

***ECONOMIC DISPATCH UNIT PEMBANGKIT TERMAL
MEMPERHITUNGGAN KEKANGAN EMISI LINGKUNGAN
MENGUNAKAN METODE *DIFFERENTIAL EVOLUTIONARY
ALGORITHM (DEA)****

SKRIPSI

untuk memenuhi salah satu persyaratan
mencapai derajat Sarjana S1



Disusun oleh:

Yogi Agus Priatna

14524084

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia
Yogyakarta**

2018

LEMBAR PENGESAHAN

***ECONOMIC DISPATCH* UNIT PEMBANGKIT TERMAL MEMPERHITUNGGAN
KEKANGAN EMISI LINGKUNGAN MENGGUNAKAN METODE *DIFFERENTIAL*
EVOLUTIONARY ALGORITHM (DEA)**



**Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**

Disusun oleh:

**Yogi Agus Priatna
14524084**

Yogyakarta, 23 Agustus 2018

Menyetujui,

Pembimbing 1



**Firmansyah Nur Budiman, S.T., M.Sc
145240501**

Pembimbing 2



**Elvira Sukma Wahyuni, S.Pd, M.Eng
155231301**

LEMBAR PENGESAHAN

SKRIPSI

ECONOMIC DISPATCH UNIT PEMBANGKIT TERMAL MEMPERHITUNGAN
KEKANGAN EMISI LINGKUNGAN MENGGUNAKAN METODE *DIFFERENTIAL*
EVOLUTIONARY ALGORITHM (DEA)

Dipersiapkan dan disusun oleh:

Yogi Agus Priatna

14524084

Telah dipertahankan di depan dewan penguji

Pada tanggal: 23 Agustus 2018

Susunan dewan penguji

Ketua Penguji : Elvira Sukma Wahyuni, S.Pd, M.Eng. _____

Anggota Penguji 1: Almira Budiyanto, S.Si, M.Eng. _____

Anggota Penguji 2: Yusuf Aziz Amrullah, S.T., M.Eng., Ph.D _____

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana

Tanggal: 24 Agustus 2018

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Yusuf Aziz Amrullah, S.T., M.Eng., Ph.D

045240101

PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini tidak mengandung karya yang diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan Saya juga tidak mengandung karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Informasi dan materi Skripsi yang terkait hak milik, hak intelektual, dan paten merupakan milik bersama antara tiga pihak yaitu penulis, dosen pembimbing, dan Universitas Islam Indonesia. Dalam hal penggunaan informasi dan materi Skripsi terkait paten maka akan diskusikan lebih lanjut untuk mendapatkan persetujuan dari ketiga pihak tersebut diatas.

Yogyakarta, 31-Juli-2018


METERAI
TEMPEL
6000
RUPIAH
Yogi Agus Priatna

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur penyusun panjatkan atas kehadirat Allah *Subhanahu Wa Ta'ala*, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga Laporan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Sholawat beserta salam senantiasa tetap tucurahkan kepada junjungan kita Nabi besar Muhammad *Shalallahu 'Alaihi Wassalam*, yang telah membimbing umatnya dari zaman kegelapan menuju zaman terangnya pengetahuan.

Laporan Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan studi mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Universitas Islam Indonesia.

Selama proses penulisan laporan ini, penyusun banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, untuk itu dengan kerendahan hati, penyusun ingin berterima kasih kepada:

1. Allah *Subhanahu Wa Ta'ala*, karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini.
2. Nabi Muhammad *Sholallahu 'Alaihi Wassalam*, atas perjuangannya, kita dapat merasakan indahnya pengetahuan.
3. Kedua orangtua tercinta Bapak Sutoyo dan Ibu Fatimah serta adik saya Muhammad Azam Shubhi yang selalu memberi doa dan dukungan.
4. Bapak Dr. Imam Djati Widodo, M.EngSc. selaku dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
5. Bapak Dr.Eng. Hendra Setiawan selaku Kepala Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
6. Bapak Firmansyah Nur Budiman, ST., M.Sc. dan ibu Elvira Wahyuni, S.Pd. M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan pengarahan.
7. Abdul Manan, Yanuardi Ramadhan, Rizal Khuzai, Reni Nur Azizah, Mba Anesya Violita dan Eri Yuniati selaku orang yang telah membantu dan menemani selama proses pengerjaan tugas akhir.
8. Teman-teman Lembaga Dakwah Kampus Dakwah Hijrah Mahasiswa Universitas Islam Indonesia.
9. Teman-teman konsentrasi ketenagaan Program Studi Teknik Elektro Universitas Islam Indonesia.
10. Teman-teman Elektro Universitas Islam Indonesia angkatan 2014.
11. Semua teman-teman yang telah banyak membantu dalam pengerjaan Skripsi.

12. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu baik langsung maupun tidak langsung dalam membantu dan menyukseskan pengerjaan Skripsi.

Kepada semua pihak yang namanya tidak dapat disebutkan satu persatu, penulis mengucapkan terima kasih atas segala bantuan dan dukungan yang diberikan. Semoga Allah SWT melimpahkan berkah dan rahmat-Nya kepada kita semua.

Saya menyadari sepenuhnya bahwa dalam laporan Skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, saran, kritik, dan masukan dari semua pihak akan saya terima dengan senang hati demi kesempurnaan laporan ini. Semoga laporan Skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca semua. Amin.

Wabillahitaufik Walhidayah

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, 11 Agustus 2017

Penulis,

Yogi A. Priatna

ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Arti Lambang dan Singkatan berisi daftar lambang dan singkatan yang digunakan di dalam laporan Tugas Akhir yang dilengkapi oleh arti dan besaran/satuan.

ED	= <i>Economic Dispatch</i>
IEEE	= <i>Institute of Electrical and Electronics Engineering</i>
DEA	= <i>Differential Evolutionary Algorithm</i>
F	= Faktor Skala
Cr	= <i>Crossover</i>
PSO	= <i>Particle Swarm Optimization</i>
CO ₂	= Karbon Dioksida
SO ₂	= Sulfur Dioksida
NO _x	= Mono-nitrogen Oksida NO dan NO ₂
\$	= Simbol mata uang beberapa negara
MWh	= <i>Mega Watt Hour</i>

ABSTRAK

Permasalahan *Economic Dispatch* (ED) adalah suatu permasalahan untuk menentukan alokasi daya yang paling optimum diantara unit-unit pembangkit termal untuk melayani beban total sehingga didapat total biaya operasi yang minimum dengan selalu memperhitungkan batasan persamaan dan ketidaksamaan sistem. Penggunaan bahan bakar dari unit-unit pembangkit termal menjadi salah satu pertimbangan dalam melakukan optimasi ED, dikarenakan munculnya emisi lingkungan dari penggunaan bahan bakar. Emisi lingkungan yang dipilih dalam penelitian ini adalah emisi CO₂, karena emisi CO₂ menghasilkan kuantitas emisi yang paling tinggi pada unit-unit pembangkit termal. Proses optimasi dilakukan menggunakan metode *Differential Evolution Algorithm* (DEA), diselesaikan menggunakan *software* MATLAB dan diterapkan pada sistem IEEE 24 bus dengan 26 unit termal. Dari hasil ED tanpa memperhitungkan kekangan emisi CO₂ didapat biaya operasi total semua pembangkit selama 24 jam sebesar \$861714,5 dengan total energi yang disuplai sebesar 54910 MWh. Sedangkan hasil ED dengan memperhitungkan kekangan emisi CO₂ menunjukkan bahwa penurunan kuantitas emisi CO₂ akan menghasilkan kenaikan pada biaya operasi. Dengan batasan maksimum emisi CO₂ sebesar 37503,53 ton maka kuantitas total emisi CO₂ yang dihasilkan sebesar 37473,01 ton dengan total biaya bahan bakar sebesar \$902895,79. Biaya operasional yang tinggi dikarenakan batasan dari kuantitas emisi CO₂ akan mengutamakan unit-unit yang menghasilkan emisi rendah namun biaya operasinya lebih mahal.

Kata kunci : *economic dispatch*, kekangan emisi CO₂, *differential evolution algorithm*, MATLAB.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Studi Literatur	3
2.2 Tinjauan Teori.....	4
2.2.1 Fungsi <i>Obyektif</i> ED.....	4
2.2.2 Kekangan dalam ED	5
2.2.3 <i>Differential Evolutionary Algorithm</i> (DEA).....	6
2.2.4 Integrasi Fungsi Emisi CO ₂ ke <i>Economic Dispatch</i>	8
BAB 3 METODOLOGI.....	9
3.1 Alat dan Bahan.....	9
3.2 Metode Analisis Sistem	9
3.2.1 Diagram Blok ED dengan DEA.....	9

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	12
4.1 <i>Economic Dispatch</i> Tanpa Memperhitungkan Kekangan Emisi	12
4.2 <i>Economic Dispatch</i> dengan Memperhitungkan Kekangan Emisi CO ₂	14
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	17
5.1 Kesimpulan	17
5.2 Saran	17
DAFTAR PUSTAKA	18
LAMPIRAN	19

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kurva biaya bahan bakar	4
gambar 2.2 Kurva Kuantitas Emisi CO ₂	5
Gambar 2.3 Proses Optimasi Dalam DEA	6
Gambar 3.1 Diagram Blok ED dengan DEA [5].....	10

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Parameter Kontrol DEA	12
Tabel 4.2 Hasil ED pada sistem IEEE 26 pembangkit termal tanpa memperhitungkan kekangan emisi CO ₂	13
Tabel 4.3 Hasil ED pada sistem IEEE 26 pembangkit termal dengan memperhitungkan kekangan emisi CO ₂	14
Tabel 4.4 Kuantitas Emisi yang dihasilkan pada sistem IEEE 26 pembangkit termal dengan memperhitungkan kekangan emisi CO ₂	15

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

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. 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.

