Teknik Tenaga Listrik

Minggu 14 (Bab 14): Konversi Energi Listrik ke Termal & Optik Industri

Dapur Pemanas Resistif, Pemanas Induksi (*Skin Depth*), Busur Listrik, & Perancangan Fotometri Pabrik

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 14 (CPMK 6 – Bobot 5%)

1. Pemanasan Resistif Joule & Dapur Perlakuan Panas Industri
2. Pemanasan Induksi (Skin Depth) & Dapur Busur Listrik (EAF)
3. Fotometri Industri, Metode Lumen, & Standar Pencahayaan K3/SNI



Capaian Pembelajaran Perkuliahan Minggu 14 (CPMK 6)

Setelah menyelesaikan perkuliahan Bab 14 ini, mahasiswa mampu:

1. **C1 (Mengingat):** Mengidentifikasi material elemen pemanas industri (NiCr, FeCrAl/Kanthal, SiC, $MoSi_2$) beserta batas suhunya, serta besaran dasar fotometri (Φ, I, E, η_L).
2. **C2 (Memahami):** Menjelaskan Hukum Pemanasan Joule, prinsip pemanasan induksi arus pusar (*eddy current*), kedalaman kulit (*skin depth* δ), dan efek stroboskopik di bengkel mesin.
3. **C3 (Menerapkan):** Menghitung kebutuhan daya elektrik dapur perlakuan panas (kalor sensibel & laten), rasio daya elemen pemanas 3-fasa Bintang vs Segitiga ($P_\Delta = 3P_Y$), serta jumlah lampu dengan Metode Lumen.
4. **C4 (Menganalisis):** Menganalisis pengaruh frekuensi induksi terhadap ketebalan pengerasan permukaan roda gigi (*surface hardening*) dan efisiensi termal tungku.
5. **C5 (Mengevaluasi):** Mengevaluasi keekonomian siklus hidup (*Life-Cycle Cost*) teknologi pencahayaan pabrik dan pemenuhan standar K3/SNI.
6. **C6 (Merancang):** Merancang sistem pemanas tungku industri dan tata cahaya bengkel CNC serta menyusun simulasinya dalam **GNU Octave**.



Peran Vital Elektro-Termal & Optik dalam Rekayasa Manufaktur

1. Proses Termal Metalurgi & Manufaktur

- **Perlakuan Panas (Heat Treatment):** *Annealing*, *austenitizing/hardening* (850°C), dan *tempering* komponen mesin dengan kendali suhu presisi ± 1°C.
- **Pengerasan Permukaan Roda Gigi:** Pemanasan induksi frekuensi tinggi mengeraskan gigi luar tanpa merusak keuletan inti poros.
- **Pengecoran & Peleburan:** Dapur Busur Listrik (*Electric Arc Furnace*) dan Dapur Induksi.

2. Ergonomi Optik & Keselamatan K3 Bengkel

- Akurasi pembacaan vernier/mikrometer dan keselamatan operator mesin bubut/CNC sangat bergantung pada **Iluminansi (E, Lux)**.
- Pencahayaan pabrik menyumbang 15%–25% tagihan listrik fasilitas manufaktur.
- Pemilihan lampu yang salah memicu **bahaya ilusi stroboskopik** (spindel berputar cepat tampak diam!).

Hukum Pemanasan Resistif Joule & Koefisien Temperatur

Hukum Joule-Lenz & Kesetaraan Energi

Energi panas yang dibangkitkan oleh arus listrik I yang mengalir melalui konduktor bertahanan R selama waktu t:

$$Q_{elec} = I^2 R t = \frac{V^2}{R} t \quad \text{[Joule]}$$

- **Konversi Satuan Rekayasa:**

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 3600 \text{ kJ} \approx 860 \text{ kkal}$$

- Dimensi geometri kawat elemen pemanas:

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{4\rho l}{\pi d^2}$$

Ketergantungan Resistansi pada Suhu

$$R(T) = R_0 \Big[1 + \alpha_T (T - T_0) \Big]$$

Syarat Mutlak Material Elemen Pemanas:

1. Resistivitas (ρ) tinggi agar panjang kawat tidak berlebihan.
2. Titik lebur sangat tinggi & membentuk lapisan oksida pelindung (*self-passivating*).
3. Koefisien suhu α_T kecil agar arus start dingin tidak melonjak ekstrem.



