

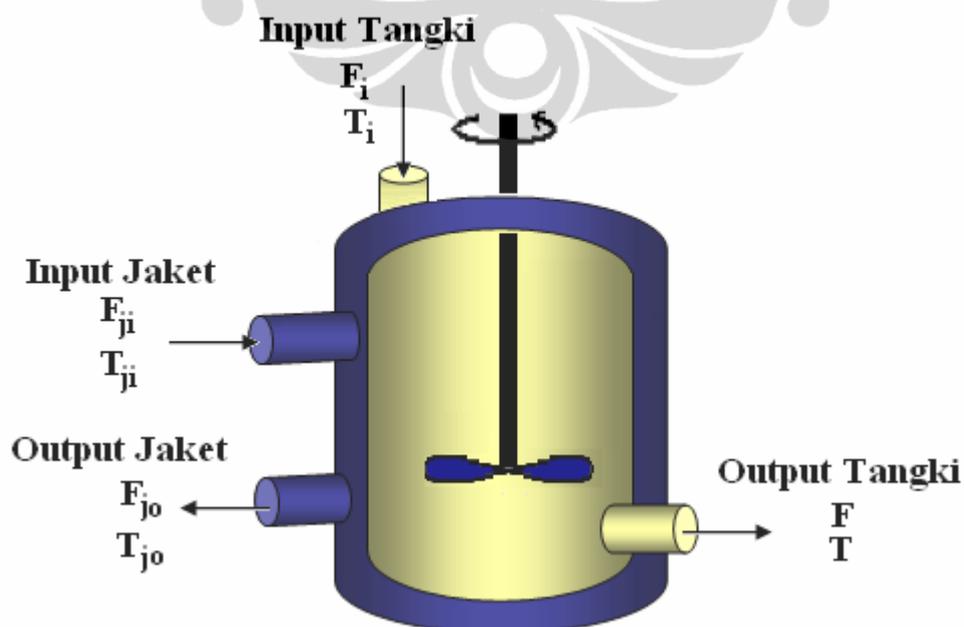
BAB 2

PEMODELAN DAN LANDASAN TEORI

SISTEM *JACKETED STIRRED TANK HEATER*

Jacketed stirred tank heater ditunjukkan pada gambar 2.1 Sistem ini terdiri dari tangki dan jaket yang mengelilingi tangki tersebut. Aliran masuk tangki berasal dari unit proses lain. Fluida ini masuk ke dalam tangki kemudian diaduk dan dipanaskan oleh jaket yang mengelilingi tangki. Input jaket berupa uap panas yang dialirkan secara terus menerus.

Penggunaan *jacket* adalah untuk menjaga sirkulasi kalor merata di sekeliling tangki dan mengurangi transfer kalor dari dalam tangki langsung ke lingkungan, karena temperatur di dalam *jacket* dijaga berada di atas temperatur fluida di dalam tangki, sehingga fluida di dalam tangki akan menyerap kalor dari *jacket* dan bukan sebaliknya. Hal inilah yang membuat penggunaan *jacket* pada *Stirred Tank Heater* dapat mempercepat proses pemanasan fluida di dalam tangki. Pada proses ini diasumsikan tidak terjadi perubahan fase di dalam fluida tangki atau fluida jaket.

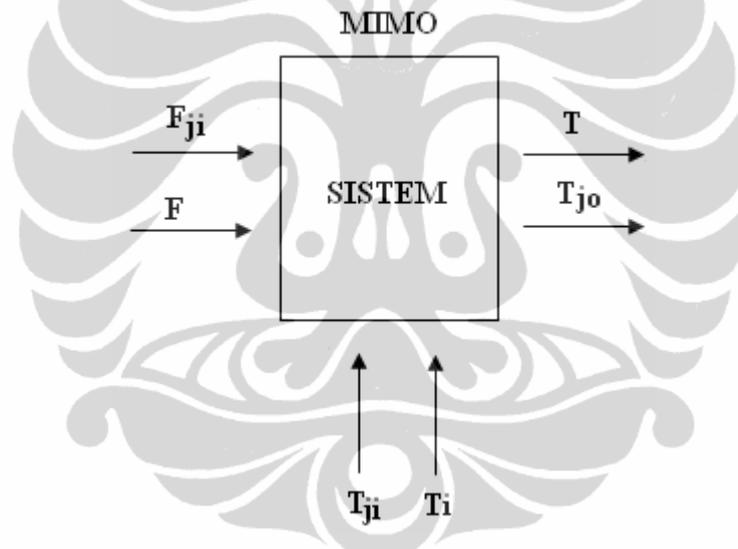


Gambar 2.1. Diagram Proses Sistem Jacketed Stirred Tank Heater

2.1 Model Sistem *Jacketed Stirred Tank Heater*

Model sistem *Jacketed Stirred Tank Heater* diperoleh dengan menggunakan kesetimbangan massa dan energi. Model sistem *Jacketed Stirred Tank Heater* merupakan model yang non linier.

Sistem *Jacketed Stirred Tank Heater* merupakan sistem *Multi Input Multi Output* (MIMO), yang terdiri dari dua variabel input dan dua variabel output. Input dari sistem ini adalah debit input jaket (F_{ji}) dan debit fluida input tangki (F), disturbance sistem adalah temperatur jaket input (T_{ji}) dan temperatur tangki input (T_i). Output dari sistem ini adalah temperatur output tangki (T) dan temperatur output jaket (T_{jo}).



Gambar 2.2. Blok Diagram *Jacketed Stirred Tank Heater*

Asumsi yang digunakan dalam pemodelan ini adalah:

- kerapatan (massa jenis) dan kapasitas panas dalam tangki dan jaket konstan.
- Percampuran dalam jaket maupun dalam tangki sempurna
- Output sistem yaitu : Temperatur output tangki dan temperatur output jaket.
- Debit fluida output tidak dikendalikan sedangkan temperatur fluida dikendalikan sesuai dengan temperatur yang diinginkan.

- Rata-rata transfer panas dari jaket ke tangki didasarkan pada persamaan $Q = UA(T_{jo} - T)$, dimana U adalah koefisien transfer panas dan A adalah luas area transfer panas.

Dengan asumsi-asumsi tersebut diatas, akan dapat diturunkan persamaan matematis untuk sistem ini. Seluruh persamaan yang dituliskan berikut ini diambil dari model yang disusun oleh oleh B.Wayne Bequette[1], dituliskan disini untuk melengkapi pembahasan dalam tesis ini.

2.1.1 Kestimbangan massa di sekitar tangki

Langkah yang pertama adalah menuliskan kestimbangan massa disekitar tangki sebagai berikut :

Massa fluida dalam tangki = massa fluida input – massa fluida output

$$\rho V = \rho_i V_i - \rho_o V_o \quad (2.1)$$

Persamaan (2.1) diturunkan terhadap waktu, sehingga diperoleh :

$$\frac{d\rho V}{dt} = \frac{d}{dt} [\rho_i V_i - \rho_o V_o] \quad (2.2)$$

$$\frac{d\rho V}{dt} = F_i \rho_i - F \rho_o \quad (2.3)$$

Jika diasumsikan densitas fluida konstan $\rho = \rho_i = \rho_o$ dan volume konstan

$\frac{dV}{dt} = 0$ maka persamaan (2.3) dapat dituliskan menjadi :

$$F_i = F \quad (2.4)$$

Persamaan (2.4) menyatakan bahwa debit input tangki sama dengan debit output tangki.

2.1.2 Kestimbangan energi di sekitar tangki

Langkah selanjutnya adalah menuliskan kestimbangan energi di sekitar tangki sebagai berikut :

Akumulasi = energi input tangki – energi output tangki + Energi Insulasi

$$\frac{dV\rho c_p(T-T_{ref})}{dt} = F_i\rho_i c_p(T_i - T_{ref}) - F\rho_o c_p(T - T_{ref}) + Q \quad (2.5)$$

Berdasarkan persamaan (2.4) maka persamaan (2.5) dapat dituliskan menjadi,

$$\frac{dV\rho c_p(T-T_{ref})}{dt} = F\rho_i c_p(T_i - T_{ref}) - F\rho_o c_p(T - T_{ref}) + Q \quad (2.6)$$

Jika diasumsikan densitas dan kapasitas fluida konstan $\rho = \rho_i = \rho$ maka persamaan (2.6) dapat disederhanakan menjadi,

$$\frac{d(T - T_{ref})}{dt} = \frac{F}{V} [(T_i - T_{ref}) - (T - T_{ref})] + \frac{Q}{V\rho c_p} \quad (2.7)$$

$$\frac{d(T - T_{ref})}{dt} = \frac{F}{V}(T_i - T) + \frac{Q}{V\rho c_p} \quad (2.8)$$

Karena T_{ref} sebagai titik kerja (titik referensi) yang dianggap $\frac{dT_{ref}}{dt} = 0$, maka

$$\begin{aligned} \frac{d(T - T_{ref})}{dt} &= \frac{dT}{dt} - \frac{dT_{ref}}{dt} \\ \frac{d(T - T_{ref})}{dt} &= \frac{dT}{dt} - 0 \\ \frac{d(T - T_{ref})}{dt} &= \frac{dT}{dt} \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V}(T_i - T) + \frac{Q}{V\rho c_p} \quad (2.10)$$

Setelah mendapatkan persamaan temperatur fluida dalam tangki, selanjutnya dapat ditentukan kesetimbangan massa di sekitar jaket dan kesetimbangan energi di sekitar jaket.

