

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Telah banyak metode yang digunakan untuk menyelesaikan masalah mengenai optimasi pembangkit tenaga listrik. Metode-metode tersebut seperti *Lagrange*, *Lambda-iteration*, *Dynamic Programming*, *Particle Swarm Optimization* (PSO), dan lain sebagainya. Pengimplementasian teknik *soft computing* yang terdiri atas *Fuzzy Logic*, *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS), Jaringan Syaraf Tiruan, dan Algoritma Genetika juga dilakukan dalam bidang sistem kelistrikan.

Dari *riil system* pengaturan pembebanan dilakukan melalui *software* pada komputer. Perhitungan pembagian beban oleh PT PLN (PERSERO) Pusat Pengatur Beban dengan perhitungan yang dilakukan dalam penelitian yang menggunakan salah satu metode optimasi pasti akan memiliki perbedaan hasil. Adanya perbedaan hasil tersebut menjadi salah satu dasar dilakukannya optimasi unit pembangkit dengan berbagai metode, termasuk di dalamnya metode logika *fuzzy* atau *fuzzy logic* dan iterasi *lambda*.

Pada perhitungan penjadwalan unit pembangkit *thermal* sistem Minahasa yang dilakukan tanggal 24 November 2011 dengan menggunakan metode iterasi *lambda* didapatkan biaya pembangkitan sebesar Rp. 369.533.914,578, sedangkan perhitungan oleh PT PLN (PERSERO) adalah sebesar Rp. 438.958.267,8 (Angdrie dkk., 2012). Selisih antara perhitungan iterasi *lambda* dengan *riil* sistem sekitar Rp. 69.424.353,3, atau terjadi penghematan sebesar 16% dengan menggunakan metode iterasi *lambda*.

Penelitian dengan teknik iterasi juga dilakukan dari *Electrical and Electronic Engineering Department, Federal University of Technology, Nigeria*. Dari penelitian tersebut, metode pembagian beban dengan teknik iterasi *lambda* lebih disarankan daripada metode algoritma genetika. Penelitian dilakukan pada

sistem dengan 26 bus serta 6 generator, dengan kebutuhan beban total sebesar 1263 MW. Penyelesaian dengan metode iterasi lambda menunjukkan nilai *incremental cost* sebesar 13.2539 \$/MWh dengan daya pembangkitan 1263,0074 MW, sedangkan dengan metode algoritma genetika nilai *incremental cost* 13.6445 \$/MWh untuk daya pembangkitan 1263.8809 MW (Dike dkk., 2013). Dari penelitian tersebut diketahui bahwa untuk membangkitkan daya sebesar 100 MW menggunakan metode iterasi lambda menghabiskan pengeluaran sebesar 1,04939 \$, sedangkan dengan metode genetika algoritma sebesar 1,07957 \$.

Pada optimasi unit pembangkit sistem 500 kV Jawa-bali yang dilakukan pada 6 (enam) unit pembangkit *thermal* menunjukkan keefektifan penggunaan *fuzzy logic* untuk efisiensi biaya bahan bakar unit pembangkit sebesar 23,27 %. Pendekatan *fuzzy logic* yang dilakukan pada sistem tersebut selama 24 jam adalah Rp. 115.379.855.898, sedangkan data *riil* sistem menghasilkan total biaya sebesar Rp. 150.371.894.794 (Marifah dkk., 2013).

Kemudian dari sebuah penelitian lain menyimpulkan bahwa optimasi unit pembangkit menggunakan metode *fuzzy logic* lebih efisien jika dibandingkan dengan metode *dynamic programming*. Dari penelitian tersebut diperoleh biaya produksi harian dengan pendekatan *fuzzy logic* sebesar 45.816,6 \$, sementara ketika menggunakan metode *dynamic programming* biayanya sebesar 51.072,5 \$ (Abu-Jasser, 2012). Maka dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa penghematan yang bisa diperoleh jika menggunakan pendekatan berbasis logika *fuzzy* adalah 10,29%.

Perbandingan efektifitas optimasi unit pembangkit metode *fuzzy logic* dengan metode lain juga dilakukan oleh Maninder Kaur dan Rajdeep Kaur Dhaliwal. Penelitian dilakukan pada 3 (tiga) unit generator dengan pengamatan beban selama 24 jam. Penelitian oleh Kaur dan Dhaliwal (2012) menunjukkan bahwa optimasi unit pembangkit dengan metode *fuzzy logic* menghasilkan biaya bahan bakar sebesar 4978.3103 Rs, sedangkan *neural network* 7328.4525 Rs, dan *conventional dynamic* 8231.64 Rs. Rs merupakan satuan yang menunjukkan nilai biaya bahan bakar yang jika diibaratkan seperti halnya \$ ataupun Rp.

Penggunaan metode iterasi lambda dengan metode *fuzzy logic* pada 5 (lima) penelitian diatas selalu menunjukkan nilai yang lebih efisien jika dibandingkan dengan metode lain, termasuk juga terhadap hasil *riil* sistem. Perbandingan antara metode satu dengan metode lain ataupun dengan *riil* sistem umumnya untuk mengetahui tingkat efektifitas sebuah metode optimasi unit pembangkit. Dalam penelitian ini, metode iterasi lambda dan logika *fuzzy* dipilih sebagai metode untuk simulasi optimasi unit pembangkit *thermal* area Jateng dan DIY. Perhatian pada penelitian ini adalah pada penggunaan metode logika *fuzzy*, sedangkan untuk metode iterasi lambda diposisikan sebagai metode efisiensi pembanding terhadap metode logika *fuzzy* (*fuzzy logic*).

Perbedaan penelitian ini dengan penelitian-penelitian yang tersebut di atas diantaranya adalah, waktu pengamatan (pengambilan data) terhadap proses pembangkitan tenaga listrik dan kebutuhan beban dilakukan selama satu minggu dengan alokasi pembagian beban yaitu pada kebutuhan beban 2496 MW, 3850 MW, dan 4392 MW. Simulasi optimasi dilakukan pada unit pembangkit *thermal* area Jateng dan DIY, serta sample kebutuhan beban diambil dari kebutuhan beban distribusi dan beban transmisi dari sistem tersebut. Kemudian hasil optimasi dari sistem tersebut dengan metode *fuzzy logic* akan diperbandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan metode iterasi lamdha.

2.2 Optimasi Unit Pembangkit *Thermal*

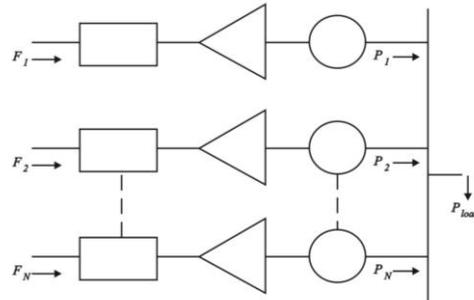
Unit pembangkit *thermal* adalah pembangkit listrik dengan penggerak mula menggunakan proses siklus panas yang didapatkan dari proses pembakaran bahan bakar yang dicampur dengan udara. Dalam proses penyediaan tenaga listrik, konsumsi bahan bakar akan semakin tinggi seiring dengan beban yang bertambah besar. Besarnya konsumsi bahan bakar secara otomatis juga akan membuat biaya bahan bakar meningkat. Besarnya biaya bahan bakar akan membuat sistem pembangkitan tenaga listrik menjadi tidak efisien karena biaya yang dikeluarkan juga besar. Oleh karena itu, perlunya penghematan biaya bahan bakar dalam penyediaan tenaga listrik.

