Teknik Tenaga Listrik

Minggu 13 (Bab 13): Motor Listrik 1-Fasa & Motor Universal

Teori Medan Putar Ganda, Pembelahan Fasa, Motor Kapasitor, Kutub Bayangan, & Motor Universal

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 13 (CPMK 5 – Bobot 5%)

1. Medan Berdenyut & Teori Medan Putar Ganda
2. Prinsip Pembelahan Fasa & Klasifikasi Motor Induksi 1-Fasa
3. Motor Universal (AC/DC Series Motor) & Aplikasi Perkakas



Capaian Pembelajaran Perkuliahan Minggu 13 (CPMK 5)

Setelah menyelesaikan perkuliahan Bab 13 ini, mahasiswa mampu:

1. **C1 (Mengingat):** Mengidentifikasi konstruksi fisik motor induksi 1-fasa (belitan utama, belitan bantu, saklar sentrifugal, cincin bayangan) dan motor universal.
2. **C2 (Memahami):** Menjelaskan fenomena medan magnet berdenyut (*pulsating field*), Teori Medan Putar Ganda (*Double-Revolving Field*), dan prinsip pembelahan fasa (*phase-splitting*).
3. **C3 (Menerapkan):** Menghitung slip maju ($s_f = s$), slip mundur ($s_b = 2 - s$), impedansi ekivalen, serta nilai kapasitansi pengasut (C_{start}) untuk menghasilkan geseran fasa optimal.
4. **C4 (Menganalisis):** Menganalisis kurva torsi-kecepatan berbagai tipe motor 1-fasa serta mendiagnosis kegagalan mekanis saklar sentrifugal dan kapasitor.
5. **C5 (Mengevaluasi):** Memilih tipe motor 1-fasa atau motor universal yang tepat untuk kompresor torak, pompa, sistem HVAC, dan perkakas tangan berkecepatan tinggi.
6. **C6 (Merancang):** Merancang rangkaian kapasitor pengasut dan menyusun simulasi karakteristik torsi-kecepatan motor 1-fasa dalam **GNU Octave**.

Mengapa Sarjana Teknik Mesin Wajib Menguasai Motor 1-Fasa?

Dominasi di Bengkel, HVAC, & Utilitas

- Jaringan listrik komersial ringan, bengkel kecil, dan gedung umumnya hanya menyediakan catu daya **AC 1-Fasa (**220 **V,** 50 **Hz)**.
- Menggerakkan **kompresor udara bengkel**, pompa air, blower HVAC, mesin cuci, hingga mesin perkakas daya fraksional (< 3 HP).
- **Perkakas Portabel (Power Tools):** Bor tangan, gerinda sudut (*angle grinder*), dan *router* mengandalkan **Motor Universal** berkecepatan > 10.000 RPM.

Masalah Fundamental Motor 1-Fasa

- Berbeda dengan motor 3-fasa yang langsung membentuk medan magnet putar, satu belitan 1-fasa hanya menghasilkan **medan magnet berdenyut (pulsating)**.
- **Konsekuensi:** Torsi awal saat diam bernilai nol ($T_{start} = 0$ Nm)!
- Insinyur mesin wajib memahami mekanisme **pembelahan fasa (phase-splitting)** dan perawatan saklar sentrifugal.

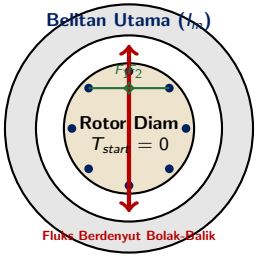
Fenomena Medan Magnet Berdenyut (*Pulsating Magnetic Field*)

Analisis Elektromagnetik Saat Rotor Diam ($n = 0$)

