

Optimisasi untuk Teknik Elektro (TKE-41XX)

Pertemuan 13: Economic Dispatch Sistem Tenaga Listrik Berbasis Particle Swarm Optimization (PSO)

Ir. Novalio Daratha S.T., M.Sc., Ph.D.

Program Studi S1 Teknik Elektro
Fakultas Teknik - Universitas Bengkulu

Semester Ganjil 2026

Agenda Pembelajaran Minggu ke-13

Tujuan Pembelajaran (CPMK-3 & CPMK-5)

Mahasiswa mampu memformulasikan masalah *Economic Dispatch* (ED) dalam sistem tenaga listrik dan menyelesaikannya menggunakan algoritma metaheuristik Particle Swarm Optimization (PSO).

- ➊ **Pengantar Economic Dispatch (ED):** Tujuan, variabel keputusan, dan karakteristik biaya pembangkitan thermal.
- ➋ **Formulasi Matematis ED:** Fungsi biaya kuadratik, efek *valve-point loading*, kendala daya (P_D, P_L), dan batas generator.
- ➌ **Pemetaan ED ke Algoritma PSO:** Vektor partikel, fungsi **fitness**, dan mekanisme perbaikan kendala (**penalty** dan **repair**).
- ➍ **Studi Kasus Sistem 3-Generator:** Perhitungan manual vs simulasi komputasi.
- ➎ **Implementasi Kode Python:** Pemrograman PSO untuk ED dan analisis profil konvergensi.

Apa itu Economic Dispatch?

Definisi

Economic Dispatch (ED) adalah proses pengalokasian daya aktif ($P_{G,i}$) secara optimal di antara unit-unit pembangkit termal yang beroperasi untuk memenuhi total kebutuhan beban (P_D) dan rugi-rugi daya jaringan (P_L) dengan **biaya bahan bakar minimum**.

Mengapa Memerlukan Metaheuristik?

- Karakteristik katup uap (*valve-point loading*) menyebabkan fungsi biaya bersifat non-konveks dan rippel tinggi.
- Metode klasik (Pengali Lagrange, Lambda-Iteration) mudah terjebak di optimum lokal!

Komponen Utama ED

- **Input:** Karakteristik unit, kurva biaya, beban sistem P_D .
- **Output:** Output daya optimal $[P_1, P_2, \dots, P_N]$.
- **Kriteria:** Total biaya F_T terendah (\$/jam).

Formulasi Matematis Economic Dispatch

1. Fungsi Tujuan: Minimisasi Biaya Total Pembangkitan

$$\min_{P_{G,i}} F_T = \sum_{i=1}^{N_g} F_i(P_{G,i})$$

Di mana $F_i(P_{G,i})$ adalah fungsi biaya pembangkit unit ke- i .

Fungsi Biaya Kuadratik Standar

$$F_i(P_{G,i}) = a_i P_{G,i}^2 + b_i P_{G,i} + c_i$$

Di mana a_i, b_i, c_i adalah koefisien biaya bahan bakar unit ke- i .

Fungsi Biaya dengan Valve-Point Effect

$$F_i(P_{G,i}) = a_i P_{G,i}^2 + b_i P_{G,i} + c_i + |e_i \sin(f_i(P_{i,\min} - P_{G,i}))|$$

Di mana e_i, f_i adalah koefisien efek *valve-point loading*.

Kendala-Kendala Operasional ED

1. Kendala Keseimbangan Daya (Equality Constraint)

Total daya yang dibangkitkan harus persis sama dengan total beban ditambah rugi-rugi transmisi:

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{G,i} = P_D + P_L$$

Rugi-rugi transmisi P_L disederhanakan dengan Formula Kron's Loss (B -coefficients):

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} P_{G,i} B_{ij} P_{G,j} + \sum_{i=1}^{N_g} B_{0i} P_{G,i} + B_{00}$$

2. Kendala Batas Kapasitas Pembangkit (Inequality Constraints)

Daya masing-masing generator dibatasi oleh kapasitas fisik minimum dan maksimum:

$$P_{i,\min} \leq P_{G,i} \leq P_{i,\max}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_g$$

