Teknik Tenaga Listrik

Minggu 11 (Bab 11): Prinsip Kerja & Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi 3-Fasa

Medan Putar Stator, Konstruksi Rotor, Konsep Slip, Aliran Daya, Kurva Torsi-Slip, & Kelas NEMA

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 11 (CPMK 5 – Bobot 8%)

1. Konstruksi Fisik & Medan Magnet Putar Stator
2. Rangkaian Ekuivalen Per-Fasa IEEE & Diagram Aliran Daya
3. Ekivalen Thevenin, Persamaan Torsi-Slip, & Kelas Desain NEMA
4. Studi Kasus Rekayasa Mesin & Rangkuman



Capaian Pembelajaran Perkuliahan Minggu 11 (CPMK 5)

Setelah menyelesaikan perkuliahan Bab 11 ini, mahasiswa mampu:

1. **C1 (Mengingat):** Mengidentifikasi konstruksi fisik stator dan rotor motor induksi 3-fasa (**sangkar tupai** vs **rotor belitan/slip-ring**) serta klasifikasi desain rotor **NEMA Kelas A, B, C, dan D**.
2. **C2 (Memahami):** Menjelaskan mekanisme terbentuknya **medan magnet putar stator** ($n_s = 120f/p$), konsep **slip** (s), alasan fisis mengapa $n_r < n_s$, serta transformasi frekuensi rotor ($f_r = s \cdot f$).
3. **C3 (Menerapkan):** Menghitung kecepatan sinkron, slip, frekuensi rotor, arus, dan tahapan **diagram aliran daya** ($P_{in} \rightarrow P_{ag} \rightarrow P_{cu,2} \rightarrow P_{conv} \rightarrow P_{out}$).
4. **C4 (Menganalisis):** Menganalisis rangkaian ekuivalen per-fasa IEEE, ekivalen Thevenin, torsi maksimum (T_{max}), slip kritis (s_{max}), dan pergeseran kurva torsi akibat resistansi rotor (R_2').
5. **C5 (Mengevaluasi):** Mengevaluasi dan memilih tipe motor induksi (Sangkar Tupai Kelas A–D vs Rotor Belitan) yang tepat untuk beban mekanik industri (*pompa, kompresor, konveyor, crusher*).
6. **C6 (Merancang):** Merancang tahanan luar rotor belitan (R_{ext}) untuk torsi start maksimum dan memodelkan keluarga kurva torsi-slip menggunakan **GNU Octave**.



Mengapa Motor Induksi 3-Fasa Menjadi *Workhorse* Industri?

Lebih dari **85% populasi motor listrik** di pabrik manufaktur, kilang migas, pembangkit listrik, dan pertambangan adalah **Motor Induksi (Asinkron) 3-Fasa**:

Keunggulan Mekanikal & Operasional

- **Konstruksi Sangat Kokoh (Rugged):** Tipe sangkar tupai tidak memiliki sikat (*brushless*), komutator, maupun cincin geser $\rightarrow$ bebas bunga api (*Explosion-Proof* untuk zona migas/tambang batubara).
- **Biaya & Perawatan Rendah:** Rasio daya-terhadap-berat tinggi, umur bantalan panjang, dapat dihubungkan langsung ke jala-jala AC 3-fasa (380/400 V).

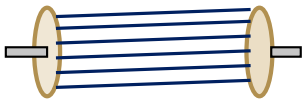
Tantangan yang Wajib Dikuasai Insinyur Mesin

- **Putaran Bergantung Frekuensi & Beban:** Kecepatan turun sedikit saat beban naik (adanya *slip* s).
- **Lonjakan Arus Start Tinggi:** Arus pengasutan langsung (DOL) mencapai $5\times$ s.d. $8\times I_{nom}$.
- **Karakteristik Torsi Non-Linier:** Wajib dicocokkan dengan inersia dan profil beban mekanik!