Operasi sistem tenaga listrik tetap dikatakan berada pada kondisi “daya seimbang” jika total daya nyata (MW) yang dibangkitkan sama dengan total beban sistem (Kristianto dkk., 2014). Keadaan tersebut harus menjadi perhatian agar tenaga listrik yang dibangkitkan tetap andal. Akan tetapi, sistem yang andal pasti akan membutuhkan pembiayaan yang tinggi, sehingga perlu adanya evaluasi terkait teknik pengoperasian yang baik. Teknik untuk menghemat pengeluaran biaya bahan bakar, serta tetap menjaga daya keluaran yang optimum dan sistem yang andal dikenal juga dengan istilah optimasi pembangkit listrik. Metode untuk melakukan optimasi pembangkit tenaga listrik dilakukan dengan mengatur kombinasi antar pembangkit.

2.2.1 *Economic Dispatch*

Economic dispatch merupakan teknik untuk menekan biaya konsumsi bahan bakar generator atau biaya operasi dari keseluruhan sistem dengan seminimal mungkin. Teknik tersebut dilakukan dengan menentukan kombinasi daya *output* dari masing-masing pembangkit serta memerhatikan kebutuhan beban sistem dan batas kemampuan masing masing pembangkit. Tujuan dari *economic dispatch* adalah untuk menentukan daya pembangkitan yang optimal dari beberapa unit pembangkit dengan biaya pembangkitan yang minimum, dan rugi-sugi serta kebutuhan beban tercukupi atau sama dengan daya yang dibangkitkan dari unit-unit pembangkit (Dewangan dkk., 2015).

Pembagian beban diperlukan untuk mendapatkan skema pembangkitan yang optimal dari unit-unit pembangkit, terlebih jika unit-unit pembangkit tersebut terhubung didalam suatu sistem yang besar (interkoneksi). Kondisi tersebut membuat pengaturan sistem yang tepat dapat memperkecil biaya produksi, karena antara pembangkit satu dengan yang lainnya saling memengaruhi dalam sistem.



Gambar 2.1. Koordinasi N unit pembangkit *thermal* dalam melayani permintaan beban (P_{load}).
(Saadat, 1999)

Dari Gambar 2.1 terlihat bahwa F (biaya bahan bakar) berpengaruh terhadap pembangkitan daya sebesar P (MW) dalam mencukupi P_{load} . Teknik optimasi dari sistem yang disajikan dalam Gambar 2.1 adalah optimasi pembangkitan baik pembagian beban maupun penjadwalan unit pembangkit dengan mengabaikan rugi-rugi transmisi, karena daya yang dibangkitkan adalah sama dengan beban (P_{load}).

Permasalahan *economic dispatch* (pembagian pembebanan) dapat dijelaskan dengan menyelesaikan persamaan matematika berikut (Marsudi, 2006):

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_L \quad (2.1)$$

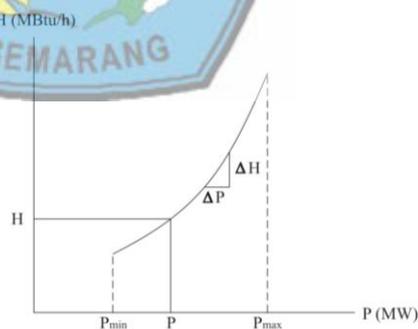
- Dimana:
- P_i = Daya Keluaran (MW)
 - P_D = Beban Sistem (MW)
 - P_L = Rugi-rugi transmisi (MW)
 - n = Jumlah pembangkit atau generator

Persamaan di atas merupakan syarat mutlak dalam sistem tenaga listrik dengan daya pembangkitan dalam penyediaan tenaga listrik harus sanggup memenuhi kebutuhan beban, serta tetap memerhatikan kerugian pada saluran transmisi. $\sum P_i$ merupakan total daya yang dibangkitkan oleh generator atau pusat listrik. Dimana daya total tersebut harus dijaga nilainya agar sama besar dengan rugi-rugi yang terjadi pada saluran transmisi serta beban total.

2.2.1.1 Karakteristik *Input-Output* Pembangkit *Thermal*

Kurva *input-output* adalah gambaran besarnya *input* yang harus diberikan pada unit pembangkit sebagai fungsi *output*-nya (Marsudi, 2006). *Input* yang diberikan untuk unit pembangkit berbeda-beda tergantung dari kategori pembangkit tersebut. Pembangkit *thermal* memiliki *input* berupa bahan bakar untuk menghasilkan gas atau uap, baik secara alami (panas bumi) maupun buatan seperti pembakaran, dan umumnya dinyatakan dengan *heatrate* dalam kcal/kWh atau Btu/kWh. Sedangkan pembangkit *hydro*, *input*an adalah air yang berfungsi untuk menggerakkan *prime mover*, dan dinyatakan dalam m^3/det .

Kurva *input-output* dapat dinyatakan dengan fungsi polinomial yang memiliki bentuk hampir linear, dengan suku pangkat 2 (dua) ke atas adalah kecil. Kurva *input-output* tidak melalui titik nol dikarenakan adanya rugi-rugi pada beban nol yang disebabkan oleh rugi-rugi geseran, rugi-rugi besi pada generator dan transformator penaik tegangan (Marsudi, 2011). Dengan menggunakan kurva *input-output*, biaya bahan bakar setiap pusat listrik (pembangkit *thermal*) dapat dinyatakan secara matematis seperti yang terlihat pada Gambar 2.2 sebagai berikut.

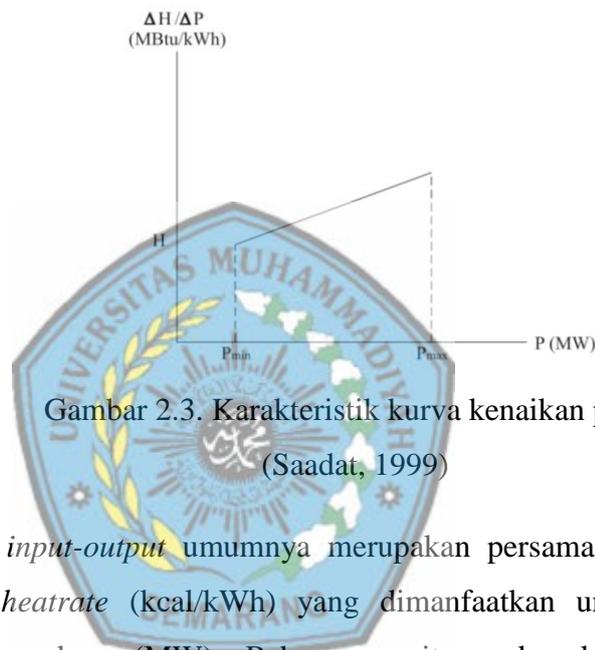


Gambar 2.2. Kurva *Input-Output* pembangkit tenaga uap
(Saadat, 1999)

