

BAB II

KINEMATIKA KRAN GELADAK DAN PENGENDALI LOGIKA FUZZY

II.1. Kinematika Kran Geladak

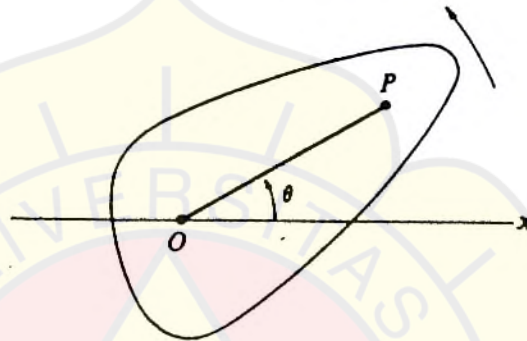
Kran geladak (deck crane) merupakan peralatan yang mempunyai gerak perpindahan muatan secara vertikal naik / turun dan berputar (rotasi) secara terus menerus dari kapal ke pelabuhan atau sebaliknya. Urutan gerak perpindahan muatan pada kran geladak, yaitu : pengangkatan (hoisting), pemindahan (slewing) dan penurunan (lowering), sebagaimana terlampir pada lampiran I.

Gerak slewing atau pemindahan barang secara horisontal pada sudut tertentu dari kran kapal ke pelabuhan atau sebaliknya dengan menggunakan kran geladak dapat dikatakan gerak rotasi pada sumbu tetap, dimana mempunyai variabel :

1. Kecepatan sudut

Jika melukiskan sebuah benda tegar sembarang bentuk yang berputar terhadap sumbu tetap di O serta tegak lurus pada bidang gambar, maka akan membentuk garis OP dimana garis OP ialah garis tetap pada benda dan ikut berputar dengan benda tersebut. Posisi seluruh benda dapat dijelaskan selengkapnya berdasarkan besar

sudut θ antara garis OP dan suatu garis patokan dalam ruang, misalnya Ox. Oleh karena itu gerak benda itu mirip dengan gerak lurus sebuah partikel yang posisinya diperinci berdasarkan sebuah koordinat, x dan y misalnya. Persamaan-persamaan gerak menjadi lebih mudah kalau sudut θ dinyatakan dalam radian.



Gambar 2.1. Benda yang berputar pada sebuah sumbu tetap melalui titik O.

Satu radian (1 rad) ialah besar sudut di pusat lingkaran yang panjang busurnya sama dengan panjang jari-jari (Gambar 2.2.a). Karena keliling lingkaran 2π ($2\pi = 6,28\dots$) kali jari-jari, maka dalam satu putaran penuh atau 360° terdapat 2π atau 6,28 radian. Jadi :

$$1 \text{ rad} = 360 / 2\pi = 57,3 \text{ derajat.}$$

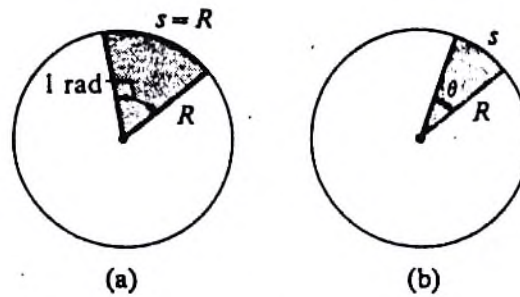
$$360^\circ = 2\pi \text{ rad} = 6,28 \text{ rad}$$

$$180^\circ = \pi \text{ rad} = 3,14 \text{ rad}$$

$$90^\circ = \pi / 2 \text{ rad} = 1,57 \text{ rad}$$

$$60^\circ = \pi / 3 \text{ rad} = 1,05 \text{ rad}$$

dan seterusnya.

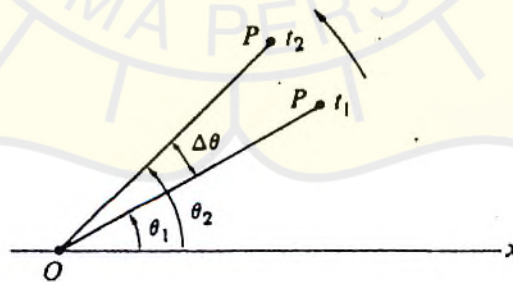


Gambar 2.2. Sudut θ dalam radian didefinisikan sebagai perbandingan busur s terhadap radius R .

Secara umum (Gambar 2.2.b), jika θ menyatakan suatu sudut yang dibuat oleh busur panjang s pada keliling lingkaran berjari-jari R , maka θ (dalam radian) sama dengan panjang busur s dibagi jari-jari R

$$\theta = \frac{s}{R}, \quad s = R \theta.$$

Sudut yang dinyatakan dalam radian, karena didefinisikan sebagai perbandingan panjang dengan panjang, merupakan bilangan semata-mata.