Seruan hemat energipun semakin gencar dicanangkan disebabkan krisis energi yang membuat berkembangnya modifikasi untuk optimisasi bahan bakar, hal itu kita kenal dengan istilah *Economic Dispatch* (ED). Fungsi 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. Secara umum penjadwalan jangka pendek untuk jangka waktu 24 jam atau 1 minggu [1]. ED adalah anggota dominan dari kumpulan operasi sistem tenaga untuk menentukan unit komitmen, aliran beban, dan kemampuan transfer yang tersedia [2].

Penggunaan bahan bakar dari unit-unit pembangkit termal menjadi salah satu pertimbangan dalam melakukan ED, dikarenakan munculnya emisi lingkungan dari penggunaan bahan bakar. Emisi lingkungan yang dimaksud antara lain emisi gas-gas SO_2 , NO_x , dan CO_2 [1]. Maka dari itu, optimasi ED harus menghasilkan emisi lingkungan yang tidak melebihi batas maksimum yang ditentukan. Fungsi dari gas-gas emisi tersebut harus menjadi aturan teknis dalam mencari optimasi ED, agar sistem tenaga listrik dapat dioperasikan tanpa menghasilkan emisi lingkungan yang tinggi.

Optimasi ED telah banyak dilakukan dengan berbagai macam metode. Untuk tugas akhir ini, metode yang akan digunakan pada optimasi ED ini yakni *Differential Evolutionary*

Algorithm (DEA). Parameter kontrol yang sedikit dan konvergensi yang tinggi dan dapat diandalkan [3] menjadi dasar pemilihan DEA untuk menjadi metode mencari nilai optimasi ED.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana menentukan biaya bahan bakar yang paling optimal tanpa kekangan emisi lingkungan pada pembangkitan dengan menggunakan metode DEA?
2. Bagaimana menentukan biaya bahan bakar yang paling optimal dengan kekangan emisi lingkungan pada pembangkitan dengan menggunakan metode DEA?

1.3 Batasan Masalah

1. Perhitungan ini hanya mencari nilai ED untuk sistem IEEE 24 bus.
2. Kekangan pembangkit yang diperhitungkan adalah batasan maksimum dan minimum pembangkitan.
3. Kekangan sistem yang diperhitungkan adalah daya total seimbang dengan beban total dan kekangan emisi.
4. Metode yang digunakan untuk mencari nilai optimal ED adalah metode DEA.
5. Emisi lingkungan yang diperhitungkan hanya emisi CO₂.
6. Simulasi untuk mencari nilai ED dengan metode DEA hanya menggunakan *software* MATLAB.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Menentukan biaya bahan bakar yang paling optimal tanpa kekangan emisi lingkungan pada pembangkitan dengan menggunakan metode DEA.
2. Menentukan biaya bahan bakar yang paling optimal dengan kekangan emisi lingkungan pada pembangkitan dengan menggunakan metode DEA.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini dapat mencari biaya yang minimum dengan menggunakan metode DEA yang memiliki parameter kontrol yang sedikit dan konvergensi yang tinggi dan dapat diandalkan untuk mencari solusi seoptimal mungkin dari permasalahan ED.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

Berbagai penelitian dalam bidang ED dengan metode DEA telah dilakukan, seperti penelitian yang dilakukan oleh Anesya Violita, dkk [4], pada penelitian tersebut dilakukan optimasi ED. Optimisasi ED ini sendiri sudah banyak dilakukan dengan berbagai macam metode Artificial Intelligence (AI). Untuk tugas akhir ini, metode AI yang dicoba untuk diaplikasikan pada optimisasi ED ini yakni Differential Evolutionary Algorithm (DEA). DEA ini akan dicoba diaplikasikan pada sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 kV kemudian hasilnya dibandingkan dengan metode lainnya yakni Lagrange dan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Hasilnya metode DE Algorithm terbukti mampu menemukan solusi optimal dari permasalahan ED dengan penghematan biaya sebesar Rp.104,76 juta/jam atau 1,545 % dibandingkan dengan metode PSO, dan penghematan biaya pembangkitan sebesar Rp. 1.167,72 juta/jam atau 14,892 % dibandingkan metode Lagrange. Sebagai referensi, metode DE Algorithm ini juga akan disimulasikan pada sistem tenaga listrik IEEE-30 bus yang hasilnya juga akan dibandingkan dengan hasil yang didapatkan apabila menggunakan metode Lagrange dan PSO. Hasil yang didapat juga mampu membuktikan bahwa metode Differential Evolutionary (DE) Algorithm juga mampu menemukan solusi lebih optimal dengan penghematan biaya sebesar 0,06 \$/jam atau sekitar 0,008 % dibandingkan metode PSO, dan penghematan biaya sebesar 23,47 \$/jam atau 2,92 % dibandingkan dengan metode Lagrange.

Menurut Sinaga [5], dalam proses pembakaran pada unit pembangkit termal memunculkan masalah lainnya yaitu meningkatnya polusi lingkungan, selain biaya bahan bakar emisi lingkungan menjadi topik yang harus diminimalkan. Pada penelitian ini untuk mencari solusi optimal permasalahan tersebut dengan menggunakan metode DEA. Simulasi dilakukan pada sistem dengan skala unit kecil 3-unit dan 6-unit serta pada sistem dengan skala unit besar yaitu 40-unit pembangkit dengan program MATLAB. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa algoritma ini memberikan hasil yang lebih optimal dan efisien pada permasalahan kombinasi ED dan emisi pada sistem dengan skala unit kecil dan memberikan keseimbangan antara biaya bahan bakar dan jumlah emisi jika diterapkan pada sistem dengan skala unit besar.

Dari kedua penelitian diatas, metode DEA terbukti mampu menemukan solusi optimal dalam memecahkan masalah optimasi ED. Penulis bermaksud akan melakukan optimasi ED dengan memperhitungkan kekangan emisi menggunakan metode DEA dengan pertimbangan penelitian yang telah dilakukan Anesya Violita, dkk dan Sinaga.

2.2 Tinjauan Teori

2.2.1 Fungsi Obyektif ED

ED dapat didefinisikan sebagai proses minimisasi fungsi obyektif dengan memperhitungkan kekangan sistem dan unit pembangkit. Kekangan sistem meliputi keseimbangan antara daya dibangkitkan dengan total beban, serta kekangan tambahan berupa batasan maksimum emisi CO₂ yang diijinkan. Kekangan unit meliputi batasan minimum dan maksimum pembangkitan tiap unit generator [1].

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 [4]. Setiap unit pembangkit termal mempunyai fungsi biaya bahan bakar yang sederhana dalam bentuk fungsi kuadratik

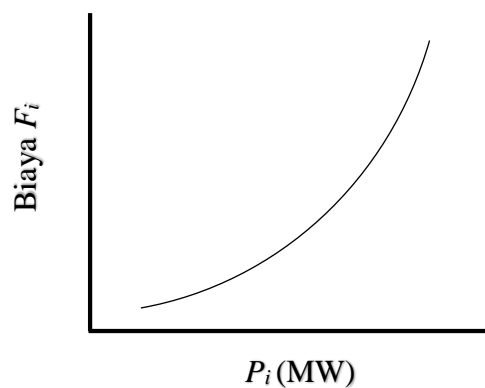
$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (2.1)$$

F_i = besar biaya pembangkitan pada pembangkit

a_i, b_i dan c_i = koefisien biaya bahan bakar dari unit i ,

P_i = daya yang ditentukan untuk unit i ,

Dari persamaan (2.1), dapat digambarkan 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 2.1.



Gambar 2.1 Kurva biaya bahan bakar

Jadi untuk total biaya pembangkitan untuk semua unit pembangkit dapat dinyatakan

$$F_t = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (2.2)$$

F_t = total biaya bahan bakar,

F_i = biaya bahan bakar unit i ,

P_i = pembangkitan dari unit i ,

n = jumlah unit pembangkit,

2.2.2 Kekangan dalam ED

2.2.2.1 Keseimbangan antara beban dengan daya yang dibangkitkan

ED adalah untuk menentukan alokasi daya yang paling optimum diantara unit-unit termal tersebut untuk melayani beban total. Maka dari itu, total daya yang dihasilkan unit-unit termal harus seimbang dengan beban yang diminta dalam setiap periode waktu, sesuai persamaan

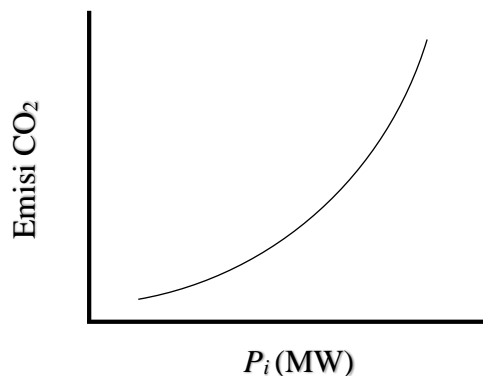
$$P_{beban}^t = \sum_{i=1}^I P_i^t \quad (2.3)$$

2.2.2.2 Fungsi emisi CO₂

Kuantitas emisi CO₂ sebuah unit termal berhubungan secara langsung dengan kuantitas daya yang dibangkitkan oleh unit tersebut. Hubungan tersebut dapat diformulasikan dengan fungsi kuadrat [1] sehingga persamaannya

$$E_i(P_i) = x_i + y_i P_i + z_i P_i^2 \text{ ton/h} \quad (2.4)$$

dimana x_i, y_i , dan z_i adalah konstanta fungsi kuadrat emisi CO₂ unit i . Sama halnya dengan fungsi biaya bahan bakar ED, karakteristik emisi CO₂ dapat digambarkan dengan kurva cekung yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, dengan sumbu y menunjukkan emisi CO₂.