2.1.3 Kesetimbangan massa di sekitar jaket

Berdasarkan kepada kesetimbangan massa disekitar jaket pada tangki ini, dapat dituliskan persamaan sebagai berikut :

Massa fluida dalam jaket = massa fluida jaket input – massa fluida jaket output

Sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\rho_j V_j = \rho_{ji} V_{ji} - \rho_{jo} V_{jo} \quad (2.11)$$

Dengan menurunkan persamaan (2.11) terhadap waktu akan diperoleh sebagai berikut,

$$\frac{d(\rho_j V_j)}{dt} = \frac{d(\rho_{ji} V_{ji})}{dt} - \frac{d(\rho_{jo} V_{jo})}{dt} \quad (2.12)$$

$$\rho_j \frac{dV_j}{dt} = \rho_{ji} F_{ji} - \rho_{jo} F_{jo} \quad (2.13)$$

Dengan asumsi bahwa fluida yang digunakan adalah bersifat *incompressible* maka dapat dianggap massa jenis fluida sebelum dan sesudah pemanasan adalah tetap.

$\rho_{ji} = \rho_{jo} = \rho$ sehingga diperoleh,

$$\frac{dv_j}{dt} = F_{ji} - F_{jo} \quad (2.14)$$

Jika diasumsikan tidak ada perubahan volume dalam jaket

$$\frac{dv_j}{dt} = 0 \quad (2.15)$$

Maka diperoleh

$$F_{ji} = F_{jo} \quad (2.16)$$

Berdasarkan persamaan (2.16) maka aliran debit input jaket dan aliran debit outlet jaket adalah sama atau tetap.

2.1.4 Kestimbangan energi di sekitar jaket

Berdasarkan kestimbangan energi disekitar jaket dapat dituliskan persamaan berikut :

Akumulasi = energi input jaket – energi output jaket – Energi Insulasi

$$Q = Q_{ij} - Q_j - Q$$

dimana

Q_{ij} merupakan energi yang masuk ke jaket dibawa oleh aliran masuk

Q_j merupakan energi yang keluar dari jaket dibawa oleh aliran keluar

Q merupakan energi insulasi

Karena asumsi tidak terjadi perubahan volume pada jaket sehingga $F_{ji} = F_{jo}$

$$\frac{d(V_j \rho_j c_{p,j} (T_j - T_{ref}))}{dt} = F_{jo} \rho_j c_{p,j} (T_{ji} - T_{ref}) - F_{jo} \rho_{jo} c_{p,j} (T_{jo} - T_{ref}) - Q \quad (2.17)$$

$$\frac{d(V_j \rho_j c_{pj} (T_j - T_{ref}))}{dt} = F_{jo} \rho_j c_{pj} [(T_{ji} - T_{ref}) - (T_{jo} - T_{ref})] - Q \quad (2.18)$$

Jika diasumsikan massa jenis dan kalor jenis uap air jaket konstan, didapatkan

$$\frac{d(T_j - T_{ref})}{dt} = \frac{F_{jo}}{V_j} (T_{ji} - T_{jo}) - \frac{Q}{V_j \rho_j c_{pj}}$$

Karena T_{ref} sebagai titik kerja (titik referensi) yang dianggap $\frac{dT_{ref}}{dt} = 0$, maka

$$\frac{d(T_j - T_{ref})}{dt} = \frac{dT_{jo}}{dt} \quad (2.19)$$

Maka persamaan differensial untuk temperatur jaket adalah :

$$\frac{dT_{jo}}{dt} = \frac{F_{jo}}{V_j} (T_{ji} - T_j) - \frac{Q}{V_j \rho_j c_{pj}} \quad (2.20)$$

Persamaan transfer panas dari jaket ke tangki adalah :

$$Q = UA(T_{jo} - T) \quad (2.21)$$

Persamaan (2.21) disubstitusikan ke persamaan (2.10) dan (2.20) maka model persamaan sistem ini adalah,

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V} (T_i - T) + \frac{UA(T_{jo} - T)}{V \rho c_p} \quad (2.22)$$

$$\frac{dT_{jo}}{dt} = \frac{F_{jo}}{V_j} (T_{ji} - T_{jo}) - \frac{UA(T_{jo} - T)}{V_j \rho_j c_{pj}} \quad (2.23)$$

Dimana state variabel, input variabel dan output variabel, dapat ditulis sebagai berikut :

State variabel : T dan T_{jo}

Output variabel : T dan T_{jo}

Input variabel : F dan F_{ji} .

Sebelum melakukan linearisasi pada model nonlinear, terlebih dahulu ditentukan nilai variabel state space pada saat steady state. Nilai steady state ini didapatkan dengan menyelesaikan persamaan dinamik. Parameter dalam tesis ini diambil dari acuan [1] B. Wayne Bequette.

Parameter proses yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$F_s = 1 \frac{ft^3}{min} \quad V = 10 ft^3$$

$$\rho c_p = 61,3 \frac{Btu}{^\circ F ft^3} \quad T_{jis} = 200^\circ F$$

$$\rho c_{pj} = 61,3 \frac{Btu}{^\circ F ft^3} \quad T_{jos} = 150^\circ F$$

$$T_{is} = 50^\circ F \quad V_j = 1 ft^3$$

$$T_s = 125^\circ F$$

Nilai UA dan F_{jos} dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan dinamik sistem yaitu persamaan (2.22) dan (2.23) pada saat steady state.

Nilai UA didapatkan dari persamaan (2.22) pada saat steady state yaitu $\frac{dT}{dt} = 0$,

$$0 = \frac{F_s}{V} (T_{is} - T_s) + \frac{UA(T_{jos} - T_s)}{V \rho c_p}$$

$$0 = \frac{1}{10} (50 - 125) + \frac{UA(150 - 125)}{10 \cdot 61,3}$$

$$0 = -7,5 + UA(0,040783)$$

$$UA = \frac{7,5}{0,040783}$$

$$UA = 183,9 \frac{Btu}{^\circ F min}$$

Nilai F_{jos} didapatkan dari persamaan (2.23) pada saat steady state $\frac{dT_{jo}}{dt} = 0$,

$$0 = \frac{F_{jos}}{V_j} (T_{jis} - T_{js}) - \frac{UA(T_{jos} - T_s)}{V_j \rho_j c_{pj}}$$

$$0 = \frac{F_{jos}}{1} (200 - 150) - \frac{183,9(150 - 125)}{1 \cdot 61,3}$$

$$0 = 50F_{jos} - 75$$

$$F_{jos} = \frac{-75}{-50}$$

$$F_{jos} = 1,5 \frac{ft^3}{min}$$

2.2 Model Ruang Keadaan

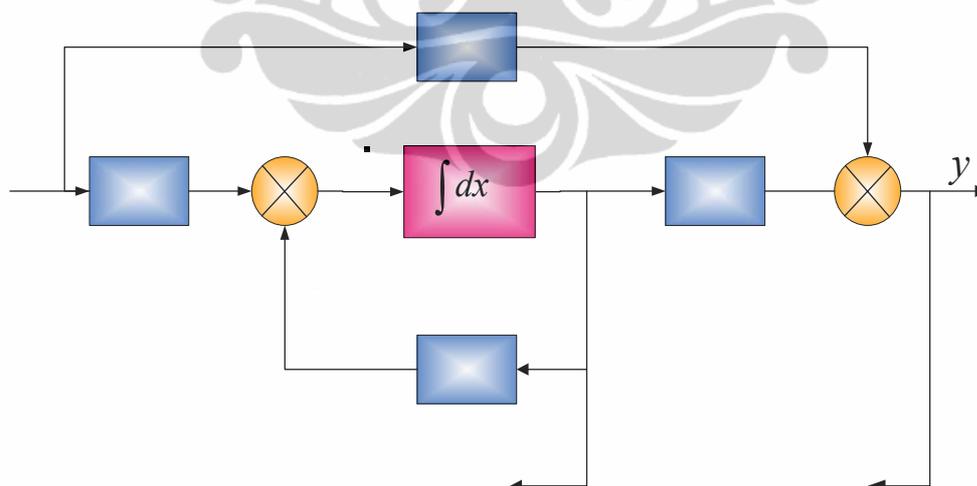
Model linier dari sistem *jacketed stirred tank heater* non linier dapat diperoleh dengan linierisasi lokal di sekitar titik operasi *steady state*. Model linier dinyatakan dalam bentuk ruang keadaan sebagai berikut :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.24)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.25)$$

\dot{x} adalah turunan terhadap waktu dari vektor keadaan, x adalah vektor keadaan, u adalah vektor masukan, y adalah vektor keluaran, A adalah matriks sistem, B adalah matriks masukan, C adalah matriks keluaran dan D adalah Matriks umpan maju.

