

Pembangkitan Tenaga Listrik

Diversifikasi Sumber Energi: Prinsip, Jenis Pembangkit, dan Kontrol

Program Studi Teknik Elektro

Universitas Bengkulu

Minggu 6 - 9 Agustus 2026

Agenda Pembahasan

- 1 Prinsip Dasar Pembangkitan Listrik
- 2 Jenis-Jenis Pembangkit Listrik
- 3 Kontrol Operasi Pembangkit
- 4 Studi Kasus dan Tantangan
- 5 Kesimpulan

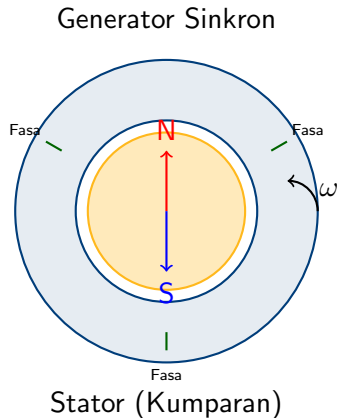
Generator Sinkron: Jantung Pembangkit

Prinsip Kerja Dasar:

- Mengubah energi mekanik menjadi energi listrik AC
- Berdasarkan hukum induksi Faraday
- Komponen utama: rotor (medan magnet) dan stator (kumparan jangkar)

Proses Konversi:

- 1 Energi mekanik menggerakkan rotor
- 2 Medan magnet berputar
- 3 Memotong kumparan stator
- 4 Timbul GGL 3-fasa



Sinkronisasi Generator ke Grid

Mengapa Sinkronisasi Penting?

Generator harus beroperasi paralel dengan sistem tenaga (grid) dengan kondisi operasi yang sangat spesifik untuk mencegah kerusakan dan gangguan sistem.

Syarat-syarat Utama Sinkronisasi:

- 1 **Tegangan Sama:** $|V_{\text{gen}}| = |V_{\text{grid}}|$
- 2 **Frekuensi Sama:** $f_{\text{gen}} = f_{\text{grid}}$ (50 Hz)
- 3 **Urutan Fasa Sama:** Sekuens positif (a-b-c)
- 4 **Sudut Fasa Sama:** $\delta \approx 0$ (mendekati nol)

Peralatan Sinkronisasi

- *Synchroscope* (manual)
- Relay sinkronisasi otomatis
- Modern: Sistem kontrol berbasis PLC/SCADA

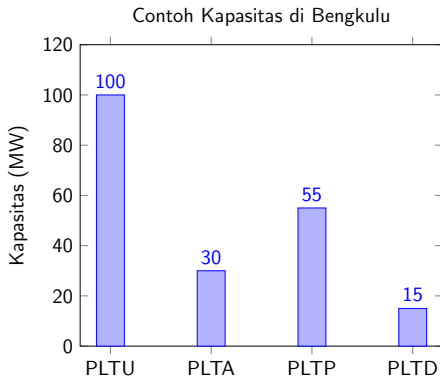
Klasifikasi Pembangkit Listrik

Berdasarkan Sumber Energi:

- **Fosil:** PLTU, PLTG, PLTD
- **Terbarukan:** PLTA, PLTP, PLTMH, PLTBg, PLTS, PLTB

Berdasarkan Fungsi Operasi:

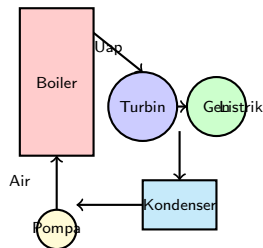
- *Base Load:* PLTU, PLTP, PLTA besar
- *Load Follower:* PLTA, PLTGU
- *Peaker:* PLTG, PLTD



1. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Prinsip Kerja (Siklus Rankine):

- ➊ Bahan bakar dibakar di boiler
- ➋ Air dipanaskan menjadi uap bertekanan tinggi
- ➌ Uap menggerakkan turbin
- ➍ Turbin memutar generator
- ➎ Uap dikondensasi dan dipompa kembali



Contoh:

Karakteristik:

- Kapasitas: 50 - 1000+ MW
 - Efisiensi: 35-45%
 - Base load plant
- PLTU Teluk Sepang (2×100 MW)
 - PLTU Tenayan (2×110 MW)

2. Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

Prinsip Kerja (Siklus Brayton):

- Gas alam dibakar di combustion chamber
- Gas panas ekspansi memutar turbin gas
- Turbin terhubung langsung ke generator

Keunggulan:

- Start-up sangat cepat (10-30 menit)
- Cocok untuk peaker plant
- Fleksibel dalam operasi
- Emisi lebih rendah dari PLTU batubara

Kelemahan:

- Efisiensi rendah (30-35%)
- Biaya bahan bakar tinggi
- Performa turun di suhu tinggi

PLTGU (Combined Cycle)

Menggabungkan PLTG dengan PLTU (memanfaatkan panas buang) untuk efisiensi hingga 55-60%. Contoh: PLTGU Pesanggaran (Bali), PLTGU

3. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Prinsip Kerja:

- Energi potensial gravitasi air
- Head (tinggi jatuh) dan debit air
- Daya: $P = \eta \rho g Q H$

Jenis Turbin Air:

- **Pelton:** Head tinggi (≥ 150 m)
- **Francis:** Head sedang (40-400 m)
- **Kaplan:** Head rendah (≤ 40 m)

Contoh di Bengkulu:

- PLTA Musi (18.2 MW)
- PLTA Ketahun (28 MW)

Keunggulan:

- Energi terbarukan
- Emisi nol
- Respon cepat
- Umur panjang (50-100 tahun)
- Efisiensi tinggi (85-90%)

Kelemahan:

- Tergantung musim/curah hujan
- Dampak lingkungan (bendungan)
- Biaya investasi awal tinggi
- Relokasi penduduk

4. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

Prinsip Kerja: Memanfaatkan energi panas dari reservoir geotermal di dalam bumi.

Tiga Teknologi Utama:

- 1 **Dry Steam:** Uap kering langsung memutar turbin ($T > 235^{\circ}\text{C}$)
- 2 **Flash Steam:** Air panas diekspansi menjadi uap ($T > 180^{\circ}\text{C}$) – *paling umum*
- 3 **Binary Cycle:** Fluida sekunder dipanaskan, menguap, memutar turbin ($T < 180^{\circ}\text{C}$)

Keunggulan:

- Energi terbarukan
- Base load (24/7)
- Emisi sangat rendah
- Footprint kecil

Contoh di Bengkulu:

- PLTP Hululais (2×55 MW, Lebong)
- Potensi: Rejang Lebong, Bengkulu Utara

5. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Definisi: Pembangkit skala kecil (<1 MW) memanfaatkan aliran sungai/irigasi.

Komponen Utama:

- Bendung/intake
- Saluran pembawa (headrace)
- Bak penenang
- Pipa pesat (penstock)
- Turbin (crossflow, Pelton, Turgo)
- Generator (sinkron/induksi)
- Sistem kontrol

Keunggulan:

- Elektrifikasi daerah terpencil
- Biaya O&M rendah
- Ramah lingkungan
- Pemberdayaan masyarakat

Aplikasi di Bengkulu:

- Banyak desa di Kepahiang
- Rejang Lebong
- Bengkulu Utara
- Kapasitas: 5-500 kW

6. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

Prinsip Kerja: Mesin diesel pembakaran dalam menggerakkan generator secara langsung.

Keunggulan:

- Start-up sangat cepat (2-5 menit)
- Fleksibel lokasi
- Dapat mobile/portable
- Instalasi cepat
- Handal untuk backup

Aplikasi:

- Peaker plant
- Emergency backup
- Sistem terisolasi
- Pulau-pulau kecil

Kelemahan:

- Biaya bahan bakar sangat tinggi
- Emisi tinggi (CO_2 , NO_x , PM)
- Efisiensi rendah (30-40%)
- Biaya O&M tinggi
- Noise tinggi

Contoh di Bengkulu:

- PLTD Pulau Enggano (4.8 MW)
- PLTD cadangan di berbagai gardu induk

7. Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm/PLTBg)

Sumber Bahan Bakar:

- **Biomassa padat:** Limbah sawit, sekam padi, kayu, sampah organik
- **Biogas:** Hasil fermentasi anaerobik (limbah ternak, sampah organik, POME)

Teknologi:

- ① **Direct Combustion:** Pembakaran langsung untuk steam turbine
- ② **Gasifikasi:** Konversi menjadi syngas untuk gas engine/turbine
- ③ **Anaerobic Digestion:** Produksi biogas untuk gas engine

Keunggulan:

- Mengurangi limbah
- Carbon neutral
- Meningkatkan nilai ekonomi limbah
- Base/mid load

Contoh di Bengkulu:

- PLTBg Agromuko (Mukomuko)
– limbah sawit
- Potensi besar: perkebunan sawit luas