Arus bolak-balik 1-fasa $i_m(t) = I_{max}\cos(\omega t)$ pada belitan utama menghasilkan distribusi rapat fluks celah udara yang **stasioner di ruang namun berdenyut terhadap waktu**:

$$B(\theta, t) = B_{max}\cos(\omega t)\cos(\theta)$$

- Fluks hanya berbalik polaritas (Utara $\leftrightarrow$ Selatan) sepanjang satu sumbu tetap tanpa berputar.
- Arus induksi pada batang rotor sangkar tupai menghasilkan gaya Lorentz kiri dan kanan yang **saling meniadakan** ($\sum T = 0$).
- Motor hanya **berdengung keras (humming)** dan



Teori Medan Putar Ganda (*Double-Revolving Field Theory*)

Berdasarkan identitas trigonometri $\cos(\omega t)\cos(\theta) = \frac{1}{2}\cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2}\cos(\theta + \omega t)$, medan berdenyut dapat diuraikan menjadi **dua medan putar berlawanan arah**:

1. Medan Putar Maju (*Forward Field*, B_f)

- Amplitudo $\frac{1}{2}B_{max}$, berputar searah rotor (ω_s).
- **Slip Maju (s_f):**

$$s_f = \frac{n_s - n}{n_s} = s, \qquad Z_f \propto \frac{R_2'}{2s}$$

2. Medan Putar Mundur (*Backward Field*, B_b)

- Amplitudo $\frac{1}{2}B_{max}$, berputar melawan arah rotor ($-\omega_s$).
- **Slip Mundur (s_b):**

$$s_b = \frac{n_s - (-n)}{n_s} = 2 - s, \qquad Z_b \propto \frac{R_2'}{2-s}$$

Implikasi Fisika Elektromekanis

- **Saat Start ($n = 0 \implies s = 1$):**
  $s_f = 1$ dan $s_b = 2 - 1 = 1$.
  Akibatnya $Z_f = Z_b$ sehingga torsi maju dan mundur sama besar:

$$T_{net}(0) = T_f(0) - T_b(0) = 0$$

- **Saat Berputar ($n \approx 0.95\, n_s \implies s = 0.05$):**
  $s_f = 0.05$ (kecil $\rightarrow Z_f$ besar, $E_f \gg E_b$) sedangkan $s_b = 1.95$ (Z_b sangat kecil).
  Torsi maju mendominasi ($T_f \gg T_b$), sehingga rotor terus berputar stabil!

Prinsip Pembelahan Fasa (*Phase-Splitting*) & Pembalikan Putaran

Agar motor 1-fasa dapat menghasilkan medan putar saat start, stator dilengkapi dua belitan yang terpisah secara ruang sebesar **90°** listrik:

Persamaan Torsi Pengasutan (*Starting Torque*)

1. **Belitan Utama (Main/Running Winding, M):** Menempati $\sim 2/3$ alur stator, kawat tebal, induktansi tinggi.
2. **Belitan Bantu (Auxiliary/Starting Winding, A):** Ditempatkan tergeser 90° listrik dari belitan utama.

Torsi awal berbanding lurus dengan sinus sudut beda fasa (α) antara arus utama I_m dan arus bantu I_a:

$$T_{start} = K \cdot I_m \cdot I_a \cdot \sin(\alpha)$$

Torsi maksimum dicapai bila $\alpha \to 90°$ (kuadratur

Cara Membalik Arah Putaran Motor 1-Fasa

- **Salah:** Menukar kabel fasa (L) dan netral (N) sumber AC **TIDAK AKAN** mengubah arah putaran!
- **Benar:** Tukar kedua ujung terminal **Belitan Bantu saja** ($Z_1 \leftrightarrow Z_2$) ATAU **Belitan Utama saja** ($U_1 \leftrightarrow U_2$), sehingga urutan medan putar berbalik 180°.

