Teknik Tenaga Listrik

Minggu 7 (Bab 7): Mesin Arus Searah (Generator & Motor DC)

Konstruksi, Dinamika Elektromekanis, Kendali PWM H-Bridge, Pengereman 4-Kuadran, & BLDC

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

Program Studi S-1 Teknik Mesin (Semester 3 – Ganjil)
Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu

Tahun Akademik 2026



Peta Bahasan Perkuliahan Minggu 7 (CPMK 4 – Bobot 8%)

1. Fondasi Elektromagnetik & Konstruksi Detail
2. Topologi Rangkaian & Kurva Magnetisasi
3. Dinamika Motor DC & Pencocokan Beban Mekanik
4. Pengendalian Kecepatan PWM, H-Bridge, & Pengereman 4-Kuadran
5. Teknologi Motor DC Modern (PMDC & BLDC) serta Standar Industri



Capaian Pembelajaran Perkuliahan Minggu 7 (CPMK 4)

Setelah menyelesaikan perkuliahan Bab 7 ini, mahasiswa mampu:

1. **C1 (Mengingat):** Mengidentifikasi anatomi mesin DC (stator, jangkar, komutator, sikat karbon, *interpole*) serta parameter *nameplate* industri (IEC 60034 / NEMA).
2. **C2 (Memahami):** Menjelaskan Hukum Faraday-Lorentz, kurva saturasi magnetisasi, mekanisme umpan balik *back-EMF* (E_b), serta perbedaan motor Brushed DC, PMDC, dan BLDC.
3. **C3 (Menerapkan):** Menghitung GGL induksi (E_a), torsi bangkitan (T_{dev}), dinamika inersia poros, siklus kerja PWM (*duty cycle*), dan efisiensi sistem.
4. **C4 (Menganalisis):** Menganalisis pencocokan kurva torsi-kecepatan motor terhadap beban mekanik (*load matching*), efek saturasi magnetik, dan operasi pengereman 4-kuadran.
5. **C5 (Mengevaluasi):** Mengevaluasi bahaya *runaway* motor seri dan memilih tipe motor serta siklus kerja (*duty cycle* S1–S3) untuk aplikasi industri mekanik.
6. **C6 (Merancang):** Merancang tahanan starter/pengereman dan menyusun simulasi dinamika transien serta karakteristik motor dalam **GNU Octave**.



Mengapa Sarjana Teknik Mesin Wajib Menguasai Mesin DC?

Keunggulan Mekanikal Penggerak DC

- **Torsi Start Raksasa:** Tak tertandingi untuk beban berinersia tinggi (traksi lokomotif, *overhead crane*, *hoist* tambang).
- **Kendali Kecepatan & Posisi Presisi:** Pengaturan RPM mulus via PWM Chopper untuk CNC, robotika, dan aktuator mekatronika.
- **Pengereman Regeneratif Mudah:** Mengubah energi kinetik turunan beban kembali menjadi energi listrik.

Evolusi di Industri Modern

- **Era Klasik (85% fokus kuliah):** Motor DC Shunt, Seri, & Kompon pada pabrik baja (*rolling mill*) & alat berat.
- **Era Modern:** Evolusi menjadi **PMDC** (*Permanent Magnet DC*) dan **BLDC** (*Brushless DC*) pada kendaraan listrik (EV) dan otomasi tanpa keausan sikat.



Prinsip Reversibilitas Elektromekanis: Generator $\leftrightarrow$ Motor

1. Aksi Generator (Hukum Faraday)

Konduktor digerakkan oleh penggerak mula (*prime mover*: turbin/mesin diesel) memotong fluks Φ:

$$e = B \cdot l \cdot v \cdot \sin(\theta) \implies E_a = K_a \Phi \omega_m$$

- Konversi: **Energi Mekanik** $\rightarrow$ **Listrik**.
- Arah GGL: **Kaidah Tangan Kanan Fleming**.

2. Aksi Motor (Hukum Gaya Lorentz)

Konduktor berarus I_a berada di dalam medan magnet B mengalami gaya tangensial:

$$F = B \cdot I_a \cdot l \implies T_{dev} = K_a \Phi I_a$$

- Konversi: **Energi Listrik** $\rightarrow$ **Mekanik**.
- Arah Gaya: **Kaidah Tangan Kiri Fleming**.