Material Elemen Pemanas Industri & Batas Temperatur Kerja

Pemilihan material elemen pemanas ditentukan oleh temperatur target dapur dan atmosfer tungku:

Nama Material	Komposisi Utama	Suhu Maks.	Lapisan Pelindung	Aplikasi Dapur Industri
1. Nichrome (Ni-Cr)	80% Ni, 20% Cr	**1150**°C	Kromium Oksida (Cr_2O_3)	Oven *tempering*, *annealing* baja, pemanas udara/air industri.
2. Kanthal (Fe-CrAl)	72% Fe, 22% Cr, 5.8% Al, 0.2% Co	**1400**°C	Alumina (Al_2O_3) tahan korosi	Tungku *hardening/austenitizing* baja karbon & baja perkakas.
3. Silicon Carbide (SiC)	Keramik SiC padat (*Glowbar*)	**1600**°C	Silika (SiO_2) kaca tipis	Dapur tempa suhu tinggi, peleburan aluminium/tembaga, keramik.
4. Molybdenum Disilicide ($MoSi_2$)	Keramik-logam (*Cermet*) $MoSi_2$	**1800**°C	Kuarsa SiO_2 murni (*self-healing*)	Sintering metalurgi serbuk, laboratorium riset material maju.



Neraca Energi Termal (Sensibel & Laten) pada Dapur Listrik

1. Kebutuhan Kalor Teoritis (Q_{th})

Untuk memanaskan benda kerja bermassa m (kg) dari suhu awal T_0 hingga melewati titik lebur T_m menuju suhu cair T_f:

$$Q_{th} = \underbrace{m \cdot c_{p,s}(T_m - T_0)}_{\text{Kalor Sensibel Padat}} + \underbrace{m \cdot L_f}_{\text{Kalor Laten Lebur}} + \underbrace{m \cdot c_{p,l}(T_f -}_{\text{Kalor Sensibel C}}$$

(Jika hanya perlakuan panas padat seperti *hardening*: $Q_{th} = m \cdot c_p \cdot \Delta T$).

2. Daya Listrik terpasang (P_{elec})

Memperhitungkan efisiensi termal tungku $\eta_{th} \in [0.60, 0.85]$ (rugi konduksi dinding bata tahan api & radiasi bukaan pintu) dalam waktu target t (detik):

$$P_{elec} = \frac{Q_{th}}{\eta_{th} \cdot t} \quad [\text{kW}]$$

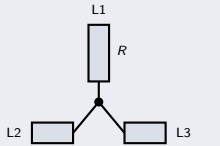
$$E_{elec} = \frac{Q_{th}\ [\text{kJ}]}{3600 \cdot \eta_{th}} \quad [\text{kWh}]$$



Konfigurasi Bank Elemen Pemanas 3-Fasa: Bintang (Y) vs Segitiga (Δ)

Tungku industri berdaya besar menggunakan 3 grup elemen pemanas identik (masing-masing beresistansi R) yang dicatu jala-jala 3-fasa $V_{LL} = 380$ V. Pengaturan daya pemanasan dilakukan dengan saklar kontaktor Y/Δ:

1. Hubung Bintang / Star (Y) – *Holding Mode*

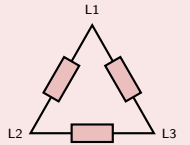


Tegangan tiap elemen: $V_{ph} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}}$

$$P_Y = 3 \times \frac{(V_{LL}/\sqrt{3})^2}{R} = \frac{\mathbf{V_{LL}^2}}{\mathbf{R}}$$

Digunakan saat **menahan suhu (soaking/holding)**.

2. Hubung Segitiga / Delta (Δ) – *Boost Mode*



Tegangan tiap elemen penuh: $V_{ph} = V_{LL}$

$$P_\Delta = 3 \times \frac{V_{LL}^2}{R} = \mathbf{3 \cdot P_Y}$$

Daya pemanasan melonjak **3 KALI LIPAT** untuk menaikkan suhu tungku secara cepat!

