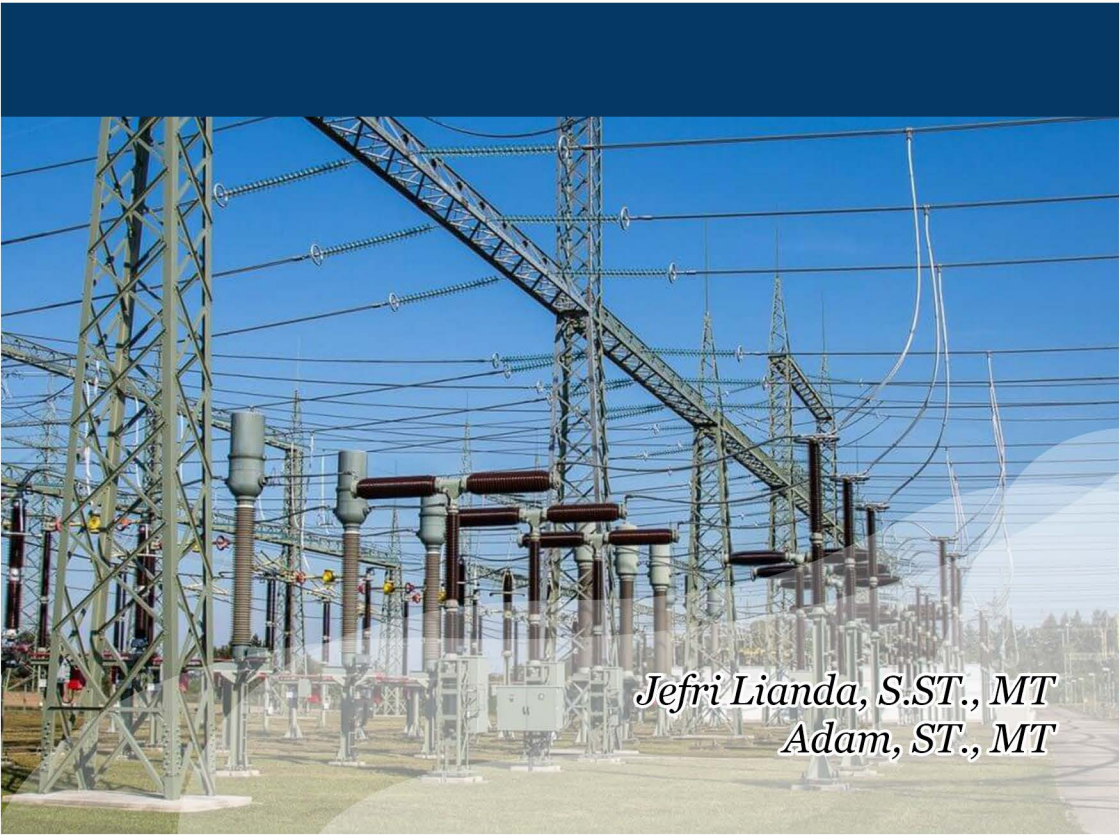




OPTIMASI DAN OPERASI

TENAGA LISTRIK



Jefri Lianda, S.ST., MT
Adam, ST., MT

OPTIMASI DAN OPERASI TENAGA LISTRIK

OPTIMASI DAN OPERASI TENAGA LISTRIK

Jefri Lianda, S.ST., MT
Adam, ST., MT



OPTIMASI DAN OPERASI TENAGA LISTRIK

© Penerbit Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia (PRCI)

Penulis:
Jefri Lianda, S.ST., MT
Adam, ST., MT

Editor: Rusli

Cetakan Pertama: Juli 2023

Cover: Tim Penyusun

Tata Letak: Tim Kreatif PRCI

Hak Cipta 2023, pada Penulis. Diterbitkan pertama kali oleh:

Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia
ANGGOTA IKAPI JAWA BARAT

Pondok Karisma Residence Jalan Raflesia VI D.151
Panglayungan, Cipedes Tasikmalaya – 085223186009

Website: www.rcipress.rcipublisher.org
E-mail: rumahcemerlangindonesia@gmail.com

Copyright © 2023 by Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia
All Right Reserved

- Cet. I –: Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia, 2023
Dimensi : 14,8 x 21 cm

ISBN: 978-623-448-570-7

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak buku ini dalam bentuk dan dengan
cara apapun tanpa izin tertulis dari penulis dan penerbit

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang
Hak Cipta Pasal 72

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta
Pasal 72

Barang siapa dengan sengaja melanggar dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam pasal ayat (1) atau pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling sedikit 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp.1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).

Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran hak cipta terkait sebagai dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

KATA PENGANTAR

Bahan ajar Optimasi dan Operasi Tenaga Listrik disusun sebagai bahan referensi bacaan mata kuliah mahasiswa Jurusan Teknik Elektro atau pembaca lain yang menaruh minat untuk mengetahui tentang optimasi dan operasi tenaga listrik. Buku ajar Optimasi dan Operasi Tenaga Listrik ini disajikan dengan menggunakan bahasa Indonesia yang sederhana sehingga mudah dipahami dan tersaji dalam 4 modul untuk 14 tatap muka yang berisi :

1. Karakteristik Unit Pembangkit
2. Ekonomi *Dispatch* Unit Pembangkit Termal
3. Penjadwalan Pembangkit (*Unit Commitment*)
4. Manajemen Operasi Pembangkit

Untuk kesempurnaan bahan ajar Optimasi dan Operasi Tenaga Listrik dan bahan ajar lainnya yang akan penulis buat, mohon saran dan kritik untuk pembuatan bahan ajar –bahan ajar lainnya.

Akhirnya penulis mengucapkan terima kasih dan maaf kepada semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu hingga tercetaknya bahan ajar ini.

Bengkalis, Juni 2023

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	ii
BAB 1 KARAKTERISTIK UNIT PEMBANGKIT	1
A. Pengoperasian Secara Ekonomis	1
B. Pembangkit Listrik.....	2
C. Unit Pembangkit Termal.....	3
D. Karakteristik Input-Output Unit Pembangkit Hidro	8
E. Rangkuman.....	12
F. Evaluasi.....	13
BAB 2 EKONOMI <i>DISPATCH</i> UNIT-UNIT PEMBANGKIT	
TERMAL.....	15
A. Pendahuluan	15
B. Permasalahan <i>Economic Dispatch</i>	17
C. Optimasi Menggunakan Persamaan <i>Lagrange</i>	20
D. Rugi-Rugi Transmisi	30
E. Rangkuman.....	40
F. Evaluasi.....	41
BAB 3 PENJADWALAN PEMBANGKIT (<i>UNIT</i>	
<i>COMMITMENT</i>).....	42
A. Konstrains Pada <i>Unit Commitment</i>	42
B. Metode Penyelesaian <i>Unit Commitment</i> (UC)	53
C. Rangkuman.....	75

D. Evaluasi.....	77
BAB 4 MANAJEMEN PEMBANGKIT	79
A. Manejemen Operasi.....	79
B. Manajemen Pemeliharaan	82
C. Suku Cadang	85
D. Laporan Pemeliharaan	87
E. Laporan Kerusakan.....	89
F. Rangkuman	93
G. Evaluasi.....	94
DAFTAR PUSTAKA.....	95
GLOSARIUM.....	96



BAB 1

KARAKTERISTIK UNIT PEMBANGKIT

A. Pengoperasian Secara Ekonomis

Sangat penting untuk mengenal karakteristik pembangkit listrik yang berguna untuk meminimalisir pembiayaan bahan baku energi. Ketika sudah mengenal karakteristik pembangkit listrik maka pengaturan output pembangkit dapat diatur dengan baik. Berdasarkan karakteristik pembangkit listrik, dapat dibuat model secara matematis untuk proses optimasi agar dihasilkan biaya pembangkitan yang ekonomis.

Ada berbagai macam jenis pembangkit listrik yaitu Pembangkit Listrik Tenaga air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Gas Alam (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), dan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU). Pembangkit listrik tersebut dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian besar berdasarkan karakteristiknya yaitu pembangkit hidro (PLTA) dan pembangkit termal (PLTU, PLTG, PLTP, PLTD, PLTGU).

Pengoptimasian pada kedua klasifikasi pembangkit tersebut sangatlah penting untuk memenuhi kebutuhan beban dengan biaya minimum. Namun, di antara dua karakteristik pembangkit tersebut, pembangkit cukup menjadi perhatian dikarenakan biaya bahan bakar dan sering berubah. Oleh

karena itu, untuk lebih lanjutnya akan banyak dibahas mengenai pembangkit termal ini.