Fakta Kunci Elektromekanis

Kedua fenomena (GGL induksi E_b dan Torsi T_{dev}) **selalu terjadi secara bersamaan** di dalam satu mesin yang sedang berputar!

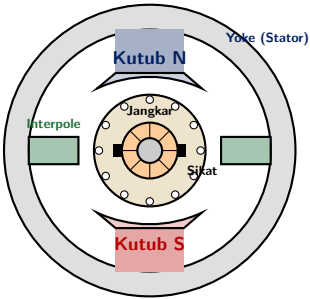
Anatomi Detail Penampang Melintang Mesin DC

A. Komponen Stator (Diam):

- **Rangka (Yoke):** Baja tuang pelindung mekanis & jalur balik fluks magnetik.
- **Inti & Sepatu Kutub (Pole Core & Shoe):** Menyebarkan fluks ke celah udara (*air gap*).
- **Kutub Bantu (Interpole):** Kutub kecil di zona netral untuk meredam bunga api komutasi.

B. Komponen Rotor (Berputar):

- **Inti Jangkar Berlaminasi:** Baja silikon 0.5 mm untuk menekan rugi arus pusar (*eddy current*).
- **Komutator & Sikat Karbon (Brushes):** Cincin segmen tembaga berisolasi mika & kontak grafit.



Konstruksi Belitan, Komutasi, & Reaksi Jangkar

Persamaan GGL & Konstanta Mesin

$$E_a = \frac{p \cdot Z}{60 \cdot a}\Phi n = K_a \Phi \omega_m, \quad K_a = \frac{pZ}{2\pi a}$$

- **Belitan Gelung (Lap):** $a = p$. Jalur paralel banyak $\rightarrow$ untuk **arus besar, tegangan rendah**.
- **Belitan Gelombang (Wave):** $a = 2$. Hanya 2 jalur paralel $\rightarrow$ untuk **tegangan tinggi, arus rendah**.

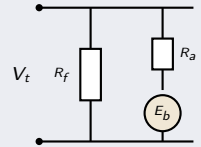
Reaksi Jangkar & Komutasi

- Medan magnet arus jangkar (I_a) mendistorsi dan melemahkan fluks utama (Φ) serta menggeser garis netral (MNA).
- **Akibat:** Timbul bunga api listrik (*sparking*) yang mengikis komutator.
- **Solusi:** Pemasangan **Kutub Bantu (Interpole)** seri dengan jangkar dan **Belitan Kompensasi** di sepatu kutub.



Skematik Rangkaian Ekivalen Mesin DC (Motor/Generator)

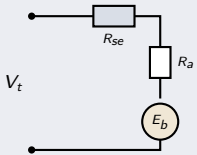
1. Eksitasi Shunt (Paralel)



$I_f = \frac{V_t}{R_f}$ (Fluks $\Phi \approx$ konstan)

$V_t = E_b + I_a R_a$

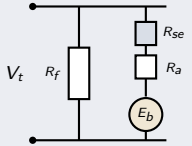
2. Eksitasi Seri



$I_L = I_{se} = I_a$ ($\Phi \propto I_a$)

$V_t = E_b + I_a(R_a + R_{se})$

3. Kompon (*Cumulative*)



$\Phi_{tot} = \Phi_{sh} \pm \Phi_{se}$

Memadukan sifat Shunt & Seri

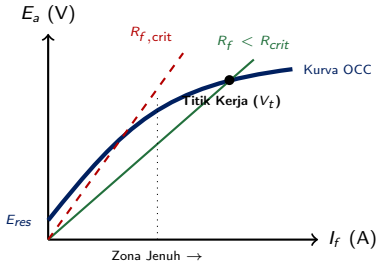
Kurva Magnetisasi (OCC), *Voltage Build-Up*, & Saturasi

Fenomena Kejenuhan Magnetik (*Saturation*)

- Pada arus medan rendah, fluks Φ naik linier terhadap arus eksitasi (I_f atau I_a).
- Di atas **titik lutut (knee point)**, inti besi silikon mengalami **jenuh magnetik**: kenaikan arus tidak lagi menambah fluks secara signifikan.