Gambar 2.3. Perubahan sudut $\Delta\theta$ sebuah benda berputar.

Dalam Gambar 2.3, pada saat t_1 garis patokan OP pada benda yang sedang berputar membuat sudut θ_1 terhadap garis patokan Ox.

Kemudian pada saat t_2 besar sudut bertambah menjadi θ_2 . dan apabila *kecepatan sudut rata-rata* benda itu, ω , dalam selang waktu antara t_1 dan t_2 , didefinisikan sebagai perbandingan perubahan sudut $\theta_2 - \theta_1$, atau $\Delta\theta$, terhadap selang waktu $t_2 - t_1$, atau Δt :

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

Kecepatan sudut sesaat ω didefinisikan sebagai harga limit yang didekati oleh perbandingan di atas bila Δt mendekati nol :

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (2-1)$$

Karena benda tadi benda tegar, maka semua garis radial yang tetap dalam benda itu dan tegak lurus kepada sumbu rotasi akan menempuh sudut yang sama dalam waktu yang sama, sehingga kecepatan sudut ω terhadap sumbu sama untuk semua partikel dalam benda. Jadi ω merupakan karakteristik benda secara keseluruhan. Kecepatan sudut memiliki dimensi kebalikan waktu (T^{-1}); satuan kecepatan sudut ialah *satu radian per sekon* (1 rad s^{-1}) atau *putaran per menit* (put men^{-1}).

2. Percepatan sudut

Jika kecepatan sudut benda berubah sebesar $\Delta\omega$ dalam selang waktu Δt , maka dapat dikatakan benda itu mempunyai percepatan sudut.

Percepatan sudut rata-rata $\bar{\alpha}$ didefinisikan sebagai

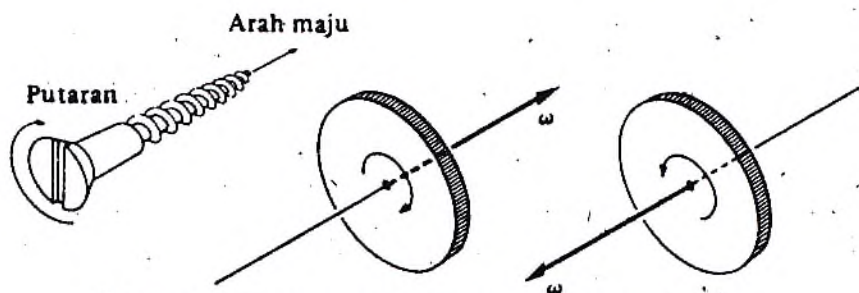
$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t},$$

dan *percepatan sudut sesaat* α didefinisikan sebagai harga limit perbandingan di atas kalau Δt mendekati nol :

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}. \quad (2-2)$$

Karena ω untuk semua partikel dalam benda tegar berharga sama, maka menurut persamaan 2-2 α juga harus berharga sama untuk setiap partikel, jadi α seperti halnya ω , merupakan karakteristik benda secara keseluruhan. Percepatan sudut memiliki dimensi kebalikan waktu kuadrat (T^{-2}); satuan percepatan sudut ialah radian/detik² (rad/s^2) atau putaran/detik².

Kebanyakan persamaan yang menjelaskan gerak suatu benda tegar dapat diringkaskan jika mengenal pengertian *kecepatan sudut vektor*, ω , dan *percepatan sudut vektor* α . Kecepatan sudut vektor ω didefinisikan sebagai vektor yang besarnya ω , yang mengarah ke arah gerak maju sekrup putaran kanan yang diputar searah dengan arah rotasi benda itu. Untuk benda tegar yang berputar terhadap sumbu tetap, vektor ω sejajar dengan sumbu itu, seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Kecepatan sudut ω sebuah benda berputar.

Begitu pula, percepatan sudut vektor α didefinisikan sebagai sebuah vektor yang besarnya α , yang setiap saat arahnya sama dengan perubahan vektor kecepatan sudut, $d\omega$. Untuk rotasi terhadap sebuah sumbu tetap, dalam mana ω selalu paralel dengan sumbu ini, vektor α itu juga paralel dengan sumbu tersebut.