1. Motor Induksi Fasa-Belah (*Split-Phase Motor*)

Karakteristik & Konstruksi Belitan

- **Belitan Utama:** Tahanan R_m rendah, reaktansi X_m tinggi $\implies$ I_m tertinggal jauh dari V_s ($\theta_m \approx 45°$–$60°$).
- **Belitan Bantu:** Kawat tembaga berdiameter kecil (R_a **tinggi**, X_a rendah) $\implies$ I_a hampir sefasa dengan V_s ($\theta_a \approx 15°$–$20°$).
- **Beda Fasa:** $\alpha = \theta_m - \theta_a \approx 25°$–$30°$.
- **Torsi Start Sedang:** $T_{start} \approx 130\%$–$170\%\ T_{FL}$.
- **Aplikasi:** Kipas angin besar, mesin cuci, pompa sentrifugal kecil, gerinda duduk (*bench grinder*).

Peran Kritis Saklar Sentrifugal (S_c)

- Karena kawat belitan bantu sangat tipis, rapat arusnya sangat tinggi dan hanya dirancang untuk operasi beberapa detik!
- Pada kecepatan **75%–80% n_s** (≈ 1125 rpm untuk 4-kutub), bobot pegas **Saklar Sentrifugal** terlempar keluar dan **memutus belitan bantu**.
- **Diagnosis Kerusakan:** Jika saklar macet tertutup (*stuck closed*), belitan bantu akan hangus terbakar dalam < 30 detik!



2. Motor Kapasitor-Start (*Capacitor-Start Induction Motor*)

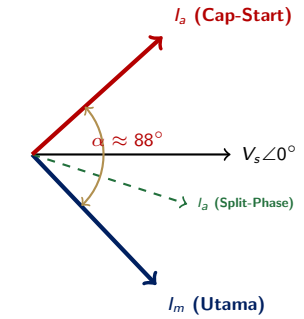
Untuk beban mekanik berat yang menuntut torsi awal raksasa, sebuah **kapasitor elektrolit (C_{start})** dipasang seri dengan belitan bantu dan saklar sentrifugal:

Keunggulan Elektromekanis & Perancangan C_{start}

- Reaktansi kapasitif $X_C = \frac{1}{2\pi f C_{start}}$ membuat arus bantu I_a **mendahului (leading)** tegangan sumber V_s sebesar $\theta_a \approx 40°$–$45°$.
- Sudut pisah fasa mencapai kuadratur optimal:

$$\alpha = |\theta_m| + |\theta_a| \approx 80°\text{–}90° \implies \sin\alpha \approx 1.0$$

- **Torsi Start Ekstra Tinggi: 300%–400% T_{FL}** dengan arus start jala-jala yang justru lebih rendah!
- Nilai C_{start} tipikal: 100 μF s.d. 400 μF AC.

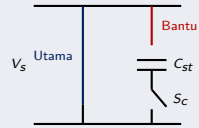


Aplikasi Utama Teknik Mesin

Kompresor udara torak (*reciprocating compressor*), pompa piston, konveyor berbeban, mesin bubut kecil.

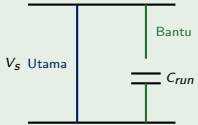
3. Motor Kapasitor Permanen (PSC) & Kapasitor Dua-Nilai (CSCR)

(a) Capacitor-Start (CS)



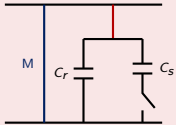
- Kapasitor elektrolit besar.
- Torsi start sangat tinggi ($> 300\%$).
- Ada saklar sentrifugal S_c.

(b) Permanent-Split Cap. (PSC)



- **Tanpa saklar sentrifugal!**
- Kapasitor kertas minyak (5–30 μF).
- Torsi start rendah ($\sim$ 85%), putaran halus & sunyi (Blower AC/Kipas).

(c) Two-Value Cap. (CSCR)



- Saat start: $C_{tot} = C_{start} + C_{run}$.
- Saat jalan: C_{run} tetap aktif.
- Torsi start tinggi **&** cos φ terbaik (Kompresor besar & pompa industri).