Syarat *Build-Up* Generator Shunt

1. Wajib ada **magnet sisa (residual)** $E_{res} \approx 2 - 5$ V.
2. Polaritas belitan medan memperkuat fluks sisa.
3. Tahanan medan lebih kecil dari tahanan kritis ($R_f < R_{f,\text{crit}}$).



Pemodelan Dinamis Kopel Elektromekanis & Transmisi Roda Gigi

Bagi insinyur mesin, motor DC selalu terkopel dengan inersia beban dan sistem transmisi:

Persamaan Diferensial Keadaan Transien

1. Dinamika Sirkit Jangkar (Elektrik):

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + K_a \Phi \omega_m(t) = v_t(t)$$

2. Dinamika Rotasi Poros (Mekanik - Hukum II Newton):

$$J_{eq} \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_{eq} \omega_m(t) = T_{dev}(t) - T_L^*(t)$$

- J_{eq}: Momen inersia ekivalen total ($\mathrm{kg \cdot m^2}$)
- B_{eq}: Koefisien redaman viskos bantalan ($\mathrm{N \cdot m \cdot s/rad}$)

Refleksi Beban Melalui *Gearbox*

Jika motor memutar beban melalui roda gigi dengan rasio reduksi $N = \frac{\omega_m}{\omega_L} = \frac{z_2}{z_1}$ dan efisiensi η_g:

$$T_L^* = \frac{T_L}{N \cdot \eta_g}, \qquad J_{eq} = J_m + \frac{J_L}{N^2}$$

Manfaat Mekanikal Gearbox:
Mereduksi inersia efektif beban sebesar faktor $1/N^2$ dan melipatgandakan torsi poros!

Mekanisme *Back-EMF* (E_b) & Mitigasi Arus Pengasutan

Regulasi Diri via $E_b = K_a \Phi \omega_m$

$$I_a = \frac{V_t - E_b}{R_a}$$

- Saat beban mekanik naik $\rightarrow \omega_m$ sedikit turun $\rightarrow E_b$ turun $\rightarrow I_a$ otomatis naik $\rightarrow T_{dev}$ naik menyamai beban.
- **Bahaya Saat Start ($\omega_m = 0 \implies E_b = 0$):**

$$I_{a,\text{start}} = \frac{V_t}{R_a} \approx 15 \text{ s.d. } 25 \times I_{nom}$$

Metode Pengasutan (*Motor Starting*)

1. **Starter Resistor Bertingkat (3/4 Titik):** Menyisipkan R_{start} seri jangkar agar $I_{start} \leq 1.5\, I_{nom}$, dilengkapi pengaman **NVR** (*No-Volt Release*) & **OLR** (*Overload*).
2. **Soft-Starter Elektronik (PWM Ramp):** Menaikkan tegangan rata-rata secara bertahap ($D : 0 \rightarrow 1$) tanpa rugi panas resistor!



Karakteristik Motor vs Profil Beban Mekanik Industri

3 Profil Beban Mekanik Utama

1. **Torsi Konstan ($T_L = k$):** Derek (*hoist/crane*), konveyor sabuk, lift.
2. **Torsi Viskos Linier ($T_L \propto \omega$):** Mesin pengaduk (*mixer*), mesin rol kalender.
3. **Torsi Kuadratik Fluida ($T_L \propto \omega^2$):** Pompa sentrifugal, kipas (*blower/fan*), propeler kapal.

Syarat Kestabilan Titik Kerja

Titik potong kurva motor $T_{dev}(\omega)$ dan beban $T_L(\omega)$ bersifat **stabil** apabila:

$$\frac{dT_L}{d\omega} > \frac{dT_{dev}}{d\omega}$$

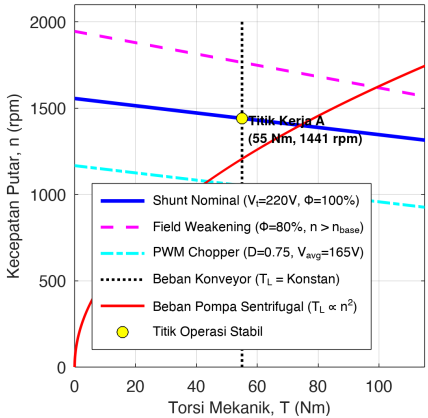
Peringatan Kritis: Motor DC Seri!

