LEMBAR KERJA MAHASISWA (LKM 11 – EDISI LENGKAP)

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

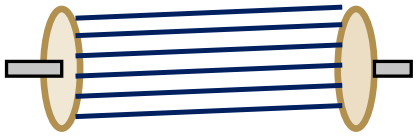
Topik Minggu 11: Medan Putar Stator, Slip, Rangkaian Ekuivalen IEEE, Aliran Daya, & Kelas NEMA

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

Capaian Pembelajaran (CPMK 5 / Minggu 11 – Bobot 8%) & Petunjuk Pengerjaan LKM Terstruktur

CPMK 5 (Sub-CPMK 11): Mahasiswa mampu menganalisis konstruksi motor induksi 3-fasa (*squirrel-cage* vs *wound-rotor*), mekanisme medan magnet putar stator (n_s), konsep slip (s) dan frekuensi rotor (f_r), rangkaian ekuivalen per-fasa IEEE, diagram aliran daya (*Sankey diagram*), serta pencocokan kurva torsi-slip dengan beban mekanik standar NEMA Kelas A–D.
Instruksi Kerja: Diskusikan dalam kelompok (2–3 orang). Tuliskan penurunan rumus dan analisis rekayasa secara sistematis pada kotak jawaban yang disediakan.

AKTIVITAS 1: KONSTRUKSI ROTOR, MEDAN PUTAR STATOR (n_s), & FREKUENSI ROTOR (f_r)



Rotor Sangkar Tupai (*Skewed Bars*)

1.1 Analisis Konstruksi Sangkar Tupai vs Rotor Belitan (C1–C2):

(a) Mengapa batang konduktor pada rotor sangkar tupai (*squirrel-cage*) dipasang **miring (*skewed*)** terhadap poros dan dihubung-singkat oleh cincin ujung (*end-rings*)?

(b) Mengapa motor induksi tidak mungkin menghasilkan torsi jika rotor berputar tepat pada kecepatan sinkron ($n_r = n_s \implies s = 0$)? Bagaimana cara paling praktis membalik arah putaran motor induksi 3-fasa di pabrik?

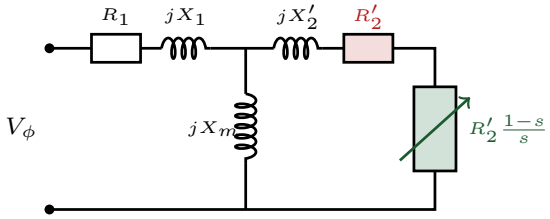
Jawaban Analisis Konstruksi Rotor, Kemiringan Alur (Skewing), & Prinsip Asinkron

1.2 Perhitungan Parameter Medan Putar, Slip (s), & Transformasi Frekuensi Rotor ($f_r = s \cdot f$) (C3):

Lengkapilah tabel operasi motor induksi 3-fasa di bawah ini untuk berbagai kondisi kerja dari keadaan diam (*locked-rotor*) hingga beban penuh!

Aplikasi Beban Mekanik	Frekuensi f	Kutub (p)	Putaran Sinkron n_s	Putaran Rotor n_r	Slip s (%)	Frekuensi Rotor f_r
Pompa Sentrifugal (Beban Penuh)	50 Hz	2	..... rpm	2910 rpm	.... %	..... Hz
Kompresor Udara (Beban Penuh)	50 Hz	4	..... rpm	1440 rpm	.... %	..... Hz
Konveyor Tambang (Saat Start Awal)	50 Hz	6	..... rpm	0 rpm (*Start*)	.... %	..... Hz
Blower Kapal Laut (Standar Maritim)	60 Hz	8	..... rpm	864 rpm	.... %	..... Hz

AKTIVITAS 2: RANGKAIAN EKUIVALEN PER-FASA IEEE & PEMISAHAN RESISTANSI ROTOR



2.1 Interpretasi Fisik Rangkaian Ekuivalen Per-Fasa (C2–C4):

Perhatikan rangkaian ekuivalen IEEE di samping. (a) Buktikan secara aljabar bagaimana resistansi rotor $\frac{R'_2}{s}$ dipecah menjadi resistansi rugi tembaga R'_2 dan resistansi beban mekanik ekivalen $R'_{mech} = R'_2 \frac{1-s}{s}$!

(b) Dari rumus tersebut, turunkan **Rasio Emas Aliran Daya** antara daya celah udara (P_{ag}), rugi tembaga rotor ($P_{cu,2}$), dan daya mekanik bangkitan (P_{conv})!