B. Pembangkit Listrik

Mengoperasikan suatu sistem tenaga listrik yang terdiri dari beberapa pusat pembangkit listrik memerlukan suatu koordinasi yang tepat dalam melakukan penjadwalan pembebanan besarnya daya listrik yang dibangkitkan oleh masing-masing pembangkit listrik, sehingga diperoleh biaya pembangkit yang minimum.

Grainger dan Stevenson (1994) menyatakan bahwa ada dua pokok permasalahan yang harus dipecahkan dalam operasi ekonomis pembangkitan pada sistem tenaga listrik yaitu :

a. Pengaturan Unit Pembangkit (*Unit Commitment*)

Penanganan biaya operasi pembangkit tenaga listrik bisa diminimalkan dengan cara mencari kombinasi yang tepat dari unit pembangkit yang ada. Hal ini dikenal dengan pengaturan unit pembangkit. Pada pengaturan unit akan dibuat skema urutan prioritas, yaitu metode pengoperasian unit pembangkit berdasarkan total biaya rata-rata bahan bakar yang paling murah.

Pengaturan unit ini dilakukan untuk menentukan unit mana saja yang beroperasi dan tidak beroperasi pada jam tertentu sehingga dapat dibuat kombinasi operasi dari unit-

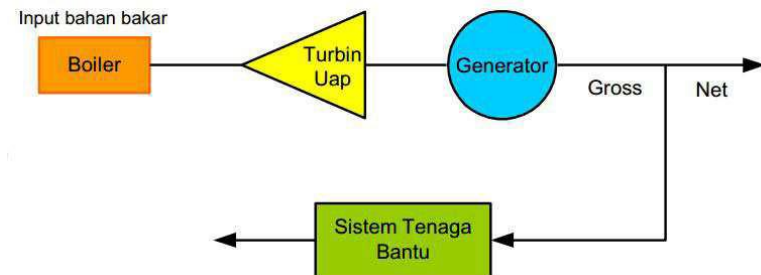
unit yang ada. Dalam mengatur unit-unit tersebut digunakan pertimbangan teknis dan ekonomis.

b. Penjadwalan Ekonomis (*Economic Dispatch*)

Penjadwalan ekonomis merupakan suatu usaha untuk menentukan besar daya yang harus disuplai dari tiap unit generator untuk memenuhi beban tertentu dengan cara membagi beban tersebut pada unit-unit pembangkit yang ada dalam sistem secara optimal ekonomis dengan tujuan meminimumkan biaya operasi pembangkitan.

C. Unit Pembangkit Termal

Secara umum, unit pembangkit termal terdiri dari boiler, turbin, dan generator yang digunakan untuk mengubah bahan bakar menjadi energi listrik. Unit pembangkit termal bisa dilihat seperti pada gambar 1.



Gambar 1. Sistem pembangkit termal
Sumber : Ontoseno (1996)

Dari Gambar 1, maka dapat diketahui beberapa karakteristik dari unit pembangkit termal yaitu :

1. Karakteristik Input Output Pembangkit Termal

Karakteristik input-output pembangkit menggambarkan hubungan antara input bahan bakar (Rp/jam) dan output yang dihasilkan oleh pembangkit (MW). Dengan mengetahui perbedaan karakteristik di antara semua pembangkit yang ada, optimasi pengoperasian pembangkit dapat dilakukan. Secara umum, karakteristik input-output pembangkit didekati dengan fungsi polinomial yaitu

$$F(P) = a_i + b_i + c_i P_i^2 \quad (1.1)$$

keterangan :

$F(P)$ atau H = input bahan bakar (Btu/jam)

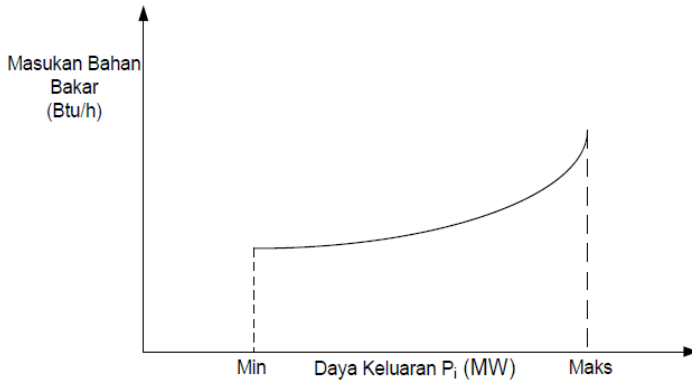
F = biaya bahan total bakar (Rp/jam)

