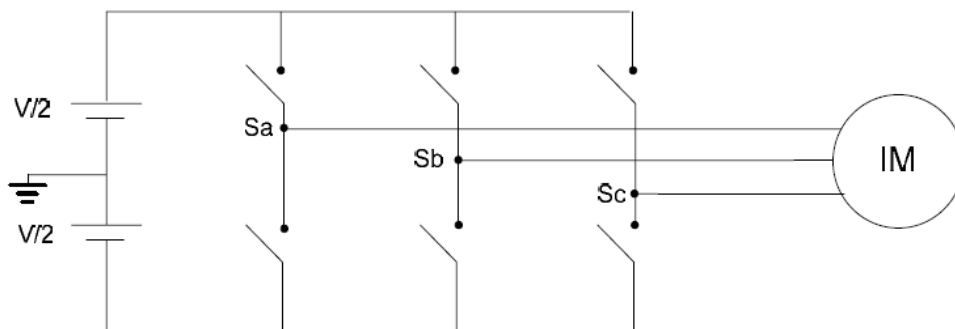
Tabel 2.1 Pemilihan vektor tegangan [11]

φ	T_e	Sector					
		1	2	3	4	5	6
$c_\varphi = 1$	$c_T = 1$	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	$c_T = 0$	V7	V0	V7	V0	V7	V0
	$c_T = -1$	V6	V1	V2	V3	V4	V5
$c_\varphi = -1$	$c_T = 1$	V3	V4	V5	V6	V1	V2
	$c_T = 0$	V0	V7	V0	V7	V0	V7
	$c_T = -1$	V5	V6	V1	V2	V3	V4

Dengan $c_\varphi = 1$ berarti fluks harus dinaikkan sebaliknya $c_\varphi = -1$ berarti fluks harus diturunkan. Untuk kondisi torsi yaitu $c_T = 1$ berarti torsi harus dinaikkan, $c_T = 0$ berarti torsi tetap tidak perlu diubah nilainya, dan $c_T = -1$ torsi diturunkan.

2.2.3 Inverter Sumber Tegangan

Inverter Sumber Tegangan memiliki enam buah saklar (tiga pasang) yang bekerja bergantian. Inverter akan menghasilkan tegangan tiga fasa sebagai masukan motor induksi. Tiap pasangannya terdapat dua buah saklar yang bekerja bergantian. Hal ini berarti tidak ada kemungkinan dari satu pasang saklar bekerja bersamaan karena dapat mengakibatkan terjadinya hubung singkat. Jika Sa bernilai 1 maka Sa' bernilai 0.



Gambar 2.11 Diagram Inverter Sumber Tegangan

Keluaran inverter yang berupa tegangan tiga fasa masukan dari motor adalah dapat dirumuskan dengan persamaan:

$$V_n = (S_n - S_n') \times V_{DC} / 2 \quad (n = a, b, c) \quad 2.32$$

Tabel 2.2 Pensaklaran inverter berdasarkan vektor tegangan

	Sa	Sb	Sc
V0	0	0	0
V1	1	0	0
V2	1	1	0
V3	0	1	0
V4	0	1	1
V5	0	0	1
V6	1	0	1
V7	1	1	1

2.2.4 Estimasi Model Tegangan

Pada pengestimasi menggunakan model tegangan, perhitungan parameter estimasinya menggunakan persamaan fluks stator estimasi. Fluks stator dan torsi estimasi dihitung berdasarkan persamaan dinamik motor model kerangka acuan stator yang diberikan pada Persamaan (2.31) sampai (2.33)[11].

Persamaan model tegangan untuk mendapatkan estimasi fluks stator adalah:

$$\bar{\psi}_s = \int \bar{V}_s - R_s \bar{i}_s dt \quad (2.31)$$

Persamaan torsinya :

$$T_e = N_p (\bar{\psi}_{ra} \bar{i}_{s\beta} - \bar{\psi}_{r\beta} \bar{i}_{s\alpha}) \quad (2.32)$$

Sedangkan untuk mendapatkan posisi fluks stator digunakan persamaan :

$$\theta_{fluks} = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{\psi}_{s\beta}}{\bar{\psi}_{s\alpha}} \right) \quad (2.33)$$