Gambar 2.2 menunjukkan karakteristik *input-output* unit pembangkit tenaga uap yang ideal berupa kurva cembung (non-linier). *Input* dari pembangkit ditunjukkan pada sumbu tegak (vertikal) yaitu energi panas yang dibutuhkan dalam bentuk MBtu/h (*1000 Btu per hour*) untuk satuan *British Temperatur Unit* (BTU). Apabila menggunakan SI (Satuan Internasional) adalah MJ/h (*Mega*

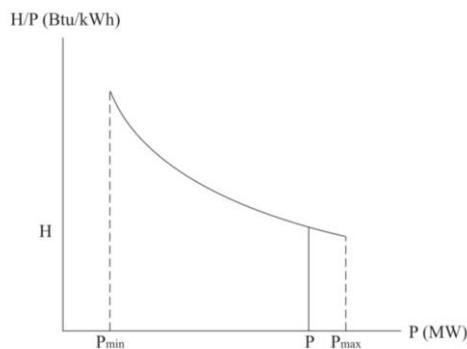
Joule per hour) atau kcal/h (*kilo kalori per hour*), dan dapat dinyatakan juga sebagai biaya total per jam (Rp/jam). *Output* dari pembangkit ditunjukkan pada sumbu mendatar (*horizontal*) yaitu daya listrik yang memiliki batas-batas berupa daya maksimum dan daya minimum pembangkit.

Karakteristik kenaikan panas dari unit pembangkit uap diperlihatkan pada Gambar 2.3. Karakteristik ini adalah kemiringan dari karakteristik *input-output* ($\Delta H/\Delta P$) secara linier.



Gambar 2.3. Karakteristik kurva kenaikan panas (Saadat, 1999)

Kurva *input-output* umumnya merupakan persamaan *input* berupa laju panas atau *heatrate* (kcal/kWh) yang dimanfaatkan untuk membangkitkan *output* berupa daya (MW). Beberapa unit pembangkit *thermal* memiliki karakteristik laju panas yang cenderung turun jika terjadi penambahan daya pembangkitan oleh unit tersebut.



Gambar 2.4. Karakteristik *Heatrate* unit pembangkit *thermal*. (Saadat, 1999)

Untuk menentukan kurva *input-output* dari suatu pembangkit, maka diperlukan beberapa data karakteristik pembangkit seperti, laju panas dan daya pembangkitan. Data-data tersebut kemudian diolah ke dalam grafik dengan pendekatan fungsi polinomial. Kurva *input-output* dinyatakan dalam persamaan berikut (Wood dan Wollenberg, 1996):

$$H_i (P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (2.2)$$

Dimana: $H_i (P_i)$ = *input* laju panas pada unit (MBtu/h)
 P_i = daya keluaran tiap unit pembangkit (MW)
 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ = koefisien biaya operasi pembangkit
 i = 1, 2, 3,....., n (untuk n pembangkit)

Koefisien α, β, γ merupakan nilai karakteristik dari sebuah pembangkit yang nilainya akan berbeda antara pembangkit satu dengan yang lainnya. Untuk menentukan nilai konstanta α, β, γ dilakukan dengan mengolah beberapa data percobaan atau hasil penelitian dengan menggunakan Metode Kuadrat Terkecil (*Least Square Methode*). Pengolahan data dengan menggunakan metode kuadrat terkecil adalah sebagai berikut (Idris, 2010):

$$J = \sum_{i=1}^N [\alpha + \beta P_i + \gamma P_i^2 - H_i] \quad (2.3)$$

Kemudian diturunkan terhadap J menjadi (Idris, 2010):

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} = \sum_{i=1}^N 2[\alpha + \beta P_i + \gamma P_i^2 - H_i] = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \beta} = \sum_{i=1}^N 2P_i[\alpha + \beta P_i + \gamma P_i^2 - H_i] = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \gamma} = \sum_{i=1}^N 2 P_i^2[\alpha + \beta P_i + \gamma P_i^2 - H_i] = 0 \quad (2.6)$$

Penyelesaiannya diperoleh dengan mengatur turunan J terhadap $\alpha, \beta,$ dan γ menjadi nol, hasilnya adalah (Idris, 2010):

$$(N)\alpha + \left[\sum_{i=1}^N P_i \right] \beta + \left[\sum_{i=1}^N P_i^2 \right] \gamma = \sum_{i=1}^N H_i \quad (2.7)$$

$$\left[\sum_{i=1}^N P_i \right] \alpha + \left[\sum_{i=1}^N P_i^2 \right] \beta + \left[\sum_{i=1}^N P_i^3 \right] \gamma = \sum_{i=1}^N P_i H_i \quad (2.8)$$

$$\left[\sum_{i=1}^N P_i^2 \right] \alpha + \left[\sum_{i=1}^N P_i^3 \right] \beta + \left[\sum_{i=1}^N P_i^4 \right] \gamma = \sum_{i=1}^N P_i^2 H_i \quad (2.9)$$

Dalam bentuk matriks (Idris, 2010):

$$\begin{pmatrix} n + \sum P_i + \sum P_i^2 \\ \sum P_i + \sum P_i^2 + \sum P_i^3 \\ \sum P_i^2 + \sum P_i^3 + \sum P_i^4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum H_i \\ \sum P_i H_i \\ \sum P_i^2 H_i \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Sehingga nilai koefisien α , β , dan γ adalah (Idris, 2010):

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n + \sum P_i + \sum P_i^2 \\ \sum P_i + \sum P_i^2 + \sum P_i^3 \\ \sum P_i^2 + \sum P_i^3 + \sum P_i^4 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum H_i \\ \sum P_i H_i \\ \sum P_i^2 H_i \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Persamaan 2.11 bernilai sama dengan persamaan berikut (Sofyan dkk., 2010):

$$\begin{aligned} \sum C_i &= n \cdot a_i + b_i \sum P_j + c_i \sum P_j^2 \\ \sum P_j C_i &= a_i \sum P_j + b_i \sum P_j^2 + c_i \sum P_j^3 \\ \sum P_j^2 C_i &= a_i \sum P_j^2 + b_i \sum P_j^3 + c_i \sum P_j^4 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Dimana: C_i = biaya bahan bakar (\$/kWh) atau *heatrate* (kcal/kWh)
 n = banyak data
 P_j = daya keluaran tiap unit pembangkit (MW)
 a, b_i, c_i = koefisien biaya operasi pembangkit
 i = 1, 2, 3,....., n (untuk n pembangkit)

Pada persamaan 2.11 dan 2.12 memiliki nilai yang sama, konstanta $C_i = H_i$, $P_j = P_i$, dan a, b, c berturut-turut adalah α, β , dan γ . Perbedaan diantara persamaan-persamaan tersebut hanya pada penulisan konstanta. Pada persamaan di atas berlaku jika biaya bahan bakar untuk pembangkitan sebesar P_i MW diketahui, namun jika yang diketahui hanya data *heatrate*, maka konstanta F_i dapat diganti dengan H_i yang menunjukkan nilai *heatrate*.