Pemanasan Induksi (*Induction Heating*) & Kedalaman Kulit (δ)

Fisika Arus Pusar (*Eddy Current*) & *Skin Effect*

Kumparan tembaga berpendingin air dialiri arus AC frekuensi tinggi (f), menginduksikan arus pusar pekat di permukaan benda kerja logam. Arus terkonsentrasi pada **Kedalaman Kulit (Skin Depth, δ)**:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad \text{[meter]}$$

- ρ: Resistivitas listrik logam ($\Omega \cdot \text{m}$)
- f: Frekuensi arus inverter (Hz)
- $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; μ_r: Permeabilitas relatif

Aplikasi: *Surface Hardening* Roda Gigi

- **Frekuensi Tinggi (**100–400 **kHz):** $\delta \approx 0.5$–1.2 mm $\rightarrow$ Mengeraskan permukaan gigi roda gigi (*gear teeth*) menjadi martensit tahan aus, sedangkan **inti roda gigi tetap ulet** menahan beban impak!
- **Frekuensi Menengah (**1–10 **kHz):** $\delta \approx 3$–8 mm $\rightarrow$ Pemanasan tembus (*through-heating*) batang tempa (*forging billet*).

Dapur Busur Listrik (*Electric Arc Furnace*) & Pemanas Radiasi

1. Dapur Busur Listrik (*EAF*)

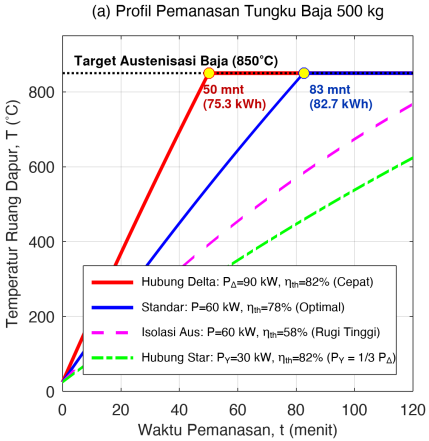
- Menggunakan **3 elektroda grafit raksasa** yang diturunkan mendekati muatan skrap baja.
- Busur plasma listrik (*electric arc*) bersuhu **3000**°C–**3500**°C melebur puluhan ton baja dalam waktu < 60 menit.
- Dicatu oleh transformator tanur bertegangan sekunder rendah (200–900 V) namun berarus luar biasa besar (30.000–80.000 A).

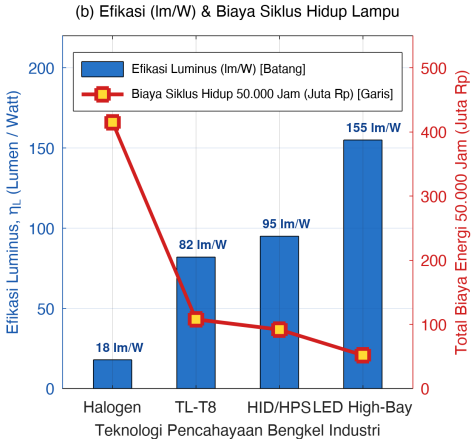
2. Pemanasan Inframerah & Dielektrik

- **Inframerah (Infrared Heating):** Transfer panas radiasi elektromagnetik ($\lambda = 0.78$–$10\ \mu$m) tanpa memanaskan udara sekitar. Sangat efisien untuk pengeringan cat bodi otomotif (*powder coating curing*).
- **Pemanasan Dielektrik (HF):** Medan listrik frekuensi tinggi (13.56–27.12 MHz) untuk pemanasan isolator (perekat kayu lapis, pengelasan plastik PVC, pengeringan tekstil).



Visualisasi Simulasi Octave: Dapur Baja & Efikasi Lampu Pabrik





Analisis Grafik: (a) Hubung Delta (90 kW) mencapai suhu austenisasi 850°C dalam 50 menit dengan konsumsi energi total lebih hemat dibanding pemanasan lambat karena waktu rugi panas dinding lebih singkat; (b) Transisi ke *High-Bay LED* (155 lm/W) memangkas biaya siklus hidup 50.000 jam secara drastis.

Besaran Dasar Fotometri & Teknologi Lampu Industri

4 Besaran Kunci Fotometri Teknik

1. **Fluks Luminus (Φ, Lumen – lm):** Laju total pancaran cahaya tampak dari sumber lampu.
2. **Intensitas Cahaya (I, Candela – cd):** Fluks luminus per satuan sudut ruang ($I = d\Phi/d\omega$).
3. **Iluminansi (E, Lux – lx $= \mathbf{lm/m^2}$):** Kerapatan fluks cahaya yang jatuh tegak lurus pada meja kerja mesin:

$$E = \frac{\Phi_{\text{terima}}}{A} \quad [\text{Lux}]$$

4. **Efikasi Luminus (η_L, lm/W):** $\eta_L = \frac{\Phi}{P_{listrik}}$.