Anatomi Motor Induksi: Sangkar Tupai vs Rotor Belitan (*Slip-Ring*)

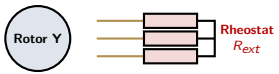
1. **Stator (Bagian Diam):**
   - Inti besi silikon berlaminasi ($0.35 - 0.5$ mm) beralur (*slots*) tempat belitan 3-fasa (U-V-W) terpisah ruang 120° listrik, dilengkapi sirip pendingin rangka (*TEFC - Totally Enclosed Fan Cooled*).
2. **Rotor Sangkar Tupai (Squirrel-Cage – 90% Industri):**
   - Batang konduktor aluminium/tembaga dicor di alur rotor dan dihubung-singkat permanen oleh **cincin ujung (end-rings)**.
   - Batang dibuat **miring (skewed)** untuk meredam dengung magnetik dan mencegah penguncian (*cogging*).
3. **Rotor Belitan (Wound-Rotor / Slip-Ring):**
   - Belitan 3-fasa hubungan Y dihubungkan ke **3 cincin geser (slip-rings)** & sikat karbon untuk menyisipkan **resistor luar (R_{ext})** saat start berat (*crusher, ball mill*).

(a) Rotor Sangkar Tupai (Squirrel-Cage)



Cincin Ujung (*End-Ring*) & Batang Konduktor Miring (*Skewed*)

(b) Skema Rotor Belitan (Slip-Ring) + R_{ext}



Medan Magnet Putar Stator (*Rotating Magnetic Field*) & n_s

Ketika belitan stator 3-fasa yang terpisah ruang 120° dialiri arus bolak-balik 3-fasa seimbang (berbeda fasa waktu 120°), superposisi fluks menghasilkan **Medan Magnet Putar** bermagnitudo konstan $B_{net}(\theta, t) = \mathbf{1.5\,B_{max}}\angle(\omega_e t - \theta)$:

Kecepatan Sinkron (n_s)

Kecepatan putar medan magnet celah udara ditentukan oleh frekuensi jala-jala f (Hz) dan jumlah kutub stator p:

$$\mathbf{n_s} = \frac{\mathbf{120f}}{\mathbf{p}}\ \text{(rpm)}, \quad \omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{4\pi f}{p}\ \text{(rad/s)}$$

Cara Membalik Arah Putaran Motor 3-Fasa

Untuk mengubah arah putaran dari searah jarum jam (**CW**: urutan fasa $U - V - W$) menjadi berlawanan (**CCW**), cukup **menukar dua dari tiga kabel fasa** (misal $U - W - V$)!

Tabel Kecepatan Sinkron n_s (rpm)

Jumlah Kutub (p)	$f = 50$ **Hz (PLN)**	$f = 60$ **Hz (US/Kap**
2 Kutub	3000 rpm	3600 rpm
4 Kutub	**1500** rpm	1800 rpm
6 Kutub	1000 rpm	1200 rpm
8 Kutub	750 rpm	900 rpm

Konsep Slip (s), Frekuensi Arus Rotor (f_r), & Mekanisme Torsi

Mengapa Rotor Tidak Pernah Mencapai n_s?

1. Medan putar stator (n_s) memotong batang rotor (n_r) $\rightarrow$ menginduksi GGL rotor $E_2 \propto (n_s - n_r)$ (Hukum Faraday).
2. Karena rotor terhubung-singkat, mengalir arus I_2 yang berinteraksi dengan B_{stator} menghasilkan **Torsi Lorentz**: $\vec{T} = k(\vec{B}_{rotor} \times \vec{B}_{stator})$.
3. **Jika $n_r = n_s$:** Tidak ada gerak relatif $\implies E_2 = 0 \implies I_2 = 0 \implies \mathbf{T_e = 0}$! Maka pada operasi motor selalu berlaku $\mathbf{n_r < n_s}$ (Asinkron).

Persamaan Fundamental Slip (s)

$$\mathbf{s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \implies n_r = (1 - s)\, n_s}$$

- Saat diam (*locked-rotor/start*): $n_r = 0 \implies \mathbf{s = 1.0}$ (100%).
- Saat beban penuh (*full-load*): $\mathbf{s \approx 0.02 - 0.05}$ (2% – 5%).

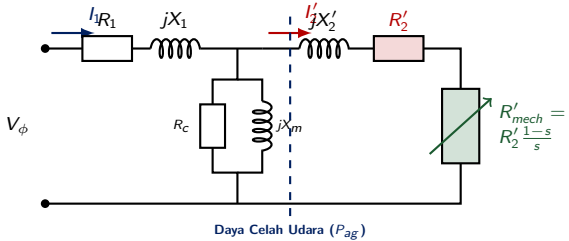
Frekuensi & GGL Induksi di Dalam Rotor:

$$\mathbf{f_r = s \cdot f}, \qquad E_2(s) = s \cdot E_{20}, \qquad X_2(s) = s \cdot X_{20}$$