2.3 Pengendali Logika Fuzzy

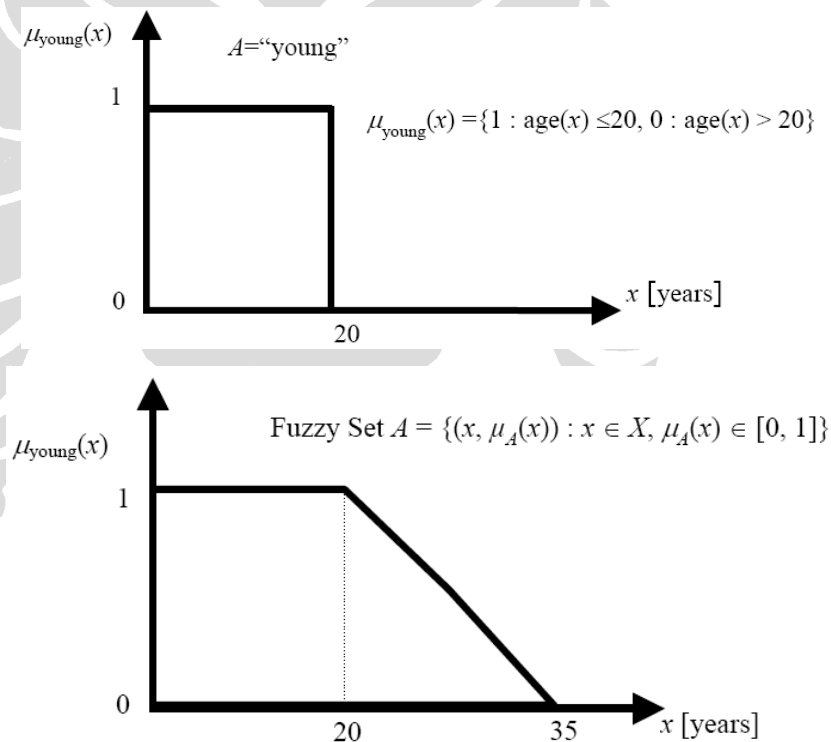
Logika Fuzzy diperkenalkan oleh Profesor Lotfi Zadeh sebagai perwakilan dan manipulasi data yang tidak tepat, atau lebih kepada ketidakpastian. Logika Fuzzy menyediakan suatu kesimpulan yang memungkinkan mendekati kemampuan manusia dalam memberikan sebuah kesimpulan untuk digunakan pada sistem yang berbasis pengetahuan. Teori logika fuzzy menyediakan suatu kekuatan matematika untuk menangkap ketidakpastian tersebut yang berhubungan dengan informasi, seperti pemikiran dan logika manusia. Pendekatan konvensional untuk merepresentasikan pengetahuan manusia tidak dapat mewakili konsep dari Fuzzy. Oleh karena itu, pendekatan berdasarkan pada logika biner tidak memberikan suatu kerangka konseptual yang sesuai dalam hubungannya dengan penyajian pengetahuan akal fikiran manusia.

2.3.1 Himpunan Fuzzy

Logika Biner berbasis pada dua nilai yaitu "truth" dan "false". Suatu variabel x secara keseluruhan adalah anggota dari sebuah himpunan ($\mu(x)=1$) atau

secara keseluruhan bukan merupakan anggota dari sebuah himpunan ($\mu(x)=0$). Logika fuzzy menggunakan keseluruhan interval antara 0 (false) dan 1 (truth) untuk menggambarkan keanggotaan suatu variabel pada suatu himpunan fuzzy.