P_i = output pembangkit termal (MW)

a_i, b_i, c_i = konstanta input-output pembangkit termal

$ke=i$ (Rp/MW.jam)

i = indeks pembangkit ke i ($i=1,2,3,..., n$)



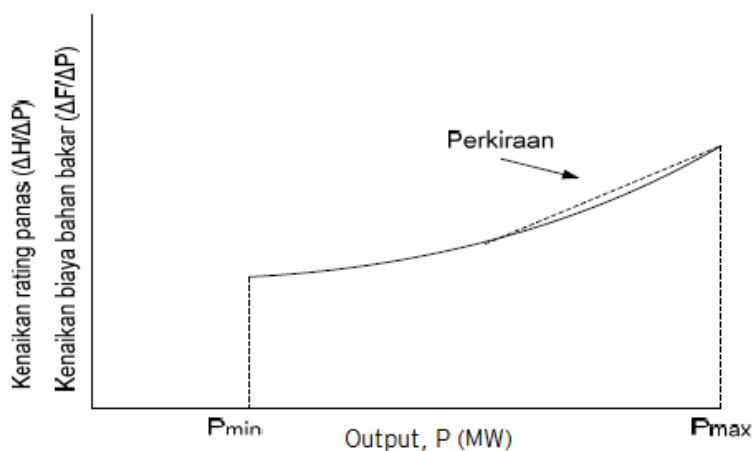
Gambar 2. Kurva karakteristik input output unit termal
Sumber : Allen j. wood and Bruce f (1996)

Gambar 2 ini menunjukkan karakteristik input dan output dari unit termal dalam bentuk yang ideal. Input dari pembangkit ditunjukkan pada sumbu tegak yaitu energi panas yang dibutuhkan dalam bentuk Mbtu/h (*Million of btu per hour*) karena digunakan satuan British Temperatur Unit (apabila menggunakan SI menjadi MJ/h atau Kcal/H) atau biaya total per jam (Rp/jam). Output dari pembangkit ditunjukkan pada sumbu mendatar yaitu daya listrik, yang memiliki batas-batas kritis operasi yaitu daya maksimum dan minimum dari pembangkit. Kurva ini didapat dari hasil tes panas pada pembangkit uap. Gambar 1.2 juga digambarkan sebagai kurva non-linier yang kontinu.

2. Karakteristik Kenaikan Biaya atau Panas Pembangkit Termal

Karakteristik lain yang perlu untuk diketahui dari suatu unit pembangkit termal adalah karakteristik laju kenaikan

panas yang dapat juga dikatakan sebagai karakteristik kenaikan biaya. Bentuk karakteristik laju kenaikan panas ini dapat dilihat pada gambar 3. Karakteristik ini merupakan suatu kemiringan (*slope*) dari karakteristik input dan output. Pada karakteristik ini ditunjukkan nilai Btu per kWh atau Rp/kWh terhadap daya keluaran dalam satuan MW. Karakteristik ini lebih lanjut digunakan untuk perhitungan pembebanan ekonomis dari unit pembangkit. Jika persamaan input-output unit pembangkit dinyatakan dalam pendekatan dengan menggunakan persamaan kuadrat, maka karakteristik kenaikan biaya akan mempunyai bentuk garis lurus. Kurva karakteristik kenaikan biaya atau panas pembangkit termal dapat dilihat pada gambar 1.3.

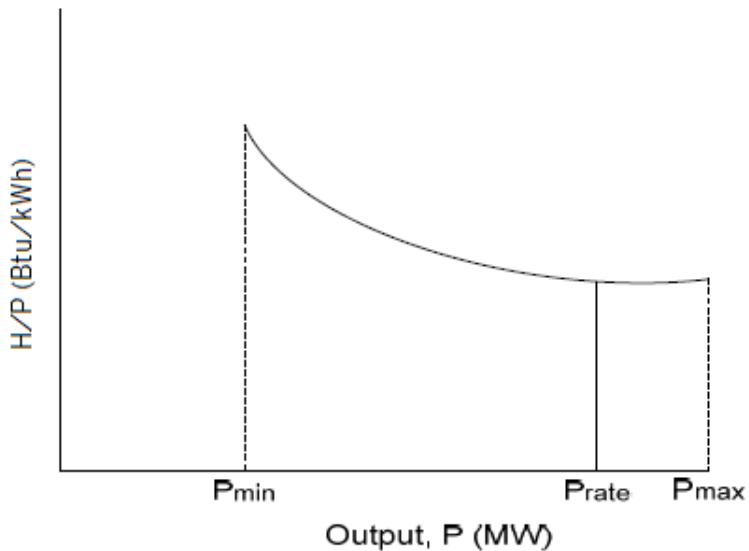


Gambar 3. Kurva karakteristik kenaikan biaya atau panas unit termal

Sumber : Allen j. wood and Bruce f (1996)