2.2.1.2 Karakteristik Biaya Bahan Bakar Pembangkit *Thermal*

Biaya operasi pusat listrik merupakan biaya terbesar dalam pengoperasian sistem tenaga listrik. Biaya tersebut ditentukan oleh biaya investasi dan biaya operasi. Biaya investasi pada pusat listrik bergantung pada besar kapasitas daya terpasang unit pembangkit, sedangkan untuk biaya operasi atau biaya produksi bergantung kepada besar daya yang dibangkitkan untuk memenuhi kebutuhan sistem (Syah dkk., 2012).

Daya aktif (nyata) merupakan keluaran dari pembangkitan tenaga listrik yang besarnya dipengaruhi oleh efisiensi generator, biaya bahan bakar, dan rugi-rugi saluran transmisi (Cekdin, 2010). Daya pembangkitan atau beban yang semakin bertambah akan membuat biaya bahan bakar juga meningkat. Hal itu dikarenakan konsumsi bahan bakar yang juga semakin bertambah.



Gambar 2.5. Kurva karakteristik biaya bahan bakar terhadap daya aktif.

(Marsudi, 2006)

Untuk menganalisis permasalahan mengenai operasi dalam sistem tenaga, khususnya masalah operasi ekonomis, diperlukan dasar mengenai karakteristik *input-output* dari suatu unit pembangkit *thermal*. Dari karakteristik *input-output* unit pembangkit dengan biaya bahan bakar maka akan diketahui fungsi karakteristik biaya bahan bakar pembangkit *thermal*. Dalam mendefinisikan karakteristik dari unit turbin uap digunakan beberapa konstanta sebagai berikut (Wood dan Wollenberg, 1996).

H = *Input* laju panas pada unit (MBtu/h)

F = *Input* bahan bakar pada unit dikalikan R/MBtu (R/h)

Untuk memperoleh operasi pembangkit yang ekonomis, daya yang dibangkitkan oleh unit pembangkit harus dihitung berdasarkan biaya bahan bakar masing-masing unit. Hubungan antara biaya bahan bakar terhadap daya aktif atau daya yang dibangkitkan oleh unit pembangkit dapat dirumuskan melalui persamaan berikut (Wood dan Wollenberg, 1996):

$$F_i (P_i) = H_i (P_i) \times R/\text{MBtu} \quad (2.13)$$

Dimana: $F_i (P_i)$ = biaya operasi tiap unit pembangkit (\$/h)
 $H_i (P_i)$ = *Input* laju panas pada unit (MBtu/h)
 R/MBtu = Biaya bahan bakar ((\$/MBtu)
 i = 1, 2, 3,....., n (untuk n pembangkit)

Maka, ketika persamaan 2.2 disubstitusikan ke dalam persamaan 2.13 akan menghasilkan persamaan 2.14 (Wood dan Wollenberg, 1996).

$$F_i (P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (2.14)$$

Dimana: $F_i (P_i)$ = biaya operasi tiap unit pembangkit (\$/h)
 P_i = daya keluaran tiap unit pembangkit (MW)
 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ = koefisien biaya operasi pembangkit
 i = 1, 2, 3,....., n (untuk n pembangkit)

Jumlah biaya operasi bahan bakar dari masing-masing pusat listrik dari suatu sistem, atau biaya total operasi biaya bahan bakar dari unit-unit generator dari suatu pusat listrik disebut juga biaya total operasi. Fungsi biaya operasi atau fungsi yang menunjukkan karakteristik biaya bahan bakar unit pembangkit merupakan fungsi nilai efisiensi dari unit pembangkit, sehingga untuk menentukan efisiensi pembangkitan dari suatu sistem harus menjumlahkan fungsi biaya operasi dari masing-masing unit pembangkit atau generator (Wood dan Wollenberg, 1996).

$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 \dots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i (P_i) \quad (2.15)$$

Dimana: F_T = Biaya total operasi sistem

- $F_i(P_i)$ = Fungsi biaya bahan bakar (MW)
 i = 1, 2, 3,....., n (untuk n pembangkit)
 n = Jumlah pembangkit atau generator

2.2.1.3 Koefisien Biaya Bahan Bakar (Lambda)

Lambda (λ) merupakan koefisien biaya bahan bakar yang besarnya ditentukan oleh fungsi karakteristik *input-output* atau biaya bahan bakar dengan satuan \$/hour atau Rp/jam. Koefisien biaya bahan bakar dibutuhkan oleh semua metode dalam menentukan operasi ekonomis suatu unit pembangkit. Nilai lambda dapat diketahui secara langsung dengan menggunakan persamaan 2.16, atau menggunakan teknik iterasi lambda. Iterasi lambda merupakan teknik mendapatkan nilai lambda dengan menentukan harga estimasi awal nilai lambda terlebih dahulu ($\lambda^{(k)}$) sampai nilai ΔP_i berada dalam sebuah ketelitian yang akurat (Cekdin, 2010; Saadat, 1999).

$$\lambda = \frac{P_D + \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{2\gamma_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\gamma_i}} \quad (2.16)$$

$$\lambda_i = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} = 2\gamma_i + \beta_i \quad (2.17)$$

Dalam teknik iterasi perubahan biaya bahan bakar setiap unit pembangkit *thermal* dapat diperoleh dengan persamaan berikut (Saadat, 1999):

$$P_i = \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i} \quad (2.18)$$

Dari persamaan di atas, daya pembangkitan total diperoleh dengan menjumlahkan daya yang dibangkitkan oleh masing-masing unit pembangkit. Berdasarkan persamaan 2.1, salah satu syarat pembangkitan tenaga listrik adalah kesetimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan permintaan beban. Jika perhitungan optimasi unit pembangkit dilakukan dengan mengabaikan faktor

rugi-rugi transmisi, maka daya total pembangkitan (MW) adalah sama dengan beban total (persamaan 2.19) (Cekdin, 2010).

$$\Delta P = 0 \quad (2.19)$$

$$\Delta P \neq 0 \quad (2.20)$$

ΔP adalah selisih antara daya total pembangkitan dengan daya permintaan beban. Jika mengacu pada persamaan 2.1, maka akan dihasilkan sistem sesuai persamaan 2.19 dengan daya pembangkitan yang bernilai sama dengan permintaan beban. Kondisi berbeda akan terbentuk jika daya pembangkitan tidak sama dengan permintaan beban, sehingga akan dihasilkan nilai lambda baru ($\Delta\lambda$). Untuk menentukan ΔP dan $\Delta\lambda$ dapat digunakan persamaan-persamaan sebagai berikut (Saadat, 1999):

$$\Delta P^{(k)} = P_D - \sum_{i=1}^n P_i \quad (2.21)$$

$$\Delta\lambda^{(k)} = \frac{\Delta P^{(k)}}{\sum \frac{1}{2\gamma_i}} \quad (2.22)$$

sehingga,
$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \Delta\lambda^{(k)} \quad (2.23)$$

Koefisien $\lambda^{(k+1)}$ merupakan nilai lambda setelah dilakukan iterasi. Proses iterasi lambda akan terus berlangsung hingga nilai $\Delta P = 0$.