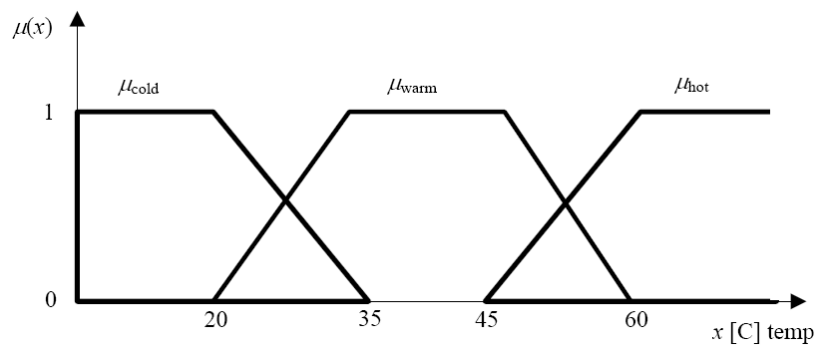
Pada teori himpunan klasik, untuk sebuah himpunan A dinyatakan sebagai himpunan yang beranggotakan orang-orang berusia muda (*young*), kita harus menentukan batasan usia yang pasti untuk himpunan tersebut misalnya yang berusia 20 atau kurang sedangkan yang lebih dari 20 bukan anggota himpunan A. Sedangkan pada logika Fuzzy definisi dari usia muda (*young*) tersebut sama dengan pemikiran manusia yaitu berkurangnya fungsi keanggotaan untuk usia diatas 20. Gambar 2.12 dapat menjelaskan definisi usia muda pada logika biner dan logika fuzzy.



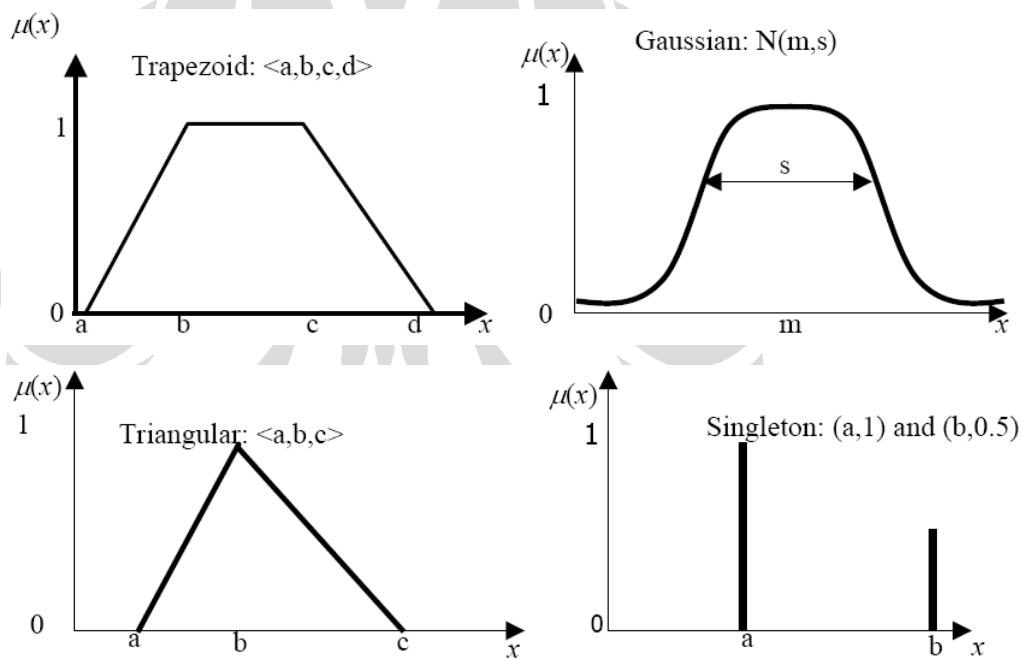
Gambar 2.12 Himpunan Biner dan Fuzzy

Himpunan Fuzzy memperbolehkan kita mengkombinasikan variabel linguistik misalnya konsep Fuzzy pada himpunan temperatur yaitu *cold*, *warm* dan *hot* secara kuantitatif dengan pendekatan fungsi keanggotaan seperti pada gambar 2.13. Fungsi keanggotaan tersebut ekuivalen dengan memberikan fungsi probabilitas pada variabel linguistik seperti halnya teori statistik. Fungsi keanggotaan juga dapat mengambil beberapa bentuk yang sesuai dengan konsep

Fuzzy. Contoh fungsi-fungsi keanggotaan yang umum digunakan pada logika Fuzzy dapat dilihat pada Gambar 2.14