Gambar 2.2 Kurva Kuantitas Emisi CO₂

2.2.2.3 Batasan minimum dan maksimum pembangkit

Unit-unit pembangkit mempunyai batas minimum dan batas maksimum untuk dapat menyuplai daya dalam rentangnya. Batas kerja unit-unit pembangkit diberikan oleh persamaan

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (2.5)$$

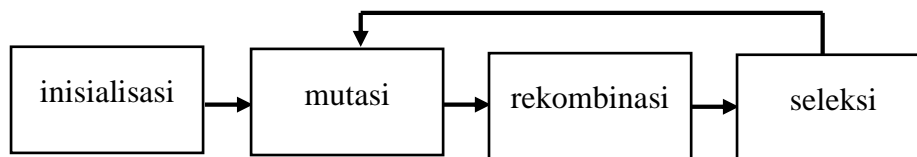
P_i = pembangkitan dari unit i ,

$P_{i,min}$ = pembangkitan minimum dari unit i ,

$P_{i,max}$ = pembangkitan maksimum dari unit i ,

2.2.3 Differential Evolutionary Algorithm (DEA)

DEA adalah pengembangan dari algoritma genetika yang merupakan optimasi modern yang berdasarkan pencarian populasi. Algoritma tersebut umumnya dipilih karena strukturnya yang sederhana, parameter kontrolnya yang sedikit dan konvergensi keandalan yang tinggi. DEA mempunyai proses optimasi dengan empat operasi dasar, diantaranya inisialisasi, mutasi, rekombinasi dan seleksi.



Gambar 2.3 Proses Optimasi Dalam DEA

Inisialisasi

Dalam algoritmanya DEA menggunakan dua buah populasi vektor. Masing-masing populasi terdiri dari N_p *vector* dengan D -dimensional parameter. Populasi awal, P_x , terdiri dari *vector* $x_{i,g}$ yang ditentukan sebagai titik awal. Populasi awal DE secara matematis dapat digambarkan dengan persamaan

$$P_{x,g} = (x_{i,g}), \quad i = 1, \dots, N_p, g = 1, \dots, g_{max} \quad (2.6)$$

$$x_{i,g} = (x_{j,i,g}), \quad j = 1, \dots, D.$$

$x_{i,g}$ merupakan vektor ke- i pada pembangkitan ke g . Sedangkan $x_{j,i,g}$ adalah nilai vektor ke- i pada parameter ke- j , pada pembangkitan ke g . Nilai i adalah bilangan bulat dari 0 sampai N_p , g adalah bilangan bulat dari 0 sampai g_{max} , dan j adalah bilangan bulat dari 0 sampai $D-1$.

Nilai awal vektor pada populasi awal diinisialisasi secara *random* dengan memperhitungkan batas atas (\mathbf{b}_U) dan batas bawah (\mathbf{b}_L) dari setiap vektor [4]. Persamaannya

$$x_j^L \leq x_{j,i,g} \leq x_j^U \quad (2.7)$$

Nilai vektor awal tersebut masing-masing dibangkitkan secara *random* diantara batasan-batasan tersebut berdasarkan persamaan

$$x_{j,i,g} = rand_j(0,1) \times (b_{j,U} - b_{j,L}) + b_{j,L} \quad (2.8)$$

$rand_j(0,1)$ merupakan angka yang dibangkitkan secara *random* dengan *range* antara [0,1].

Mutasi

Mutasi yaitu sebuah proses selanjutnya untuk membentuk populasi yang berisi *mutant vector*. Caranya yaitu mengkombinasi perbedaan vektor (*difference vector*) dari vektor satu dan vektor dua yang dipilih secara random pada vektor ketiga [4]. Pembentukan *mutant vector* ditunjukkan oleh persamaan

$$v_{i,g} = x_{r0} + F \times (x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (2.9)$$

$v_{i,g}$ = *mutant vector*

x_{r0}, x_{r1}, x_{r2} = vektor yang dipilih secara random

F = nilai real dengan range [0,1].

Rekombinasi

Proses selanjutnya adalah rekombinasi, dimana diproses ini membentuk sebuah populasi yang berisi *trial vector*. Populasi ini didapatkan dari hasil rekombinasi antara populasi vektor awal dengan populasi *mutant vector*.

$$u_{i,g} = u_{j,i,g} = \begin{cases} v_{j,i,g} & \text{if } (rand_j(0,1) \leq Cr \text{ or } j = j_{rand}) \\ x_{j,i,g} & \text{yang lain} \end{cases} \quad (2.10)$$

Probabilitas crossover (Cr) dengan range [0,1], berfungsi untuk mengendalikan laju rekombinasi atau untuk mengontrol pembagian nilai parameter yang digandakan dari *mutant*. $rand_j(0,1)$ adalah nilai random yang akan menentukan apakah vektor tersebut direkombinasi atau tidak. Jika nilai $rand_j(0,1)$ suatu vektor adalah kurang dari Cr, maka nilai vektor yang akan digandakan pada *trial vector* adalah *mutant vector*. Jika sebaliknya, maka nilai vektor yang akan digandakan pada *trial vector* adalah vektor awal [4].

Seleksi

Proses terakhir yaitu seleksi, yang bertujuan untuk memilih vektor yang akan menjadi anggota populasi untuk iterasi selanjutnya. Dimana prosesnya adalah jika *trial vector*, $u_{i,g}$, memiliki nilai *objective function* sama atau lebih kecil daripada target vektor $x_{i,g}$, maka akan mengganti *target vector* pada iterasi selanjutnya. Jika sebaliknya, maka *target vector* tetap menjadi anggota populasi pada iterasi selanjutnya [4]. Seperti persamaan

$$x_{i,g} = \begin{cases} u_{i,g} & \text{if } f(u_{i,g}) \leq f(x_{i,g}) \\ x_{j,i,g} & \text{yang lain} \end{cases} \quad (2.11)$$

2.2.4 Integrasi Fungsi Emisi CO₂ ke *Economic Dispatch*

Bertambahnya kekakuan dengan diintegrasikannya permasalahan emisi lingkungan ke dalam masalah ED membuat batasan maksimum emisi lingkungan dapat membatasi operasi sebuah unit pembangkit, beberapa unit, atau keseluruhan sistem. Dalam penelitian ini batasan maksimum emisi CO₂ diterapkan untuk keseluruhan sistem dan untuk keseluruhan waktu studi. Maka kekakuan emisi lingkungan didefinisikan

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I EP_i^t \leq EM \quad (2.12)$$

dimana EM adalah batasan maksimum total emisi CO₂ yang dibolehkan selama waktu studi (24 jam) dan dinyatakan dalam satuan ton.

Dalam penelitian ini nilai EM dihubungkan dengan total beban yang diminta melalui koefisien *me* dimana

$$\text{Batasan maksimum } CO_2 = me \times \sum_t^T P_{beban}^t \quad (2.13)$$

dengan koefisien *me* dalam satuan ton/MWh dan batasan maksimum CO₂ dalam satuan ton.

Koefisien *me* divariasikan pada berbagai nilai, dan masing-masing nilai *me* dihitung besarnya kuantitas emisi CO₂, kemudian dirancang terhadap biaya operasi [7].

BAB 3 METODOLOGI

3.1 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya adalah:

1. Laptop

Laptop yang digunakan untuk mengerjakan penelitian ini adalah TOSHIBA Satellite C40-A dengan prosesor *core i3*, Intel HD dengan RAM 2 GB.

2. *Software* MATLAB

Untuk membantu mendapatkan nilai optimasi ED dengan menggunakan metode DEA dengan menggunakan bahasa pemrograman yang mempunyai keunggulan dalam memecahkan masalah matematis dengan baik maka dipilihlah *software* MATLAB.

3. Data

Data yang digunakan untuk dalam penelitian ini didapat dari sistem IEEE 24 bus, yang mempunyai 26 unit pembangkit termal (data disajikan dalam Lampiran). Dalam penelitian ini rugi-rugi transmisi diabaikan maka 26 unit termal diasumsikan terhubung dalam sebuah bus.