Persamaan (2.24) dan persamaan (2.25) dapat digambarkan dalam bentuk blok diagram yang ditunjukkan pada gambar (2.3). Sistem pengendali umpan balik yang dapat diterapkan pada sistem ini yaitu output *feedback*, *state feedback* atau kombinasi keduanya. Aksi *feedback* cukup sederhana untuk menstabilkan suatu sistem yang tidak stabil atau untuk memperbaiki *performance* kestabilan sistem.



Gambar 2.3 Gambar Blok Diagram Model Ruang Keadaan

Pada persamaan ruang keadaan ini diketahui variabel-variabel yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$x = \begin{bmatrix} T - T_s \\ T_{jo} - T_{jos} \end{bmatrix}$$

state variabel

$$u = \begin{bmatrix} F_{ji} - F_{jis} \\ F - F_s \end{bmatrix}$$

input variabel

$$y = \begin{bmatrix} T - T_s \\ T_{jo} - T_{jos} \end{bmatrix}$$

output variabel

Persamaan dinamik pada sistem ini,

$$\frac{dT}{dt} = f_1(T, T_{jo}, F_{jo}, F) = \frac{F}{V}(T_i - T) + \frac{UA(T_{jo} - T)}{V\rho c_p} \quad (2.26)$$

$$\frac{dT_{jo}}{dt} = f_2(T, T_{jo}, F_{jo}, F) = \frac{F_{ji}}{V_j}(T_{ji} - T_{jo}) - \frac{UA(T_{jo} - T)}{V_j\rho_j c_{pj}} \quad (2.27)$$

Nilai koefisien-koefisien matriks A adalah :

$$a_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}$$

$$a_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} = \frac{\partial f_1}{\partial (T - T_s)} = \frac{\partial f_1}{\partial T} = -\frac{F_s}{V} - \frac{UA}{V\rho c_p} = -\frac{1}{10} - \frac{183,9}{10.61,3} = -0,1 - 0,3 = -0,4$$

$$a_{12} = \frac{\partial f_1}{\partial x_2} = \frac{\partial f_1}{\partial (T_{jo} - T_{jos})} = \frac{\partial f_1}{\partial T_{jo}} = \frac{UA}{V\rho c_p} = \frac{183,9}{10.61,3} = 0,3$$

$$a_{21} = \frac{\partial f_2}{\partial x_1} = \frac{\partial f_2}{\partial (T - T_s)} = \frac{\partial f_2}{\partial T} = \frac{UA}{V_j\rho_j c_{pj}} = \frac{183,9}{1.61,3} = 3$$

$$a_{22} = \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = \frac{\partial f_2}{\partial (T_{jo} - T_{jos})} = \frac{\partial f_2}{\partial T_{jo}} = -\frac{F_{jos}}{V_j} - \frac{UA}{V_j\rho_j c_{pj}} = -\frac{1,5}{1} - \frac{183,9}{1.61,3} = -1,5 - 3 = -4,5$$

Nilai koefisien-koefisien matriks B adalah :

$$b_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial u_j}$$

$$b_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial u_1} = \frac{\partial f_1}{\partial (F_{ji} - F_{jis})} = \frac{\partial f_1}{\partial F_{jo}} = 0$$

$$b_{12} = \frac{\partial f_1}{\partial u_2} = \frac{\partial f_1}{\partial (F - F_s)} = \frac{\partial f_1}{\partial F} = \frac{T_i - T_s}{V} = \frac{50 - 125}{10} = -7,5$$

$$b_{21} = \frac{\partial f_2}{\partial u_1} = \frac{\partial f_2}{\partial (F_{ji} - F_{jis})} = \frac{\partial f_2}{\partial F_{jo}} = \frac{T_{jis} - T_{js}}{V_j} = \frac{200 - 150}{1} = 50$$

$$b_{22} = \frac{\partial f_2}{\partial u_2} = \frac{\partial f_2}{\partial (F - F_s)} = \frac{\partial f_2}{\partial F} = 0$$

Sehingga persamaan ruang keadaan untuk sistem *Jacketed Stirred Tank Heater* dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Dengan memasukkan koefisien-koefisien matriks A dan B menjadi,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -0,4 & 0,3 \\ 3 & -4,5 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -7,5 \\ 50 & 0 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Sedangkan persamaan output untuk model ruang keadaan adalah :

$$y = cx + du \quad (2.30)$$

Dimana y adalah output variabel yaitu T dan T_{jo}, disturbance D₁= T₁ dan D₂ = T_{ji}

Sehingga persamaan output untuk sistem ini dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$y = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

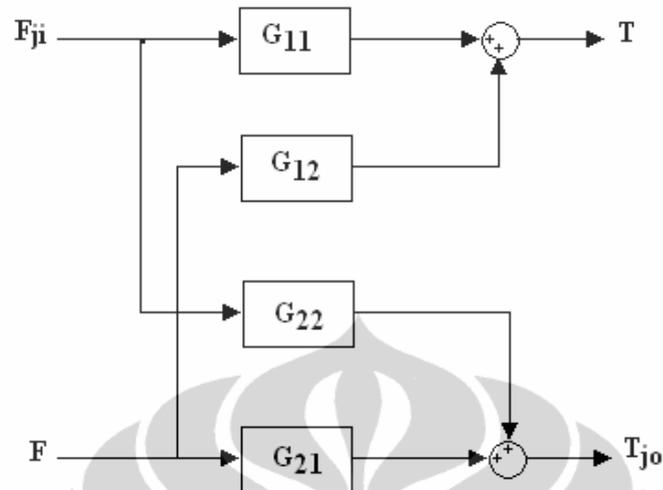
Nilai koefisien-koefisien matriks C dan D memiliki nilai sebagai berikut :

$$\begin{matrix} c_{11} = 1 & c_{12} = 0 \\ c_{21} = 0 & c_{22} = 1 \end{matrix} \quad \text{dan} \quad \begin{matrix} d_{11} = 0,1 & d_{12} = 0 \\ d_{21} = 0 & d_{22} = 1,5 \end{matrix}$$

2.3 Model Fungsi Alih Sistem

Seperti halnya Gambar 2.2, dimana sistem jacketed stirred tank ini memiliki dua variabel masukan yaitu F_{ji} merupakan variabel yang mempresentasikan debit input jaket dan F merupakan variabel yang mempresentasikan debit input tangki, sedangkan untuk variabel keluaran terdiri dari dua variabel yaitu T merupakan variabel yang mempresentasikan temperatur output tangki dan T_{jo} merupakan

variabel yang mempresentasikan temperatur output jaket. Gambar 2.4 merupakan blok diagram fungsi alih sistem jacketed stirred tank heater yang disimulasikan.



Gambar 2.4 Diagram Blok Fungsi Alih Sistem Jacketed Stirred Tank Heater

Perbandingan keluaran dan masukan sistem yang akan dikendalikan dinamakan fungsi alih sistem, biasanya diberi simbol $G(s)$, sehingga dapat ditulis :

$$T(s) = G_{11}(s)F_{ji}(s) + G_{12}(s)F(s) \quad (2.32)$$

$$T_{jo}(s) = G_{21}(s)F(s) + G_{22}(s)F_{ji}(s) \quad (2.33)$$

Dimana $G_{ij}(s)$ merupakan fungsi alih yang menghubungkan keluaran ke- i dan masukan ke- j dengan menggunakan notasi matriks, dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} T \\ T_{jo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_j \\ F_{ji} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Matriks fungsi alih sistem berhubungan dengan input dan output sistem dan dapat ditulis sebagai berikut :

$$y(s) = G(s)u(s) \quad (2.35)$$

Dimana $y(s)$ adalah bentuk transformasi Laplace dari vektor keluaran $y(t)$, $G(s)$ adalah matriks fungsi alih sedang kan $u(s)$ adalah bentuk transformasi Laplace dari vektor masukan $u(t)$.