Hubungan Fundamental:

$$f = \frac{P \cdot n_p}{120} \quad (\text{untuk generator 60 Hz})$$

$$f = \frac{P \cdot n_p}{60} \quad (\text{untuk generator 50 Hz})$$

di mana P = jumlah kutub, n_p = kecepatan rotor (rpm)

Prinsip Kontrol:

- **Governor** mengatur input energi primer ke turbin
- Menjaga keseimbangan: $\sum P_{\text{gen}} = \sum P_{\text{load}} + \text{losses}$

Mekanisme Respon

- Beban $\uparrow \rightarrow f \downarrow \rightarrow$ Governor buka valve $\rightarrow P_{\text{mech}} \uparrow \rightarrow f$ kembali naik
- Beban $\downarrow \rightarrow f \uparrow \rightarrow$ Governor tutup valve $\rightarrow P_{\text{mech}} \downarrow \rightarrow f$ kembali turun

① Primary Control (Governor Response):

- Respon otomatis lokal
- Waktu: detik
- Droop control: 3-5%

② Secondary Control (AGC - Automatic Generation Control):

- Mengembalikan frekuensi ke nominal (50.00 Hz)
- Waktu: menit
- Terpusat di Load Dispatch Center

③ Tertiary Control (Economic Dispatch):

- Optimasi ekonomi jangka panjang
- Waktu: jam
- Unit commitment, maintenance scheduling

Hubungan: Tegangan sistem dipengaruhi oleh keseimbangan daya reaktif.

Automatic Voltage Regulator (AVR):

- Mengatur arus eksitasi (DC) ke rotor generator
- Waktu respon: milidetik hingga detik

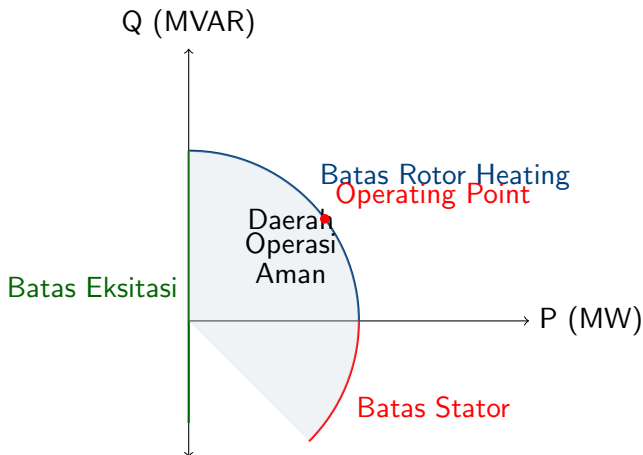
Mekanisme:

- V turun $\rightarrow$ AVR naikkan $I_f \rightarrow V$ naik
- V naik $\rightarrow$ AVR turunkan $I_f \rightarrow V$ turun

Peralatan Pendukung:

- Kapasitor bank
- Reactor
- SVC/STATCOM
- OLTC transformer

Interaksi P-Q dalam Sistem Tenaga



Catatan: Daya aktif (P) dikontrol oleh governor, daya reaktif (Q) dikontrol oleh AVR, tetapi keduanya saling berinteraksi dalam sistem.

Ringkasan: Diversifikasi Energi di Bengkulu

Jenis	Kapasitas	Peran	Status
PLTU	200 MW	Base Load	Operasi
PLTA	46 MW	Mid/Base	Operasi
PLTP	110 MW	Base Load	Operasi
PLTMH	~5 MW	Lokal	Tersebar
PLTD	~20 MW	Backup	Operasi
PLTBg	~2 MW	Mid Load	Operasi
PLTS	Kecil	Distributed	Berkembang

Tantangan:

- Integrasi energi terbarukan intermiten (PLTS, PLTB)
- Stabilitas sistem dengan penetrasi RE tinggi
- Investasi infrastruktur transmisi
- Kebijakan energi dan subsidi

Peluang:

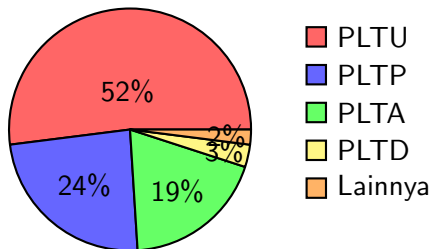
- Potensi geotermal besar (Rejang Lebong, Bengkulu Utara)
- Mikrohidro untuk elektrifikasi pedesaan
- Biomassa dari perkebunan sawit

