

Lembar Kerja

Dasar-Dasar Sistem Tenaga Listrik

Minggu 6: Pembangkitan Tenaga Listrik

Program Studi Teknik Elektro
Universitas Bengkulu

9 Agustus 2026

Petunjuk Pengerjaan:

- Kerjakan semua soal dengan sistematis
- Tunjukkan langkah-langkah perhitungan dengan jelas
- Gunakan GNU Octave untuk soal komputasi
- Diskusikan hasil dengan kelompok
- **Waktu pengerjaan: 2 x 50 menit (sesi kelas)**

1 Bagian A: Konsep Dasar Generator Sinkron (20 poin)

1.1 Soal A.1 - Prinsip Kerja Generator (8 poin)

- Jelaskan secara singkat prinsip kerja generator sinkron berdasarkan hukum induksi Faraday
- Sebutkan dan jelaskan fungsi dari komponen utama generator sinkron (rotor dan stator)
- Apa perbedaan antara generator sinkron dengan motor sinkron dari sisi konversi energi?
- Mengapa generator di pembangkit listrik umumnya menggunakan tipe sinkron, bukan asinkron (induksi)?

1.2 Soal A.2 - Sinkronisasi Generator (12 poin)

Sebuah generator sinkron akan dihubungkan secara paralel dengan grid (sistem jaringan).

- a) Sebutkan dan jelaskan 4 syarat utama yang harus dipenuhi sebelum generator dapat disinkronkan ke grid
- b) Apa yang akan terjadi jika generator disinkronkan dengan:
 - i. Tegangan generator lebih rendah dari tegangan grid?
 - ii. Frekuensi generator 49.5 Hz sementara grid 50 Hz?
 - iii. Urutan fasa berbeda (a-b-c vs a-c-b)?
 - iv. Sudut fasa berbeda 30° ?
- c) Jelaskan fungsi *synchroscope* dalam proses sinkronisasi manual
- d) Pada era modern, proses sinkronisasi dilakukan secara otomatis. Sebutkan minimal 2 keuntungan sinkronisasi otomatis dibanding manual

2 Bagian B: Jenis-Jenis Pembangkit Listrik (30 poin)

2.1 Soal B.1 - Analisis PLTU (10 poin)

Sebuah PLTU beroperasi dengan siklus Rankine dengan data sebagai berikut:

Data Operasi:

- Laju aliran uap: $\dot{m} = 150 \text{ kg/s}$
- Entalpi uap masuk turbin: $h_1 = 3400 \text{ kJ/kg}$
- Entalpi uap keluar turbin: $h_2 = 2200 \text{ kJ/kg}$
- Entalpi air keluar kondenser: $h_3 = 200 \text{ kJ/kg}$
- Entalpi air masuk boiler: $h_4 = 210 \text{ kJ/kg}$
- Efisiensi generator: $\eta_g = 98\%$

a) Hitung daya mekanik yang dihasilkan turbin (dalam MW):

$$P_{turbin} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

b) Hitung daya listrik yang dihasilkan generator (dalam MW)

c) Hitung energi yang diserap boiler per detik (dalam MW):

$$Q_{in} = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

d) Hitung efisiensi termal siklus Rankine:

$$\eta_{thermal} = \frac{P_{turbin}}{Q_{in}} \times 100\%$$

e) Hitung energi yang dibuang ke kondenser (dalam MW)

f) Jika PLTU beroperasi 24 jam penuh, berapa total energi listrik yang dihasilkan (dalam MWh)?

Jenis Pembangkit	Sumber Energi	Efisiensi (%)	Start-up Time	Peran Operasi	Emisi CO ₂
PLTU		35-45			Tinggi
PLTG	Gas Alam		10-30 menit		
PLTGU		55-60			
PLTA			Cepat (menit)	Load Follower	
PLTP	Panas Bumi				
PLTD		30-40		Peaker	
PLTMH	Air (sungai)			Lokal	Nol

2.2 Soal B.2 - Perbandingan Teknologi Pembangkit (10 poin)

Lengkapi tabel perbandingan berikut untuk berbagai jenis pembangkit listrik:

Berdasarkan tabel di atas, jawab pertanyaan berikut:

- Jelaskan mengapa PLTGU memiliki efisiensi tertinggi dibanding pembangkit lainnya
- Mengapa PLTA sangat cocok sebagai *load follower*? Sebutkan minimal 2 alasan
- Bandingkan PLTG dengan PLTD dari segi: waktu start-up, efisiensi, dan biaya bahan bakar

2.3 Soal B.3 - Kasus PLTA (10 poin)

Sebuah PLTA memiliki data sebagai berikut:

Data Sistem:

- Tinggi jatuh air (head): $H = 120$ m
- Debit air: $Q = 25$ m³/s
- Efisiensi turbin: $\eta_t = 90\%$
- Efisiensi generator: $\eta_g = 95\%$
- Massa jenis air: $\rho = 1000$ kg/m³
- Percepatan gravitasi: $g = 9.81$ m/s²

a) Hitung daya hidraulik teoritis (dalam MW):

$$P_{hidraulik} = \rho g Q H \times 10^{-6} \text{ MW}$$

b) Hitung daya mekanik yang dihasilkan turbin (dalam MW)

c) Hitung daya listrik yang dihasilkan generator (dalam MW)

d) Hitung efisiensi total PLTA:

$$\eta_{total} = \eta_t \times \eta_g$$

e) Jika debit air berkurang 40% akibat musim kemarau, berapa persen penurunan daya output?

f) Jelaskan mengapa PLTA sangat bergantung pada musim/curah hujan. Apa dampaknya terhadap operasi sistem tenaga listrik?