Syarat *Kuhn-Tucker* melengkapi syarat *lagrangian* untuk mengikuti ketentuan ketidaksamaan. Syarat-syarat untuk pengiriman daya nyata yang optimal dari pembangkit dengan mengabaikan rugi-rugi daya adalah sebagai berikut (Cekdin, 2010; Saadat, 1999):

$$\frac{dF_i(P_i)}{dP_i} = \lambda_i \quad \text{untuk,} \quad P_{i(\min)} \leq P_i \leq P_{i(\max)} \quad (2.24)$$

$$\frac{dF_i(P_i)}{dP_i} \leq \lambda_i \quad \text{untuk,} \quad P_i = P_{i(\max)} \quad (2.25)$$

$$\frac{dF_i(P_i)}{dP_i} \geq \lambda_i \quad \text{untuk,} \quad P_i = P_{i(\min)} \quad (2.26)$$

Teknik iterasi lambda yang menggunakan beberapa lambda dilakukan sampai jumlah daya (P_i) dari semua unit pembangkit adalah $\sum P_i = P_D$.

2.2.2 Penjadwalan Operasi Pembangkit *Thermal*

Pemakaian tenaga listrik oleh konsumen yang selalu berubah-ubah setiap waktu akan menyebabkan fluktuasi beban, sehingga pembangkitan oleh pusat-pusat listrik juga akan berubah mengikuti fluktuasi beban. Pengaturan penggunaan tenaga listrik adalah program pengaturan waktu dan besaran pemakaian tenaga listrik agar diperoleh pemakaian yang efisien dan hemat (Nugroho, 2006).

Istilah untuk penjadwalan operasi unit pembangkit dikenal dengan *unit commitment*, yaitu sejumlah unit pembangkit yang disiapkan untuk menghadapi beban yang besar agar dicapai biaya bahan bakar semurah mungkin. Dalam menentukan *unit commitment* akan diprioritaskan untuk pembangkit dengan biaya bahan bakar yang kecil, guna beroperasi sebagai beban dasar (*based loading*). Kemudian ketika terjadi kenaikan beban, akan terjadi penambahan operasi oleh sejumlah unit pembangkit, dan pembangkit dengan biaya bahan bakar yang tinggi akan ditempatkan sebagai *peaking unit* atau beban puncak.

Penjadwalan operasi unit pembangkit akan membuat kondisi terjadinya proses *start-stop* oleh pembangkit *thermal* atau generator. Semakin lama sebuah unit pembangkit *thermal* diberhentikan makin besar biaya *start*-nya. Selain karena unit pembangkit *thermal* proses *start*-nya lama, unit tersebut juga telah menjadi dingin dan diperlukan biaya pemanasan kembali sebelum unit tersebut dapat menghasilkan daya. Oleh karena itu, proses *start-stop* unit pembangkit *thermal* harus diperhatikan agar tidak mengganggu sistem penyediaan daya listrik dan menambah biaya pengeluaran.

2.3 Metode Logika *Fuzzy* (*Fuzzy Logic*)

Logika adalah ilmu yang mempelajari secara sistematis kaidah-kaidah penalaran yang absah atau valid (Ula, 2014). Ada 2 konsep logika, yaitu logika tegas (*crisp*) dan logika *fuzzy* (*fuzzy logic*). Logika tegas atau logika himpunan tegas hanya mengenal dua keadaan yaitu: ya atau tidak, *high* atau *low*, 1 atau 0. Sedangkan logika *fuzzy* adalah logika yang menggunakan konsep sifat

kesamaran, sehingga logika *fuzzy* adalah logika fuzzy memiliki nilai kebenaran yang dinyatakan dalam bilangan real dengan interval 0 – 1.

Konsep tentang logika *fuzzy* diperkenalkan oleh Prof. Lotfi Astor Zadeh pada 1962. Menurut Kusumadewi dan Hartati (2010), logika *fuzzy* adalah suatu cara yang tepat untuk memetakan sesuatu ruang *input* ke dalam suatu ruang *output*. Metodologi ini dapat diterapkan pada perangkat keras, perangkat lunak, atau kombinasi keduanya. Variabel yang dibutuhkan dalam *fuzzy logic* atau logika *fuzzy* adalah variabel yang berkaitan antara fungsi *input* terhadap *outputnya*, maupun fungsi lain yang saling berhubungan. Penggunaan aplikasi logika *fuzzy* pada optimasi daya listrik adalah sebagai sistem pengambilan keputusan yang optimal dalam menentukan daya listrik pada suatu ruang, baik untuk ruang terbuka maupun ruang tertutup (Supriyono, 2006).

2.3.1 Komponen Sistem Logika Fuzzy

Komponen-komponen yang terdapat di dalam sistem *logika fuzzy*, yaitu (Kusumadewi dan Hartati, 2010):

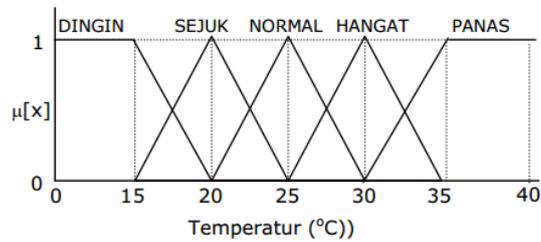
1. Variabel *fuzzy*

Variabel *fuzzy* merupakan variabel yang hendak dibahas dalam suatu sistem *fuzzy*. Contoh: Temperatur, permintaan, umur, dll.

2. Himpunan *fuzzy*

Himpunan *fuzzy* merupakan suatu grup yang mewakili suatu kondisi atau keadaan tertentu dalam suatu variabel *fuzzy*. Himpunan *fuzzy* memiliki 2 atribut, sebagai berikut:

- a. Linguistik, yaitu penamaan suatu grup yang mewakili suatu keadaan atau kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami, seperti: dingin, sejuk, normal, hangat, panas, dan lain sebagainya.
- b. Numeris, yaitu suatu nilai (angka) yang menunjukkan ukuran dari suatu variabel seperti: 1, 2, 15, 25, 40, dan sebagainya.



Gambar 2.6. Himpunan *fuzzy* pada variabel temperatur.

(Kusumadewi dan Hartati, 2010)

3. Semesta Pembicaraan

Semesta pembicaraan adalah keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk dioperasikan dalam suatu variabel *fuzzy*. Semesta pembicaraan merupakan himpunan bilangan real yang senantiasa bertambah secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai semesta pembicaraan dapat berupa bilangan positif maupun negatif. Adakalanya nilai semesta pembicaraan ini tidak dibatasi batas atasnya.

Contoh semesta pembicaraan untuk variabel temperatur: $[0 \ 40]$

4. Domain

Domain himpunan *fuzzy* adalah keseluruhan nilai yang diizinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan *fuzzy*. Domain juga merupakan himpunan bilangan real yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai domain dapat berupa bilangan positif maupun negatif.