Matriks fungsi alih didapat dalam bentuk :

$$G(s) = C(sI - A)^{-1} B \quad (2.36)$$

Dengan menggunakan MATLAB SS2TF (lihat lampiran), dapat dihitung matriks fungsi alih $G(s)$ sebagai berikut :

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

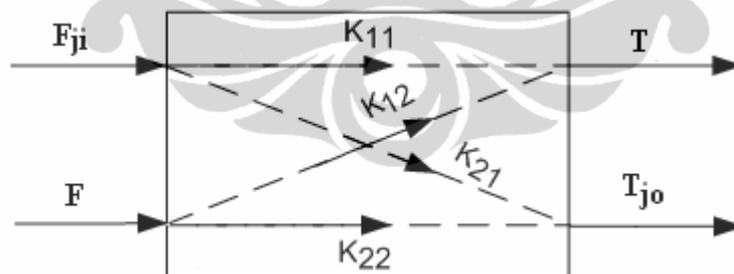
Dengan memasukkan nilai A, B dan C maka fungsi alih sistem jacketed stirred tank heater adalah

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{15}{s^2 + 4,9s + 0,9} & \frac{(-7,5s - 33,75)}{s^2 + 4,9s + 0,9} \\ \frac{(50s + 20)}{s^2 + 4,9s + 0,9} & \frac{-22,5}{s^2 + 4,9s + 0,9} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Fungsi alih dua buah input *manipulated variable* yaitu debit input jaket (F_{ji}) dan debit input tangki (F) dengan dua output sistem yaitu temperatur output tangki (T) dan temperatur output jaket (T_{jo})

2.4 Decoupler pada interaksi loop

Dalam proses *Multi Input Multi Output* (MIMO), masing-masing input mempunyai interaksi dengan masing-masing output. Untuk mengurangi interaksi antar *loop*, maka dirancang suatu *decoupler*.



Gambar 2.5 Skema Proses Multivariabel 2 x 2

Berdasarkan gambar 2.5, interaksi sistem dimana output proses yaitu temperatur output tangki (T) dan temperatur output jaket (T_{jo}) dipengaruhi oleh dua input yaitu debit input jaket (F_{ji}) dan debit input tangki (F). Dengan adanya sifat saling mempengaruhi tersebut maka perlu ditentukan pasangan input output sistem yang mempunyai interaksi paling kuat. Untuk menentukan besarnya

interaksi tersebut digunakan cara Bristol atau lebih dikenal dengan *Relative Gain Matrix* (RGM) yang selanjutnya disebut dengan matrik penguatan relatif. Langkah-langkah untuk menentukan besarnya interaksi pada sistem jacketed stirred tank heater, berdasarkan metode matrik penguatan relatif adalah sebagai berikut :

a. Penguatan lingkaran terbuka

Besar penguatan lingkaran terbuka pada sistem jacketed stirred tank heater merupakan perubahan suatu output terhadap satu input lain pada keadaan tetap :

$$K_{11} = \left. \frac{\Delta T}{\Delta F_{j1}} \right|_F \quad K_{12} = \left. \frac{\Delta T}{\Delta F_{j2}} \right|_{F_{j1}} \quad (2.39)$$

$$K_{21} = \left. \frac{\Delta T_{j0}}{\Delta F_{j1}} \right|_F \quad K_{22} = \left. \frac{\Delta T_{j0}}{\Delta F_{j2}} \right|_{F_{j1}}$$

Jika fungsi alih sistem diketahui maka besar penguatan lingkaran terbuka sistem dapat dicari dengan teorema harga akhir yaitu :

$$K_{ij} = \lim_{s \rightarrow 0} G_{ij}(s) \quad (2.40)$$

Dimana K_{ij} adalah penguatan lingkaran terbuka input ke-j terhadap output ke-i, sedangkan G_{ij} adalah fungsi alih sistem pada input ke-j terhadap output ke-i.

Besar penguatan lingkaran terbuka (K_{ij}) kemudian disusun dalam bentuk matrik yang disebut matrik penguatan keadaan tunak atau Steady State Gain Matrix (SSGM), seperti pada persamaan (2.43).

$$T \begin{matrix} F_{j1} & F_{j2} \\ \hline K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{matrix} \quad (2.41)$$

b. Menentukan besar penguatan *lingkaran tertutup*

Untuk menormalisasi elemen matrik penguatan keadaan tunak sehingga tidak tergantung terhadap satuan harga K_{ij} , maka harus dihitung penguatan dengan satu kel\$uaran pada keadaan tetap (konstan).

$$K'_{11} = \left. \frac{\Delta T}{\Delta F_{ji}} \right|_{T_{jo}} = \frac{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}{K_{22}} \quad K'_{12} = \left. \frac{\Delta T}{\Delta F} \right|_{T_{jo}} = \frac{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}{-K_{21}} \quad (2.42)$$

$$K'_{21} = \left. \frac{\Delta T_{jo}}{\Delta F_{ji}} \right|_T = \frac{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}{-K_{12}} \quad K'_{22} = \left. \frac{\Delta T_{jo}}{\Delta F} \right|_T = \frac{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}{K_{11}}$$

Dimana K'_{ij} merupakan besar penguatan relatif lingkaran tertutup pada masukan ke-j dan output ke-i.

c. Menentukan besar penguatan relatif (RGM)

Perbandingan antara penguatan lingkaran terbuka dengan lingkaran tertutup dinamakan besar penguatan relatif,

$$\mu_{ij} = \frac{K_{ij}}{K'_{ij}} \quad (2.43)$$

Dimana μ_{ij} merupakan besar penguatan relatif pada input ke-j terhadap output ke-i, sedangkan K_{ij} dan K'_{ij} masing-masing merupakan besar penguatan lingkaran terbuka dan besar penguatan lingkaran tertutup input ke-j terhadap output ke-i. Sehingga elemen-elemen penguatan relatif dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut ini :

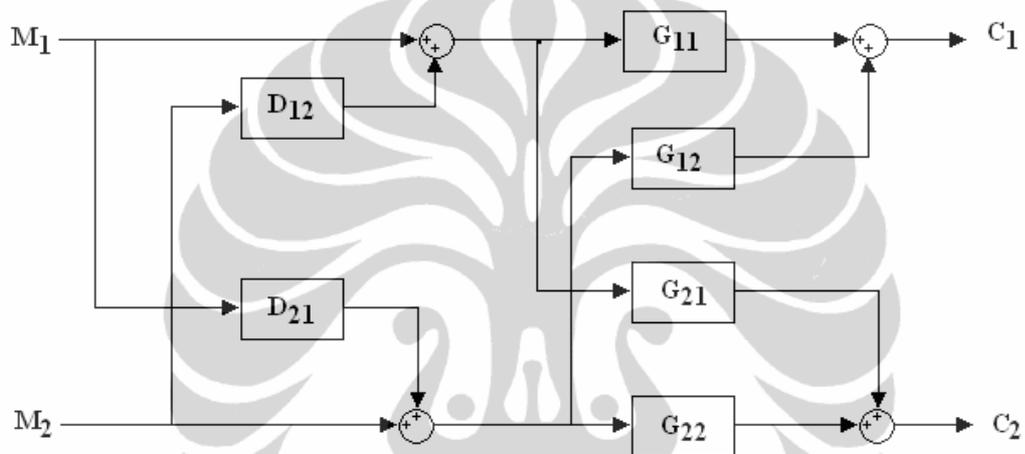
$$T \begin{matrix} F_{ji} & F \end{matrix} \left[\begin{array}{l} \mu_{11} = \frac{K_{11}}{K'_{11}} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}} \quad \mu_{12} = \frac{K_{12}}{K'_{12}} = \frac{-K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}} \\ \mu_{21} = \frac{K_{21}}{K'_{21}} = \frac{-K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}} \quad \mu_{22} = \frac{K_{22}}{K'_{22}} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}} \end{array} \right] \quad (2.44)$$

Disusun dalam sebuah matrik penguatan relatif sebagai berikut :

$$T \begin{matrix} F_{ji} & F \end{matrix} \left[\begin{array}{l} \mu_{11} \quad \mu_{12} \\ \mu_{21} \quad \mu_{22} \end{array} \right] \quad (2.45)$$

Jumlah elemen penguatan pada tiap baris dan tiap kolom pada matriks penguatan relatif adalah sama dengan satu. Ini menjelaskan bahwa kombinasi input output untuk pengendalian sistem jacketed stirred tank heater dapat ditentukan.

Interaksi pasangan pengendali dan keluaran yang masih memiliki sifat saling mempengaruhi antar satu pasangan dengan pasangan yang lainnya dapat dikurangi atau dihilangkan sama sekali dengan menempatkan suatu decoupler diantara kendali dan plant. Hal ini bertujuan agar setiap input hanya akan mempengaruhi output pasangannya dan tidak mempengaruhi keluaran pasangan lain.