Rangkaian Ekuivalen Per-Fasa Motor Induksi 3-Fasa (Standar IEEE)

Mirip transformator yang sekundernya berputar! Dengan membagi persamaan arus rotor $I_2' = \frac{sE_1}{\sqrt{(R_2')^2+(sX_2')^2}}$ dengan slip s, diperoleh impedansi rotor rujukan stator $Z_2' = \frac{R_2'}{s} + jX_2'$:

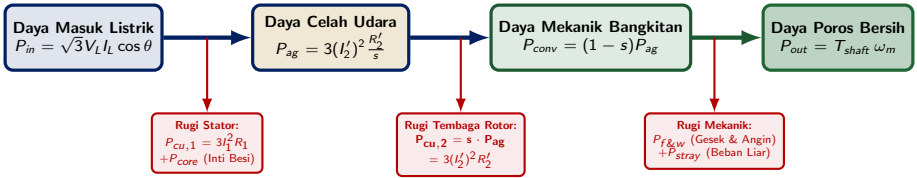


Pemisahan Resistansi Rotor

Resistansi total rotor $\frac{R_2'}{s}$ dipecah menjadi dua komponen fisis:

$$\frac{R_2'}{s} = \underbrace{R_2'}_{\substack{\text{Rugi Panas} \\ \text{Tembaga Rotor}}} + \underbrace{R_2'\left(\frac{1-s}{s}\right)}_{\substack{\text{Resistansi Ekivalen} \\ \text{Daya Mekanik Poros!}}}$$

Diagram Aliran Daya (*Power Flow*) & Hubungan Fundamental



Rasio Emas Daya Celah Udara (*Golden Ratio*)

$$\mathbf{P_{ag} : P_{cu,2} : P_{conv} = 1 : s : (1-s)}$$

$$\mathbf{T_{dev} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{(1-s)P_{ag}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{ag}}{\omega_s}}$$

Implikasi Termal & Efisiensi (η)

Karena $\frac{P_{conv}}{P_{ag}} = 1 - s$, motor yang beroperasi pada **slip tinggi (s besar)** membuang porsi energi celah udara sebesar s menjadi panas di rotor! Oleh sebab itu slip nominal dirancang kecil ($s \leq 4\%$).

Ekivalen Thevenin Stator & Persamaan Torsi-Kecepatan

Untuk mendapatkan rumus torsi yang presisi, jaringan sisi stator (V_ϕ, R_1, jX_1, jX_m) disederhanakan menggunakan **Teorema Thevenin** yang dilihat dari celah udara rotor:

Parameter Thevenin & Torsi Bangkitan

$$V_{th} \approx V_\phi \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}}, \quad Z_{th} = R_{th} + jX_{th}$$

Persamaan Torsi Elektromagnetik IEEE:

$$\mathbf{T_e(s)} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{\mathbf{V_{th}^2} \left(\frac{\mathbf{R_2'}}{\mathbf{s}}\right)}{\left(\mathbf{R_{th}} + \frac{\mathbf{R_2'}}{\mathbf{s}}\right)^2 + (\mathbf{X_{th}} + \mathbf{X_2'})^2}$$

(Catatan: Torsi berbanding lurus dengan **kuadrat tegangan** $T_e \propto V_{th}^2$!)

Slip Kritis (s_{max}) & Torsi Maksimum (T_{max})

Berdasarkan teorema transfer daya maksimum ($\frac{R_2'}{s_{max}} = |Z_{th} + jX_2'|$):

$$\mathbf{s_{max}} = \frac{\mathbf{R_2'}}{\sqrt{\mathbf{R_{th}^2} + (\mathbf{X_{th}} + \mathbf{X_2'})^2}}$$

$$\mathbf{T_{max}} = \frac{3}{2\omega_s} \cdot \frac{\mathbf{V_{th}^2}}{\mathbf{R_{th}} + \sqrt{\mathbf{R_{th}^2} + (\mathbf{X_{th}} + \mathbf{X_2'})^2}}$$

Fakta Penting: Nilai puncak T_{max} **independen dari** R_2', sedangkan letak slip s_{max} berbanding lurus dengan R_2'!

