PROBLEM SET 14 (TUGAS MANDIRI TERSTRUKTUR – EDISI LENGKAP)

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

Topik Minggu 14: Dapur Pemanas Resistif, Pemanas Induksi (*Skin Depth*), & Fotometri Pabrik

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

Capaian Pembelajaran (CPMK 6 / Minggu 14 – Bobot 5%) & Pedoman Pengerjaan Tugas Mandiri

CPMK 6 (Sub-CPMK 14): Mahasiswa mampu memahami prinsip konversi energi listrik menjadi termal dan optik, menghitung kebutuhan daya dapur pemanas resistif 3-fasa, menganalisis kedalaman kulit (*skin depth*) pemanasan induksi, merancang tata cahaya bengkel mesin (Metode Lumen), serta menyusun simulasi berbasis GNU Octave.
Ketentuan Pengerjaan: Kerjakan secara mandiri pada kertas A4 rapi. Sertakan penurunan rumus analitis lengkap serta lampirkan kode program dan grafik keluaran simulasi GNU Octave (Soal C6).

BAGIAN I: KONVERSI ELEKTRO-TERMAL, ELEMEN PEMANAS, & FOTOMETRI INDUSTRI

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

(a) Sebutkan komposisi kimia utama, mekanisme pembentukan lapisan oksida pelindung (*self-passivating oxide layer*), dan batas temperatur kerja maksimum dari keempat material elemen pemanas industri berikut: (i) **Nichrome (NiCr)**; (ii) **Kanthal (FeCrAl)**; (iii) **Silicon Carbide (SiC)**; dan (iv) **Molybdenum Disilicide ($MoSi_2$)**!

(b) Definisikan keempat besaran fotometri berikut beserta simbol dan satuan SI-nya: **Fluks Luminus**, **Intensitas Cahaya**, **Iluminansi**, dan **Efikasi Luminus**, serta sebutkan standar iluminansi minimum SNI/K3 untuk area *gudang*, *pengelasan kasar*, dan *bengkel pemesinan presisi CNC*!

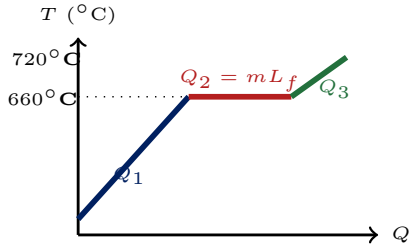
2. (C2 - Memahami | Bobot: 15 Poin)

(a) Buktikan secara matematis mengapa pemindahan hubungan 3 elemen pemanas identik pada jala-jala 3-fasa dari **Hubung Bintang (Y)** ke **Hubung Segitiga (Δ)** meningkatkan daya pemanasan menjadi tepat **3 kali lipat** ($P_\Delta = 3P_Y$)!

(b) Jelaskan prinsip fisis **Pemanasan Induksi Elektromagnetik** (peran arus pusar *eddy current* dan efek kulit *skin effect*), serta mengapa metode ini sangat ideal untuk pengerasan permukaan roda gigi (*gear surface hardening*) dibanding dapur pemanas konvensional!

(c) Jelaskan mekanisme terjadinya **Efek Stroboskopik** pada bengkel mesin bubut/frais dan bagaimana cara menghindarinya!

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



Sebuah dapur peleburan listrik digunakan untuk melebur **800** kg paduan aluminium dari suhu ruang $T_0 = 25°C$ hingga mencapai suhu tuang cair (*pouring temperature*) $T_f = 720°C$ dalam waktu target **90** menit. Data termofisika aluminium: titik lebur $T_m = 660°C$, kalor jenis padat $c_{p,s} = 0.90$ kJ/(kg · K), kalor laten lebur $L_f = 397$ kJ/kg, dan kalor jenis cair $c_{p,l} = 1.08$ kJ/(kg · K). Efisiensi termal dapur adalah $\eta_{th} = 72\%$.
Hitung: (a) Kalor sensibel padat (Q_1), kalor laten peleburan (Q_2), kalor sensibel pemanasan lanjut cair (Q_3), dan kalor total teoritis Q_{th} (dalam MJ dan kWh); (b) Energi listrik total (E_{elec}, kWh) dan daya elektrik dapur (P_{elec}, kW) yang diperlukan; (c) Nilai resistansi R tiap fasa jika dapur menggunakan 3 grup elemen pemanas dalam **Hubung Segitiga (Δ)** pada tegangan jala-jala 3-fasa $V_{LL} = 380$ V!