Gambar 2.6 Sistem dengan decoupler

Pada gambar 2.6 output $C_1(s)$ dan output $C_2(s)$ dapat ditulis dengan persamaan :

$$C_1(s) = G_{11}(s) + G_{11}(s) D_{12}(s) M_2(s) + G_{12}(s) M_2(s) + G_{12}(s) D_{21}(s) M_1(s) \quad (2.46)$$

$$C_2(s) = G_{22}(s) + G_{22}(s) D_{21}(s) M_1(s) + G_{21}(s) M_1(s) + G_{21}(s) D_{12}(s) M_2(s) \quad (2.47)$$

Pengaruh M_1 pada C_2 maupun pengaruh M_2 pada C_1 dapat di buat minimum dengan memberikan harga nol pada output pasangan kendali yang dimaksud, sehingga dapat ditulis menjadi persamaan :

$$C_1(s) = G_{11}(s) D_{12}(s) M_2(s) + G_{12}(s) M_2(s)$$

$$0 = G_{11}(s) D_{12}(s) M_2(s) + G_{12}(s) M_2(s)$$

$$0 = (G_{11}(s) D_{12}(s) + G_{12}(s)) M_2(s)$$

$$G_{11}(s) D_{12}(s) + G_{12}(s) = 0$$

$$D_{12}(s) = \frac{-G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad (2.48)$$

Tujuan merancang $D_{12}(s)$ adalah jika output pengendali kedua berubah ($C_2(s)$) maka $C_1(s)$ dijaga konstan, sehingga keluaran $C_1(s)$ akan tetap jika ada perubahan output pengendali kedua.

$$C_2(s) = G_{22}(s) D_{21}(s) M_1(s) + G_{21}(s) M_1(s)$$

$$0 = G_{22}(s) D_{21}(s) M_1(s) + G_{21}(s) M_1(s)$$

$$0 = (G_{22}(s) D_{21}(s) + G_{21}(s)) M_1(s)$$

$$G_{22}(s) D_{21}(s) + G_{21}(s) = 0$$

$$D_{21}(s) = \frac{-G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (2.49)$$

Tujuan merancang $D_{21}(s)$ adalah bila output pengendali pertama ($C_1(s)$) berubah, $C_2(s)$ dijaga konstan, jadi keluaran $C_2(s)$ akan tetap jika terjadi perubahan output pengendali pertama.

2.5 Tuning PID

Keberhasilan dalam menentukan kestabilan sistem kendali adalah dengan menentukan tuning (penalaan) kendali yang digunakan. Untuk itu dirancang suatu desain dan implementasi secara aktual pada pengambilan strategi kendali yang dipilih. Standar dasar untuk desain tersebut adalah membuat suatu asumsi tentang variasi jumlah pada sistem yang dinamik, dengan membuat model secara matematik. Apabila secara matematik telah ditemukan bentuknya, maka strategi kendali dapat diikuti secara matematik. Hal tersebut merupakan suatu dasar pada semua strategi model control. Salah satu metode penalaan adalah metode Heuristic.

Cara penalaan (tuning) metode ini adalah sebagai berikut :

Kendali P :

- Pengaruh Integral dan Derivative dihilangkan dengan memaksimal T_i dan meminimalkan T_d .
- Jika K_p terlalu besar dapat membuat system menjadi tidak stabil.
- Mulai dari K_p yang kecil, dicoba untuk mendapatkan step response test diulang kembali dengan harga K_p yang baru, jika hasil tanggapan sistem belum memuaskan maka nilai K_p diperbesar lagi dan step response test diulang kembali, demikian seterusnya sampai tanggapan sistem yang baik.

Kendali I :

- Pertahankan harga K_p yang sudah diperoleh
- Pengaruh D dihilangkan dengan meminimalkan T_d .
- Mulai dari T_i yang besar gunakan harga K_p dan T_i tersebut, lakukan step respon test. Jika tanggapan yang diperoleh masih kurang baik, harga T_i dikurangi dan ulangi, demikian seterusnya sampai mendapatkan tanggapan sistem yang baik.

Kendali D :

- Mulai dari T_d yang kecil dicoba untuk mendapatkan step response test diulang kembali dengan harga T_d yang baru, jika hasil tanggapan sistem belum memuaskan maka nilai T_d diperbesar lagi dan step response test diulang kembali, demikian seterusnya sampai tanggapan sistem yang baik.

2.6 Pengendali Logika Fuzzy

Logika *fuzzy* pertama kali dikenalkan kepada publik oleh Lotfi Zadeh, seorang profesor di University of California di Berkeley. Logika *fuzzy* adalah metodologi untuk menyatakan hukum operasional dari suatu sistem dengan ungkapan bahasa, bukan dengan persamaan matematis. Dengan kata lain, sistem pengendali berbasis logika *fuzzy* pada hakekatnya adalah sistem pakar waktunya (*real-time expert system*) yang memanfaatkan logika *fuzzy* untuk

memanipulasi variabel-variabel kualitatif. Banyak sistem yang terlalu kompleks untuk dimodelkan secara akurat, meskipun dengan persamaan matematis yang kompleks. Dalam kasus seperti itu, ungkapan bahasa yang digunakan dalam logika *fuzzy* dapat membantu mendefinisikan karakteristik operasional sistem dengan lebih baik. Ungkapan bahasa untuk karakteristik sistem biasanya dinyatakan dalam bentuk implikasi logika, misalnya aturan **Jika – Maka** seperti berikut ini :

Jika *temperatur_ruangan* HANGAT, **maka** atur *kecepatan_kipas* pada posisi SEDANG

Ungkapan PANAS dan SEDANG sebenarnya adalah himpunan yang mendefinisikan nilai-nilai yang dikenal sebagai fungsi keanggotaan. Dengan memilih rentang nilai dan bukan satu nilai analog untuk mendefinisikan variabel masukan "*temperatur_ruangan*", dapat dilakukan pengendalian variabel keluaran "*kecepatan_kipas*" secara lebih akurat.

Pengendali logika *fuzzy* (*fuzzy logic controller*) dapat meningkatkan kinerja sistem kendali menjadi lebih mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan pada parameter proses yang dikendalikan, sehingga dapat mendapatkan respon yang lebih baik.

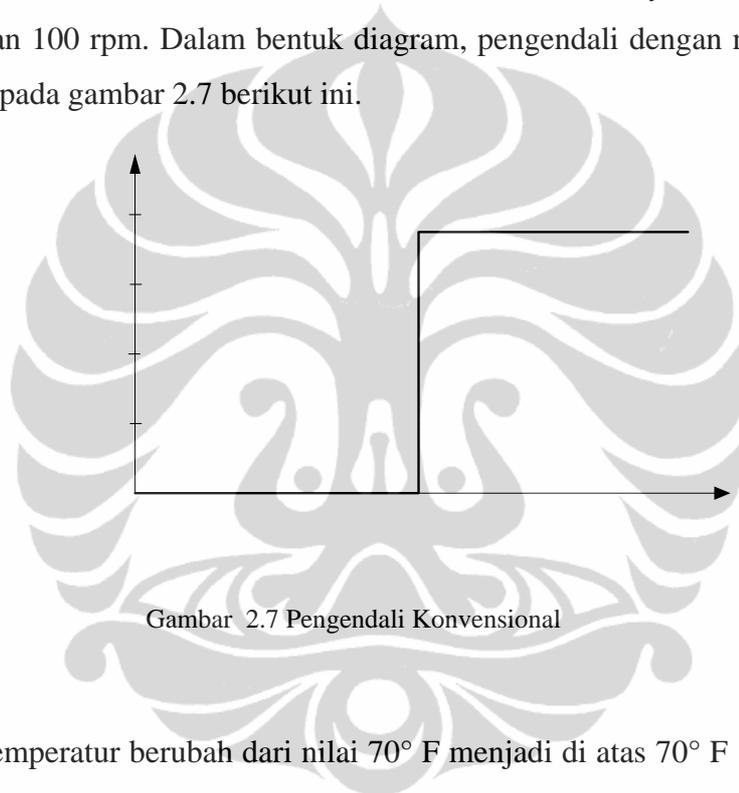
2.6.1 Pendekatan Konvensional

Untuk menggambarkan perbedaan antara pendekatan logika *fuzzy* dengan pendekatan konvensional, di bawah ini dibahas contoh masalah dalam suatu sistem pengendali. Misalkan, untuk pernyataan logika berikut ini akan dijelaskan bagaimana pengendali konvensional menanganinya.