3.2 Metode Analisis Sistem

3.2.1 Diagram Blok ED dengan DEA

Proses DEA untuk optimasi *economic dispatch* yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 dapat dijelaskan secara rinci dibawah:

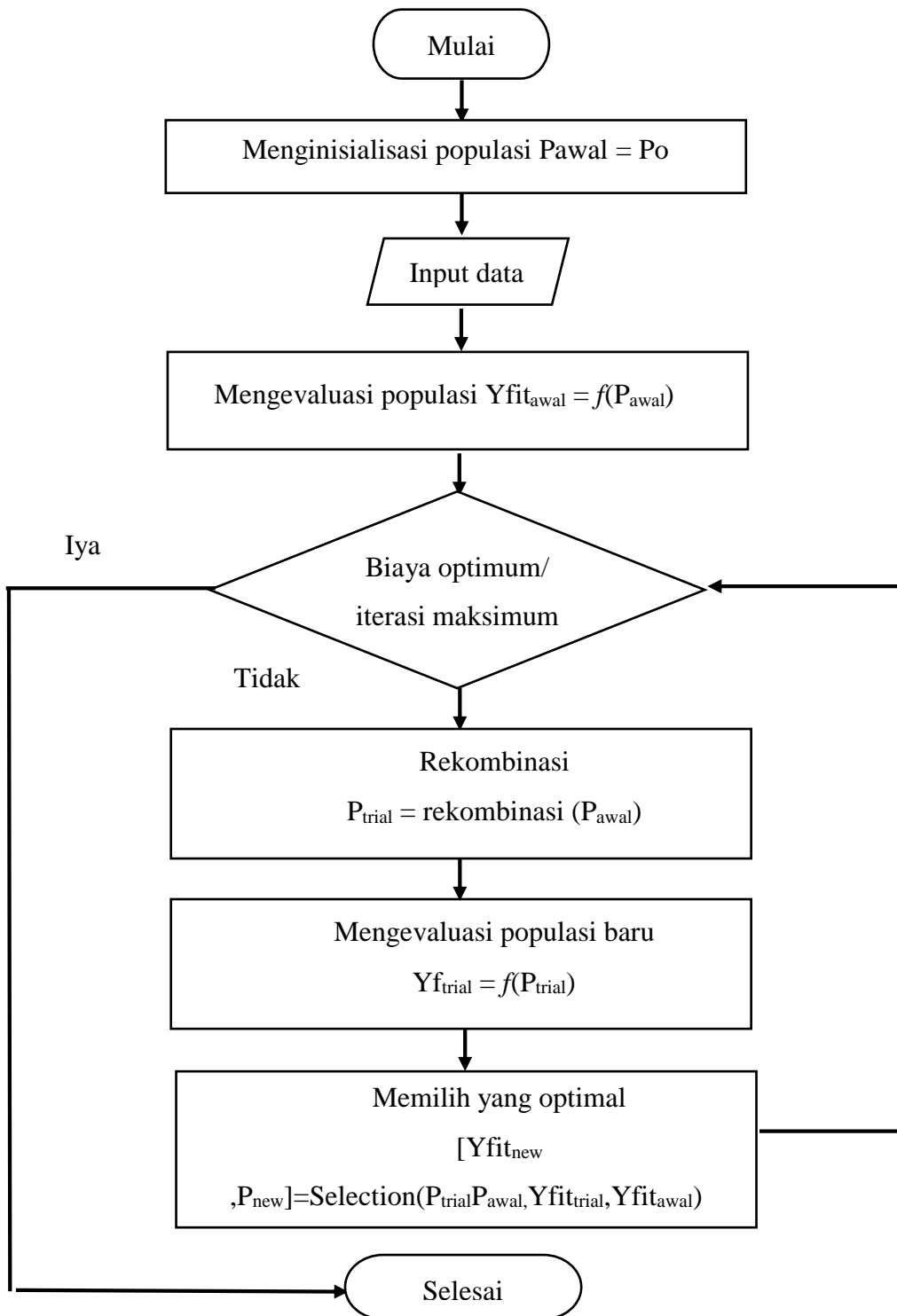
1. Inisialisasi

Langkah pertama menginisialisasi data sistem yang akan digunakan dalam penelitian yaitu batasan pembangkitan daya, fungsi biaya, fungsi emisi CO₂, batasan maksimum CO₂ dan beban selama 24 jam. Lalu untuk inisialisasi parameter DEA digunakan jumlah maksimum iterasi sebanyak 750, lalu dipilih populasi sejumlah 30 buah untuk membangkitkan sebuah populasi vektor awal untuk nanti diuji tingkat *fitness*-nya yang harus tetap memperhatikan batasan maksimum dan minimum pembangkit dan tetap memenuhi permintaan beban.

2. Perhitungan nilai fitness awal

Optimasi dengan metode DEA ini adalah mencari nilai biaya bahan bakar pembangkitan dengan nilai seminimum mungkin. Maka untuk mencari nilai *fitness* dari vektor awal adalah

dengan menghitung fungsi biaya bahan bakar dengan memasukkan nilai daya yang telah dirandom pada tahap inisialisasi.



Gambar 3.1 Diagram Blok ED dengan DEA [6]

3. Mutasi

Selanjutnya adalah membentuk populasi yang berisi *mutant vector* ($v_{i,g}$). Pembentukan *mutant vector* ditunjukkan oleh persamaan (2.9). nilai F dalam persamaan (2.9) adalah

parameter kontrol dari DEA yang berfungsi untuk mengontrol pengaruh dari variasi *differential* dari $(x_{r1,g} - x_{r2,g})$. Pada penelitian ini ditentukan nilai $F = 0,7$.

4. Rekombinasi

Rekombinasi adalah dimana diproses ini membentuk sebuah populasi yang berisi *trial vector* yang didapatkan dari hasil rekombinasi antara populasi vektor awal dengan populasi *mutant vector*. Probabilitas *crossover* (Cr) dengan range $[0,1]$, berfungsi untuk mengendalikan laju rekombinasi. Pada penelitian ini ditentukan nilai $Cr = 0,8$. Terdapat sebuah $\text{rand}_j(0,1)$ jika nilai $\text{rand}_j(0,1)$ suatu vektor adalah kurang dari Cr, maka nilai vektor yang akan digandakan pada *trial vector* adalah *mutant vector*. Jika sebaliknya, maka nilai vektor yang akan digandakan pada *trial vector* adalah vektor awal.

5. Perhitungan nilai fitness akhir

Vector trial yang diperoleh, selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai *fitness* ke dalam fungsi biaya bahan bakar pembangkitan pada fungsi biaya bahan bakar sebelumnya.

6. Seleksi

Seleksi bertujuan untuk memilih vektor yang akan menjadi anggota populasi untuk iterasi selanjutnya. Lalu sesudah populasi baru didapat, maka proses mutasi, rekombinasi, dan seleksi diulangi sampai didapat nilai optimum atau mencapai iterasi maksimum yang ditentukan sebesar 750 kali.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari Metodologi yang telah dirancang pada Bab 3 akan diterapkan pada sistem IEEE 24 bus dari 26 unit pembangkit termal (data ditunjukkan pada Lampiran) yang didalamnya terdapat data macam-macam bahan bakar dari semua unit pembangkit, data beban sistem IEEE 24 bus selama 24 jam, data daya minimum dan maksimum yang bisa dibangkitkan dalam setiap unit pembangkit, data fungsi koefisien biaya dan fungsi koefisien emisi dari setiap unit pembangkit.

4.1 *Economic Dispatch Tanpa Memperhitungkan Kekangan Emisi*

Untuk mencari nilai optimum dari ED dengan menggunakan metode DEA, maka DEA sendiri mempunyai tiga buah parameter kontrol yaitu ukuran populasi, faktor skala F dan probabilitas crossover Cr. Maka langkah pertama dalam simulasi ini kita menentukan ke tiga parameter kontrol tersebut. Nilai parameter kontrol ini digunakan selalu dalam semua percobaan dalam mencari nilai optimasi ED. Nilai parameter kontrol yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4.1:

Tabel 4.1 Parameter Kontrol DEA

Populasi	Faktor skala F	Crossover Cr
30	0,7	0,8

Jumlah populasi sebesar 30 menunjukkan telah dibangkitkan sebuah populasi vektor awal yang berisi 30 buah vektor. Faktor skala F merupakan nilai *real* dengan jarak [0,1]. Nilai F ini berfungsi untuk mengontrol pengaruh dari variasi *differential* dari $(x_{r1,g} - x_{r2,g})$ yang ditunjukkan pada persamaan (2.9). Sedangkan nilai crossover Cr berfungsi untuk mengendalikan laju crossover dengan jarak [0,1].

Dalam pengambilan hasil dilakukan menggunakan *software* MATLAB, dalam pengambilan hasil untuk beban yang sama didapatkan nilai biaya minimum yang berbeda-beda. Oleh karena itu dilakukan *run* sebanyak 10 kali untuk beban di jam ke-1 dan dilihat nilai biaya yang paling minimum berada di *range* berapa, dan dijadikan nilai awal biaya yang paling optimum. Hasil ED dengan menggunakan metode DEA tanpa memperhitungkan kekangan emisi CO₂ untuk sistem IEEE 26 unit mempunyai hasil yaitu daya yang dibangkitkan dan biaya yang dihasilkan dari tiap tipe dan bahan bakar unitnya untuk selama periode waktu 24 jam tertera pada Tabel 4.2. Untuk data lengkapnya tersedia dalam lampiran pada Tabel A.3 dan Tabel A.4.