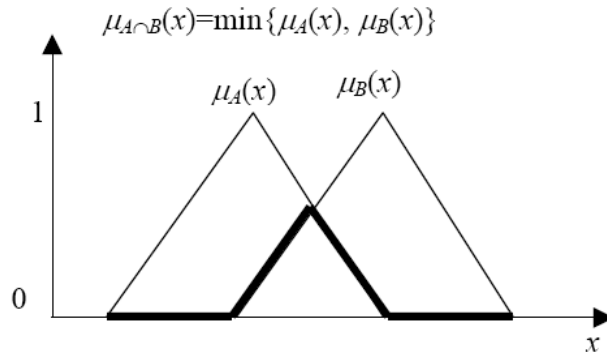
Gambar 2.13 Deskripsi kuantitatif dari konsep Fuzzy



Gambar 2.14 Fungsi-fungsi keanggotaan Logika Fuzzy

2.3.2 Operasi pada Himpunan Fuzzy

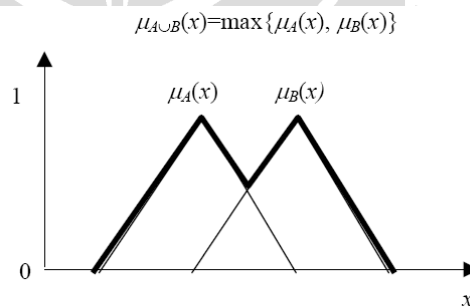
Misalkan A dan B adalah himpunan bagian dari himpunan tak kosong X. Irisan dari A dan B didefinisikan sebagai $\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$, irisan dari dua buah fungsi keanggotaan segitiga fuzzy dapat dilihat pada Gambar 2.15



Gambar 2.15 Irisan dua buah Fungsi Keanggotaan Segitiga

Sedangkan gabungan dari dua buah himpunan A dan B yaitu :

$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$, Gambar 2.16 menunjukkan gabungan dari dua buah fungsi keanggotaan Fuzzy.



Gambar 2.16 Gabungan dua buah Fungsi Keanggotaan Segitiga

Fungsi komplemen dari himpunan A yaitu:

$$\mu_{\text{not}A}(x) = 1 - \mu_A(x).$$

Definisi diatas serupa dengan operasi biner untuk AND, OR dan NOT. Namun untuk fleksibilitas dari Logika Fuzzy operasi AND dan OR dapat disesuaikan.

2.3.3 Aturan / Rule Fuzzy

Logika Fuzzy sangat baik diimplementasikan sebagai aturan kendali yang hanya bisa diekspresikan secara verbal, atau sistem yang tidak dapat dimodelkan dengan persamaan differensial linier. Fuzzy Rule adalah pernyataan kondisional yang menggunakan operasi Fuzzy dan fungsi keanggotaan untuk membuat fungsi pengendalian. Pernyataan *If-Then* digunakan untuk memformulasikan pernyataan kondisional yang meliputi rule / aturan Logika Fuzzy. Contoh sebuah pernyataan rule *If-Then* yaitu : If x is A then y is B.

Dimana A dan B adalah variabel linguistik yang merupakan himpunan-himpunan Fuzzy yang berada dalam range himpunan semesta X dan Y. Jika bagian *if* dari *rule* "x is A" disebut sebagai antecedent atau premis, sementara "y is B" disebut sebagai consequent atau kesimpulan. Contoh dari fuzzy *rule* dengan variabel linguistik yaitu :

If temperature is cold then heating is high

2.3.4 Pengendali Logika Fuzzy Mamdani

Pengendali Logika Fuzzy yang sering diimplementasikan yaitu :

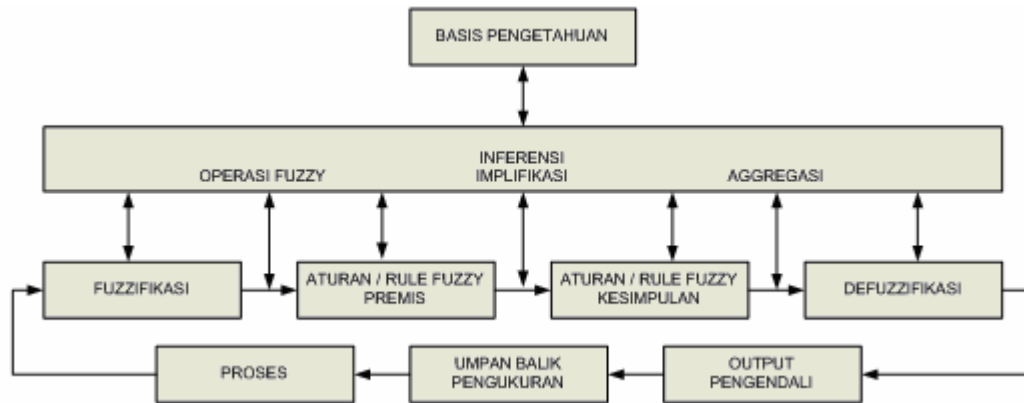
- Sistem Pengendali Logika Fuzzy Mamdani
- Sistem Pengendali Logika Fuzzy Sugeno
- Sistem Pengendali Logika Fuzzy Tsukamoto