Jika *temperatur_ruangan* ≥ 70 _Fahrenheit, maka atur *kecepatan_kipas* pada "1000 rpm"

Jika *temperatur_ruangan* < 70 _Fahrenheit, maka atur *kecepatan_kipas* pada "100 rpm"

Dalam sistem kendali konvensional yang sering disebut sebagai 'kendali analog', pengendali bergantung pada titik-titik keputusan atas dasar nilai-nilai analog. Pada sistem ini, masukan harus mencapai nilai pasti tertentu sebelum sistem kendali bereaksi dengan cara tertentu. Variasi yang sangat kecil sekalipun pada nilai masukannya dapat menyebabkan keluaran bereaksi sangat berbeda. Misalnya, jika temperatur ruangan mencapai 70° F atau lebih, maka dipakai aturan pertama yakni kipas diatur pada kecepatan 1000 rpm. Jika temperatur berubah menjadi di bawah 70° F, maka berlaku aturan kedua yakni kipas diatur pada kecepatan 100 rpm. Dalam bentuk diagram, pengendali dengan nilai analog diperlihatkan pada gambar 2.7 berikut ini.



Gambar 2.7 Pengendali Konvensional

Bila temperatur berubah dari nilai 70° F menjadi di atas 70° F temperatur berfluktuasi antara sedikit di atas atau di bawah 70° F (misalnya antara 69.0° F sampai 71.0° F). Pada sistem kendali analog, kejadian ini akan menyebabkan putaran kipas berubah-ubah dalam menanggapi perubahan pada variabel masukan temperatur ruangan, meskipun sebenarnya perubahan temperatur tidak begitu terasa. Fluktuasi kecil pada masukan seperti kasus yang dipaparkan sangat sulit ditanggapi oleh kendali konvensional, sebaliknya pada kondisi demikian inilah logika *fuzzy* menunjukkan kelebihanannya.

0.75

0.5

0.25

2.6.2 Pendekatan Logika Fuzzy

Logika *fuzzy* diimplementasikan dalam tiga tahapan :

- Tahap fuzzifikasi (*fuzzification*), yakni pemetaan dari masukan analog ke himpunan *fuzzy*.
- Tahap inferensi, yakni melakukan logika pengambilan keputusan dari aturan *fuzzy*.
- Tahap defuzzifikasi (*defuzzification*), yakni transformasi keluaran dari nilai *fuzzy* ke nilai analog.

Ketiga tahapan logika *fuzzy* tersebut dapat digambarkan dalam diagram blok berikut ini:



Gambar 2.8 Tahapan Proses dalam Logika Fuzzy

2.6.2.1 Fuzzifikasi (*fuzzification*)

Pada tahap fuzzifikasi, nilai masukan nyata terukur dipetakan ke dalam fungsi keanggotaan *fuzzy*. Sebagai contoh, dalam bahasan berikut pengendali temperatur ruangan di atas dikembangkan dengan metode logika *fuzzy*.

Untuk membuat sistem kendali temperatur ruangan mula-mula dikembangkan fungsi keanggotaan untuk variabel masukan "temperatur_ruangan". Fungsi keanggotaan ini didefinisikan dengan rentang nilai dan derajat keanggotaan. Dalam logika *fuzzy*, penting untuk membedakan tidak hanya dalam fungsi keanggotaan mana suatu variabel berada tetapi juga derajat keanggotaan relatif variabel tersebut. Jadi tiap variabel memiliki bobot keanggotaan dalam suatu fungsi keanggotaan. Suatu variabel dapat memiliki bobot keanggotaan dalam beberapa fungsi keanggotaan sekaligus pada suatu saat.

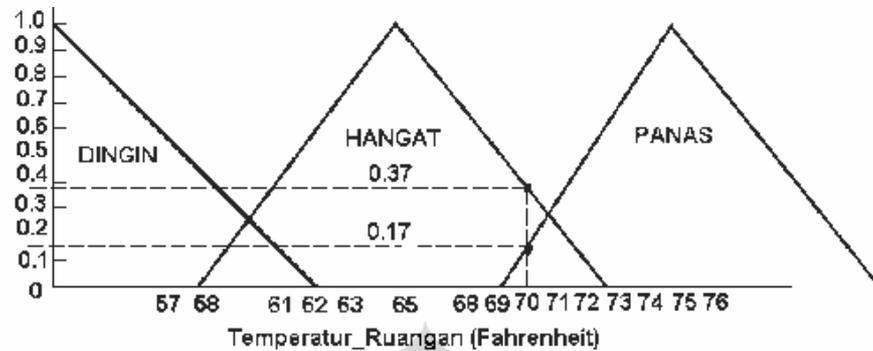
FUZZIFIKASI

Masukan

Analog

INF

Sebagai contoh. Fungsi keanggotaan "temperatur_ruangan" mungkin seperti gambar 2.11



Gambar 2.9. Fungsi keanggotaan variabel masukan temperatur_ruangan

Seperti terlihat pada gambar 2.9, fungsi keanggotaan *fuzzy* memiliki rentang nilai-nilai yang dapat saling tumpang-tindih. Dalam diagram tersebut didefinisikan adanya tiga himpunan nilai keanggotaan untuk variabel "temperatur_ruangan". Ketiga himpunan itu adalah DINGIN, HANGAT, dan PANAS. Derajat keanggotaan suatu nilai tertentu, dalam diagram tersebut, adalah titik perpotongan antara nilai masukan pada sumbu horisontal dengan garis yang mendefinisikan satu atau lebih fungsi keanggotaan *fuzzy*. Titik perpotongan ini dinyatakan dengan nilai tertentu pada sumbu tegak yang menentukan keanggotaan relatif nilai tersebut di dalam himpunan nilai masukan nyata. Sebagai contoh, nilai 70 pada variabel temperatur_ruangan adalah anggota dari fungsi keanggotaan PANAS dengan keanggotaan relatif 0.17. Nilai 70 tersebut juga adalah anggota dari fungsi keanggotaan HANGAT dengan keanggotaan relatif 0.37. Tidak seperti pada sistem analog, dimana suatu nilai secara analog dapat dinyatakan sebagai anggota atau bukan anggota dari suatu fungsi, sistem logika *fuzzy* bekerja atas dasar keanggotaan dari suatu himpunan dan derajat keanggotaan nilai tersebut untuk suatu fungsi keanggotaan tertentu. Dalam kasus ini, karena temperatur_ruangan pada 70° F adalah lebih condong pada keanggotaan HANGAT (0.37) daripada PANAS (0.17), maka pengendali akan memperhitungkan derajat keanggotaan HANGAT tersebut dalam menentukan aksi keluaran yang akan dilakukan.

2.6.2.2 Inferensi

Setelah fungsi keanggotaan untuk variabel masukan dan keluarannya ditentukan, basis aturan pengendalian dapat dikembangkan untuk menghubungkan aksi keluaran pengendali terhadap kondisi masukannya. Tahap ini disebut sebagai tahap inferensi, yakni bagian yang berfungsi untuk mengambil keputusan berdasarkan aturan-aturan yang telah dibuat dalam basis pengetahuan sistem fuzzy ini. Contoh berikut ini, misalnya, dapat diperlakukan untuk pengendali yang sedang dibahas.

Jika temp_ruangan DINGIN, maka atur kecepatan_kipas pada posisi LAMBAT.

Jika temp_ruangan PANAS, maka atur kecepatan_kipas pada posisi CEPAT.

Jika temp_ruangan HANGAT, maka atur kecepatan_kipas pada posisi SEDANG.

