# PROBLEM SET 11 (TUGAS MANDIRI TERSTRUKTUR – EDISI LENGKAP)

**Mata Kuliah: Teknik Tenaga Listrik (2/3 SKS – Semester 3)**

**Topik Minggu 11:** Medan Putar, Slip, Rangkaian Ekuivalen IEEE, Aliran Daya, Kelas NEMA, & Octave

**Nama:** .....
**NPM:** .....
**Kelas/Klp:** .....
**Nilai Final:** / 100

**Capaian Pembelajaran (CPMK 5 / Minggu 11 – Bobot 8%) & Pedoman Pengerjaan Tugas Mandiri**

**CPMK 5 (Sub-CPMK 11):** Mahasiswa mampu menganalisis konstruksi motor induksi 3-fasa, medan magnet putar stator, konsep slip dan frekuensi rotor, rangkaian ekuivalen per-fasa IEEE, diagram aliran daya (*Sankey diagram*), karakteristik torsi-slip Thevenin, klasifikasi NEMA Kelas A–D, serta simulasi berbasis GNU Octave.
**Ketentuan Pengerjaan:** Kerjakan secara mandiri pada kertas A4 rapi. Sertakan skema rangkaian ekuivalen, penurunan rumus analitis lengkap, serta lampirkan kode program dan grafik keluaran simulasi GNU Octave (Soal C6).

## BAGIAN I: KONSTRUKSI, PRINSIP MEDAN PUTAR, & NERACA ALIRAN DAYA

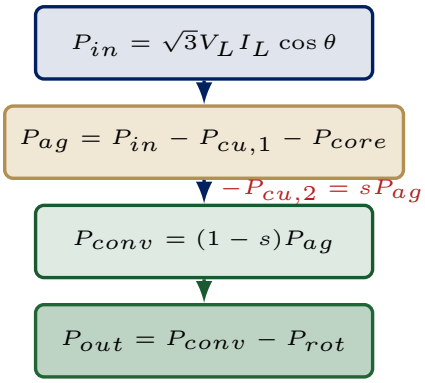
### 1. (C1 - Mengingat | Bobot: 10 Poin)

(a) Jelaskan perbedaan konstruksi fisik, komponen kontak mekanis, biaya perawatan, dan aplikasi industri antara **Rotor Sangkar Tupai (*Squirrel-Cage*)** dan **Rotor Belitan (*Wound-Rotor / Slip-Ring*)**!
(b) Identifikasi karakteristik empat kelas desain rotor standar **NEMA (Kelas A, B, C, dan D)** ditinjau dari rasio torsi start ($T_{start}/T_{nom}$), arus start ($I_{start}/I_{nom}$), slip nominal ($s_{FL}$), serta geometri alur batang rotornya!

### 2. (C2 - Memahami | Bobot: 15 Poin)

(a) Uraikan mekanisme fisis terbentuknya **Medan Magnet Putar Stator** ($B_{net} = 1.5B_m\angle(\omega t - \theta)$) ketika belitan 3-fasa yang terpisah ruang 120° dicatu oleh arus bolak-balik 3-fasa seimbang, serta jelaskan mengapa penukaran dua kabel fasa membalik arah putaran motor!
(b) Mengapa motor induksi disebut **mesin asinkron** dan mustahil menghasilkan torsi mekanik jika rotor berputar tepat pada kecepatan sinkron ($n_r = n_s$)?
(c) Jelaskan bagaimana resistansi rotor per-fasa $\frac{R'_2}{s}$ pada rangkaian ekuivalen IEEE dipisahkan menjadi komponen rugi panas tembaga rotor ($R'_2$) dan resistansi ekivalen beban mekanik ($R'_2\frac{1-s}{s}$), lalu buktikan bahwa efisiensi internal rotor dibatasi oleh $\eta_{rotor} = \frac{P_{conv}}{P_{ag}} = 1 - s$!