Pada tesis ini digunakan Pengendali Fuzzy Mamdani yang terdiri dari : basis pengetahuan, fuzzifikasi, inferensi dan defuzzifikasi. Gambar 2.17 menunjukkan gambaran sebuah pengendali Fuzzy Mamdani

2.3.4.1 Sistem Basis Pengetahuan

Basis pengetahuan terdiri dari data-data dan aturan pengendali linguistik. Data-data tersebut memberikan informasi yang akan digunakan untuk menentukan aturan pengendali linguistik yang memberikan fungsi pengendalian tertentu. Pengendali Fuzzy akan memeriksa sinyal masukan dan menggunakan aturan-aturan tersebut untuk menentukan sinyal pengendali keluaran. Aturan pengendali terdiri dari himpunan aturan *if-then* yang dibentuk dengan menggunakan informasi dari :

- Pengalaman dan pengetahuan dari seorang ahli yang mengetahui sistem yang akan dikendalikan.
- Pemodelan dari pengendalian seorang operator: untuk membuat proses otomatisasi sebuah proses, aturan-aturan fuzzy akan mensistesisikan aturan pengendalian linguistik yang diperoleh dari pengalaman operator sistem yang akan dikendalikan.
- Pemodelan dari proses: Logika Fuzzy dapat dipadukan dengan teknik pengendali konvensional.



Gambar 2.17 Pengendali Logika Fuzzy Mamdani

2.3.4.2 Fuzifikasi

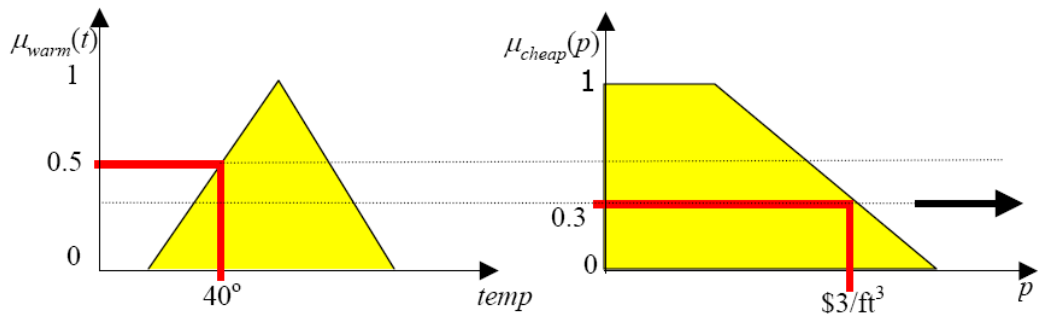
Selanjutnya dilakukan fuzifikasi untuk perhitungan variabel-variabel masukan. Semua sinyal masukan yang berupa nilai numerik ditransformasikan ke kuantitas Fuzzy. Fuzifikasi ini menggunakan fungsi keanggotaan dari premis aturan-aturan Fuzzy. Tipe dan bentuk dari fungsi keanggotaan ditentukan dengan menggunakan basis pengetahuan. Setelah difuzifikasi semua masukan akan memiliki nilai diantara [0,1] untuk tiap-tiap aturan Fuzzy.