3. Rotasi dengan percepatan sudut konstan

Jenis paling sederhana gerak rotasi dengan percepatan ialah apabila percepatan sudutnya konstan. Dalam kejadian seperti ini, perumusan kecepatan sudut dan koordinat sudut dapat diperoleh dengan mudah dengan cara integrasi, yaitu :

$$d\omega/dt = \alpha = \text{konstan}$$

$$\int d\omega = \int \alpha dt$$

$$\omega = \alpha t + C_1$$

Jika ω_0 merupakan kecepatan sudut ketika $t = 0$, maka konstanta integrasi $C_1 = \omega_0$ dan

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad (2-3)$$

karena $\omega = d\theta/dt$,

$$\int d\theta = \int \omega_0 dt + \int \alpha t dt, \quad \theta = \omega_0 t + 1/2 \alpha t^2 + C_2.$$

Pada umumnya, konstanta integrasi C_2 ialah harga θ ketika $t = 0$, misalnya θ_0 . Jika $\theta_0 = 0$, maka :

$$\theta = \omega_0 t + 1/2 \alpha t^2. \quad (2-4)$$

Jika untuk percepatan sudut

$$\alpha = \omega \frac{d\omega}{d\theta}$$

maka

$$\int \alpha d\theta = \int \omega d\omega + C_3, \quad \alpha\theta = \frac{1}{2} \omega^2 + C_3.$$

Jika sudut θ adalah nol ketika $t = 0$, dan jika kecepatan sudut awalnya ω_0 , maka $C_3 = -\frac{1}{2} \omega_0^2$ dan

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2 \alpha \theta \quad (2-5)$$

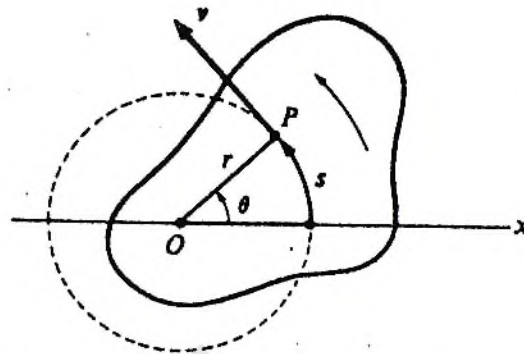
4. Hubungan antara kecepatan sudut dan kecepatan linier dengan percepatan

Jika sebuah benda tegar yang berputar terhadap sebuah sumbu tetap, maka tiap titik di benda itu bergerak dalam suatu lingkaran yang pusatnya terletak di sumbu itu, dan bidangnya tegaklurus terhadap sumbu. Ada beberapa hubungan sederhana dan berguna antara kecepatan dan percepatan sudut benda yang berputar dengan kecepatan dan percepatan linier titik-titik benda itu.

Andaikan r jarak dari sumbu ke titik P di dalam benda, sehingga titik itu bergerak dalam lingkaran berjari-jari r , seperti pada Gambar 2.5. Bila jari-jari membentuk sudut θ dengan sumbu patokan, jarak s ke titik P , diukur sepanjang lintasan lingkaran, ialah

$$s = r \theta \quad (2-6)$$

dimana θ dinyatakan radian.



Gambar 2.5. Jarak yang ditempuh titik $P = r()$

Diferensialkan kedua ruas persama ini terhadap t ; maka karena r konstan, kita peroleh

$$\frac{ds}{dt} = r \frac{d\theta}{dt}$$

Tetapi ds/dt tidak lain adalah kecepatan linier v di titik P , dan $d\theta/dt$ adalah kecepatan sudut ω benda yang berputar. Karena itu

$$v = r \omega \quad (2-7)$$

dan besar v kecepatan linier sama dengan hasil kali kecepatan sudut ω dengan jarak r dari titik ke sumbu.

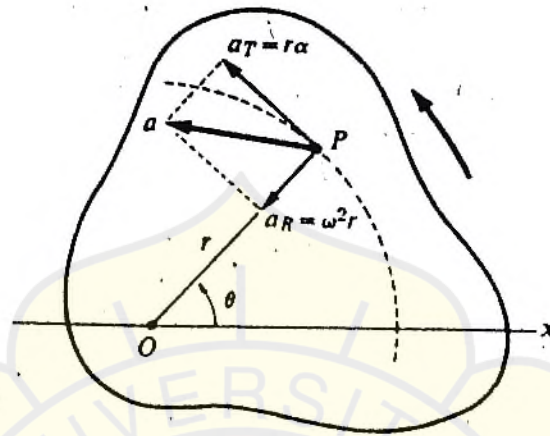
Dengan mendiferensialkan persamaan (2-7) terhadap t , maka diperoleh

$$\frac{dv}{dt} = r \frac{d\omega}{dt}$$

Tetapi dv/dt tidak lain adalah komponen singgung percepatan a_t titik P , dan $d\omega/dt$ adalah percepatan sudut α benda yang berputar, sehingga

$$a_t = r \alpha \quad (2-8)$$

dan besarnya komponen singgung percepatan sama dengan hasil kali percepatan sudut dengan jarak dari sumbu.