Tabel 4.2 Hasil ED pada sistem IEEE 26 pembangkit termal tanpa memperhitungkan kekangan emisi CO₂

Unit	Tipe	Bahan Bakar	Daya yang dibangkitkan	Total biaya
#1-5	Fossil Steam	#6 oil	881,23	25890,18
#6-9	Combustion Turbine	#2 oil	1087,9	52601,19
#10-13	Fossil Steam	Coal	4935,47	76340,96
#14-16	Fossil Steam	#6 oil	4692,07	102744,33
#17-20	Fossil Steam	Coal	11520,29	144229,33
#21-23	Fossil Steam	#6 oil	9268,83	236268,68
#24	Fossil Steam	Coal	6539,94	78190,4
#25-26	Nuclear Steam	LWR	15984,27	145449,45

Pada Tabel 4.2 dapat dilihat dari tipe semua pembangkit mempunyai jenis bahan bakar yang berbeda, hasilnya yaitu total daya yang dibangkitkan dari tiap tipe unit pembangkit untuk selama periode waktu 24 jam sebesar 54910 MWh dengan total biaya yang dihasilkan sebesar \$861714,5. Dapat dilihat untuk menyuplai beban selama 24 jam unit-unit nuklir (unit #25-26) diutamakan untuk menyuplai dengan kapasitas daya yang besar sebesar 15984,27 MWh dibanding dengan unit-unit lainnya. Hal ini dikarenakan unit nuklir menjadi unit yang paling murah biaya operasinya. Dapat dilihat pada Tabel 4.2 nilai biaya yang paling minimum dihasilkan oleh unit-unit nuklir sebesar 145449,45, dengan daya yang besar saat dibangkitkan dibanding dengan unit-unit lainnya dapat menghasilkan biaya yang paling minimum dibanding unit-unit lainnya. Dikarenakan unit nuklir memiliki start yang lama dan respon yang lambat, oleh karena itu unit nuklir dioperasikan untuk menyuplai beban dasar. Sementara itu, unit berbahan bakar batu bara menjadi unit-unit yang diutamakan setelah unit nuklir, dikarenakan unit berbahan bakar batu bara menjadi unit yang paling murah biaya operasinya setelah unit nuklir. Oleh karena itu unit berbahan bakar batu bara digunakan untuk menyuplai beban dasar dan juga beban menengah. Sedangkan unit-unit yang berbahan bakar minyak menjadi unit yang paling mahal biaya operasinya. Oleh karena itu unit berbahan bakar minyak digunakan untuk menyuplai beban puncak karena unit-unit tersebut waktu startnya cepat sehingga lebih mendukung terhadap perubahan beban.

Maka dari itu, faktor yang paling mempengaruhi dalam ED diatas adalah permintaan beban selama 24 jam dan karakteristik masing-masing unit pembangkit yang meliputi biaya operasi, waktu start, dan mendukung dalam perubahan beban. Dengan proses optimasi yang telah dilakukan, maka diperoleh hasil ED yang optimal.

4.2 Economic Dispatch dengan Memperhitungkan Kekangan Emisi CO₂

Economic dispatch dengan memperhitungkan kekangan emisi CO₂ hal pertama yang harus dilakukan adalah menentukan batasan maksimum emisi CO₂ agar emisi CO₂ yang dihasilkan dari tiap unit-unit pembangkit termal tidak melewati batasan maksimum tersebut.

Seperti pada persamaan (2.13) batasan maksimum emisi CO₂ ditentukan sebesar : $me \times$ total beban yang diminta setiap jam nya. Dari percobaan menggunakan MATLAB dapat diketahui nilai koefisien me minimum yang dapat dicapai pada ED sebesar 0,683 ton/MWh. Artinya kuantitas emisi CO₂ untuk beban setiap jam nya harus kurang dari atau sama dengan dari batasan maksimum emisi CO₂. Nilai me divariasikan sebanyak 7 nilai me , dikarenakan dengan nilai variasi me tersebut kita sudah bisa melihat perbedaan yang dihasilkan.

Dalam pengambilan hasil tetap dilakukan *run* sebanyak 10 kali untuk beban di jam ke-1 dan dilihat nilai biaya yang paling minimum berada di *range* berapa dan dijadikan nilai awal biaya yang paling optimum. Hasil ED dengan menggunakan metode DEA dengan memperhitungkan kekangan emisi CO₂ untuk operasi 26 unit termal sistem IEEE 24 bus diantaranya yaitu biaya yang dihasilkan setiap jamnya selama 24 jam tertera pada Tabel 4.3 dan kuantitas emisi yang dihasilkan setiap jamnya selama 24 jam tertera pada Tabel 4.4.

Tabel 4.3 Hasil ED pada sistem IEEE 26 pembangkit termal dengan memperhitungkan kekangan emisi CO₂

Percobaan	1	2	3	4	5	6	7
me	0,683	0,685	0,687	0,701	0,703	0,723	0,725
batasan	37503,53	37613,35	37723,17	38491,91	38601,73	39699,93	39809,75
Total Biaya	902895,79	889150,76	884632,91	879227,04	868937,85	863903,48	861734,8
jam ke-1	28029,96	27518,95	27167,46	27160,35	27039,19	27020,40	26979,56
jam ke-2	27923,63	27870,22	27816,53	27804,16	27520,75	27475,09	27382,06
jam ke-3	27516,58	27478,84	27463,30	27386,88	26966,58	26845,54	26769,86
jam ke-4	27826,07	27635,11	27487,71	27375,30	27119,97	26930,58	26912,53
jam ke-5	28599,86	28385,67	28208,66	27995,77	27880,08	27650,30	27574,50
jam ke-6	29686,60	29541,61	29450,81	29440,80	29132,03	29094,47	28957,12
jam ke-7	32134,29	32075,63	32057,28	31695,44	31602,41	31369,16	31271,19
jam ke-8	39686,38	39065,43	38917,04	38124,05	37835,07	37808,48	37733,22
jam ke-9	42076,26	41234,90	40772,05	40484,78	39963,00	39830,15	39753,48
jam ke-10	42571,01	42193,06	41726,75	41585,41	41404,89	41237,26	41187,33
jam ke-11	44415,63	44082,90	44006,78	43979,26	43741,08	43735,24	43660,00
jam ke-12	43543,36	41700,37	41558,16	41430,46	40759,82	40581,84	40486,64
jam ke-13	43543,36	41700,37	41558,16	41430,46	40759,82	40581,84	40486,64
jam ke-14	41667,79	41545,17	41243,22	41238,64	41016,59	40522,61	40398,12
jam ke-15	43778,87	43052,05	42856,05	42770,29	41731,43	41507,85	41437,59
jam ke-16	44824,09	44120,67	43916,82	43055,18	41407,41	41401,44	41250,35
jam ke-17	40933,29	40819,95	40799,56	40346,36	39970,10	39618,24	39436,48
jam ke-18	41442,75	40924,46	40777,17	40449,80	39838,34	39535,15	39435,64

Percobaan	1	2	3	4	5	6	7
jam ke-19	43298,98	40623,05	40323,63	39612,32	39442,49	39128,07	39066,99
jam ke-20	41960,47	40606,71	40465,99	40423,02	40238,56	39569,06	39420,71
jam ke-21	42288,69	42243,43	42024,27	41928,18	41448,95	41175,08	41097,77
jam ke-22	39841,91	39722,90	39385,98	39280,27	38428,41	38090,69	38063,79
jam ke-23	35475,86	35440,98	35243,42	34914,21	34571,30	34520,00	34407,83
jam ke-24	29830,10	29568,33	29406,11	29315,66	29119,57	28674,94	28565,42

Tabel 4.4 Kuantitas Emisi yang dihasilkan pada sistem IEEE 26 pembangkit termal dengan memperhitungkan kekangan emisi CO₂

Variasi	1	2	3	4	5	6	7
me	0,683	0,685	0,687	0,701	0,703	0,723	0,725
batasan	37503,53	37613,35	37723,17	38491,91	38601,73	39699,93	39809,75
Total Emisi	37473,01	37589,95	37683,80	38471,21	38529,73	39247,38	39720,80
jam ke-1	1256,53	1165,47	1192,37	1223,08	1199,11	1195,97	1210,13
jam ke-2	1181,57	1142,02	1163,77	1215,29	1157,97	1271,10	1292,97
jam ke-3	1123,66	1156,92	1138,95	1215,11	1250,27	1317,99	1376,89
jam ke-4	1132,97	1137,93	1209,73	1192,43	1235,81	1220,71	1157,39
jam ke-5	1238,86	1160,50	1174,81	1236,03	1258,07	1214,62	1212,09
jam ke-6	1209,05	1287,86	1238,56	1250,92	1267,43	1392,82	1229,81
jam ke-7	1373,96	1291,69	1309,94	1459,95	1434,71	1314,07	1420,53
jam ke-8	1623,99	1646,90	1674,06	1668,56	1673,13	1649,30	1676,14
jam ke-9	1710,81	1701,94	1726,37	1785,24	1736,05	1812,32	1885,97
jam ke-10	1741,98	1749,49	1759,92	1779,62	1743,68	1889,55	1916,43
jam ke-11	1816,66	1989,19	1914,05	1905,99	1930,90	1958,26	1855,88
jam ke-12	1739,47	1768,16	1808,16	1839,19	1777,22	1783,22	1838,91
jam ke-13	1739,47	1768,16	1808,16	1839,19	1777,22	1783,22	1838,91
jam ke-14	1693,12	1823,46	1753,28	1825,13	1820,93	1880,53	1865,44
jam ke-15	1795,76	1847,11	1779,77	1893,26	1815,36	1918,17	1941,28
jam ke-16	1806,32	1814,78	1857,77	1868,77	1932,24	1953,92	2039,63
jam ke-17	1712,16	1758,67	1712,47	1748,63	1838,61	1683,85	1743,46
jam ke-18	1808,41	1761,70	1695,65	1714,27	1759,35	1796,55	1844,46
jam ke-19	1721,89	1697,61	1713,69	1701,05	1859,78	1837,27	2020,57
jam ke-20	1754,00	1722,96	1750,11	1682,15	1742,18	1789,92	1833,91
jam ke-21	1819,47	1748,89	1742,84	1924,98	1814,83	1896,41	1933,83
jam ke-22	1733,53	1660,43	1650,62	1645,98	1721,20	1842,49	1785,90
jam ke-23	1455,72	1502,93	1559,30	1507,06	1537,90	1551,06	1466,68
jam ke-24	1283,65	1285,17	1349,45	1349,33	1245,80	1294,09	1333,58