4. Motor Kutub Bayangan (*Shaded-Pole Motor*)

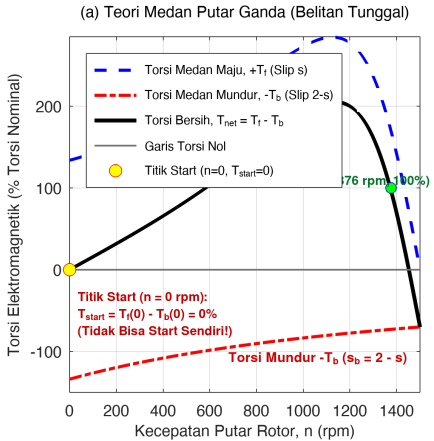
Prinsip Cincin Tembaga Hubung-Singkat (*Shading Coil*)

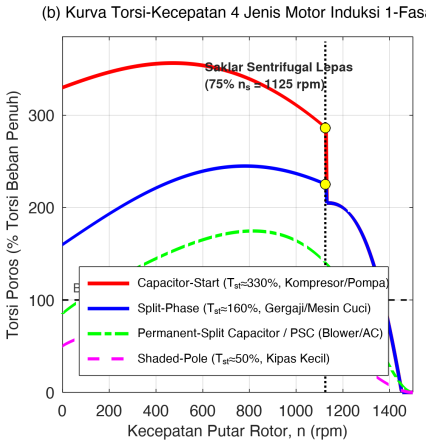
- Menggunakan stator kutub menonjol (*salient pole*) tanpa belitan bantu dan tanpa saklar.
- Sekitar 1/3 bagian ujung sepatu kutub diberi alur dan dipasang **cincin tembaga tebal hubung-singkat (shading ring)**.
- **Aksi Hukum Lenz:** Saat fluks utama naik, arus induksi pada cincin tembaga menahan perubahan fluks di bagian kutub berbayang (Φ_{shaded} tertinggal terhadap $\Phi_{unshaded}$).
- Tercipta efek sapuan medan magnet bergeser dari **kutub tak berbayang menuju kutub berbayang**!

Karakteristik & Keterbatasan

- **Torsi Start Sangat Rendah:** $\approx 40\%$–60% T_{FL}.
- **Efisiensi Rendah (20%–35%):** Rugi I^2R terus-menerus pada cincin bayangan.
- **Arah Putaran Tetap:** Tidak dapat dibalik secara elektrik.
- **Keunggulan:** Sangat murah, konstruksi paling sederhana, dan hampir bebas perawatan (kipas *exhaust* kecil, pengering rambut, kipas pendingin).

Visualisasi Simulasi Octave: Medan Putar Ganda & Kurva T–n





Analisis Grafik: (a) Pada belitan tunggal, torsi maju $+T_f$ dan torsi mundur $-T_b$ saling meniadakan saat diam ($T_{start} = 0$); (b) Penambahan kapasitor start mendongkrak torsi awal hingga $\sim 330\%$ T_{FL} sebelum saklar sentrifugal membuka pada 75% n_s (1125 rpm).

Motor Universal: Mesin Komutator Seri AC/DC Kecepatan Tinggi

Bagaimana mesin perkakas tangan (*hand drill*, gerinda sudut, *router*) mampu berputar hingga **10.000–30.000** RPM padahal batas kecepatan sinkron 50 Hz hanya 3000 RPM? Jawabannya adalah **Motor Universal**!

Prinsip Torsi Searah pada Catu Daya AC

- Konstruksi identik dengan **Motor DC Seri** (belitan medan seri dengan jangkar via sikat & komutator), namun seluruh inti stator wajib **berlaminasi baja silikon** untuk menekan rugi arus pusar AC.
- Saat siklus negatif AC: arah arus medan berbalik ($\Phi \to -\Phi$) **DAN** arah arus jangkar berbalik ($I_a \to -I_a$) secara serempak:

$$T_{dev} = K_a(-\Phi)(-I_a) = +K_a k_s I_a^2 \geq 0$$

- Torsi selalu searah (*unidirectional*) dengan frekuensi denyut $2f = 100$ Hz!