3. Karakteristik Efisiensi Terhadap Output

Karakteristik laju panas juga salah satu karakteristik yang perlu diketahui. Pada karakteristik ini, input merupakan jumlah panas perkilowattjam (Btu/kWh) dan output merupakan daya listrik dalam satuan MW. Kurva Karakteristik Efisiensi Terhadap Output dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Kurva karakteristik efisiensi terhadap output
Sumber : Allen j. wood and Bruce f (1996)

Karakteristik laju panas ini menunjukkan kerja sistem dari sistem pembangkit termal seperti kondisi uap, temperatur panas, tekanan kondensor dan siklus aliran air secara keseluruhan. Pada karakteristik terlihat bahwa efisiensi yang baik sebuah pembangkit termal terletak pada daerah limit maksimalnya.

D. Karakteristik Input-Output Unit Pembangkit Hidro

Karakteristik input-output dari pembangkit tenaga listrik hidro menggambarkan hubungan antara input ke penggerak mula (turbin) berupa jumlah air yang dialirkan diantara sudu-sudu turbin persamaan waktu dengan output daya dari generator. Output dari pembangkit listrik hidro adalah daya yang dikirim keluar. Kurva karakteristik input-output unit pembangkit hidro dapat dilihat pada gambar 1.5. Dalam koordinasi Pembangkit hidro-thermal yang menggunakan metode *Dynamic Programming*, karakteristik input-output dari pembangkit hidro sangat penting karena jumlah air diatur sedemikian rupa untuk mendapatkan pembangkitan yang ekonomis. Oleh karena tinggi terjun air dianggap konstan, maka besar debit air sebagai fungsi daya output pembangkit akan didekati dengan persamaan polynomial orde dua yaitu:

$$Q = \alpha_{li} + \beta_i P_{hi} + \gamma_i P_{hi}^2 \quad (1.2)$$

Keterangan :

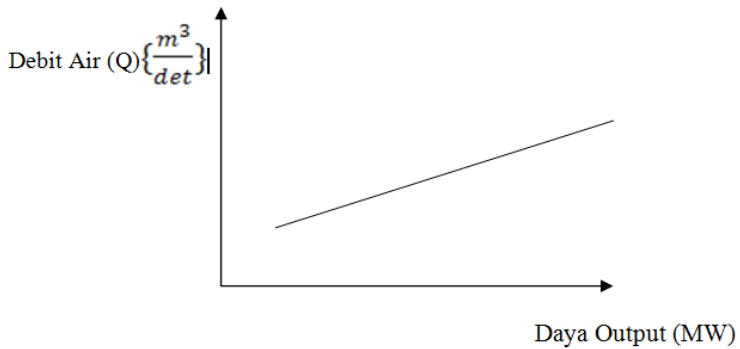
Q_1 = Debit air rata-rata (m^3/MWh)

P_{hi} = Output pembangkit hidro (MW)

α, β, γ = konstanta

Persamaan laju pertambahan pemakaian air (*Incremental Water Rate*) diperoleh dari turunan pertama persamaan input-output, yaitu :

$$IWR = \beta_1 + \gamma_1 P_{hi} \quad (\text{m}^3/\text{MWh}) \quad (1.3)$$



Gambar 5. Kurva Karakteristik Pembangkit Hidro
Sumber : Djiteng (1990)

Contoh 1.

Buatlah kurva karakteristik input-output pembangkit termal menggunakan matlab sesuai data tabel 1:

Tabel 1. Ciri khas tingkat panas unit pembentukan fosil

Fosil	Unit	100%	80%	60%	40%	25%
Unit-Description	Rating	Output	Output	Output	Output	Output
	(MW)	(Btu/kW)	(Btu/kW)	(Btu/kWh)	(Btu/kWh)	(Btu/kWh)
Steam-oil	50	11500	11592	11949	12719	14019 ^a

```
disp('-----')
```

```
'rating = n'
```

```
n=[1 0.8 0.6 0.4 0.25];
```

```
disp('-----')
```