Pada Tabel 4.3 dapat dilihat dari ke 7 variasi bahwa semua biaya yang dihasilkan dari setiap jamnya didapat biaya operasi total semua pembangkit selama 24 jam yang dihasilkan dari metode DEA untuk *economic dispatch*. Hasilnya dari setiap variasi nilai total biaya pembangkitan mengalami penurunan biaya dengan total energi yang disuplai disetiap variasi sebesar 54910 MWh. Pada Tabel 4.4 dari ke 7 variasi semua kuantitas emisi CO₂ yang dihasilkan dari setiap jamnya didapat kuantitas emisi CO₂ total semua pembangkit selama 24 jam, dan hasilnya dari setiap variasi mengalami kenaikan nilai kuantitas total emisi CO₂. Hasil ini

menunjukkan bahwa nilai kuantitas total emisi CO₂ dengan nilai minimum menghasilkan kenaikan pada biaya operasi. Dengan nilai minimum sebesar 0,683 ton/MWh memiliki batasan maksimum emisi CO₂ sebesar 37503,53 ton dan menghasilkan kuantitas total emisi CO₂ sebesar 37473,01 ton dengan total biaya bahan bakar sebesar \$902895,79. Biaya operasional yang tinggi dikarenakan batasan dari kuantitas emisi CO₂ akan mengutamakan unit-unit yang menghasilkan emisi rendah namun biaya operasinya lebih mahal.

Unit-unit pembangkit yang menghasilkan emisi paling rendah yaitu unit-unit nuklir, disusul dengan unit berbahan bakar minyak, dan unit berbahan bakar batu bara menjadi unit yang menghasilkan emisi paling tinggi untuk tiap MWh yang dihasilkannya. Unit-unit nuklir menghasilkan emisi paling rendah dengan daya yang besar saat dibangkitkan dibanding dengan unit-unit lainnya dapat menghasilkan emisi yang paling rendah dibanding unit-unit lainnya. Dikarenakan unit nuklir memiliki start yang lama dan respon yang lambat, oleh karena itu unit nuklir dioperasikan untuk menyuplai beban dasar. Sementara itu, unit berbahan bakar minyak menjadi unit-unit yang diutamakan setelah unit nuklir, dikarenakan unit berbahan bakar minyak menjadi unit yang paling rendah menghasilkan nilai emisi setelah unit nuklir. Oleh karena itu unit berbahan bakar minyak digunakan untuk menyuplai beban dasar dan juga beban menengah. Sedangkan unit-unit yang berbahan bakar batu bara menjadi unit yang paling tinggi menghasilkan tingkat emisi. Oleh karena itu unit berbahan bakar batu bara digunakan untuk menyuplai beban puncak agar menghasilkan total emisi yang lebih rendah.

Maka dari itu, faktor yang paling mempengaruhi dalam ED diatas adalah kuantitas total emisi CO₂ dan karakteristik masing-masing unit pembangkit yang meliputi fungsi emisi CO₂, kuantitas emisi CO₂, waktu start, dan mendukung dalam perubahan beban. Dengan proses optimasi yang telah dilakukan, maka diperoleh hasil ED yang optimal.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari serangkaian penelitian yang telah dilakukan pada operasi 26 unit pembangkit termal sistem IEEE 24 bus, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari *economic dispatch* tanpa memperhitungkan kekangan emisi CO₂ didapat biaya operasi total semua pembangkit selama 24 jam sebesar \$861714,5 dengan total energi yang disuplai sebesar 54910 MWh. Untuk mendapat biaya operasi total yang paling murah maka unit-unit nuklir dan sebagian unit berbahan bakar batu bara digunakan untuk menyuplai beban dasar karena unit-unit tersebut mempunyai biaya operasi yang paling murah, namun startnya paling lama dan untuk mendukung terhadap perubahan beban sangat lambat. Kemudian sebagian unit berbahan bakar batu bara yang lainnya digunakan untuk menyuplai beban menengah. Dan untuk unit berbahan bakar minyak digunakan untuk menyuplai beban puncak karena biaya operasinya paling mahal, namun mempunyai start yang cepat dan sangat mendukung terhadap perubahan beban.
2. Pada *economic dispatch* dengan memperhitungkan kekangan emisi CO₂ diketahui bahwa kuantitas emisi CO₂ dengan nilai minimum menghasilkan kenaikan pada biaya operasi. Dengan nilai minimum sebesar 0,683 ton/MWh memiliki batasan maksimum emisi CO₂ sebesar 37503,53 ton dan menghasilkan kuantitas total emisi CO₂ sebesar 37473,01 ton dengan total biaya bahan bakar sebesar \$902895,79. Hal itu dikarenakan batasan dari kuantitas emisi CO₂ akan mengutamakan unit-unit yang menghasilkan emisi rendah namun biaya operasinya lebih mahal. Unit-unit yang menghasilkan emisi rendah akan menyuplai beban dasar. Unit-unit pembangkit yang menghasilkan emisi paling rendah yaitu unit-unit nuklir, disusul dengan unit berbahan bakar minyak, dan unit berbahan bakar batu bara menjadi unit yang menghasilkan emisi paling tinggi untuk tiap MWh yang dihasilkannya.

5.2 Saran

1. Emisi yang dihasilkan oleh pembangkit termal tidak hanya CO₂, maka dari itu studi lebih lanjut bisa menggunakan emisi lain sebagai kekangan emisinya.
2. Sistem yang dibahas dalam studi ini adalah sistem kecil yang hanya terdiri dari 26 unit pembangkit termal, karena itu studi lanjut bisa menggunakan sistem yang lebih besar

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. N. Budiman, "Penjadwalan Unit Pembangkit Termal dengan Memperhitungkan Kekangan Emisi Lingkungan dan Ketidakpastian Sistem," 2009.
- [2] L. Jebaraj, C. Venkatesan, I. Soubache, and C. Christober, "Application of differential evolution algorithm in static and dynamic economic or emission dispatch problem: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. October 2015, pp. 1206–1220, 2017.
- [3] S. Khamsawang and S. Jiriwibhakorn, "Solving the Economic Dispatch Problem by Using Differential Evolution," *World Acad. Sci.*, vol. 3, no. 4, pp. 700–704, 2009.
- [4] A. Violita, A. Priyadi, and I. Robandi, "Optimisasi Economic Dispatch pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV menggunakan Differential Evolutionary Algorithm," *J. Tek. ITS*, vol. 1, no. 1, pp. 115–118, 2012.
- [5] A. S. Sinaga, "Pembebanan Ekonomis dengan Pengendalian Emisi pada Pembangkit Termis Menggunakan Algoritma Evolusi Diferensial," *JNTETI*, vol. 3, no. 2, pp. 157–163, 2014.
- [6] J. H. Van Sickel, K. Y. Lee, and J. S. Heo, "Power Plant Control," *ISAP*, no. 2, pp. 560–565, 2007.
- [7] Sarjiya, "Short-Term Operating Strategy with Consideration of Bilateral Contract and System Uncertainty," 2007.

LAMPIRAN

Data Sistem IEEE 24 bus

Sistem yang digunakan adalah *IEEE Reliability Test System 1979*, yang terdiri dari 24 bus dan 26 unit pembangkit termal. Data sistem didapatkan dari *IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995, Short-Term Generation Scheduling with Transmission and Environmental Constraints Using An Augmented Lagrangian Relaxation*, dengan tambahan data berupa tipe dan bahan bakar masing-masing unit, serta harga bahan bakar dari *Reliability Assessment of Electric Power Systems using Monte Carlo Methods* (Roy Billinton, Wenyuan Li, 1994, New York : Plenum Press). Data *CO₂ emission factor* didapatkan dari http://www.ee.washington.edu/research/pstca/rts/pg_tcarts.htm.