2.3.4.3 Inferensi

Setelah semua variabel masukan diubah ke variabel linguistik, proses inferensi akan mengevaluasi tiap himpunan dari aturan if-then untuk mendapatkan variabel linguistik keluaran dengan tiga langkah, yaitu :

- Kombinasi dari bagian premis aturan fuzzy menggunakan operasi T-norms atau operasi S-norms, ketika variabel linguistik dihubungkan dengan "AND" dan "OR". Sebagai contoh : *"if temperature is warm and gas" is cheap* dikombinasikan menjadi :

$$\mu_{antecedence} = \min\{\mu_{warm}(t), \mu_{cheap}(p)\} = \min\{0.5, 0.3\} = 0.3$$

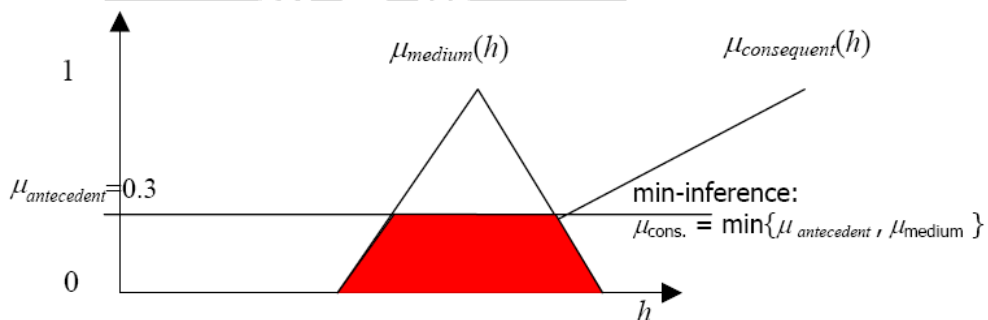


Gambar 2.18 Kombinasi Premis Aturan Fuzzy

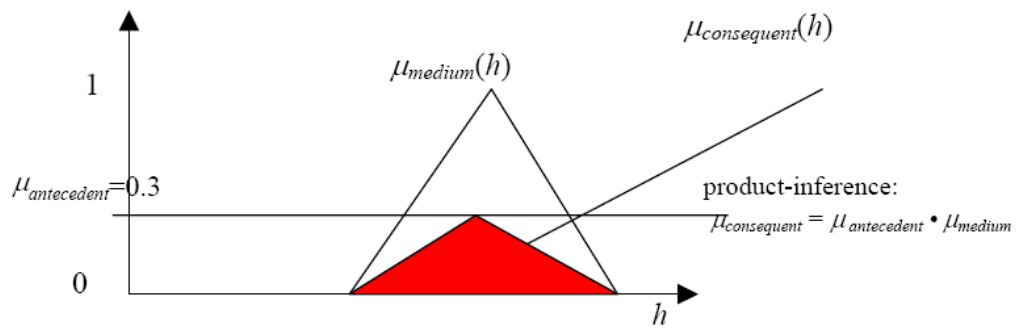
Gambar 2.18 menunjukkan fungsi keanggotaan dari masukan aturan Fuzzy yaitu temperatur dan harga gas yang mempunyai nilai 40° dan $\$3/\text{ft}^3$, setelah difuzifikasi memiliki nilai 0.5 dan 0.3. Dengan menggunakan operasi minimum diperoleh fungsi keanggotaan 0.3.

b. Tahapan Implikasi, dimana kesimpulan dari aturan fuzzy menentukan himpunan fuzzy keluaran. Sebagai contoh: *if temperature is warm and gas is cheap the heating is medium* memberikan fungsi keanggotaan medium kepada variabel keluaran. Implikasi merubah bentuk fungsi keanggotaan keluaran pada himpunan fuzzy dengan dua metode yaitu operasi *minimum* dan operasi *product*.

- Operasi *minimum* akan memenggal keluaran himpunan fuzzy seperti terlihat pada Gambar 2.19 sesuai dengan nilai fungsi keanggotaan dari kombinasi masukan.
- Operasi *product* akan menskalakan fungsi keanggotaan keluaran sesuai dengan fungsi keanggotaan masukan.