Keunggulan & Kendali Perkakas

- **Rasio Daya-per-Berat Tertinggi:** Karena ω sangat tinggi ($P = T \cdot \omega$), motor berdaya 800 W dapat digenggam satu tangan!
- **Belitan Kompensasi:** Dipasang di stator untuk menetralkan reaktansi jangkar AC dan mengurangi bunga api sikat.
- **Kendali Kecepatan Elektronik:** Menggunakan pemicu sudut fasa **TRIAC** pada pelatuk (*trigger*) bor/gerinda.

Studi Kasus Komprehensif: Perancangan Kapasitor Pengasut Kompresor

Kasus Rekayasa: Motor Kapasitor-Start Kompresor Udara Bengkel

Sebuah motor induksi 1-fasa 220 V, 50 Hz, 4-kutub menggerakkan kompresor torak bengkel mesin. Saat rotor terkunci (start, $s = 1$), impedansi belitan utama adalah $Z_m = 3.0 + j4.0\ \Omega$, sedangkan impedansi belitan bantu (tanpa kapasitor) adalah $Z_a = 6.0 + j3.0\ \Omega$.

1. Hitung besar dan sudut fasa arus utama I_m saat start!
2. Rancang nilai kapasitor pengasut C_{start} (μF) yang dipasang seri dengan belitan bantu agar arus bantu I_a berbeda fasa tepat $\alpha = 90^\circ$ (kuadratur ideal) terhadap I_m!

Solusi Bagian 1 (Belitan Utama):

- $|Z_m| = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5.0\ \Omega$
- Sudut impedansi: $\theta_m = \arctan(4/3) = +53.13^\circ$
- Arus utama tertinggal (*lagging*):

$$I_m = \frac{220\angle 0^\circ}{5\angle 53.13^\circ} = \mathbf{44.0}\angle -\mathbf{53.13}^\circ \text{ A}$$

Solusi Bagian 2 (Perancangan C_{start} untuk $\alpha = 90^\circ$):

- Agar $\alpha = 90^\circ$, arus bantu I_a harus mendahului V_s sebesar: $\theta_a = 90^\circ - 53.13^\circ = +\mathbf{36.87}^\circ$ (*leading*).
- Sudut impedansi cabang bantu total harus -36.87°:

$$\frac{X_a - X_C}{R_a} = \tan(-36.87^\circ) = -0.75 \implies \frac{3.0 - X_C}{6.0} = -0.75$$

- $X_C = 3.0 + 4.5 = \mathbf{7.5\ \Omega} \implies C_{start} = \frac{1}{2\pi(50)(7.5)} = \mathbf{424.4}\ \mu$F

Rangkuman Eksekutif & Matriks Pemilihan Motor 1-Fasa

Tipe Motor	Torsi Start	Aplikasi Utama Teknik Mesin
Split-Phase	130–170%	Mesin cuci, gerinda duduk, pompa kecil
Capacitor-Start	300–400%	Kompresor udara torak, pompa piston
PSC (Cap. Run)	70–100%	Blower HVAC, kipas kondensor AC
Two-Value (CSCR)	320–400%	Kompresor berat, konveyor, mesin kayu
Shaded-Pole	40–60%	Kipas pendingin alat elektronik kecil
Motor Universal	350–450%	Bor tangan, gerinda sudut ($>$ 10.000 RPM)

Penugasan Minggu 13

- **LKM 13:** Analisis medan putar ganda, diagnosis saklar sentrifugal, & desain kapasitor.
- **Problem Set 13 (C1–C6):** Perhitungan kuadratur fasa & simulasi **GNU Octave**.
- **Minggu 14:** Konversi Energi Listrik ke Termal & Optik Industri.



Program Studi S-1 Teknik Mesin FT UNIB