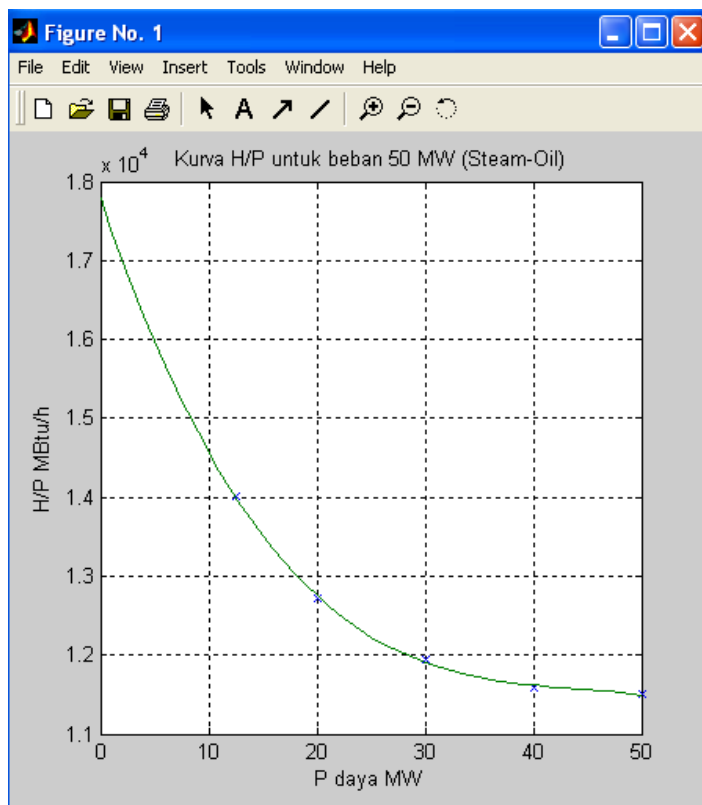
```
'Unit rating P = x'
```

```
x=50*n;
```

```

disp('-----')
'Fuel input H = y'
y=[11500 11592 11949 12719 14019];
p=polyfit(x,y,3)
x2=0:1:50;
y2=polyval(p,x2);
subplot(311),plot(x,y,'x',x2,y2)
grid on
ylabel('H/P MBtu/h')
xlabel('P daya MW')

```



Gambar 6. Kurva karakteristik input-output pembangkit steam-oil

E. Rangkuman

Permasalahan yang harus dipecahkan dalam operasi ekonomis pembangkitan pada sistem tenaga listrik yaitu pengaturan unit pembangkit (*unit commitment*) dan penjadwalan ekonomis (*economic dispatch*). Unit pembangkit termal terdiri dari boiler, turbin, dan generator yang

digunakan untuk mengubah bahan bakar menjadi energi listrik. Karakteristik input-output pembangkit menggambarkan hubungan antara input bahan bakar (Rp/jam) dan output yang dihasilkan oleh pembangkit (MW). Karakteristik laju kenaikan panas yang dapat juga dikatakan sebagai karakteristik kenaikan biaya. Karakteristik ini merupakan suatu kemiringan (slope) dari karakteristik input dan output. Pada karakteristik ini ditunjukkan nilai Btu per kWh atau Rp/kWh terhadap daya keluaran dalam satuan MW. Karakteristik input-output dari pembangkit tenaga listrik hidro menggambarkan hubungan antara input ke penggerak mula (turbin) berupa jumlah air yang dialirkan diantara sudu-sudu turbin persamaan waktu dengan output daya dari generator.

F. Evaluasi

1. Jelaskan permasalahan yang harus dipecahkan dalam operasi ekonomis pembangkitan pada sistem tenaga?
2. Jelaskan karakteristik dari unit pembangkit termal?
3. Buatlah kurva karakteristik input-output pembangkit termal menggunakan matlab sesuai data tabel 1.2.