Gambar 2.6. Rotasi tak seragam terhadap sumbu tetap melalui titik O. Komponen singgung percepatan titik P sama dengan $r\alpha$; komponen radialnya sama dengan $\omega^2 r$.

Komponen radial percepatan v^2/r titik P dapat juga dirumuskan dalam bentuk kecepatan sudut :

$$a_R = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r = \omega v \quad (2-9)$$

II.2. Pengertian Dasar Logika Fuzzy

Logika fuzzy adalah logika multivariabel yang mengizinkan adanya keanggotaan ganda parsial, yakni transisi bertahap antara anggota suatu himpunan ke bukan anggota himpunan. Suatu anggota himpunan mempunyai nilai yang menyatakan besarnya derajat keanggotaannya pada himpunan itu dan himpunan lainnya. Logika fuzzy bertujuan menirukan cara berpikir manusia yang mengizinkan ketidakpastian, mampu melakukan pertimbangan non presisi untuk mengambil keputusan yang masuk akal di lingkungan yang penuh ketidakpastian dan ketidakpresisian.

Otak manusia menyimpan informasi yang diringkas berupa kesimpulan yang lebih sederhana, misalnya informasi cahaya tampak disimpan dalam informasi warnanya, bukan panjang gelombangnya, dan dibagi dalam kelas-kelas yang diuraikan tidak presisi dan saling tumpang tindih. Walaupun manusia dapat melakukan kesalahan, keunggulannya adalah kecepatan dan nilai ekonomisnya. Cara berpikir manusia seperti ini menyebabkan manusia dapat mengendalikan sistem yang sangat sulit dan sulit dikendalikan dengan metode pengendalian konvensional yang memiliki keterbatasan, antara lain sulit diterapkan jika fungsi alih sistem tidak diketahui, sulit menangani sistem-sistem non linear, dan meskipun telah dilienarisasi pengendaliannya tidak baik jika daerah kerjanya berubah-ubah.

Teori himpunan fuzzy sebagai dasar logika fuzzy merupakan generalisasi teori himpunan klasik. Himpunan klasik mengenal logika dua tingkat (*bilevel logic*), yaitu sesuatu termasuk anggota himpunan (derajat keanggotaan = 1) atau tidak termasuk sama sekali (derajat keanggotaan = 0). Contohnya, kucing adalah anggota mamalia, katak bukan himpunan mamalia. Himpunan ini disebut himpunan crisp.

Teori himpunan fuzzy mengizinkan adanya keanggotaan parsial, yakni transisi bertahap antara anggota suatu himpunan ke bukan anggota himpunan dengan perbedaan derajat keanggotaan. Contohnya adalah himpunan tinggi manusia. Seseorang dengan tinggi 170 cm termasuk dalam anggota himpunan "tinggi". Dalam teori himpunan klasik, jika ia lebih pendek 10 cm, ia tidak termasuk lagi anggota himpunan "tinggi". Pada teori himpunan fuzzy di mana tinggi 180 cm memiliki derajat keanggotaan penuh atau mutlak (100%), tinggi 170 cm juga masih termasuk himpunan tinggi, namun dengan derajat keanggotaan lebih kecil (misalnya 90%), demikian seterusnya.

II.2.1. Notasi dan Operasi pada Himpunan Fuzzy

Dalam teori himpunan fuzzy ditetapkan suatu parameter yang menyatakan derajat keanggotaan suatu variabel dalam suatu himpunan yang dinyatakan dalam simbol μ

$$\text{Notasi: } \mu_A(x) \rightarrow [0,1]$$

Notasi tersebut berarti bahwa derajat keanggotaan x dalam himpunan A berkisar antara 0 sampai 1. Di sini variabel x bernilai tunggal (*crisp*) dan fungsi yang memetakan suatu himpunan ke dalam interval $[0,1]$ disebut fungsi keanggotaan (*membership function*). Dalam sistem kendali, fungsi ini biasanya lebih berupa fungsi linier sepotong-sepotong (*piecewise linear*) daripada fungsi yang kontinu [Pier 93].

Pada logika fuzzy, μ disebut juga sebagai nilai kebenaran yang menyatakan kebenaran pernyataan. Dengan interval $0 \leq \mu \leq 1$ (0 menyatakan 100% salah dan 1 menyatakan 100% benar), logika fuzzy konsisten dengan logika biner sehingga merupakan generalisasi logika biner.