- Pada beban ringan ($I_a < I_{sat}$): $T_{dev} = k_s I_a^2$ dan $\omega_m \propto 1/\sqrt{T_{dev}}$.
- Jika beban lepas ($T_L \to 0$), kecepatan melonjak tak terhingga (**Runaway Speed**) yang menghancurkan rotor akibat gaya sentrifugal!
- **Aturan Mutlak:** Dilarang memakai transmisi sabuk (*belt*); wajib kopling roda gigi/poros langsung!

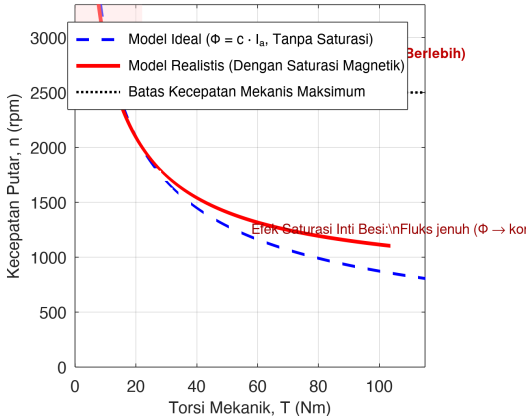


Visualisasi Simulasi Octave: *Load Matching* & Efek Saturasi

(a) Motor DC Shunt & Pencocokan Beban Mekanik (Load Matching)



(b) Motor DC Seri: Model Linier Ideal vs Saturasi Inti Besi



Analisis Grafik: (a) Perpotongan kurva motor shunt dengan beban konveyor dan pompa sentrifugal menentukan titik operasi stabil; (b) Kejenuhan inti besi (*magnetic saturation*) membatasi kenaikan fluks motor seri pada torsi tinggi.

Kendali Kecepatan Modern: PWM Chopper & Jembatan H-Bridge

Persamaan kecepatan: $\omega_m = \frac{V_{avg} - I_a R_a}{K_a \Phi}$. Di industri modern, pengaturan tahanan luar sudah digantikan oleh **Pulse Width Modulation (PWM)**:

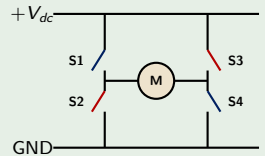
Prinsip Modulasi Lebar Pulsa (PWM)

Saklar semikonduktor (IGBT/MOSFET) diatur dengan siklus kerja (*Duty Cycle*) D:

$$D = \frac{t_{on}}{T_{pwm}} \in [0, 1] \implies V_{avg} = D \cdot V_{dc}$$

- **Zona Torsi Konstan ($n \leq n_{base}$):** Mengatur D dengan fluks Φ penuh.
- **Zona Daya Konstan ($n > n_{base}$):** Pelemahan medan (*field weakening*) pada $V_{avg} = V_{nom}$.

Skema *Full H-Bridge* (4-Kuadran)



- **Putar Maju (CW):** S1 & S4 ON ($V_t = +DV_{dc}$)
- **Putar Mundur (CCW):** S2 & S3 ON ($V_t = -DV_{dc}$)

Metode Pengereman Elektrik (*Electrical Braking*) & 4-Kuadran

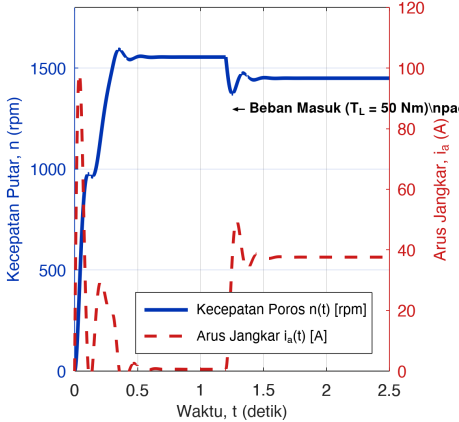
Dalam aplikasi derek (*crane*), lift, dan kendaraan listrik, pengereman mekanis dibantu oleh **3 metode pengereman elektrik** (membalik arah torsi $T_{dev} < 0$):