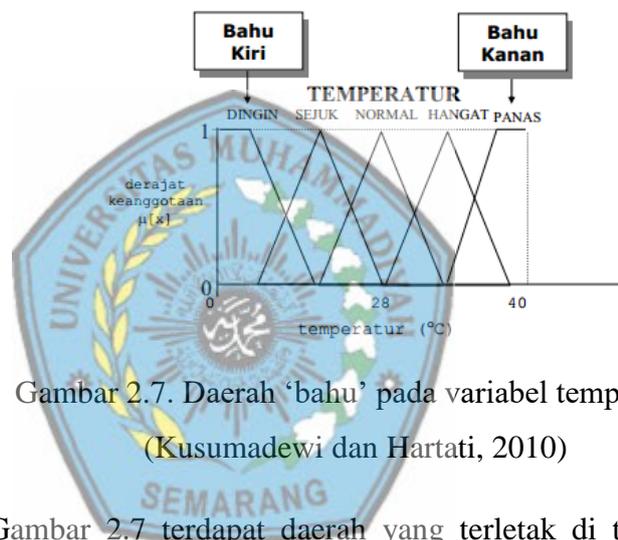
Contoh domain himpunan *fuzzy*: Dingin = $[0 \ 20]$, Sejuk = $[15 \ 25]$, Normal = $[20 \ 30]$, Hangat = $[25 \ 35]$, Panas = $[30 \ 40]$

2.3.2 Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik *input* data ke dalam nilai keanggotaanya (Marifah dkk., 2013). Interval nilai yang terdapat dalam fungsi keanggotaan adalah antara 0 dan 1. Artinya bisa saja suatu keadaan mempunyai dua nilai secara bersamaan “0 dan 1”, namun besar nilainya tergantung pada bobot

keanggotaan yang dimilikinya (Manurung, 2013). Itulah yang membedakan antara logika *fuzzy* dengan logika klasik.

Fungsi-fungsi yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan seperti representasi linear, representasi kurva segitiga, representasi kurva trapesium, representasi kurva bentuk bahu, representasi kurva-S, representasi kurva bentuk lonceng (*bell curve*), serta koordinat keanggotaan (Kusumadewi dan Hartati, 2010). Dalam kurva bentuk bahu digambarkan dengan kurva segitiga yang linear sisi kanan dan kirinya, dan terdiri lebih dari satu kurva segitiga.



Gambar 2.7. Daerah ‘bahu’ pada variabel temperatur
(Kusumadewi dan Hartati, 2010)

Pada Gambar 2.7 terdapat daerah yang terletak di tengah-tengah suatu variabel yang direpresentasikan dalam bentuk segitiga. Akan tetapi terdapat keadaan variabel yang tidak mengalami perubahan, seperti yang terlihat pada kondisi “panas”, kenaikan temperatur akan tetap berada pada kondisi “panas”. Himpunan *fuzzy* ‘bahu’ area bentuk bukan segitiga, digunakan untuk mengakhiri variabel suatu daerah *fuzzy*. Bahu kiri bergerak dari benar ke salah, demikian juga bahu kanan bergerak dari salah ke benar.

2.3.3 Operator Himpunan *Fuzzy*

Operator himpunan *fuzzy* didefinisikan sebagai operasi yang secara khusus untuk mengombinasikan dan memodifikasi himpunan *fuzzy*. Operator dasar dalam himpunan *fuzzy*, yaitu (Kusumadewi dan Hartati, 2010):

1. Operator AND

Operator ini berhubungan dengan operasi interseksi pada himpunan. α -predikat sebagai hasil operasi dengan operator AND diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terkecil antar elemen pada himpunan-himpunan yang bersangkutan.

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A[x], \mu_B[y]) \quad (2.27)$$

2. Operator OR

Operator ini berhubungan dengan operasi *union* pada himpunan. α -predikat sebagai hasil operasi dengan operator OR diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terbesar antar elemen pada himpunan-himpunan yang bersangkutan.

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A[x], \mu_B[y]) \quad (2.28)$$

3. Operator NOT

Operator ini berhubungan dengan operasi komplemen pada himpunan. α -predikat sebagai hasil operasi dengan operator NOT diperoleh dengan mengurangi nilai keanggotaan elemen pada himpunan yang bersangkutan dari 1.

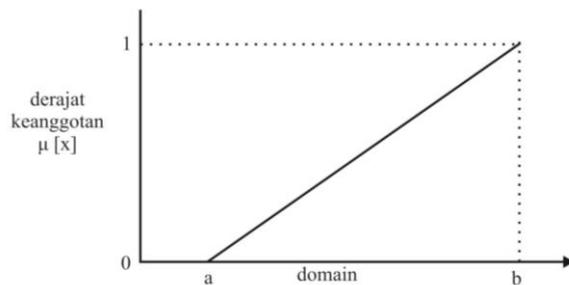
$$\mu_{A'} = 1 - \mu_A[x] \quad (2.29)$$

2.3.4 Interferensi Fuzzy Metode Mamdani

Metode Mamdani diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975, dan metode ini sering dikenal juga dengan nama Metode *Max-Min* (Kusumadewi dan Hartati, 2010). Pemanfaatan Metode Mamdani dalam penggunaan logika *fuzzy* memerlukan beberapa tahapan guna menghasilkan *output*. Tahapan-tahapan tersebut seperti halnya pembentukan himpunan *fuzzy*, fungsi implikasi, *rules* (aturan), dan *defuzzifikasi*.

Pembentukan himpunan *fuzzy* dilakukan pada *membership function* (fungsi keanggotaan), baik pada variabel *input* maupun *output*. Himpunan *fuzzy* yang digunakan dalam bentuk linguistik dan numeris. Penggunaan atribut linguistik untuk menunjukkan kategori kondisi yang merepresentasikan dari nilai oleh

bilangan numeris pada himpunan tersebut. Dari variabel *input* akan dipetakan terhadap sistem *output*nya, sehingga terdapat 2 atau lebih variabel *input* yang dapat digunakan. Variabel *input-output* yang digunakan adalah kurva berupa konstanta atau persamaan linear.



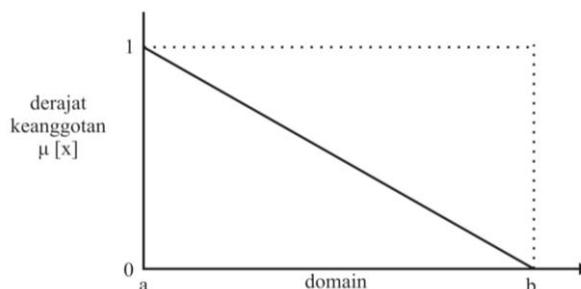
Gambar 2.8. Representasi Linear naik
(Kusumadewi dan Hartati, 2010)

Pada representasi kurva di atas, kenaikan himpunan dimulai pada nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan nol [0] bergerak ke kanan menuju ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih tinggi.

Fungsi keanggotaan (Kusumadewi dan Hartati, 2010):

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a) / (b - a); & a \leq x \leq b \\ 1; & x \geq b \end{cases} \quad (2.30)$$

Selain itu, garis lurus dapat dimulai dari nilai domain dengan derajat keanggotaan tertinggi pada sisi kiri, kemudian bergerak menurun ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih rendah.