Sebagaimana halnya logika biner, pada logika fuzzy juga terdapat operator logika AND, OR, dan NOT.

Operasi AND terhadap dua variabel A dan B dinyatakan sebagai berikut :

$$\mu_{(A \text{ AND } B)} = \min(\mu_A, \mu_B)$$

Operasi OR :

$$\mu_{(A \text{ OR } B)} = \max(\mu_A, \mu_B)$$

Operasi NOT :

$$\mu_{(\text{NOT } A)} = 1 - \mu_A$$

II.2.2. Kalimat Kondisional

Seorang manusia sebagai operator pengendalian sistem kontrol berpedoman pada kalimat-kalimat kondisional (IF-THEN). Cara ini ditiru oleh sistem logika fuzzy karena memudahkan seorang operator/ ahli (*expert*) memasukkan pengetahuannya ke dalam sistem fuzzy.

Contohnya adalah kalimat kondisional untuk sistem kontrol turbin uap: JIKA temperatur dingin DAN tekanan rendah, MAKA aksi katup maksimum

Dalam kalimat tersebut, terminologi dingin, rendah, dan maksimum bersifat fuzzy karena ketidakpastian nilainya sehingga disebut kalimat kondisional fuzzy.

Kalimat kondisional fuzzy memetakan himpunan masukan ke himpunan keluaran. Terminologi "temperatur" dan "tekanan" adalah himpunan masukan dengan dingin dan rendah adalah nama himpunan bagiannya; "aksi katup" adalah himpunan keluaran dengan maksimum adalah nama himpunan bagiannya. Fungsi pemetaan ini disebut Fuzzy Associative Memory [Kosko 92] atau MAF (Fuzzy Asosiatif Memori) dan terdiri dari aturan-aturan (*rules*) yang memetakan masukan ke keluaran.

Suatu himpunan masukan atau keluaran dibagi menjadi beberapa himpunan bagian fuzzy. Contoh, masukan "temperatur" dibagi menjadi 5 himpunan bagian fuzzy dan diberi nama/ label : sangat dingin, dingin, sedang, hangat, dan panas. Himpunan bagian

fuzzy ini disebut daerah kontrol (*control region*). Pada contoh sistem kontrol turbin uap, masukan "tekanan" dibagi menjadi 5 daerah kontrol masukan, masukan "temperatur" dibagi menjadi 5 daerah kontrol masukan, dan keluaran aksi katup dibagi menjadi 7 daerah kontrol keluaran.

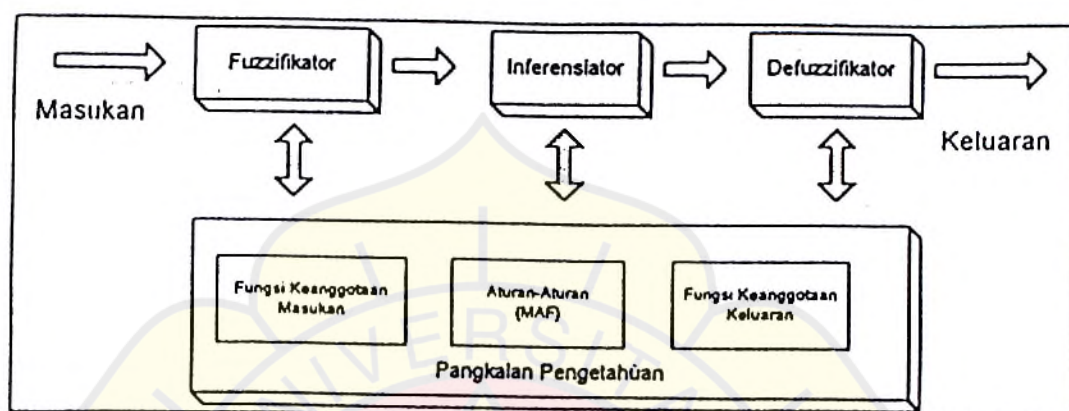
Karena terdapat 2 masukan dengan masing-masing terdiri dari 5 daerah kontrol masukan, maka terdapat 5×5 kombinasi masukan, sehingga diperlukan 25 aturan (*rules*) MAF untuk menangani seluruh kombinasi masukan tersebut. Sebagian contoh aturan tersebut adalah:

1. Jika temperatur DINGIN dan tekanan SANGAT KECIL, maka aksi katup POSITIF BESAR.
2. Jika temperatur DINGIN dan tekanan KECIL, maka aksi katup POSITIF KECIL.
3. Jika temperatur DINGIN dan tekanan SEDANG, maka aksi katup NOL.
4. Jika temperatur DINGIN dan tekanan BESAR, maka aksi katup NEGATIF SEDANG.