Tiga Mode Operasi & Empat Titik Kritis Kurva Torsi Motor Induksi

4 Titik Kritis pada Kurva Motoring ($0 \leq s \leq 1$)

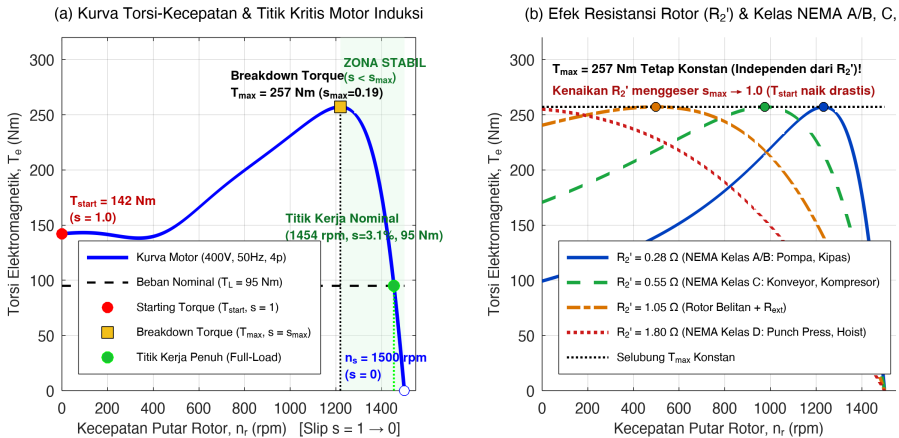
1. **Starting Torque (T_{start} pada $s = 1$):** Torsi awal saat poros mulai berputar ($150\% - 250\%\ T_{nom}$). Wajib $T_{start} > T_{L,\text{statis}}$!
2. **Pull-Up Torque (T_{min}):** Torsi minimum (pelana) saat akselerasi di sekitar $25\% - 40\%\ n_s$.
3. **Breakdown Torque (T_{max} pada s_{max}):** Torsi puncak ($200\% - 300\%\ T_{nom}$). Jika beban melebihi T_{max}, motor mengalami **stall (macet)**!
4. **Full-Load Point (T_{FL}, n_{FL}):** Titik kerja stabil di zona linier ($s < s_{max}$).

3 Rejim Operasi Mesin Induksi Berdasarkan Slip

- **1. Rejim Pengereman Plugging ($s > 1$, $n_r < 0$):** Rotor berputar berlawanan arah medan putar stator (urutan 2 fasa ditukar). Menyerap daya listrik & mekanik untuk mengerem cepat.
- **2. Rejim Motoring Normal ($0 \leq s \leq 1$, $0 \leq n_r \leq n_s$):** Mengubah daya listrik menjadi daya mekanik poros.
- **3. Rejim Generator Induksi ($s < 0$, $n_r > n_s$):** Poros diputar melebihi kecepatan sinkron oleh turbin angin atau beban turunan derek (**Pengereman Regeneratif**).



Visualisasi Simulasi Octave: Karakteristik Torsi-Slip & Efek R_2'



Analisis Grafik Simulasi GNU Octave: (a) Pemetaan T_{start}, *Pull-up Torque*, T_{max} (257 Nm pada $s_{max} = 0.19$), dan titik kerja stabil beban penuh (1454 rpm, $s = 3.1\%$); (b) Penambahan R_2' menggeser $s_{max} \rightarrow 1.0$ sehingga T_{start} meningkat drastis dengan T_{max} tetap konstan!

Standar Desain Rotor NEMA (Kelas A, B, C, D) & Aplikasi Mekanik

Standar **NEMA MG-1 / IEC 60034-12** mengklasifikasikan motor sangkar tupai berdasarkan geometri alur batang rotor (R_2' dan X_2') untuk mencocokkan karakteristik beban mekanik:

Kelas NEMA	Torsi Start	Arus Start	Slip Nominal	Geometri Rotor & Aplikasi Beban Mekanik Khas
Kelas A	$150\% - 170\%$	$6\times - 8\times$	$1.5\% - 3\%$	Batang dekat permukaan (R_2' kecil, X_2' kecil). Kipas industri, pompa sentrifugal, mesin bubut/frais.
Kelas B	$140\% - 160\%$	$5\times - 6.5\times$	$2\% - 3.5\%$	**Standar 80% Industri:** Alur dalam (*deep-bar*). Blower HVAC, pompa air, kompresor sentrifugal.
Kelas C	$200\% - 250\%$	$4.5\times - 5.5\times$	$3\% - 5\%$	**Sangkar Ganda:** Sangkar luar resistansi tinggi (aktif saat start) & dalam reaktansi tinggi. Konveyor berat, kompresor torak.
Kelas D	$275\% - 320\%$	$4\times - 5\times$	$5\% - 13\%$	Batang kecil resistansi tinggi ($s_{max} \approx 1$). **Mesin kempa (punch press) ber-flywheel**, *jaw crusher*, hoist/crane.