Penurunan Resistansi Ekivalen Mekanik & Rasio $P_{ag} : P_{cu,2} : P_{conv}$

AKTIVITAS 3: ANALISIS DIAGRAM SANKEY ALIRAN DAYA & TORSI POROS (C3–C4)

Studi Kasus Motor Induksi Penggerak Crusher Tambang:

Sebuah motor induksi 3-fasa hubungan Bintang (Y), 400 V (antar-saluran), 50 Hz, 6 kutub beroperasi pada beban penuh dengan slip $s = 4.5\%$. Motor menarik arus saluran $I_L = 36$ A pada faktor daya $\cos\theta = 0.84$ (*lagging*). Diketahui resistansi belitan stator per fasa $R_1 = 0.30\ \Omega$, rugi inti besi stator $P_{core} = 520$ W, serta rugi gesek, angin, dan beban liar mekanik total $P_{rot} = P_{f\&w} + P_{stray} = 480$ W.

3.1 Komputasi Neraca Aliran Daya Lengkap & Torsi Mekanik Poros:

Hitung secara berurutan: (a) Kecepatan sinkron (n_s), kecepatan rotor (n_r), dan frekuensi arus rotor (f_r); (b) Daya listrik masuk (P_{in}), rugi tembaga stator ($P_{cu,1} = 3I_1^2R_1$), dan daya celah udara (P_{ag}); (c) Rugi tembaga rotor ($P_{cu,2}$), daya mekanik bangkitan (P_{conv}), dan daya bersih poros (P_{out} dalam kW dan HP); (d) Torsi elektromagnetik bangkitan ($T_{dev} = P_{ag}/\omega_s$), torsi poros bersih ($T_{shaft} = P_{out}/\omega_m$), dan efisiensi motor ($\eta$)!

Langkah Perhitungan Diagram Aliran Daya, Torsi Bangkitan vs Torsi Poros, & Efisiensi

AKTIVITAS 4: KARAKTERISTIK TORSI-SLIP, DESAIN R_{ext}, & PEMILIHAN KELAS NEMA (C5–C6)

4.1 Perancangan Tahanan Luar Rotor Belitan (R_{ext}) untuk Torsi Start Maksimum:

Sebuah motor induksi rotor belitan (*wound-rotor*) 4-kutub, 50 Hz memiliki parameter Thevenin per-fasa $R_{th} = 0.25\ \Omega$, $X_{th} + X_2' = 1.50\ \Omega$, dan resistansi rotor internal $R_2' = 0.30\ \Omega$.

(a) Hitung slip tempat terjadinya torsi maksimum (s_{max}) dan kecepatan n_{max} tanpa resistor luar!

(b) Berapa nilai resistor luar rujukan stator (R_{ext}') yang harus disisipkan melalui cincin geser (*slip-ring*) agar **torsi start awal bernilai sama dengan torsi maksimum** ($T_{start} = T_{max} \implies s_{max}' = 1.0$)? Mengapa nilai puncak T_{max} tidak berubah saat R_{ext}' ditambahkan?

Perhitungan Slip Kritis (s_{max}) & Perancangan Resistor Luar R_{ext}' pada $s_{max}' = 1.0$

4.2 Keputusan Rekayasa Mesin: Pencocokan Beban Mekanik dengan Kelas Desain NEMA (A, B, C, D):

Pilih dan jelaskan alasan teknis pemilihan kelas motor sangkar tupai standar **NEMA (Kelas B, Kelas C, atau Kelas D)** untuk ketiga mesin di pabrik manufaktur berikut: (1) **Pompa Air Pendingin Sentrifugal**; (2) **Konveyor Sabuk Pengangkut Bijih Besi yang Start dalam Keadaan Bermuatan Penuh**; (3) **Mesin Kempa Baja (*Stamping Punch Press*) dengan Roda Gila (*Flywheel*)**!

Justifikasi Pemilihan Kelas NEMA (Kelas B, C, dan D) Terhadap Profil Torsi Beban Mekanik

Tanda Tangan Dosen / Asisten:

Akt. 1 (n_s, Slip, f_r)	Akt. 2 (Rangkaian IEEE)	Akt. 3 (Aliran Daya)	Akt. 4 (R_{ext} & NEMA)	Total Skor
20 Poin	20 Poin	35 Poin	25 Poin	100 Poin

(. . . . .)

Tanggal Pemeriksaan: . . . . . .