LEMBAR KERJA MAHASISWA (LKM 9 – GENERATOR SINKRON)

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

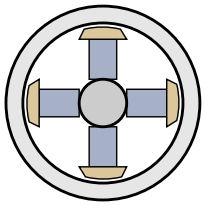
Topik Minggu 9: Konstruksi Alternator, Eksitasi Brushless & AVR, Analisis Fasor, & Operasi Paralel

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

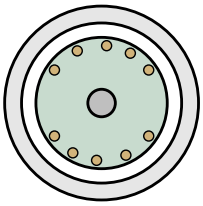
Capaian Pembelajaran (CPMK 5 / Minggu 9 – Bobot 6%) & Petunjuk Pengerjaan LKM

CPMK 5 (Sub-CPMK 9): Mahasiswa mampu menganalisis konstruksi rotor generator sinkron (*salient-pole* vs *cylindrical*), sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless exciter*) & AVR, rangkaian ekivalen per fasa, diagram fasor, regulasi tegangan ($VR\%$), serta pembagian beban operasi paralel (*Governor & AVR droop*).
Instruksi Kerja: Diskusikan dalam kelompok (2–3 orang). Tuliskan penurunan rumus dan analisis teknik secara sistematis pada kotak jawaban yang disediakan.

AKTIVITAS 1: KONSTRUKSI ROTOR, PERSAMAAN GGL, & SISTEM EKSITASI BRUSHLESS (C1–C2)



(A) Salient-Pole



(B) Cylindrical

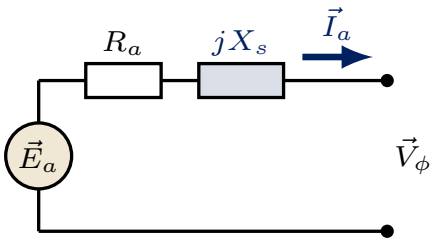
1.1 Analisis Geometri Rotor & Kecepatan Kritis Mekanis:
Perhatikan dua penampang rotor alternator di samping: **(A) Kutub Sepatu (*Salient-Pole*)** dan **(B) Silindris Pejal (*Non-Salient*)**. Jelaskan mengapa Turbogenerator Uap 3000 rpm di PLTU/PKS wajib menggunakan konstruksi (B) ditinjau dari tegangan mekanis gaya sentrifugal ($\sigma_c \propto \omega^2 r^2$) dan rugi gesek angin (*windage loss*), serta tentukan jumlah kutub p untuk putaran 3000 rpm dan 1500 rpm pada $f = 50$ Hz!

Ruang Jawaban Analisis Mekanikal Geometri Rotor & Hubungan Frekuensi-Kutub ($f = pn_s/120$)

1.2 Prinsip Lup Kendali *Brushless Excitation System* & AVR:
Jelaskan bagaimana arus eksitasi DC dapat mengalir ke belitan rotor utama tanpa menggunakan sikat karbon/cincin seret (*slip-ring*) melalui peran **AC Exciter** dan **Rotating Diode Rectifier** satu poros, serta jelaskan respons **AVR** ketika beban induktif pabrik tiba-tiba masuk!

Ruang Jawaban Alur Eksitasi Tanpa Sikat (Brushless) & Mekanisme Umpan Balik AVR

AKTIVITAS 2: RANGKAIAN EKIVALEN PER FASA & DIAGRAM FASOR (C3–C4)



2.1 Persamaan Tegangan & Lukisan Fasor Tiga Kondisi Beban:
(a) Berdasarkan rangkaian ekivalen per fasa di samping, tuliskan persamaan fasor $\vec{E}_a$ dan rumus skalarnya untuk beban *Lagging* ($\cos\phi$ tertinggal) vs *Leading* ($\cos\phi$ mendahului)!
(b) Gambarkan sketsa diagram fasor ($\vec{V}_\phi, \vec{I}_a, I_a R_a, jI_a X_s, \vec{E}_a$) untuk beban **Lagging** dan beban **Leading**, lalu buktikan secara grafis mengapa beban *Leading* menghasilkan regulasi tegangan negatif ($VR < 0$)!