Soal Rekayasa Sistem Penggerak Mekanik

Sebuah motor induksi 3-fasa hubungan Y, 400 V, 50 Hz, 4 kutub menggerakkan kompresor udara pabrik pada putaran $n_r = 1440$ rpm. Motor menarik arus saluran $I_L = 25$ A dengan faktor daya $\cos\theta = 0.85$ (*lagging*). Diketahui resistansi stator per fasa $R_1 = 0.40\ \Omega$, rugi inti besi $P_{core} = 450$ W, serta rugi gesek dan angin mekanik $P_{f\&w} = 350$ W (abaikan P_{stray}). Hitung neraca daya lengkap, torsi poros, dan efisiensi!

Tahap 1: Kecepatan Sinkron, Slip, & Daya Celah Udara

- $n_s = \frac{120 \times 50}{4} = \mathbf{1500}$ rpm ($\omega_s = 157.08$ rad/s)
- Slip: $s = \frac{1500 - 1440}{1500} = \mathbf{0.04}$ (**4%**); $f_r = 0.04 \times 50 = \mathbf{2}$ Hz
- Daya Masuk: $P_{in} = \sqrt{3}(400)(25)(0.85) = \mathbf{14\,722}$ W
- Rugi Tembaga Stator: $P_{cu,1} = 3(25)^2(0.40) = \mathbf{750}$ W
- Daya Celah Udara:

$$P_{ag} = P_{in} - P_{cu,1} - P_{core} = 14\,722 - 750 - 450 = \mathbf{13\,522}\ \text{W}$$

Tahap 2: Konversi Elektromekanis, Torsi, & Efisiensi

- Rugi Tembaga Rotor: $P_{cu,2} = s \cdot P_{ag} = 0.04(13\,522) = \mathbf{540.9}$ W
- Daya Mekanik Bangkitan: $P_{conv} = (1-s)P_{ag} = \mathbf{12\,981.1}$ W
- Daya Keluaran Poros: $P_{out} = 12\,981.1 - 350 = \mathbf{12\,631.1}$ W $\approx \mathbf{16.93}$ HP
- Torsi Bangkitan vs Torsi Poros ($\omega_m = 150.80$ rad/s):

$$T_{dev} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \mathbf{86.08}\ \text{Nm}, \quad T_{shaft} = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \mathbf{83.76}\ \text{Nm}$$

- Efisiensi Total: $\eta = \frac{12\,631.1}{14\,722} \times 100\% = \mathbf{85.80\%}$

Rangkuman Eksekutif & Tugas Terstruktur Minggu 11

Intisari Rekayasa Motor Induksi 3-Fasa (Bagian I)

1. **Medan Putar & Slip:** $n_s = \frac{120f}{p}$; torsi timbul saat $n_r < n_s$ ($s = \frac{n_s - n_r}{n_s} > 0$) dengan frekuensi rotor $f_r = s \cdot f$.
2. **Rasio Emas Aliran Daya:** $P_{ag} : P_{cu,2} : P_{conv} = 1 : s : (1-s)$ dan $T_{dev} = P_{ag}/\omega_s$.
3. **Karakteristik Torsi-Slip:** $T_{max} \propto V_{th}^2$ namun **independen dari** R_2', sedangkan $s_{max} \propto R_2'$.
4. **Pemilihan Beban:** Kelas B untuk pompa/kipas; Kelas C untuk konveyor/kompresor; Kelas D atau Rotor Belitan untuk beban impak/*crusher*.

Penugasan Minggu 11 & Pratinjau Minggu 12

- **LKM 11:** Analisis medan putar, diagram Sankey aliran daya, dan pencocokan kelas NEMA.
- **Problem Set 11 (C1–C6):** Perhitungan Thevenin, desain R_{ext} rotor belitan, & simulasi **GNU Octave**.
- **Minggu 12:** Metode Starting (DOL, $Y-\Delta$, Soft-Starter), Pengereman Injeksi DC, & Regulasi VFD (V/f).



Program Studi S-1 Teknik Mesin FT UNIB