Tabel A.1 Data pembangkit dan parameter operasi 26 unit termal sistem IEEE 24 bus

Unit	Tipe	Bahan Bakar	Pmin (MW)	Pmax (MW)	Koefisien Fungsi Biaya		
					<i>c</i> (\$/MW ² h)	<i>b</i> (\$/MW ^h)	<i>a</i> (\$/h)
1	<i>Fossil Steam</i>	#6 oil	2,4	12	0,02533	25,5472	24,3891
2			2,4	12	0,02649	25,6753	24,4110
3			2,4	12	0,02801	25,8027	24,6382
4			2,4	12	0,02842	25,9318	24,7605
5			2,4	12	0,02855	26,0611	24,8882
6	<i>Combustion Turbine</i>	#2 oil	4	20	0,01199	37,5510	117,7551
7			4	20	0,01261	37,6637	118,1083
8			4	20	0,01359	37,7770	118,4576
9			4	20	0,01433	37,8896	118,8206
10	<i>Fossil Steam</i>	Coal	15,2	76	0,00876	13,3272	81,1364
11			15,2	76	0,00895	13,3538	81,2980
12			15,2	76	0,00910	13,3805	81,4641
13			15,2	76	0,00932	13,4073	81,6259
14	<i>Fossil Steam</i>	#6 oil	25	100	0,00623	18,0000	217,8952
15			25	100	0,00612	18,1000	218,3350
16			25	100	0,00598	18,2000	218,7752
17	<i>Fossil Steam</i>	Coal	54,25	155	0,00463	10,6940	142,7348
18			54,25	155	0,00473	10,7154	143,0288
19			54,25	155	0,00481	10,7367	143,3179
20			54,25	155	0,00487	10,7583	143,5972
21	<i>Fossil Steam</i>	#6 oil	68,95	197	0,00259	23,0000	259,1310
22			68,95	197	0,00260	23,1000	259,6490
23			68,95	197	0,00263	23,2000	260,1760
24	<i>Fossil Steam</i>	Coal	140	350	0,00153	10,8616	177,0575
25	<i>Nuclear Steam</i>	LWR	100	400	0,00194	7,4921	310,0021
26			100	400	0,00195	7,5031	311,9102

Tabel A.1 (lanjutan)

Unit	Harga Bahan Bakar (\$/Mbtu)	Faktor Emisi CO ₂ (lb/Mbtu)	Koefisien Fungsi Emisi CO ₂		
			Z (ton/MW ² h)	' (ton/MWh)	((ton/h)
1	2,3	170	0,0008	0,8565	0,8177
2	2,3	170	0,0009	0,8608	0,8184
3	2,3	170	0,0009	0,8651	0,8260
4	2,3	170	0,0010	0,8694	0,8301
5	2,3	170	0,0010	0,8737	0,8344
6	3	160	0,0003	0,9084	2,8487
7	3	160	0,0003	0,9111	2,8572
8	3	160	0,0003	0,9139	2,8657
9	3	160	0,0003	0,9166	2,8745
10	1,2	210	0,0007	1,0579	6,4405
11	1,2	210	0,0007	1,0600	6,4533
12	1,2	210	0,0007	1,0621	6,4665
13	1,2	210	0,0007	1,0643	6,4794
14	2,3	170	0,0002	0,6035	7,3052
15	2,3	170	0,0002	0,6068	7,3200
16	2,3	170	0,0002	0,6102	7,3347
17	1,2	210	0,0004	0,8489	11,3301
18	1,2	210	0,0004	0,8506	11,3534
19	1,2	210	0,0004	0,8523	11,3764
20	1,2	210	0,0004	0,8540	11,3986
21	2,3	170	0,0001	0,7711	8,6877
22	2,3	170	0,0001	0,7745	8,7051
23	2,3	170	0,0001	0,7778	8,7228
24	3	210	0,0001	0,8622	14,0546
25	0,6	-	0.000005	0.04311	0.70273
26	0,6	-	0.000005	0.04311	0.70273

Data beban selama 24 jam didapatkan dari *IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 21, No. 4, November 2006, Reliability Constrained Unit Commitment Using Simulated Annealing* dan tertampil dalam Tabel A.2.

Tabel A.2 Data beban selama 24-jam untuk sistem IEEE 24 bus

Jam ke	Beban (MW)	Jam ke	Beban (MW)
1	1700	13	2590
2	1730	14	2550
3	1690	15	2620
4	1700	16	2650
5	1750	17	2550
6	1850	18	2530
7	2000	19	2500
8	2430	20	2550
9	2540	21	2600
10	2600	22	2480
11	2670	23	2200
12	2590	24	1840

Tabel A.3 Hasil ED pada sistem IEEE 26 pembangkit termal tanpa memperhitungkan kekangan emisi CO₂

MW jam	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	5,10	9,29	6,49	2,50	7,26	6,12	4,00	4,15	9,62	22,89	55,24	39,60	21,06	36,58	33,58	61,81	92,04	82,61	109,30	77,81	95,36	103,54	99,58	163,17	318,04	233,27
2	8,27	3,65	6,68	5,13	4,52	8,66	4,67	4,47	15,93	46,91	49,88	27,84	51,18	78,31	25,67	55,53	54,25	89,84	70,46	88,21	116,27	70,09	68,95	262,09	283,22	229,31
3	8,33	4,22	6,86	4,96	8,62	10,09	7,64	13,87	13,97	39,53	30,50	38,69	39,03	27,76	27,74	31,07	106,97	87,01	109,96	111,44	68,95	74,96	123,94	140,00	271,29	282,60
4	9,52	3,84	9,92	5,24	3,41	18,61	7,89	14,83	6,60	35,75	18,10	22,94	45,67	41,41	58,31	76,04	120,75	80,09	105,49	100,84	68,95	73,18	68,95	170,53	326,27	206,86
5	8,75	5,55	3,98	8,54	4,05	7,49	8,44	15,37	7,21	52,61	63,17	68,44	15,64	40,76	39,54	64,03	69,96	132,92	80,12	75,27	86,57	95,34	74,46	175,20	219,22	327,37
6	6,87	5,81	3,90	7,36	2,40	6,48	5,23	9,47	4,40	53,14	15,83	60,77	48,22	48,49	29,08	73,11	97,11	105,69	70,55	82,46	89,88	69,35	96,30	278,45	321,77	257,87
7	3,00	7,45	3,56	9,98	8,35	18,12	4,47	16,27	11,77	41,17	61,18	73,68	59,56	28,64	57,99	84,02	112,05	96,25	98,56	74,94	82,37	77,03	96,70	350,00	338,26	184,63
8	6,65	8,82	12,00	2,66	9,30	12,58	4,76	10,06	11,65	40,30	28,80	40,66	35,05	93,39	50,70	47,06	150,78	126,75	130,88	122,01	122,57	95,46	197,00	284,41	394,14	391,59
9	4,80	7,50	10,57	7,28	7,65	20,00	8,16	17,19	5,54	53,23	76,00	29,84	60,78	84,26	71,65	63,73	133,58	124,20	72,98	147,95	193,94	192,01	145,39	271,57	330,19	400,00
10	5,78	7,92	7,62	12,00	5,77	12,62	10,38	20,00	16,28	46,86	59,00	67,65	49,41	34,47	78,76	97,85	155,00	144,39	113,40	121,29	137,01	197,00	184,34	242,14	389,56	383,50
11	12,00	12,00	7,27	10,74	8,77	20,00	20,00	11,25	18,04	76,00	76,48	80,18	35,85	100,00	88,83	60,82	155,00	91,84	155,00	155,00	122,46	196,40	117,54	350,00	335,33	353,20
12	11,98	5,91	3,78	12,00	7,36	5,34	5,53	20,00	16,93	43,86	64,15	76,00	53,90	75,23	76,12	36,69	137,34	131,95	109,18	142,50	193,69	107,94	148,32	350,00	354,29	400,00
13	11,98	5,91	3,78	12,00	7,36	5,34	5,53	20,00	16,93	43,86	64,15	76,00	53,90	75,23	76,12	36,69	137,34	131,95	109,18	142,50	193,69	107,94	148,32	350,00	354,29	400,00
14	12,00	9,14	7,33	8,56	8,12	7,14	8,48	20,00	5,32	72,29	51,10	63,05	62,39	42,58	81,83	63,44	149,70	155,00	149,43	144,55	128,86	100,31	122,94	349,97	326,49	400,00
15	3,39	5,25	10,66	10,45	8,23	9,91	7,27	20,00	20,00	49,58	51,15	76,00	49,40	100,00	93,35	64,43	144,28	78,44	120,53	107,29	186,14	196,82	190,88	269,73	346,82	400,00
16	9,16	12,00	6,02	12,00	12,00	20,00	6,94	20,00	20,00	35,13	76,00	75,05	76,00	100,00	70,70	100,00	108,85	155,00	155,00	152,26	189,48	197,00	197,00	217,90	254,09	372,43
17	9,81	7,41	10,41	3,99	5,96	12,34	8,24	19,75	10,40	76,00	74,55	46,15	76,00	36,66	58,27	74,74	153,40	151,48	142,26	149,97	160,78	133,22	141,60	340,42	358,87	287,31
18	8,42	4,93	3,44	6,15	4,75	20,00	10,58	15,32	19,83	44,65	38,00	52,26	61,74	74,15	99,22	84,17	134,01	155,00	115,54	145,75	95,74	169,51	88,88	350,00	327,95	400,00
19	8,01	5,44	8,89	4,10	11,00	12,42	5,16	12,52	6,10	28,77	73,09	72,87	60,13	100,00	47,32	52,85	155,00	155,00	70,92	155,00	141,63	105,86	177,29	251,69	378,92	400,00
20	8,38	8,78	3,26	8,02	8,46	10,16	10,33	7,84	12,67	46,96	42,15	73,57	67,35	85,01	85,39	100,00	130,35	83,78	131,49	143,47	111,36	140,17	147,05	283,99	400,00	400,00
21	11,99	9,54	2,91	9,49	7,86	15,92	6,06	8,08	9,15	36,37	52,66	59,45	31,78	100,00	83,50	77,94	148,41	121,14	128,35	98,53	155,29	165,46	156,28	339,97	388,75	375,11
22	8,57	4,28	9,88	7,57	8,09	12,48	4,93	15,96	9,92	40,50	39,90	42,75	60,62	39,78	92,21	64,46	134,06	116,93	155,00	140,70	180,69	186,66	105,71	303,50	326,06	368,81
23	10,64	9,84	3,32	11,19	6,99	12,79	4,32	8,23	19,51	60,79	60,58	75,69	17,92	99,05	38,76	47,93	155,00	107,06	86,30	140,33	72,41	97,64	138,66	301,64	329,09	284,34
24	5,36	2,40	3,63	8,37	2,87	4,67	7,22	5,97	4,00	21,73	62,79	47,40	23,05	58,18	56,86	52,23	112,07	119,80	127,12	111,75	143,24	68,95	73,60	143,56	306,71	266,46