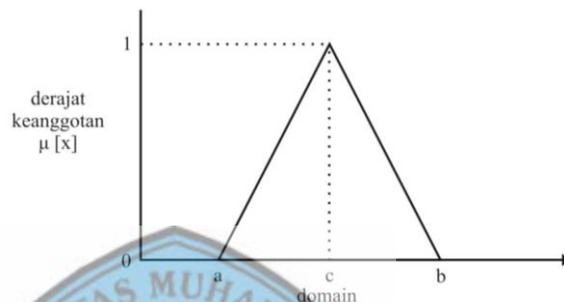


Gambar 2.9. Representasi Linear turun
(Kusumadewi dan Hartati, 2010)

Fungsi keanggotaan (Kusumadewi dan Hartati, 2010):

$$\mu[x] = \begin{cases} (b - x) / (b - a); & a \leq x \leq b \\ 0; & x \geq b \end{cases} \quad (2.31)$$

Fungsi di atas merupakan fungsi keanggotaan secara linear. Kedua fungsi tersebut jika disatukan akan membentuk representasi kurva segitiga dengan fungsi keanggotaan sebagai berikut (Kusumadewi dan Hartati, 2010):



Gambar 2.10. Representasi kurva segitiga (Kusumadewi dan Hartati, 2010)

Fungsi keanggotaan (Kusumadewi dan Hartati, 2010):

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ (x - a) / (b - a); & a \leq x \leq b \\ (b - x) / (c - b); & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (2.32)$$

Kemudian hasil *output* dari pemetaan terhadap *inputannya* juga akan ditentukan oleh fungsi implikasi yang digunakan. Apabila sistem terdiri dari beberapa aturan, maka inferensi diperoleh dari kumpulan dan korelasi antar aturan. Ada 3 metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem *fuzzy*, yaitu: *max*, *additive* dan probabilitik OR (probor) (Kusumadewi dan Hartati, 2010).

a. Metode *Max* (*Maximum*)

Solusi himpunan *fuzzy* pada Metode *Max* diperoleh dengan cara mengambil nilai maksimum aturan, kemudian menggunakannya untuk memodifikasi daerah *fuzzy*, dan mengaplikasikannya ke *output* dengan menggunakan operator OR (union). Jika semua proposisi telah dievaluasi,

maka *output* akan berisi suatu himpunan *fuzzy* yang merefleksikan kontribusi dari tiap-tiap proposisi. Secara umum dapat dituliskan:

$$\mu_{sf}[X_i] \leftarrow \max (\mu_{sf}[X_i], \mu_{kf}[X_i]) \quad (2.33)$$

Dengan:

$\mu_{sf}[X_i]$ = nilai keanggotaan solusi *fuzzy* sampai aturan ke-i

$\mu_{kf}[X_i]$ = nilai keanggotaan konsekuen *fuzzy* aturan ke-i

b. Metode *Additive (Sum)*

Pada metode ini, solusi himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara melakukan *bounded-sum* terhadap semua *output* daerah *fuzzy*. Secara umum dituliskan:

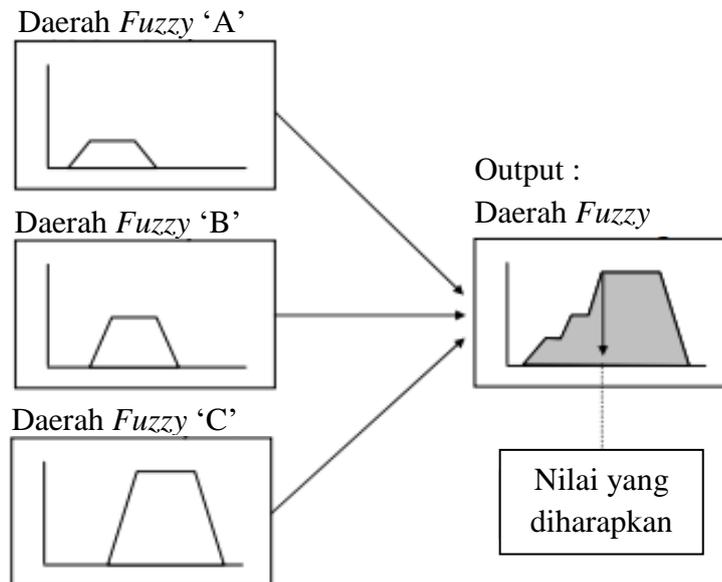
$$\mu_{sf}[X_i] \leftarrow \min (1, \mu_{sf}[X_i] + \mu_{kf}[X_i]) \quad (2.34)$$

c. Metode Probabilistik OR (probor)

Pada metode ini, solusi himpunan *fuzzy* diperoleh dengan cara melakukan *product* terhadap semua *output* daerah *fuzzy*. Secara umum dituliskan:

$$\mu_{sf}[X_i] \leftarrow (\mu_{sf}[X_i] + \mu_{kf}[X_i]) - (\mu_{sf}[X_i] * \mu_{kf}[X_i]) \quad (2.35)$$

Proses selanjutnya adalah penegasan (*defuzzy*), yaitu *input* dari proses defuzzifikasi berupa suatu himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan *fuzzy*, sedangkan *output* yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan *fuzzy* tersebut. Pada defuzzifikasi akan terjadi proses pendeskripsian aturan-aturan (beberapa aturan) *input* terhadap *output*nya, seperti yang tercantum dalam fungsi keanggotaan (*membership function*). Sehingga jika diberikan suatu himpunan *fuzzy* dalam *range* tertentu, maka akan dihasilkan suatu nilai *crsip* tertentu sebagai *output*. Bentuk kurva proses defuzziikasi dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Proses Defuzzifikasi

Ada beberapa metode defuzzifikasi pada komposisi aturan Mamdani, antara lain:

a. Metode *Centroid (Composite Moment)*

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil titik pusat (z^*) daerah *fuzzy*. Secara umum dirumuskan:

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)} \quad (2.36)$$

b. Metode Bisektor

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai pada domain *fuzzy* yang memiliki nilai keanggotaan setengah dari jumlah total nilai keanggotaan pada daerah *fuzzy*. Secara umum dituliskan:

$$z_p \text{ sedemikian hingga } \int_{k_l}^p \mu(z) dz = \int_p^{k_n} \mu(z) dz \quad (2.37)$$

c. Metode *Mean of Maximum (MOM)*

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai rata-rata domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

d. Metode *Largest of Maximum* (LOM)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai terbesar dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

e. Metode *Smallest of Maximum* (SOM)

Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil nilai terkecil dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

2.4 Batasan Daya Unit Pembangkit

Karakteristik dari suatu objek merupakan penggambaran sifat atau karakter dari objek tersebut, baik faktor *intern* maupun faktor *ekstern* yang dapat memengaruhi operasi objek tersebut. Pemberian beban maksimum pada generator hanya diperbolehkan untuk beberapa saat, atau tidak boleh secara *continuou*. Pembebanan generator untuk sistem *continuou* hanya disarankan tidak melebihi 80% dari kapasitas pembangkitannya, karena dapat memengaruhi umur peralatan (*lifetime*) dan keekonomisan. Sedangkan pemberian beban minimum untuk pembangkit *thermal* adalah 25%, karena di bawah nilai tersebut akan mengganggu kinerja sistem kontrol (Marsudi, 2006).