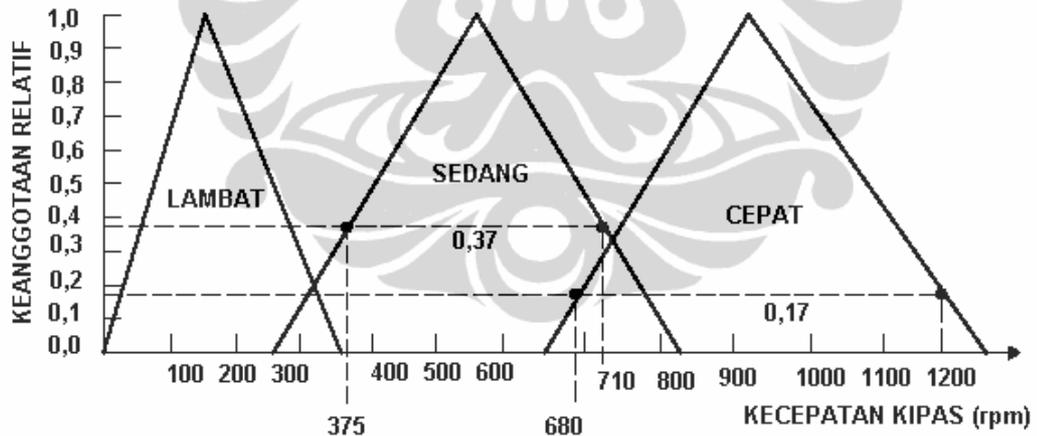
Aturan Jika-Maka tersebut dapat menghubungkan banyak variabel masukan dan keluaran. Karena aturan didasarkan pada deskripsi dengan kata-kata bukan dengan definisi matematis, maka semua hubungan yang dapat dijelaskan dengan ungkapan bahasa pada umumnya dapat dilakukan dengan pengendali logika *fuzzy*. Hal ini berarti sistem non-linier yang biasanya sulit dikendalikan dengan pengendali konvensional, dapat dengan mudah dikendalikan oleh pengendali logika *fuzzy*. Dan, karena variabel memiliki keanggotaan berbobot, aturan yang terdiri atas variabel-variabel ini juga memiliki bobot. Untuk sistem dengan banyak masukan dan banyak keluaran serta memiliki banyak aturan-aturan, fluktuasi pada tiap-tiap masukan dapat ditekan dengan pembobotan aturan. Oleh karena itu sistem logika *fuzzy* bersifat sangat *robust* dan seringkali memungkinkan perubahan atau pembuangan banyak aturan tanpa secara signifikan mempengaruhi karakter pengendalian. Pada tabel 2.1 dijelaskan hubungan antara variabel masukan, aturan dan variabel keluaran. Pada gambar 2.14 ditunjukkan fungsi keanggotaan variabel keluaran. Dalam kasus ini, nilai pada sumbu horisontal ditentukan oleh keanggotaan relatif yang tertera pada sumbu vertikal. Pada tabel 2.1, nilai masukan temperatur ruangan = 70 °F menghasilkan dua bobot untuk kecepatan kipas:

- o Kecepatan kipas = 0.37 diberikan kepada fungsi keanggotaan keluaran SEDANG.

Kecepatan kipas = 0.17 diberikan kepada fungsi keanggotaan keluaran CEPAT.

Tabel 2.1 . Hubungan antara Variabel Masukan, Aturan, dan Variabel Keluaran

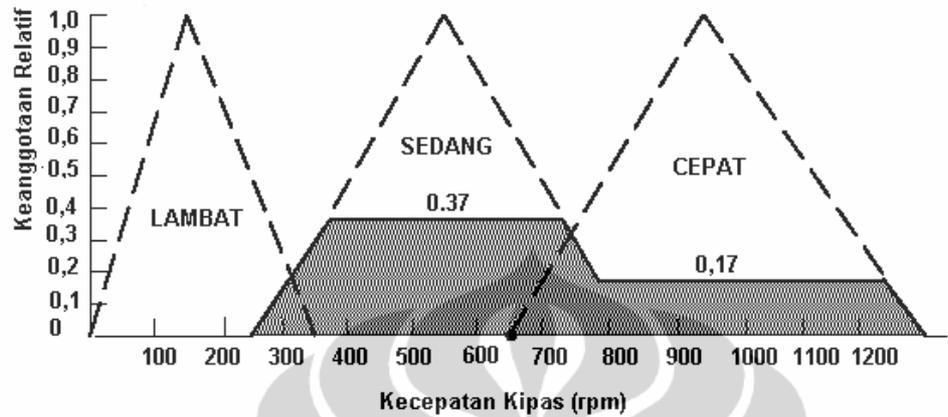
Variabel Masukan	Aturan	Variabel Keluaran
Temperatur_ruangan (HANGAT) = 0.37	Jika temperatur_ruangan = HANGAT maka atur kecepatan_kipas pada posisi SEDANG	kecepatan_kipas (SEDANG) = 0.37
Temperatur_ruangan (PANAS) = 0.17	Jika temperatur_ruangan = PANAS maka atur kecepatan_kipas pada posisi CEPAT	kecepatan_kipas (CEPAT) = 0.17



Gambar 2.10 Fungsi Keanggotaan Variabel Keluaran Kecepatan Kipas

Seperti ditunjukkan pada gambar 2.10, nilai keluaran nyata digambarkan oleh perpotongan garis lurus horisontal yang ditarik dari nilai faktor pembobotan pada sumbu vertikal dengan garis bidang fungsi keanggotaan terkait. Dari titik perpotongan tersebut ditarik garis lurus vertikal memotong sumbu horisontal

untuk menentukan nilai keluaran analog. Hasil inferensinya ditampilkan pada gambar 2.11 yang kemudian akan dihitung nilai defuzifikasinya.



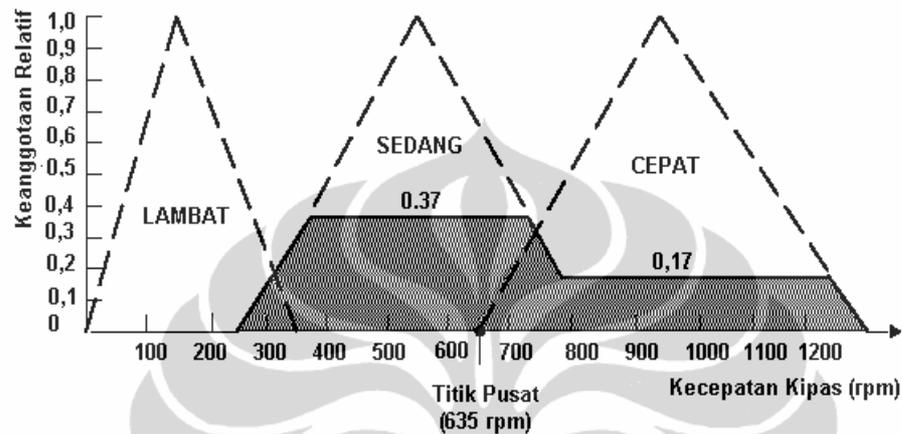
Gambar 2.11 Hasil Inferensi

2.6.2.3 Defuzifikasi (*defuzzification*)

Setelah dilakukan evaluasi atas masukan dan menerapkan basis aturannya, pengendali logika *fuzzy* menghasilkan keluaran untuk diberikan kepada sistem yang dikendalikannya. Hal ini dilakukan misalnya dengan cara mengeluarkan tegangan atau arus listrik pada nilai tertentu untuk mengendalikan kecepatan putaran kipas pada contoh di atas atau mungkin menentukan kecepatan optimal lengan robot ketika mendekati sarasannya. Pengendali logika *fuzzy* harus mengubah variabel keluaran *fuzzy* menjadi nilai-nilai analog yang dapat digunakan untuk mengendalikan sistem. Proses ini disebut sebagai defusifikasi. Telah dikembangkan banyak metode untuk melakukan defusifikasi ini, diantaranya adalah metode defusifikasi dengan penghitungan titik-pusat (*centroid calculation defuzzification*).

Fungsi keanggotaan masukan berbobot dan aturan yang dikenakan padanya menentukan keanggotaan relatif dalam fungsi keluaran. Besarnya keanggotaan relatif yang diberikan pada variabel masukan akan diberikan juga pada variabel keluaran, sebagaimana ditentukan oleh aturan yang diberlakukan. Untuk $temperatur_ruangan = 70\text{ }^{\circ}\text{F}$, variabel keluaran memberikan nilai yang berhubungan dengan nilai masukan seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1

Salah satu metode untuk menentukan nilai keluaran analog adalah dengan metode penghitungan titik pusat. Meskipun metode ini merupakan metode yang padat-komputasi (*computationally intensive*), tetapi dapat menghasilkan satu nilai keluaran tertentu berdasar pada keanggotaan relatif dari semua aturan yang berlaku.