Jadi bank MAF berisi aturan-aturan (*rules*) fuzzy berupa kalimat-kalimat kondisional (IF-THEN) yang memetakan masukan ke keluaran dan dibuat oleh operator ahli (*expert*).

II.2.3. Konfigurasi Sistem Kendali dengan Logika Fuzzy

Sistem pengendali berbasis logika fuzzy mempunyai konfigurasi dasar sebagai berikut :



Gambar 2.7. Konfigurasi Sistem Pengendali Logika Fuzzy

Tiga bagian utama dari sistem tersebut adalah :

1. Fuzzifikator

Fuzzifikator berfungsi mengubah input dari nilai *crisp* menjadi derajat keanggotaan masukan pada himpunan bagian masukan (label *membership function*) yang sesuai dengan fungsi keanggotaan masukan. Prosesnya disebut fuzzifikasi.

2. Inferensiator

Inferensi (pemetaan masukan ke keluaran) hasil fuzzifikasi dilakukan pada bagian ini. Untuk setiap kombinasi hasil fuzzifikasi dibangkitkan himpunan bagian keluaran (label) dengan derajat aktivasi tertentu berdasarkan aturan-aturan dalam MAF.

3. Defuzifikator

Bagian ini melakukan proses defuzzifikasi, yaitu perubahan keluaran dari domain fuzzy ke domain crisp berdasarkan daerah kontrol keluaran yang diperoleh dari fungsi keanggotaan keluaran.

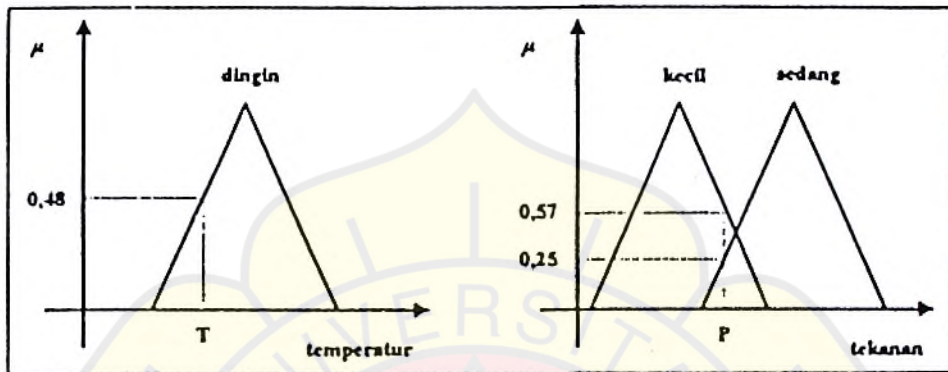
Dalam desain sistem pengendali seperti di atas, pangkalan pengetahuan, khususnya MAF merupakan bagian terpenting karena merupakan tiruan tindakan yang dilakukan pembuat aturan (pakar) sehingga menentukan unjuk kerja respon sistem kendali.

II.2.3.1. Proses Fuzzifikasi

Fuzzifikasi adalah proses yang merubah masukan berdomain crisp ke domain fuzzy. Ini dilakukan karena proses dalam sistem berlangsung dalam domain fuzzy sehingga suatu nilai masukan harus terlebih dahulu ditransformasikan ke domain fuzzy kemudian dapat diproses.

Sebagai contoh, sensor sistem mendeteksi tekanan (P) dan temperatur (T). Fuzzifikator memeriksa ke pangkalan pengetahuan untuk mendapatkan nilai domain fuzzy dan diperoleh: P berada pada daerah kontrol masukan KECIL dengan $\mu = 0,57$ dan SEDANG dengan $\mu = 0,25$; T berada pada daerah kontrol masukan DINGIN dengan $\mu = 0,48$. Jadi dengan proses fuzzifikasi, nilai crisp T

ditransformasikan menjadi nilai fuzzy DINGIN ($\mu = 0,48$) dan nilai crisp P ditransformasikan menjadi nilai fuzzy KECIL ($\mu = 0,57$) dan SEDANG ($\mu = 0,25$).