Metode Pengereman	**Prinsip Rangkaian & Fisika**	**Persamaan Arus Jangkar (I_a)**	**Aplikasi Utama**
1. Pengereman Regeneratif	Beban memutar poros melebihi kecepatan tanpa beban ($\omega > \omega_0 \implies E_b > V_t$). Energi dikembalikan ke baterai/jala-jala.	$I_a = \frac{V_t - E_b}{R_a} < 0$ (Arus berbalik menjadi generator)	Mobil listrik (EV) turun bukit, menurunkan muatan crane.
2. Pengereman Dinamis (Reostatik)	Sumber V_t diputus, terminal jangkar dihubungkan ke resistor pengereman R_{brake}. Energi kinetik diubah menjadi panas.	$I_a = \frac{-E_b}{R_a + R_{brake}}$	Pengereman halus lokomotif diesel-elektrik & conveyor.
3. Pengereman Plugging	Polaritas tegangan sumber dibalik mendadak ($V_t \to -V_t$) saat motor masih berputar maju. Torsi pengereman sangat agresif!	$I_a = \frac{-V_t - E_b}{R_a + R_{plug}}$ (Wajib pakai resistor pembatas R_{plug})	Penghentian darurat (*emergency stop*) & mesin rol baja.

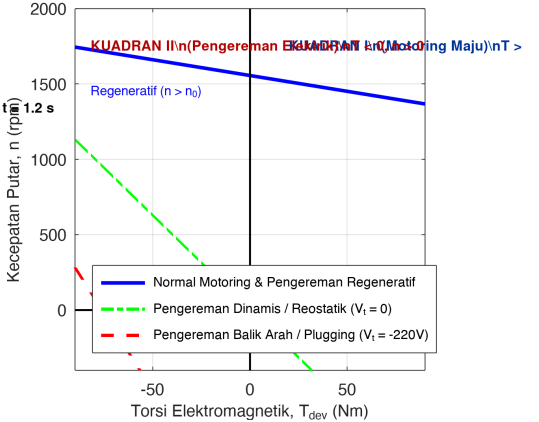


Visualisasi Simulasi Octave: Transien Dinamis & Pengereman

(a) Respons Transien Dinamis: Starting PWM & Beban Tiba-Tiba



(b) Operasi Kuadran I-II & Metode Pengereman Elektrik



Analisis Grafik: (a) Respons transien $n(t)$ dan $i_a(t)$ saat *soft-starting* dan pembebanan kejut 50 Nm pada $t = 1.2$ s; (b) Pemetaan kurva operasi Kuadran I (Motoring) dan Kuadran II (Regeneratif, Dinamis, dan *Plugging*).

Teknologi Modern: Motor PMDC & *Brushless DC* (BLDC)

1. Motor PMDC (*Permanent Magnet*)

- Belitan medan stator diganti dengan magnet permanen (Neodymium NdFeB / Ferit).
- Tidak ada rugi tembaga medan ($I_f^2 R_f = 0$), ukuran lebih ringkas, efisiensi tinggi.
- Masih menggunakan sikat & komutator. Dipakai pada motor starter mobil, *wiper*, dan aktuator otomotif.

2. Motor BLDC (*Brushless DC Motor*)

- **Konstruksi Terbalik (Inside-Out):** Magnet permanen berada di **Rotor**, sedangkan belitan jangkar berada di **Stator**.
- **Komutasi Elektronik:** Sikat mekanis digantikan oleh sensor posisi **Hall-Effect** dan saklar inverter 3-fasa.
- **Keunggulan:** Bebas perawatan sikat, tanpa bunga api, umur pakai sangat panjang, rasio torsi-terhadap-berat tertinggi (drone, EV, spindel CNC).