Tabel 2. Ciri khas tingkat panas unit pembentukan fosil

Fosil Unit-Description	Unit	100%	80%	60%	40%	25%
	Rating	Output	Output	Output	Output	Output
	(MW)	(Btu/kW)	(Btu/kW)	(Btu/kWh)	(Btu/kWh)	(Btu/kWh)
Steam-gas	50	11700	11794	12156	112940	13409 ^a
Steam-coal	200	9500	9576	9871	10507	14262 ^a
Steam-oil	200	9900	9979	10286	10949	111581 ^a

BAB 2

EKONOMI *DISPATCH* UNIT-UNIT PEMBANGKIT TERMAL

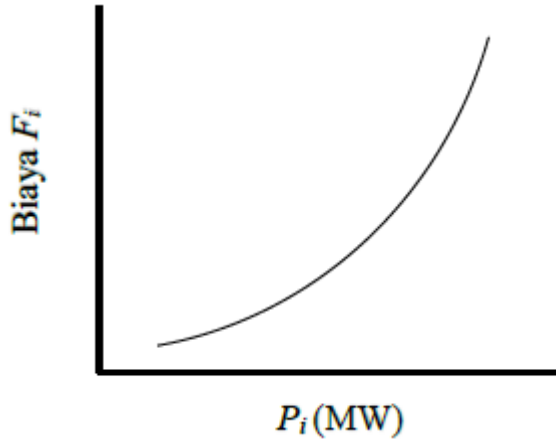
A. Pendahuluan

Sistem interkoneksi adalah sistem dalam pembangkit tenaga listrik yang digunakan untuk menghubungkan setiap pembangkit sekarang ini, sehingga membutuhkan sistem yang besar untuk dilakukannya proses penyaluran energi. Pada sistem ini setiap generator yang bekerja berada ditempat yang berbeda pada daerah satu dengan lainnya, akan tetepi tetap terhubung oleh jaringan transmisi. Sistem tenaga listrik merupakan sistem yang berada dalam skala yang besar perlu dijalankan secara optimal. Djiteng (1990) mengatakan bahwa pengoptimalan sumber daya dapat dilakukan dengan pengoptimalan pemakaian bahan bakar, sehingga menghasilkan biaya yang minimum karena biaya terbesar terdapat pada biaya bahan bakar, agar didapatkan penyaluran energi listrik seefisien mungkin dengan pemakaian bahan bakar sehemat mungkin.

Economic dispatch adalah pembagian pembebanan pada pembangkit-pembangkit yang ada dalam sistem secara optimal ekonomis, pada harga beban sistem tertentu. Besar beban pada suatu sistem tenaga selalu berubah setiap periode waktu tertentu, sehingga untuk mensuplai beban secara ekonomis maka perhitungan economic dispatch dilakukan pada setiap besar beban tersebut.

Fungsi *economic dispatch* (ED) adalah untuk menentukan alokasi daya yang paling optimum diantara unit-unit pembangkit termal tersebut, daya yang optimum tersebut digunakan untuk melayani beban total sehingga didapat total biaya operasi yang minimum dengan selalu memperhitungkan aturan-aturan teknis dan operasional, yaitu setiap unit generator dilihat minimum dan maksimum pembangkitannya dan daya total yang dibangkitkan dengan beban harus seimbang jumlahnya untuk suatu periode tertentu. Penggunaan bahan bakar dari unit-unit pembangkit termal menjadi salah satu pertimbangan dalam melakukan ED, dikarenakan munculnya emisi lingkungan dari penggunaan bahan bakar.

ED berperan utama dalam tersedianya pengiriman daya optimum dengan biaya bahan bakar yang minimal dengan kendala operasional yang terkait. Biaya bahan bakar menjadi biaya pembangkitan yang utama. Setiap unit pembangkit termal mempunyai fungsi biaya bahan bakar yang sederhana dalam bentuk fungsi kuadratik. Karakteristik unit termal dengan sebuah kurva cekung yang menunjukkan semakin besar daya yang dibangkitkan oleh unit pembangkit termal maka semakin besar juga biaya bahan bakar yang dihasilkan, seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva biaya bahan bakar
Sumber : Ontoseno (2009)

B. Permasalahan *Economic Dispatch*

Penyelesaian masalah operasi ekonomis pembangkit dalam sistem tenaga listrik yaitu menentukan unit-unit pembangkit untuk mensuplai kebutuhan beban dengan biaya yang optimum dengan memperhatikan batas-batas daya yang dibangkitkan. Fungsi biaya dari tiap generator dapat diformulasikan secara matematis sebagai suatu fungsi obyektif seperti pada persamaan:

$$F_T = \sum_{i=1}^N H(P_i) \quad (2.1)$$

keterangan

F_T = total biaya pada pembangkit

$H(P_i)$ = fungsi input-output dari pembangkit

N = jumlah generator

Karakteristik input output pembangkit adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara input bahan bakar dan output yang dihasilkan oleh pembangkit. Secara umum karakteristik input output pembangkit didekati dengan fungsi polinomial orde dua yaitu:

$$H(P_i) = a + bP_i + cP_i^2 \quad (2.1)$$

keterangan :

$H(P_i)$ = input bahan bakar pembangkit (Mbtu/h)

P_i = output daya pembangkit (MW)

a, b, c = konstanta persamaan input-output pembangkit ke- i

Penentuan konstanta a, b, c membutuhkan data yang diperoleh dari hasil percobaan yang berhubungan dengan input bahan bakar H_i (rupiah/jam) dan output pembangkit P_i (MW).