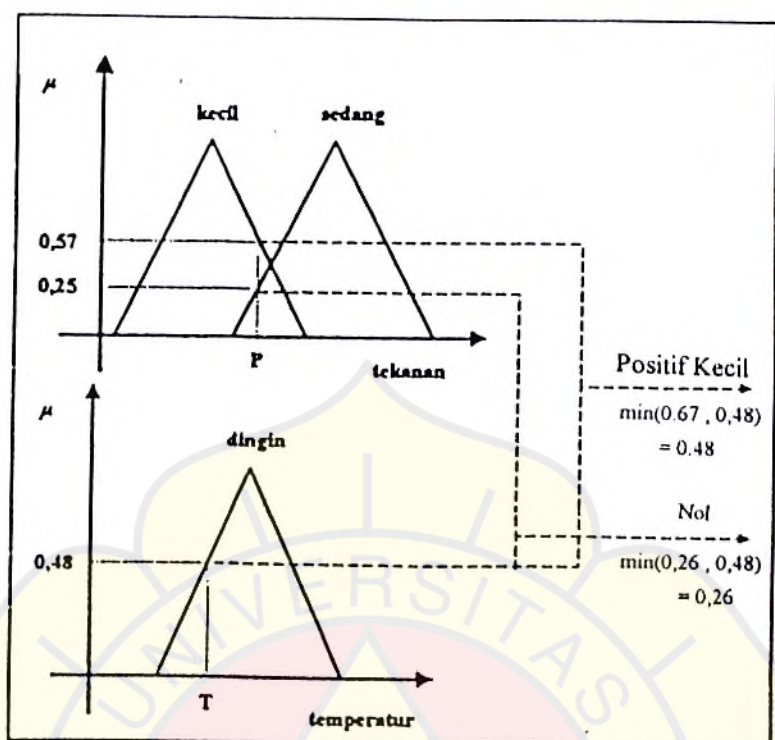
Gambar 2.8. Proses Fuzzifikasi Masukan Temperatur dan Tekanan

II.2.3.2. Proses Inferensi

Inferensi adalah pembangkitan keluaran dari aturan-aturan yang teraktifkan (*rules fired*). Pada contoh di atas, kombinasi input P dan T akan mengaktifkan (*fire*) aturan :

- Jika temperatur DINGIN ($\mu = 0,48$) dan tekanan KECIL ($\mu = 0,57$), maka aksi katup POSITIF KECIL ($\mu = 0,48$)
- Jika temperatur DINGIN ($\mu = 0,48$) dan tekanan SEDANG ($\mu = 0,25$), maka aksi katup NOL ($\mu = 0,25$)

Keluaran yang dihasilkan mempunyai nilai μ sama dengan nilai μ terkecil masukan karena operasi logika yang digunakan adalah AND.



Gambar 2.9. Proses Pembangkitan Output (Inferensi)

Ada 2 macam teknik inferensi, yaitu :

- Inferensi Korelasi Minimum (IKM) atau *correlation-minimum inference*

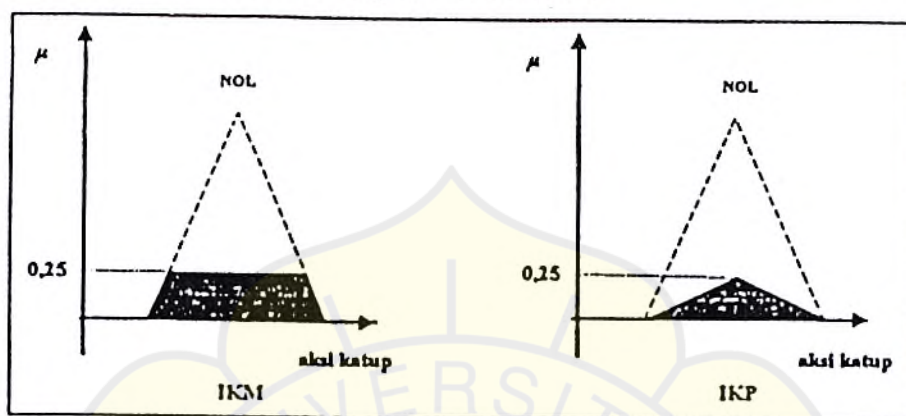
Pada IKM, keluaran yang dibangkitkan terpotong pada μ -nya.

- Inferensi Korelasi Perkalian (IKP) atau *correlation-product inference*

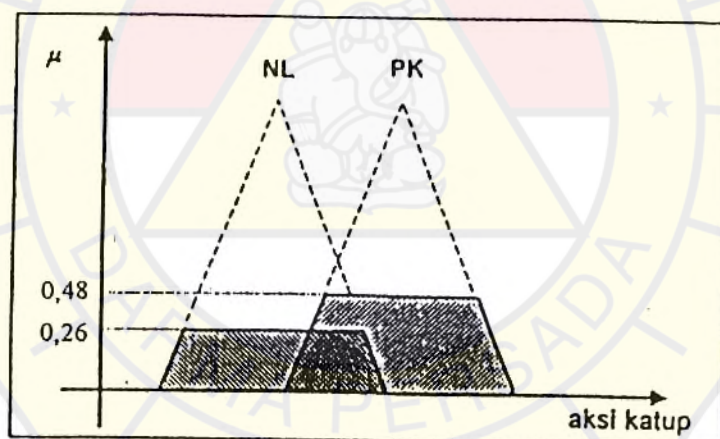
Pada IKP, keluaran yang dibangkitkan diskalakan oleh μ -nya.