FORMULA RUJUKAN TEKNIS ELEKTRO-TERMAL & FOTOMETRI INDUSTRI (SNI 03-6575 / IEC 60519)

- Pemanasan Joule: $Q = I^2Rt$, $R(T) = R_0[1 + \alpha_T(T - T_0)]$; Kalor Lebur: $Q_{th} = mc_{p,s}(T_m - T_0) + mL_f + mc_{p,l}(T_f - T_m)$, $P_{elec} = \frac{Q_{th}}{\eta_{th} \cdot t}$
- Bank Pemanas 3-Fasa: $P_Y = \frac{V_{LL}^2}{R}$, $P_\Delta = \frac{3V_{LL}^2}{R} = 3P_Y$; Kedalaman Kulit Induksi: $\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}}$ ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)
- Fotometri & Metode Lumen: $\eta_L = \frac{\Phi}{P}$ (lm/W), $E = \frac{\Phi_{terima}}{A}$ (Lux), Jumlah Armatur: $N = \frac{E \cdot A}{n \cdot \Phi_{\text{lamp}} \cdot CU \cdot LLF}$

BAGIAN II: ANALISIS INDUKSI, EVALUASI LIFE-CYCLE COST, & SIMULASI OCTAVE

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

Sebuah mesin pemanas induksi digunakan untuk mengeraskan permukaan poros baja karbon ($\rho = 2.2 \times 10^{-7}\ \Omega \cdot \text{m}$). (a) Pada awal pemanasan (suhu di bawah titik Curie 770°C, sifat feromagnetik kuat dengan $\mu_r = 120$), hitung frekuensi kerja inverter f (kHz) yang harus dipilih agar kedalaman kulit arus pusar tepat $\delta_1 = 0.60$ mm!

(b) Analisislah apa yang terjadi pada kedalaman kulit δ_2 ketika permukaan poros melampaui suhu Curie 770°C (baja berubah menjadi paramagnetik non-magnetik dengan $\mu_r = 1$ dan resistivitas naik menjadi $\rho_{panas} = 1.1 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{m}$) pada frekuensi yang sama! Mengapa fenomena peningkatan δ secara mendadak di atas titik Curie ini justru menguntungkan untuk mencegah peleburan berlebih di lapisan luar poros?

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

Sebuah pabrik manufaktur komponen otomotif memiliki gedung perakitan dan pemesinan presisi seluas $A = 1.200\ \text{m}^2$ (60 m × 20 m) yang membutuhkan iluminansi $E = 500$ Lux ($CU = 0.65$, $LLF = 0.80$) dan beroperasi 4.000 jam/tahun selama periode evaluasi 10 tahun (40.000 jam). Tarif listrik industri adalah Rp 1.500/kWh. Evaluasilah dua kandidat sistem pencahayaan berikut:

- **Opsi A (Lampu Metal Halide 400 W):** Efikasi 90 lm/W ($\Phi = 36.000$ lm), umur lampu 20.000 jam, harga per unit Rp 650.000.
- **Opsi B (Industrial High-Bay LED 200 W):** Efikasi 160 lm/W ($\Phi = 32.000$ lm), umur lampu 50.000 jam, harga per unit Rp 1.400.000.

Hitung jumlah lampu N, biaya investasi awal, biaya penggantian lampu, total biaya energi listrik 10 tahun, serta **Total Biaya Siklus Hidup (*Life-Cycle Cost / LCC*)** untuk kedua opsi, lalu berikan rekomendasi rekayasa Anda!

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

(a) Perancangan Kawat Elemen Pemanas Kanthal (FeCrAl):

Rancang panjang (l, meter) dan diameter (d, mm) pita/kawat silinder elemen pemanas Kanthal A-1 ($\rho = 1.45 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{m}$ yang konstan terhadap suhu) untuk satu cabang pemanas berdaya 10 kW pada tegangan 220 V, dengan batasan rapat daya permukaan kawat (*surface watt density*) tidak melebihi $w_s = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot l} = 2.5\ \text{W/cm}^2$ ($2.5 \times 10^4\ \text{W/m}^2$)!

(b) Pemodelan & Simulasi GNU Octave:

Susun dan jalankan skrip **GNU Octave** (`simulasi_motor1fasa_dan_termal.m`) yang menghasilkan figur `profil_pemanas_furnace.png` beresolusi 300 DPI: (i) Subplot 1: Memplot profil kenaikan temperatur transien $T(t)$ tungku perlakuan panas baja 500 kg (25°C → 850°C) untuk konfigurasi Hubung Delta (90 kW), Standar (60 kW), Isolasi Aus ($\eta_{th} = 58\%$), dan Hubung Star (30 kW); (ii) Subplot 2: Memplot perbandingan Efikasi Luminus (lm/W) dan Biaya Siklus Hidup 50.000 Jam untuk lampu Halogen, TL-T8, HID/HPS, dan High-Bay LED. Lampirkan kode dan grafik!

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

Verifikasi Dosen / Asisten:

(.....)

Tanggal Pemeriksaan: .....

Catatan Evaluasi & Umpan Balik Dosen Pengampu

Rubrik Pemeriksaan Pengerjaan Tugas Mandiri:

☐ Penguasaan material elemen pemanas, Y/Δ, & fotometri akurat (C1–C2)
☐ Evaluasi *Life-Cycle Cost* pencahayaan pabrik komprehensif (C5)
☐ Perhitungan kalor lebur & *skin depth* tepat (C3–C4)
☐ Desain dimensi kawat Kanthal & simulasi Octave valid (C6)