Gambar 8. memperlihatkan Kombinasi N unit termal ke beban P_{load} . Karakteristik input output pembangkit seperti dibawah ini:

Unit 1 : Coal-steam

Max output = 600 MW

Min output = 150 MW

Kurva input-output:

$$H_1 \left(\frac{\text{MBtu}}{\text{h}} \right) = 510,0 + 7,2P_1 + 0,00142P_1^2$$

Unit 2 : Oil-steam

Max output = 400 MW

Min output = 100 MW

Kurva input-output:

$$H_2 \left(\frac{\text{MBtu}}{\text{h}} \right) = 310,0 + 7,85P_2 + 0,00194P_2^2$$

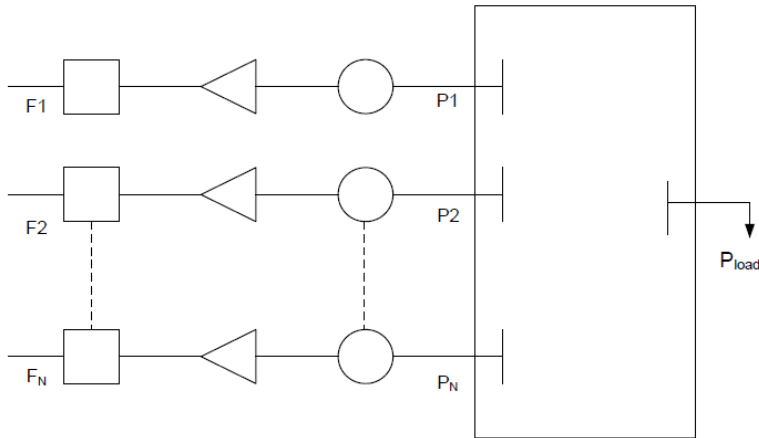
Unit 3 : Oil-steam

Max output = 200 MW

Min output = 50 MW

Kurva input-output:

$$H_3\left(\frac{\text{MBtu}}{h}\right) = 78,0 + 7,97P_3 + 0,00482P_3^2$$



Gambar 8. Kombinasi N unit termal ke beban P_{load}

Sumber : Allen j. wood and Bruce f (1996)

C. Optimasi Menggunakan Persamaan *Lagrange*

Metode *lagrange* merupakan salah satu metode konvensional yang umum digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi biaya atau economic dispatch. Grainger dan Stevenson (1994), menyatakan metode Lagrange terbagi dua yaitu losses diabaikan dan losses diperhitungkan. Dalam sistem tenaga, kerugian transmisi merupakan kehilangan daya yang harus ditanggung oleh sistem pembangkit, jadi kerugian transmisi ini merupakan beban bagi sistem tenaga.

Pendekatan yang khas pada metoda Lagrange untuk ditambahkan dalam fungsi objektif disebut dengan faktor pengali Lagrange, persamaan faktor pengali Lagrange dituliskan pada persamaan dibawah ini:

$$L = F_T + \lambda(P_R - \sum_{i=1}^N P_i) \quad (2.1)$$

Persamaan *Lagrange* tersebut merupakan fungsi dari output pembangkit, keadaan optimum dapat diperoleh dari persamaan Lagrange sama dengan nol.

$$\frac{\partial F_t}{\partial P_i} = \chi \quad (2.2)$$

Kondisi operasi ekonomis adalah

$$(b + 2cP_i) \times \text{fuel cost} = \chi \quad (2.3)$$

keterangan :

L = faktor pengali *Lagrange*

F_T = total biaya pembangkitan (Rp)

P_i = output pembangkit ke-i (MW)

P_r = total kebutuhan beban pada sistem (MW)

Dalam pengoperasiannya, sering terjadi pertambahan atau pengurangan biaya operasi bahan bakar disebabkan karena proses produks atau operasi. Biaya ini disebut dengan