Neraca Aliran Daya, Efisiensi, & Standar *Nameplate* IEC 60034

Aliran Daya & Efisiensi (η)

- Daya Masuk: $P_{in} = V_t I_L$
- Rugi Tembaga: $P_{cu} = I_a^2 R_a + I_f^2 R_f$
- Daya Konversi: $P_{conv} = E_b I_a = T_{dev} \omega_m$
- Daya Poros Bersih: $P_{out} = P_{conv} - P_{rot}$
- Efisiensi Maksimum saat: $I_a^2 R_a = P_{konstan}$

Panduan Pemilihan *Nameplate* (Teknik Mesin)

- **Duty Cycle (IEC 60034-1):**
  - **S1 (Continuous):** Pompa, blower, konveyor.
  - **S2 / S3 (Intermittent):** Crane hoist, aktuator katup.
- **Kelas Isolasi Termal:** Kelas B (130°C), Kelas F (155°C), Kelas H (180°C).
- **Ingress Protection (IP):** Misal **IP55** (tahan debu pabrik & semprotan air).



Studi Kasus Komprehensif: Sistem Derek (*Crane Hoist*) Pelabuhan

Kasus Rekayasa Mekanikal-Elektrikal

Sebuah motor DC shunt $V_t = 240$ V menggerakkan drum derek pelabuhan melalui *gearbox*. Spesifikasi: $R_a = 0.4\ \Omega$, $R_f = 120\ \Omega$. Saat mengangkat muatan penuh (Kuadran I), motor menarik arus $I_L = 32$ A pada putaran 1200 rpm dengan rugi rotasional $P_{rot} = 450$ W.

1. Hitung E_b, torsi bangkitan T_{dev}, daya poros P_{out} (HP), dan efisiensi η saat mengangkat beban!
2. Saat muatan berat diturunkan, beban memutar poros motor pada 1320 rpm (pengereman regeneratif, Kuadran II). Hitung E_b' baru dan arus yang dikembalikan ke jala-jala!

Solusi Bagian 1 (Motoring - Mengangkat):

- $I_f = 240/120 = 2$ A $\implies I_a = 32 - 2 = 30$ A
- $E_b = 240 - (30 \times 0.4) = \mathbf{228}$ V
- $P_{conv} = 228 \times 30 = 6840$ W; $\omega_m = 125.66$ rad/s
- $T_{dev} = 6840/125.66 = \mathbf{54.43}$ Nm
- $P_{out} = 6840 - 450 = \mathbf{6390}$ W $\approx \mathbf{8.57}$ HP ($\eta = \mathbf{83.2}\%$)

Solusi Bagian 2 (Regenerative Braking - Menurunkan):

- Karena fluks shunt konstan ($E_b \propto n$):

$$E_b' = 228 \times \frac{1320}{1200} = \mathbf{250.8}\ \text{V} > V_t\ (240\ \text{V})$$

- Arus jangkar berbalik arah:

$$I_a' = \frac{240 - 250.8}{0.4} = -\mathbf{27.0}\ \text{A}$$

- Motor mengerem beban sambil menyuplai daya balik!



Rangkuman Eksekutif & Tugas Terstruktur

Poin Kunci Rekayasa Mesin DC

1. **Keseimbangan Elektromekanis:** $E_b = K_a \Phi \omega_m$ dan $T_{dev} = K_a \Phi I_a$ bekerja simultan.
2. **Pemilihan Beban:** Shunt untuk kecepatan konstan (konveyor/pompa); Seri untuk torsi awal raksasa (derek/traksi, awas *runaway*!); Kompon Kumulatif untuk beban impak (*punch press*).
3. **Kendali Modern:** PWM H-Bridge memungkinkan operasi 4-kuadran dan pengereman regeneratif/dinamis.
4. **Tren Masa Depan:** Transisi menuju PMDC & BLDC.

Penugasan Minggu 7 & Persiapan UTS

- **LKM 7:** Analisis skematik, *load matching*, dan pengereman dinamis.
- **Problem Set 7 (C1–C6):** Perhitungan analitis & simulasi transien **GNU Octave**.
- **Minggu 8: UTS** (Materi Minggu 1 s.d. 7).
- **Referensi:** Yon Rijono; S.J. Chapman (*McGraw-Hill*); Hughes (*Pearson*).



Program Studi S-1 Teknik Mesin FT UNIB