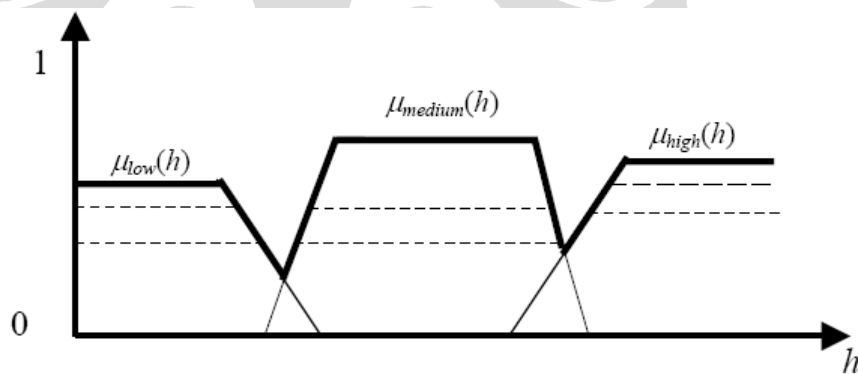


Gambar 2.19(a) Implikasi dengan operasi *minimum*



Gambar 2.19(b) Implikasi dengan operasi *product*

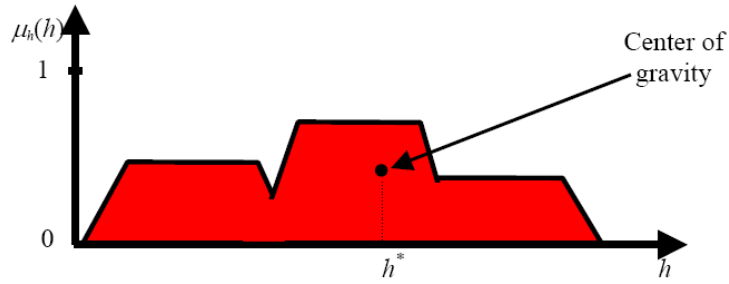
c. Agregasi: Keluaran dari pengendali Fuzzy merupakan keluaran dari semua aturan-aturan fuzzy di dalam pengendali tersebut. Aturan-aturan ini harus dikombinasikan untuk dibuat suatu keputusan. Agregasi adalah proses dimana himpunan Fuzzy akan mewakili keluaran dari tiap-tiap kesimpulan aturan yang diperoleh dari proses implikasi yang dikombinasikan ke dalam bentuk himpunan fuzzy. Pada Gambar 2.20 agregasi diperoleh dengan menggunakan operasi maximum.



Gambar 2.20 Agregasi dari kumpulan kesimpulan aturan Fuzzy

2.3.4.4 Defuzzifikasi

Proses defuzzifikasi akan menentukan nilai crisp untuk variabel keluaran dari seluruh fungsi keanggotaan yang diperoleh dari tahapan agregasi. Salah satu metode defuzzifikasi yang dikenal adalah "Center of Gravity", digunakan ketika pada tahapan implikasi dilakukan operasi minimum Fuzzy. Metode "Center of Gravity" dapat dilihat pada persamaan (2.34).



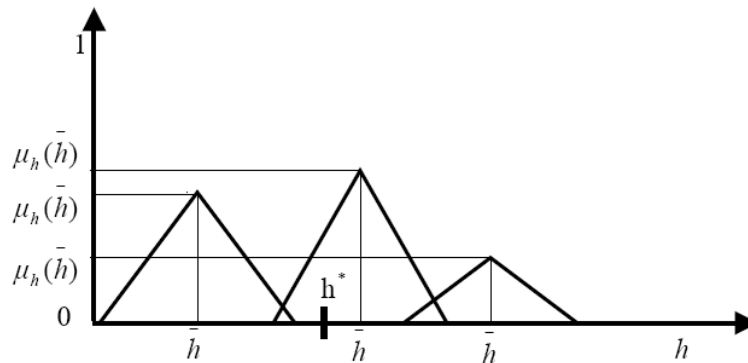
Gambar 2.21 Defuzzifikasi dengan *Center of Gravity*

$$h^* = \frac{\int h \cdot \mu_h(h) \cdot dh}{\int \mu_h(h) \cdot dh} \quad (2.34)$$

Dimana h adalah nilai keluaran crisp sebagai variabel masukan proses. μ_h adalah fungsi keanggotaan dari himpunan keluaran Fuzzy.

Metode defuzzifikasi yang lainnya adalah "center average", dengan persamaan (2.35), dimana nilai variabel keluarannya hasil operasi maksimum fungsi keanggotaan yang terskala pada tiap-tiap aturan Fuzzy seperti pada Gambar 2.22.

$$h^* = \frac{\sum \bar{h} \cdot \mu_h(\bar{h})}{\sum \mu_h(\bar{h})} \quad (2.35)$$



Gambar 2.22. Defuzzifikasi metode *Center average*