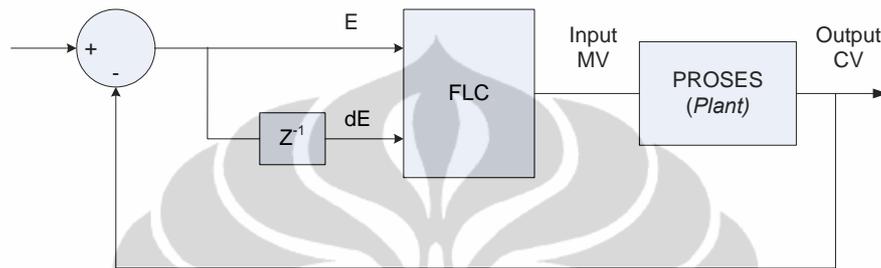


Gambar 2.12. Penghitungan Titik Pusat

2.6.3 Logika *Fuzzy* dalam Teknik Kendali

Dalam sub bab ini dibahas tentang aplikasi logika *fuzzy* dalam teknik kendali. Bentuk logika *fuzzy* dasar adalah arsitektur Mamdani, seperti yang telah dijelaskan dalam subbab 2.6, dimana pengendali secara langsung mengubah spesifikasi kinerja eksternal dan sifat *plant* ke dalam bahasa berbasis aturan (*rule*). Arsitektur Mamdani ini merupakan sistem kendali logika *fuzzy* yang paling banyak digunakan dibandingkan dengan arsitektur Takagi-Sugeno yang menggunakan kombinasi aturan-aturan bahasa dan fungsi linier untuk membentuk strategi kendali logika *fuzzy*. Asumsi dasar kendali logika *fuzzy* yang diajukan oleh E.H. Mamdani pada tahun 1974 adalah tidak adanya model *plant* secara eksplisit. Paradigma dasar kendali logika *fuzzy* Mamdani yang berbasis aturan memetakan *controlled variable* (CV_1, CV_2, \dots) dari *plant* dengan *manipulated variable* (MV_1, MV_2, \dots). Struktur pengendali yang ditunjukkan dalam gambar 2.13 menghubungkan arsitektur ini dengan sistem kendali umpan balik konvensional. Dalam setiap CV bisa secara langsung menjadi variabel terukur

atau beda antara variabel terukur tersebut dengan suatu nilai referensi yang telah ditentukan yang merupakan *error*. Selain error juga diperlukan masukan lain seperti perubahan *error* ($\frac{de}{dt}$) yang digunakan dalam *premise* aturan. Selain perubahan *error*, dalam kasus sistem kendali *fuzzy* untuk implementasi waktu diskret digunakan $CV \equiv e(t) - e(t-T)$ dengan T merupakan periode cuplik sistem.



Gambar 2.13 Arsitektur Pengendali Fuzzy

Arsitektur umum sistem kendali *fuzzy* ditunjukkan dalam gambar 2.14 yang memetakan *error*, $e = y_d - y$ ke dalam aksi pengendali, u . Masukan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) adalah *error* (e) dan perubahan *error* (de). Pengendalian dilakukan oleh FLC yang memetakan nilai *error*, $e_n(t)$, dan perubahan *error* ternormalisasi, $de_n(t)$, yang dinyatakan sebagai

$$\begin{aligned} e_n(t) &= n_e e(t) \\ de_n(t) &= n_{ce} (e(t) - e(t-T)) \end{aligned} \quad (2.50)$$

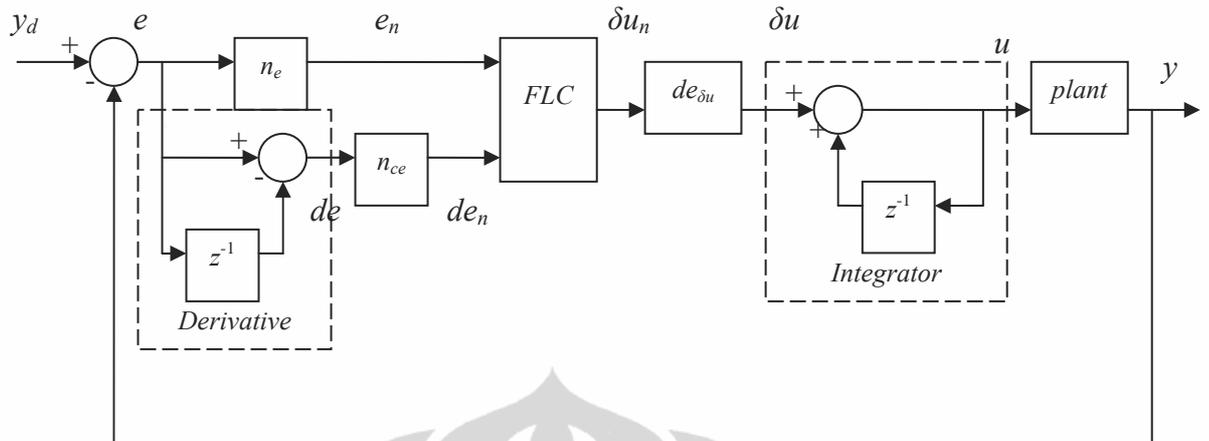
dengan T adalah *time step*, n_e dan n_{ce} adalah faktor normalisasi, ke dalam perubahan aksi pengendali $\delta u_n(t)$ melalui aturan dalam bentuk:

$$\text{If } e_n(t) \text{ is P and } de_n(t) \text{ is N then } \delta u_n(t) \text{ is Z}$$

P, N, Z merupakan kependekan dari *positive*, *negative* dan *zero*, yang didefinisikan sebagai *fuzzy set* melalui variabel-variabel yang relevan seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.14

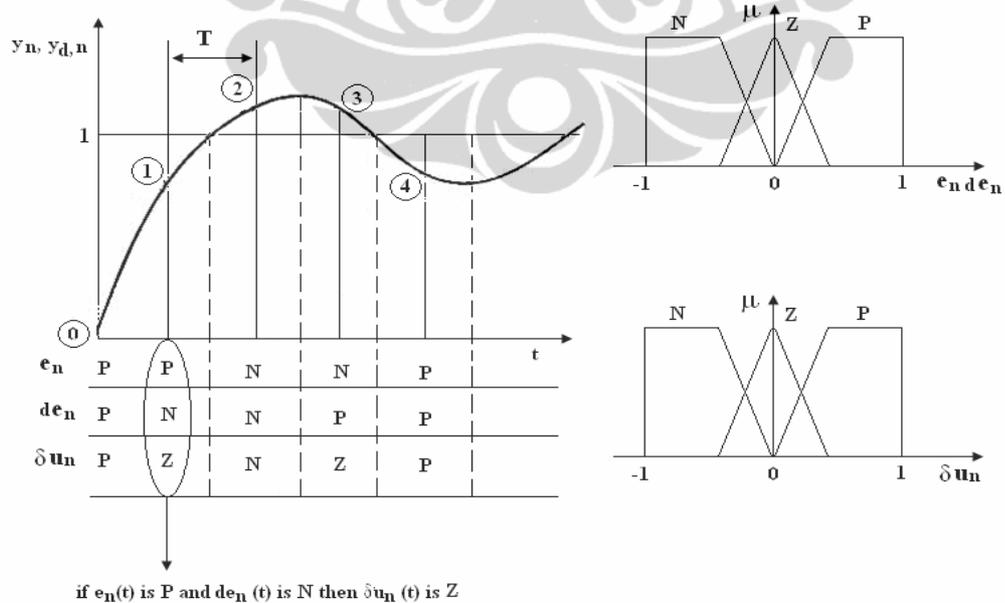
Keluaran dari FLC adalah perubahan dari aksi kendali. Untuk memperoleh aksi kendali u , perlu diintegrasikan dan didenormalisasikan dengan menggunakan faktor denormalisasi $de_{\delta u}$, sehingga diperoleh nilai aksi kendali saat t , dimana nilai perubahan aksi kendali ditambah dengan nilai u sebelumnya, melalui rumus:

$$u(t) = u(t-T) + de_{\delta u} \delta u_n(t) \quad (2.51)$$



Gambar 2.14 Arsitektur umum sistem pengendali fuzzy

Aturan-aturan secara efektif menyatakan skenario operasi dari suatu sistem kendali fuzzy, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.14. Pada saat $t = 0$, sistem mulai pada nilai output nominal tertentu (misalnya $y = 0$) dan diharapkan mencapai nilai yang diinginkan y_d , selisih antara nilai y_d dan y ini disebut nilai error awal. Keadaan awal ini (dalam gambar 2.15 ditandai dengan (0)) menyatakan bahwa *error* bernilai positif (P) dan perubahan *error* bernilai positif, sehingga δu_n menjadi positif.



Gambar 2.15 Aturan-aturan kendali untuk pengendali *fuzzy* sederhana secara umum

Jika keluaran *plant* meningkat maka output akan mencapai level yang ditandai dengan (1) dalam gambar 2.15 dimana *error* masih positif (P) tetapi perubahan error negatif (N), sehingga δu_n menjadi zero (Z). Jika keluaran *plant* meningkat maka output akan mencapai level yang ditandai dengan (2) dimana *error* negatif (N) dan perubahan error negatif (N), sehingga δu_n menjadi negatif (N). Jika keluaran *plant* menurun maka output akan mencapai level yang ditandai dengan (3) dimana *error* negatif (N) dan perubahan error positif (P), sehingga δu_n menjadi zero (Z). Jika keluaran *plant* menurun maka output akan mencapai level yang ditandai dengan (4) dimana *error* positif (P) dan perubahan error positif (P), sehingga δu_n menjadi positif (P). Dengan cara yang sama didapatkan lima aturan-aturan kendali yang lain.