Pemetaan Masalah ED ke Swarm / Partikel PSO

Elemen PSO	Interpretasi Matematis	Fungsi pada Masalah ED
Partikel $\mathbf{x}_k$	Vektor variabel keputusan $\mathbf{x}_k = [P_{1,k}, P_{2,k}, \dots, P_{N_g,k}]$	Alokasi output daya N_g generator pada partikel ke- k
Kecepatan $\mathbf{v}_k$	Vektor perubahan $\mathbf{v}_k = [v_{1,k}, v_{2,k}, \dots, v_{N_g,k}]$	Perubahan daya aktif tiap iterasi
Fungsi Fitness	$f(\mathbf{x}_k) = F_T(\mathbf{x}_k) + \lambda_{\text{pen}} \sum P_{G,i} - (P_D + P_L) ^2$	Evaluasi total biaya + penalti kesalahan daya
Search Space	Box Constraints $[P_{i,\min}, P_{i,\max}]$	Batas teknis operasi generator

Updating Rule

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (pbest_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (gbest_d^t - x_{id}^t)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1}$$

Strategi Handling Kendala Daya dan Batas Generator

1. Clamping Batas Daya

Jika partikel keluar batas operasi:

$$P_{G,i} = \begin{cases} P_{i,\min}, & \text{jika } P_{G,i} < P_{i,\min} \\ P_{i,\max}, & \text{jika } P_{G,i} > P_{i,\max} \end{cases}$$

2. Repair Mechanism (Slack Generator)

Atur generator terakhir N_g untuk menutupi selisih daya:

$$P_{G,N_g} = P_D + P_L - \sum_{i=1}^{N_g-1} P_{G,i}$$

Lalu terapkan clamping pada P_{G,N_g} .

Studi Kasus: Sistem 3 Pembangkit Termal

Data Spesifikasi Pembangkit ($P_D = 850$ MW)

Unit	a_i (\$/MW ² h)	b_i (\$/MWh)	c_i (\$/h)	$P_{i,\min}$ (MW)	$P_{i,\max}$ (MW)
Pembangkit 1	0.00156	7.92	561	100	600
Pembangkit 2	0.00194	7.85	310	100	400
Pembangkit 3	0.00482	7.97	78	50	200

Pertanyaan Optimisasi

- Berapa alokasi daya [P_1, P_2, P_3] yang meminimalkan total biaya F_T ?
- Berapa total biaya bahan bakar (\$/jam) yang dihasilkan oleh PSO?

Implementasi Python: PSO untuk Economic Dispatch

```
1 import numpy as np
2
3 # Data Pembangkit: [a, b, c, Pmin, Pmax]
4 gen_data = np.array([
5     [0.00156, 7.92, 561, 100, 600],
6     [0.00194, 7.85, 310, 100, 400],
7     [0.00482, 7.97, 78, 50, 200]
8 ])
9 P_D = 850.0 # Beban total (MW)
10
11 def fitness(x):
12     P = np.clip(x, gen_data[:, 3], gen_data[:, 4])
13     # Repair generator terakhir
14     P[-1] = P_D - np.sum(P[:-1])
15     if P[-1] < gen_data[-1, 3] or P[-1] > gen_data[-1, 4]:
16         penalty = 1e5 * (abs(P[-1] - np.clip(P[-1], gen_data[-1, 3], gen_data[-1, 4]))**2)
17     else:
18         penalty = 0
19     cost = np.sum(gen_data[:, 0] * P**2 + gen_data[:, 1] * P + gen_data[:, 2])
20     return cost + penalty, P
```

Hasil Solusi PSO

- $P_{G,1}^* = 393.17$ MW
- $P_{G,2}^* = 334.63$ MW
- $P_{G,3}^* = 122.20$ MW
- $\sum P_{G,i} = 850.00$ MW
- **Total Biaya Minimum: \$8.194,35 / jam**

Keunggulan PSO dalam ED

- Konvergensi cepat (< 50 iterasi).
- Robust terhadap inisialisasi acak.
- Sangat mudah diperluas untuk memperhitungkan *valve-point effect* dan rugi-rugi jaringan.

Poin Kunci

- 1 *Economic Dispatch* adalah masalah optimisasi terkendala non-linier inti dalam pengoperasian sistem tenaga listrik.
- 2 Metaheuristik PSO mampu menyelesaikan ED baik dalam bentuk sederhana (kuadratik) maupun bentuk kompleks (valve-point loading dan loss).
- 3 Penggunaan **repair function** dan **penalty function** sangat penting untuk menjamin kendala keseimbangan daya dan batas kapasitas generator terpenuhi.

Ada Pertanyaan / Diskusi?

Tugas Rumah (Problem Set 13) dan Lembar Kerja Mahasiswa (LKM 13) tersedia pada portal perkuliahan.