Pembagian pembebanan pada setiap unit pembangkit untuk memperoleh biaya operasional yang ekonomis harus tetap memperhatikan *equality constrains* dan *inequality constrains*. *Equality constraint* adalah batasan kesetimbangan daya, yang mengharuskan total daya yang dibangkitkan oleh masing-masing pembangkit harus sama dengan jumlah total kebutuhan beban dan rugi-rugi transmisi, yang dapat dinyatakan dengan persamaan 2.1 (Syah dkk., 2012). Sedangkan *inequality constraint* mengharuskan daya output dari tiap unit lebih besar dari atau sama dengan daya minimum yang diperbolehkan serta lebih kecil dari atau sama dengan daya maksimum yang diperbolehkan (Syah dkk., 2012).

$$P_{i \text{ (min)}} \leq P_i \leq P_{i \text{ (max)}} \quad (2.38)$$

2.5 Pemodelan Perhitungan Logika *fuzzy* Menggunakan Matlab

Matlab (*Matrix Laboratory*) merupakan salah satu *software* multifungsi yang dapat digunakan untuk pemecahan masalah dalam kelistrikan, termasuk sistem tenaga. Matlab adalah program bahasa tingkat tinggi dan interaktif yang memungkinkan untuk melakukan komputasi, visualisasi, dan *programming* secara intensif (Govindaraj dan Vidya, 2014). Penggunaan matlab diantaranya bermanfaat untuk bidang matematika dan komputasi, pembentukan algoritma, akuisisi dan analisis data, simulasi dan pembuatan *prototype*, dan lain sebagainya. Sebagai sebuah sistem interaktif, elemen dasar data pada matlab berupa *array* yang tidak perlu definisi dimensi, sehingga memberikan kebebasan untuk menyelesaikan masalah komputasi teknik, terutama yang berkaitan rumus vektor dan matriks.

Metode logika *fuzzy* adalah salah satu teknik *soft computing* yang merupakan inovasi baru dalam membangun sistem cerdas yaitu sistem yang memiliki keahlian seperti manusia pada domain tertentu, mampu beradaptasi dan belajar agar dapat bekerja lebih baik jika terjadi perubahan lingkungan. *Soft computing* mengeksplorasi adanya toleransi terhadap ketidaktepatan, ketidakpastian, dan kebenaran parsial untuk dapat diselesaikan dan dikendalikan dengan mudah agar sesuai dengan realita (Dahria, 2008).

Soft computing dikenal juga sebagai teknik mengenai kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) sebagai salah satu bagian dari ilmu komputer yang mempelajari bagaimana membuat mesin (komputer) dapat melakukan pekerjaan seperti dan sebaik yang dilakukan oleh manusia bahkan bisa lebih baik daripada yang dilakukan manusia (Dahria, 2008). Oleh karena itu, penyelesaian masalah dengan kecerdasan buatan harus didasarkan pada prinsip-prinsip teoretikal dan terapan yang menyangkut struktur data yang digunakan dalam representasi pengetahuan (*knowledge representation*).

2.6 Ketepatan Perhitungan Metode Logika Fuzzy

Seperti yang telah dijelaskan oleh Dahria (2008), bahwa pada metode logika *fuzzy* memiliki nilai toleransi terhadap ketidaktepatan, ketidakpastian, dan kebenaran parsial. Oleh karena itu, pengukuran terhadap ketidaktepatan dilakukan untuk mengetahui seberapa besar keakuratan data hasil *fuzzy* dengan data nyata. Hasil pengukuran ketidaktepatan tersebut dinyatakan sebagai *error*. Dengan adanya pengawasan melalui rasio *error* (galat), dapat ditentukan teknik pemodelan yang lebih sesuai atas penyimpangan yang terjadi.

Jika X_i merupakan data *actual* atau nyata dari hasil observasi untuk periode ke- i , sedangkan Y_i adalah hasil perhitungan logika *fuzzy* atau prakiraan untuk periode ke- i , maka *error* (kesalahan) didefinisikan sebagai selisih perbedaan nilai antara data nyata (X_i) dengan data prakiraan (Y_i) (Endaryati dan Kurniawan, 2015). Nilai-nilai yang umum digunakan untuk mengukur ketepatan pemakaian suatu metode peramalan tertentu dalam suatu kumpulan data adalah: MSD (*Mean Square Deviation*) atau MSE (*Mean Square Error*), MAD (*Mean Absolute Deviation*), dan MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*).

MAD (*Mean Absolute Deviation*) yaitu rata-rata kesalahan mutlak selama periode tertentu tanpa memperhatikan apakah hasil peramalan lebih besar atau lebih kecil dibandingkan kenyataannya (Khikmiyah dkk., 2012).

$$\text{MAD} = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (2.39)$$

n = Jumlah data atau prakiraan.

Mean Absolute Percentage Error atau MAPE merupakan persentase kesalahan hasil peramalan terhadap permintaan actual selama periode tertentu yang akan memberikan informasi persentase kesalahan terlalu tinggi atau terlalu rendah (Khikmiyah dkk., 2012).

$$\text{MAPE} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|X_i - Y_i|}{X_i}}{n} \times 100 \quad (2.40)$$

Sedangkan untuk *Mean Squared Error* (MSE) adalah penjumlahan kuadrat semua kesalahan peramalan pada setiap periode dan membaginya dengan jumlah periode peramalan (Khikmiyah dkk., 2012).

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n} \quad (2.41)$$

Untuk mengukur besarnya tingkat kesalahan (*error*), maka digunakan MAPE. Besarnya *error* dengan penyimpangan terkecil adalah hasil prakiraan atau perhitungan yang paling sesuai untuk digunakan. Menurut Endaryati dan Kurniawan (2015), suatu model mempunyai kinerja sangat bagus jika nilai MAPE di bawah 10%, dan mempunyai kinerja bagus jika nilai MAPE berada di antara 10% dan 20%.

2.7 Hipotesis

Menurut Prof. Dr. S. Nasution, hipotesis ialah pernyataan tentatif yang merupakan dugaan mengenai apa saja yang sedang kita amati dalam usaha untuk memahaminya (Sarwono, 2006). Jika mengacu pada tinjauan pustaka subbab 2.1, maka Peneliti merumuskan hipotesis dari penelitian ini adalah:

1. Optimasi unit pembangkit tenaga listrik berguna untuk menekan biaya bahan bakar pembangkitan tenaga listrik menjadi minimum, dengan daya pembangkitan yang optimum, sehingga sistem menjadi lebih efisien.
2. Metode logika *fuzzy* dan iterasi lambda merupakan metode-metode optimasi pembangkit tenaga listrik yang cukup efektif untuk efisiensi biaya pembangkitan tenaga listrik dengan pembagian beban dan penjadwalan operasi masing-masing unit pembangkit.
3. Antara logika *fuzzy* dan iterasi lambda memiliki teknik penyelesaian yang berbeda, sehingga akan menghasilkan *output* yang juga berbeda. Perbedaan tersebut akan menunjukkan efektifitas antara penggunaan logika *fuzzy* dengan iterasi lambda untuk menyelesaikan permasalahan *economic dispatch*.