3 Bagian C: Kontrol Operasi Pembangkit (25 poin)

3.1 Soal C.1 - Kontrol Frekuensi (15 poin)

Teori Dasar:

Frekuensi sistem tenaga listrik bergantung pada keseimbangan daya:

$$\sum P_{gen} = \sum P_{load} + P_{loss}$$

Jika terjadi ketidakseimbangan, frekuensi akan berubah dan *governor* akan merespons.

Kasus:

Sebuah sistem tenaga sederhana memiliki:

- Frekuensi nominal: $f_0 = 50$ Hz
- Total beban: $P_{load} = 1000$ MW
- Droop setting governor: $R = 4\%$ (droop)

Droop adalah perubahan frekuensi yang diperlukan untuk perubahan daya 100%:

$$R = \frac{\Delta f / f_0}{\Delta P / P_{rated}} \times 100\%$$

atau dapat ditulis:

$$\Delta P = -\frac{P_{rated}}{R} \times \frac{\Delta f}{f_0}$$

- a) Jelaskan apa yang dimaksud dengan *governor droop control*. Mengapa droop diperlukan dalam operasi paralel generator?
- b) Tiba-tiba beban bertambah 50 MW (dari 1000 MW menjadi 1050 MW). Asumsikan generator memiliki kapasitas terpasang $P_{rated} = 1200$ MW.

Hitung:

- i. Penurunan frekuensi awal sebelum governor merespons (gunakan konsep inerti; untuk soal ini asumsikan penurunan sementara adalah 0.2 Hz)
- ii. Respon daya dari governor untuk droop 4%
- iii. Frekuensi steady-state baru setelah governor merespons

Gunakan relasi:

$$\Delta P = -\frac{P_{rated}}{R/100} \times \frac{\Delta f}{f_0}$$

- c) Jelaskan perbedaan antara *primary control* (governor) dan *secondary control* (AGC - Automatic Generation Control)
- d) Mengapa frekuensi harus dijaga konstan di 50 Hz (atau 60 Hz)? Sebutkan minimal 3 dampak jika frekuensi menyimpang terlalu jauh

3.2 Soal C.2 - Kontrol Tegangan (10 poin)

- a) Jelaskan fungsi *Automatic Voltage Regulator* (AVR) pada generator sinkron. Bagaimana cara kerjanya?
- b) Apa perbedaan mendasar antara kontrol frekuensi dan kontrol tegangan dalam sistem tenaga? Lengkapi tabel berikut:

Aspek	Kontrol Frekuensi	Kontrol Tegangan
Besaran yang dikontrol		
Alat kontrol utama		
Input yang diatur		
Keterkaitan daya		
Waktu respon		

- c) Sebutkan minimal 3 peralatan pendukung kontrol tegangan selain AVR generator
- d) Jelaskan mengapa tegangan sistem lebih bersifat *lokal* (pengaruh lokal) sedangkan frekuensi bersifat *global* (sama di seluruh sistem interkoneksi)

4 Bagian D: Studi Kasus Bengkulu dan Komputasi (25 poin)

4.1 Soal D.1 - Analisis Sistem Kelistrikan Bengkulu (10 poin)

Berdasarkan data estimasi sistem kelistrikan Bengkulu:

- Beban puncak: 250 MW
- Komposisi pembangkit:
 - PLTU: 200 MW (52%)
 - PLTP: 110 MW (24%)
 - PLTA: 46 MW (19%)
 - PLTD: 20 MW (3%)
 - Lainnya: 8 MW (2%)
- Pertumbuhan beban: 6% per tahun

a) Hitung total kapasitas terpasang pembangkit di Bengkulu

b) Hitung *reserve margin*:

$$\text{Reserve Margin} = \frac{\text{Kapasitas Total} - \text{Beban Puncak}}{\text{Beban Puncak}} \times 100\%$$

c) Apakah reserve margin tersebut memadai? (Standar PLN: minimal 30%)

d) Proyeksikan beban puncak untuk 5 tahun mendatang dengan pertumbuhan 6%/tahun:

$$P_n = P_0(1 + r)^n$$

e) Berapa tambahan kapasitas yang diperlukan dalam 5 tahun untuk mempertahankan reserve margin 30%?

f) Dari berbagai jenis pembangkit yang ada di Bengkulu, jenis mana yang paling cocok untuk menambah kapasitas? Berikan minimal 3 alasan

g) Diskusikan tantangan utama pengembangan PLTP di Bengkulu (Hululais, Rejang Lebong). Sebutkan minimal 3 tantangan