Perumusan Rangkaian Ekivalen & Sketsa Diagram Fasor (Lagging vs Leading)

AKTIVITAS 3: STUDI KASUS TURBOGENERATOR UAP PABRIK KELAPA SAWIT / PKS (C3–C4)

Data Teknis Turbogenerator Uap (*Back-Pressure Steam Turbine*) PKS Bengkulu:
Sebuah generator sinkron 3-fasa terhubung Bintang (Y), kapasitas nominal $S_{\text{nom}} = 1500$ kVA, tegangan terminal $V_{LL} = 400$ V, frekuensi 50 Hz, 4 kutub memiliki resistansi jangkar $R_a = 0.004\ \Omega$/fasa dan reaktansi sinkron $X_s = 0.036\ \Omega$/fasa. Pada beban puncak pabrik pengolahan sawit, generator menyuplai arus beban penuh pada faktor daya $\cos\phi = 0.8$ lagging. Rugi-rugi mekanis (gesek bantalan + angin), inti besi, dan eksitasi total adalah $P_{\text{rot+core}} = 28$ kW.

3.1 Analisis Tegangan Induksi, Regulasi Tegangan, Sudut Torsi, & Torsi Poros Turbin Uap:

(a) Hitung kecepatan putar poros turbin n_s (rpm), tegangan fasa V_ϕ (V), dan arus jangkar beban penuh I_a (A)!
(b) Hitung GGL induksi per fasa E_a (dan nilai antarfasa E_{LL}), sudut torsi δ (derajat), serta persentase regulasi tegangan $VR(\%)$!
(c) Hitung daya aktif keluar P_{out} (kW), rugi tembaga stator 3-fasa P_{cu} (kW), daya mekanik poros turbin uap $P_{\text{in,shaft}}$ (kW), efisiensi generator η (%), serta **torsi mekanik poros turbin** T_{shaft} (Nm)!

Langkah Perhitungan Lengkap Turbogenerator Uap 1500 kVA PKS

AKTIVITAS 4: SINKRONISASI PARALEL & PEMBAGIAN BEBAN GOVERNOR-AVR DROOP (C5–C6)

4.1 Evaluasi Kegagalan Sinkronisasi & Proteksi Daya Balik (*Reverse Power Relay* ANSI 32):

(a) Sebutkan **4 syarat mutlak sinkronisasi** sebelum menutup *Circuit Breaker* (CB) paralel, dan evaluasi apa dampak mekanis pada kopling/poros turbin apabila CB ditutup saat jarum *Synchroscope* berada di posisi pukul 06:00 ($\Delta\delta = 180°$)!
(b) Mengapa ketika katup uap turbin G_2 tiba-tiba tertutup (kehilangan penggerak mula saat masih paralel di busbar), generator berubah menjadi motor (*motoring*) dan membahayakan sudu turbin uap karena pemanasan gesek uap (*windage overheating*)?

Evaluasi Bahaya Penutupan CB di Luar Fasa & Fenomena Motoring pada Turbin Uap

4.2 Perancangan Setelan *Governor Speed Droop* untuk Pembagian Beban Paralel (C6):

Turbogenerator Uap (G_1, kapasitas 1200 kW, $f_{nl,1} = 51.5$ Hz, frekuensi beban penuh 50.0 Hz) diparalelkan dengan Genset Diesel (G_2, kapasitas 600 kW, $f_{nl,2} = 51.2$ Hz, frekuensi beban penuh 50.0 Hz) untuk memikul beban total pabrik $P_{\text{load}} = 1140$ kW. Hitung: (a) Konstanta kemiringan governor s_{P1} dan s_{P2} (kW/Hz); (b) Frekuensi kerja bersama f_{sys} (Hz) serta daya P_1 dan P_2 (kW); (c) Berapa frekuensi tanpa beban baru $f'_{nl,2}$ yang harus disetel pada Governor Genset Diesel agar frekuensi sistem tepat menjadi 50.50 Hz?

Perhitungan Pembagian Beban Paralel & Desain Set-Point Governor ($f'_{nl,2}$)

Tanda Tangan Dosen / Asisten:

Akt. 1 (Konstruksi/AVR)	Akt. 2 (Sirkit/Fasor)	Akt. 3 (PKS 1500 kVA)	Akt. 4 (Paralel/Droop)	Total Skor
20 Poin	20 Poin	35 Poin	25 Poin	100 Poin

(. . . . .)
Tanggal Pemeriksaan: . . . . . .