Sebagai perbandingan, terlihat output yang terbangkit oleh salah satu aturan di atas, yaitu NOL dengan ($\mu = 0,25$).

Penggabungan hasil-hasil keluaran di atas dilakukan dengan operasi OR. Pada gambar daerah yang diarsir merupakan daerah hasil operasi OR dari output PK dan NL.



Gambar 2.10. Perbandingan Teknik Inferensi IKM dan IKP



Gambar 2.11. Penggabungan Keluaran yang Teraktifasi dengan Operasi OR

II.2.3.3. Proses Defuzzifikasi

Karena output yang dibangkitkan aturan-aturan yang teraktifasi dapat lebih dari satu, maka diperlukan proses untuk mendapatkan nilai tunggal (*crisp*) keluaran tersebut. Proses ini disebut defuzzifikasi, yaitu pentransformasian domain fuzzy ke domain crisp.

Selanjutnya dicari nilai crisp daerah yang diarsir.

Ada beberapa metode defuzzifikasi, yaitu :

1. Centroid

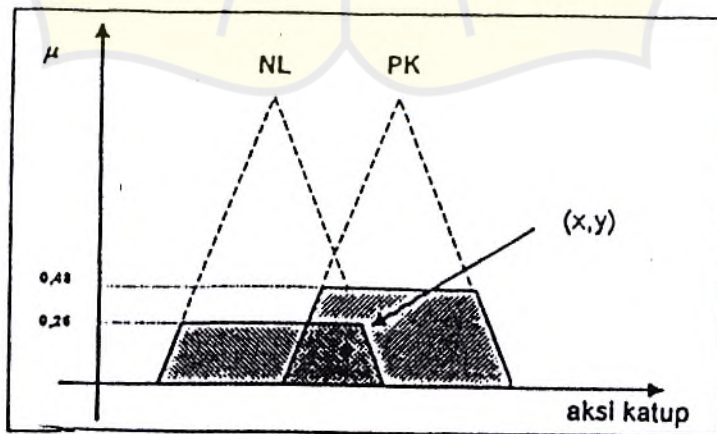
Pada metode ini nilai crisp didapat dengan menghitung titik berat (*center of gravity*) daerah yang diarsir. Titik (x,y) pada gambar merupakan titik berat daerah tersebut, dan x merupakan nilai crisp-nya. Untuk mencari nilai x dapat dihitung dengan rumus :

$$x = \frac{\int x \mu_o(x) dx}{\int \mu_o(x) dx}$$

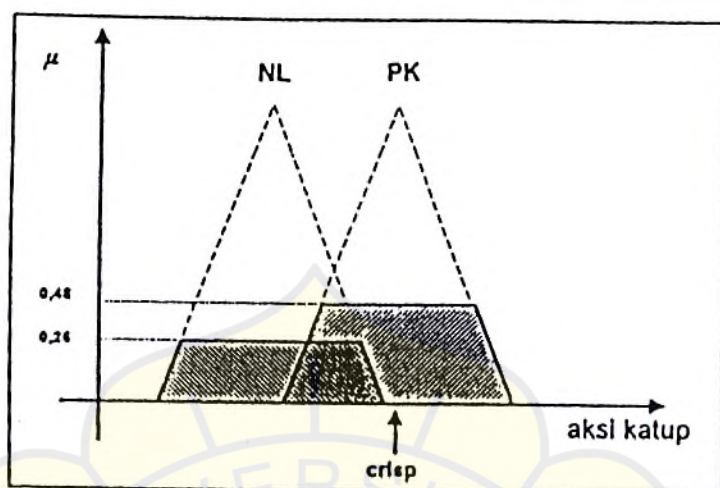
di mana o adalah himpunan fuzzy keluaran.

2. Rata-rata Maksimum (*Mean of Maximum*)

Di sini nilai crisp diperoleh dengan mencari titik tengah daerah kontrol yang memiliki derajat aktivasi paling besar. Pada gambar, NL teraktivasi dengan $\mu = 0,25$ sedangkan PK dengan $\mu = 0,48$, sehingga nilai crisp-nya adalah titik tengah PK.



Gambar 2.12. Proses Defuzzifikasi dengan Metode Centroid



Gambar 2.13. Proses Defuzzifikasi dengan Metode Rata-rata Maksimum