### 3. (C3 - Menerapkan | Bobot: 20 Poin)




Sebuah motor induksi 3-fasa hubungan Bintang (Y), 400 V (antar-saluran), 50 Hz, 4 kutub menggerakkan pompa sentrifugal bertekanan tinggi pada putaran poros $n_r = 1446$ rpm. Saat beroperasi beban penuh, motor menarik arus saluran $I_L = 30$ A dengan faktor daya $\cos\theta = 0.86$ (*lagging*). Diketahui resistansi belitan stator per fasa $R_1 = 0.35\ \Omega$, rugi inti besi stator $P_{core} = 480$ W, rugi gesek dan angin $P_{f\&w} = 320$ W, serta rugi beban liar $P_{stray} = 130$ W.
**Hitung secara sistematis:** (a) Kecepatan sinkron ($n_s$), slip ($s$), dan frekuensi arus induksi di dalam rotor ($f_r$); (b) Daya listrik masuk ($P_{in}$), rugi tembaga stator ($P_{cu,1}$), dan daya celah udara ($P_{ag}$); (c) Rugi tembaga rotor ($P_{cu,2}$), daya mekanik bangkitan ($P_{conv}$), dan daya keluaran bersih poros ($P_{out}$ dalam satuan kW dan HP); (d) Torsi bangkitan ($T_{dev}$), torsi poros bersih ($T_{shaft}$), dan efisiensi total motor ($\eta$)!

**FORMULA RUJUKAN TEKNIS MOTOR INDUKSI 3-FASA (IEEE Std 112 / NEMA MG-1)**

- Kecepatan Sinkron & Slip: $n_s = \frac{120f}{p}$, $s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$, $n_r = (1-s)n_s$, $f_r = s \cdot f$; Aliran Daya: $P_{ag} : P_{cu,2} : P_{conv} = 1 : s : (1-s)$, $T_{dev} = \frac{P_{ag}}{\omega_s}$
- Torsi Elektromagnetik Thevenin: $T_e(s) = \frac{3}{\omega_s}\frac{V_{th}^2(R'_2/s)}{(R_{th}+R'_2/s)^2+(X_{th}+X'_2)^2}$; Slip Kritis: $s_{max} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_{th}^2+(X_{th}+X'_2)^2}}$
- Breakdown Torque Maksimum: $T_{max} = \frac{3}{2\omega_s}\frac{V_{th}^2}{R_{th}+\sqrt{R_{th}^2+(X_{th}+X'_2)^2}}$ (independen terhadap $R'_2$, tetapi sebanding dengan $V_{th}^2$)

## BAGIAN II: ANALISIS THEVENIN, EVALUASI KELAS NEMA, & SIMULASI OCTAVE

### 4. (C4 - Menganalisis | Bobot: 20 Poin)

Sebuah motor induksi 3-fasa hubungan Y, 400 V (antar-saluran), 50 Hz, 4 kutub memiliki parameter rangkaian ekuivalen per-fasa: $R_1 = 0.32\ \Omega$, $X_1 = 0.78\ \Omega$, $R'_2 = 0.28\ \Omega$, $X'_2 = 0.78\ \Omega$, dan reaktansi magnetisasi $X_m = 28.0\ \Omega$.

(a) Hitung tegangan ekivalen Thevenin ($V_{th}$) dan impedansi Thevenin ($R_{th} + jX_{th}$) yang dilihat dari terminal celah udara rotor!

(b) Hitung nilai **torsi start awal** ($T_{start}$ pada $s = 1$), **slip kritis** ($s_{max}$), putaran saat torsi puncak ($n_{max}$), dan **torsi maksimum (*breakdown torque*)** $T_{max}$!

(c) Jika tegangan jala-jala pabrik mengalami penurunan (*voltage sag*) sebesar 15% menjadi 340 V saat beban mekanik konveyor meminta torsi konstan 210 Nm, analisislah berapa nilai $T'_{max}$ yang baru dan jelaskan apakah motor masih sanggup memutar beban atau mengalami kemacetan (*stall*) disertai bahaya terbakarnya belitan!