Studi Kasus: Sistem Kelistrikan Bengkulu

Karakteristik Sistem:

- Bagian dari sistem Sumatera (interkoneksi)
- Beban puncak: ~ 250 MW (2024)
- Pertumbuhan beban: 5-7% per tahun

Komposisi Pembangkit (Estimasi):



Isu Utama:

- Ketergantungan pada PLTU batubara
- Variabilitas PLTA (musiman)

Tantangan Integrasi Energi Terbarukan

Tantangan Teknis:

① Intermittency:

- PLTS: tergantung radiasi matahari
- PLTB: tergantung kecepatan angin

② Variability:

- Fluktuasi output cepat
- Forecasting error

③ Inertia Rendah:

- Inverter-based resources
- Respon frekuensi lambat

④ Voltage Stability:

- Reactive power support
- Fault ride-through

Solusi:

• Energy Storage:

- Battery ESS
- Pumped hydro
- Flywheel

• Smart Grid:

- Advanced metering
- Demand response
- Forecasting tools

• Grid Codes:

- LVRT/HVRT requirements
- Frequency support
- Reactive capability

• Hybrid Systems:

- PLTS + ESS
- PLTA + PLTS

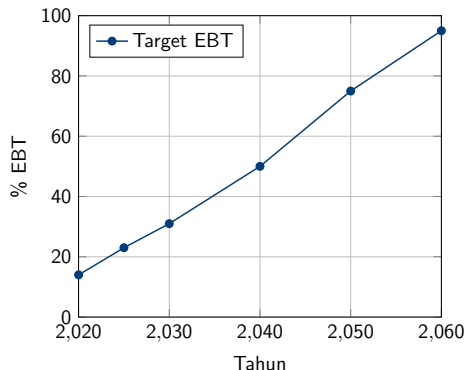
Tren Masa Depan: Transisi Energi

Target Nasional (2025-2060):

- 2025: 23% EBT dalam bauran energi
- 2030: 31% EBT
- 2060: Net Zero Emission

Teknologi Emerging:

- Virtual Power Plant (VPP)
- Vehicle-to-Grid (V2G)
- Green hydrogen
- Small Modular Reactor (SMR)
- Offshore wind



Peran Mahasiswa:

- Riset dan inovasi
- Desain sistem terintegrasi

Poin-Poin Utama

- ① Generator sinkron adalah jantung sistem pembangkit, bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik
- ② Diversifikasi sumber energi sangat penting untuk:
 - Ketahanan energi
 - Keberlanjutan lingkungan
 - Ekonomi yang optimal
- ③ Setiap jenis pembangkit memiliki karakteristik unik:
 - PLTU/PLTP: Base load
 - PLTA: Flexible
 - PLTG/PLTD: Peaking
- ④ Kontrol frekuensi dan tegangan adalah kunci operasi sistem yang stabil:
 - Governor: kontrol P dan f
 - AVR: kontrol Q dan V
- ⑤ Transisi ke energi terbarukan memerlukan:
 - Teknologi baru (ESS, smart grid)

Referensi dan Bacaan Lanjutan

Buku Teks:

- ❶ Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.
- ❷ Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1994). *Power System Analysis*. McGraw-Hill.
- ❸ Kothari, D. P., & Nagrath, I. J. (2011). *Modern Power System Analysis*. Tata McGraw-Hill.

Sumber Online:

- PLN: www.pln.co.id
- Kementerian ESDM: www.esdm.go.id
- IRENA (International Renewable Energy Agency)
- IEEE Power & Energy Society

Standar:

- Grid Code PLN 2019
- IEEE Std 1547 (Interconnection of Distributed Energy Resources)
- IEC 61400 (Wind Turbines)

Terima Kasih

Ada Pertanyaan?



Untuk Diskusi Mahasiswa:

- ➊ Mengapa PLTU masih dominan di Indonesia meskipun emisinya tinggi?
- ➋ Bagaimana cara mengintegrasikan PLTS yang intermiten ke grid tanpa mengganggu stabilitas?
- ➌ Apa perbedaan utama antara kontrol frekuensi dan kontrol tegangan?
- ➍ Mengapa PLTA cocok sebagai *load follower* sedangkan PLTU tidak?
- ➎ Bagaimana peran energy storage dalam sistem dengan penetrasi RE tinggi?
- ➏ Apa tantangan terbesar pengembangan PLTP di Indonesia?
- ➐ Jelaskan konsep *merit order dispatch* dalam sistem kelistrikan!