Tabel A.4 Total Biaya Pembangkitan pada sistem IEEE 26 pembangkit termal tanpa memperhitungkan kekangan emisi CO₂

Jam	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
GenA	155,36	237,50	238,90	270,01	249,97	201,12	101,36	195,35	147,62	172,96	334,60	334,03	334,03	334,60	111,41	260,49	277,42	241,33	230,62	240,26	334,39	245,10	299,01	161,95
GenB	265,12	118,56	133,20	123,51	167,60	174,51	217,08	252,81	218,53	229,55	336,33	177,03	177,03	261,38	159,95	336,33	216,16	151,75	164,76	251,87	271,74	134,68	279,64	86,18
GenC	193,23	198,17	203,08	283,27	127,91	125,76	116,96	338,30	300,47	222,87	213,79	122,45	122,45	215,21	303,00	180,92	296,41	113,77	256,30	109,15	100,04	282,19	110,54	118,65
GenD	89,67	158,53	153,97	161,44	248,18	217,09	286,38	93,86	215,12	340,03	306,63	340,03	340,03	248,72	298,75	340,03	128,58	185,26	131,68	234,58	273,43	222,76	318,52	243,93
GenE	215,68	143,36	251,78	113,98	130,78	87,60	244,42	269,77	225,92	176,20	255,73	218,29	218,29	238,39	241,19	341,73	181,34	149,22	315,08	247,35	231,45	237,61	208,38	99,82
GenF	347,84	443,73	497,87	820,57	399,76	361,63	802,26	592,03	873,57	593,41	873,57	318,63	318,63	386,52	491,18	873,57	583,04	873,57	585,97	500,37	718,63	588,38	600,17	293,23
GenG	268,96	294,39	406,57	416,15	436,85	315,37	286,83	297,77	426,31	510,55	876,43	326,77	326,77	438,28	392,51	379,97	429,25	517,99	312,67	508,45	346,70	304,25	280,93	390,80
GenH	275,47	287,50	645,21	681,85	702,20	477,55	736,66	499,88	771,95	879,43	545,18	879,43	879,43	879,43	879,43	879,43	869,76	700,53	593,49	415,49	424,65	724,71	430,36	344,58
GenI	484,59	726,14	651,01	369,61	392,72	285,94	566,77	561,99	329,10	739,50	806,97	764,52	764,52	320,78	882,34	882,34	514,53	875,81	350,62	601,22	466,75	496,19	863,35	270,61
GenJ	390,76	725,56	621,60	568,72	806,47	814,07	644,65	632,47	815,40	724,88	1144,60	682,45	682,45	1090,32	763,41	560,08	1144,60	693,71	471,77	726,35	577,49	635,20	923,67	374,86
GenK	846,30	769,71	496,92	325,90	960,51	294,87	931,80	473,27	1147,88	900,33	1155,01	974,77	974,77	787,11	787,71	1147,88	1126,63	601,65	1105,20	660,08	809,33	628,33	923,15	955,04
GenL	625,63	461,06	612,79	393,26	1039,83	928,21	1116,69	640,52	488,89	1028,26	1212,80	1150,94	1150,94	961,24	1150,94	1136,87	718,35	805,52	1104,79	1115,18	909,15	670,06	1146,32	736,20
GenM	368,09	792,15	619,09	713,35	293,59	749,82	913,25	563,03	931,02	766,89	574,30	831,38	831,38	954,46	766,63	1154,41	1154,41	944,89	921,52	1026,91	517,13	928,56	324,81	395,67
GenN	884,72	1665,66	722,46	974,03	961,92	1105,42	738,47	1953,18	1778,77	845,67	2080,20	1607,36	1607,36	995,62	2080,20	2080,20	886,15	1586,93	2080,20	1793,05	2080,20	943,82	2061,84	1286,23
GenO	832,98	687,01	725,22	1294,54	943,63	749,78	1288,56	1151,70	1546,54	1681,79	1874,36	1631,50	1631,50	1740,41	1961,38	1528,50	1293,74	2074,51	1088,47	1808,45	1772,38	1939,34	929,13	1267,25
GenP	1366,64	1247,83	789,96	1637,30	1408,67	1581,41	1790,13	1088,43	1403,00	2056,92	1347,74	894,64	894,64	1397,37	1416,18	2098,58	1612,52	1793,07	1197,37	2098,58	1673,67	1416,84	1104,76	1185,75
GenQ	1166,21	736,51	1339,67	1501,54	913,57	1224,93	1399,18	1860,45	1653,89	1911,54	1911,54	1698,80	1698,80	1847,39	1782,05	1361,61	1892,14	1658,95	1911,54	1615,36	1831,83	1659,56	1911,54	1399,42
GenR	1060,52	1143,89	1111,24	1031,59	1650,95	1328,41	1218,15	1577,15	1546,82	1788,83	1167,02	1639,32	1639,32	1917,55	1012,62	1917,55	1874,77	1917,55	1917,55	1073,93	1510,51	1460,63	1344,48	1494,57
GenS	1374,36	923,70	1382,03	1329,47	1034,37	924,73	1248,27	1630,94	952,47	1422,68	1923,07	1372,91	1372,91	1855,13	1507,34	1923,07	1768,10	1448,08	929,00	1638,23	1600,56	1923,07	1105,70	1585,93
GenT	1010,20	1130,43	1402,95	1278,02	980,95	1063,83	977,20	1528,67	1841,83	1520,13	1928,14	1775,58	1775,58	1800,44	1353,94	1894,60	1866,61	1815,13	1928,14	1787,38	1250,91	1753,73	1749,20	1406,70
GenU	2475,91	2968,45	1857,29	1857,29	2269,69	2347,22	2171,23	3117,06	4817,08	3459,03	3114,48	4811,15	4811,15	3265,81	4630,05	4710,10	4024,04	2484,83	3568,64	2852,63	3893,21	4499,47	1938,25	3606,72
GenV	2679,37	1891,48	2005,88	1963,99	2485,71	1874,23	2054,44	2488,48	4791,02	4911,25	4896,73	2783,32	2783,32	2602,97	4907,02	4911,25	3383,06	4250,14	2734,20	3548,71	4152,86	4662,12	2539,91	1864,75
GenW	2596,45	1872,32	3175,89	1872,32	2002,30	2518,67	2528,09	4932,64	3688,71	4626,20	3023,47	3759,10	3759,10	3152,02	4784,47	4932,64	3597,91	2342,96	4456,06	3728,68	3950,10	2742,03	3527,63	1981,94
GenX	1990,08	3128,92	1727,67	2073,79	2127,00	3320,08	4166,04	3389,98	3239,62	2896,81	4166,04	4166,04	4166,04	4165,66	3218,05	2616,49	4051,84	4166,04	3007,78	3385,03	4046,48	3614,49	3592,52	1767,89
GenY	2888,98	2587,56	2485,28	2960,95	2045,69	2921,61	3066,24	3564,27	2995,37	3523,05	3040,47	3207,92	3207,92	2962,87	3141,74	2338,95	3248,50	2975,65	3427,48	3617,24	3515,77	2959,11	2985,65	2790,43
GenZ	2168,27	2134,97	2587,99	1947,45	2977,15	2376,39	1763,68	3549,11	3625,15	3476,12	3205,26	3625,15	3625,15	3625,15	3625,15	3376,79	2628,63	3625,15	3625,15	3625,15	3400,77	3344,37	2603,00	2449,62
Total Biaya	27021,38	27475,09	26845,54	26963,90	27757,97	28370,26	31374,78	37243,11	40772,05	41404,89	42314,43	40093,55	40093,55	38444,86	42648,65	44164,40	39768,51	38993,98	38416,05	39209,67	40660,14	39016,59	34102,48	28558,70