### 5. (C5 - Mengevaluasi | Bobot: 20 Poin)

Sebagai *Senior Mechanical & Reliability Engineer* di pabrik pengolahan mineral dan semen, evaluasilah pemilihan tipe motor induksi 3-fasa (**Sangkar Tupai NEMA Kelas B, Kelas C, Kelas D, atau Motor Rotor Belitan / *Slip-Ring***) yang paling tepat untuk tiga aplikasi kritis berikut:

(a) **Mesin Penghancur Batu Kapur Primer (*Primary Jaw Crusher*) & *Ball Mill* Semen (500 kW):** Inersia massa putar sangat besar, harus start dalam kondisi ruang giling penuh batu, dan jaringan listrik tambang memiliki kapasitas arus hubung-singkat terbatas.

(b) **Mesin Kempa Pembentuk Pelat Bodi Otomotif (*Heavy Stamping Punch Press*) dengan Roda Gila (*Flywheel*):** Membutuhkan pelepasan energi kinetik $\Delta E_k = \frac{1}{2}J(\omega_1^2 - \omega_2^2)$ dari *flywheel* saat langkah kempa tanpa memicu lonjakan arus listrik berlebihan.

(c) **Blower Menara Pendingin (*Cooling Tower Fan*) & Pompa Sirkulasi Air Bersih (30 kW):** Beroperasi kontinu 24 jam/hari (Duty S1), torsi awal sangat ringan ($T_L \propto n^2$), dan menuntut efisiensi energi tertinggi (slip sekecil mungkin).

Berikan justifikasi komprehensif berdasarkan kurva $T - s$, efisiensi termal $(1 - s)$, dan keandalan mekanis!

### 6. (C6 - Merancang & Komputasi Saintifik GNU Octave | Bobot: 15 Poin)

**(a) Perancangan Bank Resistor Eksternal Rotor Belitan ($R'_{ext}$):**

Berdasarkan motor pada Soal 4 ($R_{th} = 0.303\ \Omega$, $X_{th} + X'_2 = 1.539\ \Omega$, $R'_2 = 0.28\ \Omega$): (i) Rancang nilai tahanan luar rujukan stator ($R'_{ext}$) yang harus dipasang pada cincin geser agar **torsi start awal bernilai maksimum** ($T_{start} = T_{max}$ pada $s'_{max} = 1.0$); (ii) Hitung rasio kenaikan torsi start ($T_{start,\text{baru}}/T_{start,\text{awal}}$) dan penurunan arus start rotor berkat penambahan $R'_{ext}$ tersebut!

**(b) Pemodelan & Simulasi GNU Octave:**

Susun dan jalankan skrip **GNU Octave** (`simulasi_motor_induksi.m`) untuk memvalidasi karakteristik motor Soal 4 dan menghasilkan grafik `torsi_slip_induksi.png` (300 DPI) yang memuat: (i) Subplot (a): Kurva lengkap $T_e(n_r)$ beserta penanda titik kritis $T_{start}$, *Pull-up Torque*, $T_{max}$ pada $s_{max}$, dan titik operasi beban penuh ($T_L = 95$ Nm); (ii) Subplot (b): Keluarga kurva $T_e(n_r)$ untuk 4 nilai resistansi rotor ($R'_2 = 0.28,\ 0.55,\ 1.05,\ 1.80\ \Omega$) yang membuktikan bergesernya $s_{max}$ di sepanjang selubung $T_{max}$ konstan. Lampirkan kode program dan grafik hasil simulasi!

**Verifikasi Dosen / Asisten:**

( ..... )

Tanggal Pemeriksaan: .....

| C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 Pts | 15 Pts | 20 Pts | 20 Pts | 20 Pts | 15 Pts | 100 Pts |
| | | | | | | |

**Catatan Evaluasi & Umpan Balik Dosen Pengampu**

**Rubrik Pemeriksaan Pengerjaan Tugas Mandiri:**

☐ Konstruksi rotor, medan putar, & pemisahan $R'_2/s$ akurat (C1–C2)

☐ Analisis aliran daya, Thevenin, $T_{max}$, & *voltage sag* tepat (C3–C4)

☐ Evaluasi pemilihan kelas NEMA & *flywheel* tajam (C5)

☐ Desain $R'_{ext}$ & simulasi kurva torsi-slip GNU Octave valid (C6)