4.2 Soal D.2 - Komputasi dengan GNU Octave: Unit Commitment (15 poin)

Permasalahan:

Sistem kelistrikan sederhana memiliki 3 unit pembangkit dengan karakteristik biaya sebagai berikut:

Data Pembangkit:

Unit	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	a (Rp/MW ² h)	b (Rp/MWh)
1 (PLTU)	100	400	200	15000
2 (PLTA)	50	200	150	12000
3 (PLTG)	30	150	400	20000

Fungsi biaya operasi setiap unit:

$$C_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i$$

Profil Beban (24 jam):

- Jam 00:00-06:00: 300 MW
- Jam 06:00-12:00: 450 MW
- Jam 12:00-18:00: 550 MW
- Jam 18:00-24:00: 400 MW

Tugas:

- a) Tulis kode GNU Octave untuk menyelesaikan *economic dispatch* pada jam 12:00-18:00 (beban 550 MW) dengan kendala:

- $\sum P_i = P_{demand}$
- $P_{min,i} \leq P_i \leq P_{max,i}$
- Optimal: $\frac{\partial C_1}{\partial P_1} = \frac{\partial C_2}{\partial P_2} = \frac{\partial C_3}{\partial P_3} = \lambda$ (lambda = biaya marginal)

Petunjuk: Gunakan metode iteratif atau fungsi `fmincon` di Octave

- b) Hitung alokasi daya optimal untuk setiap unit (P_1, P_2, P_3)
- c) Hitung total biaya operasi per jam pada kondisi optimal
- d) Buat plot grafik:
- Kurva biaya operasi $C_i(P_i)$ untuk setiap unit
 - Kurva biaya marginal $\frac{dC_i}{dP_i}$ untuk setiap unit
- e) Bandingkan dengan strategi *equal sharing* (setiap unit dibagi rata sesuai kapasitas). Hitung selisih biaya operasi
- f) **Bonus (5 poin):** Buat simulasi unit commitment untuk 24 jam penuh. Tentukan unit mana yang harus *on/off* di setiap periode beban. Visualisasikan dengan bar chart

Template Kode Octave:

```

% =====
% Economic Dispatch - 3 Unit Pembangkit
% =====

clear; clc; close all;

% --- Data Pembangkit ---
% Unit 1: PLTU
a1 = 200; b1 = 15000;
Pmin1 = 100; Pmax1 = 400;

% Unit 2: PLTA
a2 = 150; b2 = 12000;
Pmin2 = 50; Pmax2 = 200;

% Unit 3: PLTG
a3 = 400; b3 = 20000;
Pmin3 = 30; Pmax3 = 150;

% --- Demand ---
Pd = 550; % MW (jam 12:00-18:00)

% --- Fungsi Biaya ---
C1 = @(P) a1*P^2 + b1*P;
C2 = @(P) a2*P^2 + b2*P;
C3 = @(P) a3*P^2 + b3*P;

% --- Fungsi Biaya Marginal (dC/dP) ---
dC1 = @(P) 2*a1*P + b1;
dC2 = @(P) 2*a2*P + b2;
dC3 = @(P) 2*a3*P + b3;

% --- Economic Dispatch dengan Lambda Iteration ---
% [LENGKAPI KODE DI SINI]

% Inisialisasi lambda
lambda = 15000; % Initial guess
tol = 0.01;
max_iter = 100;

% [LENGKAPI ITERASI UNTUK MENEMUKAN LAMBDA OPTIMAL]

% --- Hasil ---
fprintf('=== ECONOMIC DISPATCH RESULT ===\n');
fprintf('Demand: %.2f MW\n', Pd);
% [LENGKAPI OUTPUT]

% --- Plotting ---
figure;
% [LENGKAPI KODE PLOTTING]

```

5 Rubrik Penilaian

Bagian	Poin	Kriteria
A. Generator Sinkron	20	Pemahaman prinsip kerja, sinkronisasi
B. Jenis Pembangkit	30	Perhitungan PLTU, PLTA, analisis perbandingan
C. Kontrol Operasi	25	Kontrol frekuensi, kontrol tegangan
D. Studi Kasus & Komputasi	25	Analisis Bengkulu, economic dispatch
Total	100	
Bonus	5	Unit commitment 24 jam

Catatan Penting

- Kerjakan secara berkelompok (maksimal 3 orang)
- Diskusi antar kelompok diperbolehkan, tetapi kode dan laporan harus unik
- Kumpulkan dalam bentuk:
 - Lembar jawaban tertulis untuk Bagian A, B, C
 - File .m (kode Octave) dan laporan PDF untuk Bagian D
- Deadline: 1 minggu setelah sesi kelas
- Presentasi hasil akan dilakukan minggu depan (5 menit per kelompok)

— SELAMAT MENGERJAKAN —

"Diversifikasi energi adalah kunci keberlanjutan sistem tenaga listrik modern."