Komparasi Efikasi & Umur Lampu

Jenis Lampu	Efikasi (lm/W)	Umur (Jam)
Pijar / Halogen	12–22	1.000–2.000
Fluorescent TL-T8	75–90	12.000–15.000
Metal Halide / HPS	85–110	15.000–24.000
High-Bay LED	**140–170**	**50.000–70.000**

Keunggulan LED Industri: Nyala instan (*instant restrike*), bebas merkuri, indeks renderasi warna tinggi (CRI > 80).



Perancangan Tata Cahaya (Metode Lumen) & Standar K3/SNI

Metode Lumen (*Zonal Cavity Method*)

Jumlah armatur lampu (N) untuk mencapai target iluminansi rata-rata E (lux) pada lantai bengkel seluas $A = p \times l$ (m^2):

$$N = \frac{E \cdot A}{n_{\text{lampu/armatur}} \cdot \Phi_{\text{lampu}} \cdot CU \cdot LLF}$$

- *CU* **(Coefficient of Utilization):** Efisiensi optik ruang & pantulan dinding (0.55–0.75).
- *LLF* **(Light Loss Factor):** Faktor penyusutan akibat debu/jelaga bengkel & penuaan lampu (0.70–0.85).

Standar SNI 03-6575 / K3 & Bahaya Stroboskopik

- **Gudang Material / Koridor:** $\geq$ 100 Lux
- **Pengelasan & Pemesinan Kasar:** $\geq$ 200–300 Lux
- **Bubut Presisi, Milling, & CNC:** $\geq$ **500** Lux
- **Metrologi & Inspeksi Kualitas:** $\geq$ **750–1000** Lux
- **Bahaya Stroboskopik:** Kedipan lampu 100 Hz yang sefrekuensi dengan kelipatan RPM chuck mesin bubut membuat poros berputar tampak berhenti! **Solusi:** Gunakan *driver* LED DC bebas kedip (*flicker-free*) atau bagi lampu pada fasa R-S-T.

Kasus Rekayasa Termal & Optik Manufaktur

Kasus A (Termal): Sebuah dapur pemanas *hardening* memanaskan 500 kg roda gigi baja ($c_p = 0.50$ kJ/kg $\cdot$ K) dari 25°C ke 850°C dalam waktu 60 menit dengan efisiensi termal tungku $\eta_{th} = 75\%$. Hitung daya elektrik P_{elec} yang dibutuhkan!

Kasus B (Optik): Gedung bengkel CNC berukuran 30 m $\times$ 20 m membutuhkan iluminansi standar K3 sebesar $E = 500$ lux. Jika digunakan armatur *High-Bay LED* 150 W dengan efikasi 150 lm/W ($CU = 0.65$, $LLF = 0.80$), hitung jumlah armatur lampu N dan daya listrik pencahayaan total!

Solusi Kasus A (Dapur Perlakuan Panas):

- Kalor sensibel baja:
  $Q_{th} = 500 \times 0.50 \times (850 - 25) = \mathbf{206.250}$ kJ
- Energi listrik masuk ($\eta_{th} = 0.75$):
  $E_{elec} = \frac{206.250}{3600 \times 0.75} = \mathbf{76.39}$ kWh
- Daya pemanas untuk target $t = 1$ jam (3600 s):
  $P_{elec} = \frac{206.250 \text{ kJ}}{0.75 \times 3600 \text{ s}} = \mathbf{76.39}$ kW

Solusi Kasus B (Tata Cahaya Bengkel CNC):

- Luas bengkel: $A = 30 \times 20 = 600$ m^2.
- Fluks per armatur LED:
  $\Phi_{lamp} = 150 \text{ W} \times 150 \text{ lm/W} = \mathbf{22.500}$ lm.
- Jumlah armatur (Metode Lumen):
  $N = \frac{500 \times 600}{1 \times 22.500 \times 0.65 \times 0.80} = \frac{300.000}{11.700} = 25.64 \implies \mathbf{26}$ unit
  (susunan matriks 2×13 atau $4 \times 7 = 28$ unit).
- Daya total (26 unit): 26×150 W $= \mathbf{3.90}$ kW.



Rangkuman Eksekutif Minggu 14 & Penugasan Terstruktur

Poin Kunci Elektro-Termal & Optik Industri

1. **Dapur Pemanas Resistif:** Pemilihan elemen (NiCr 1150°C, Kanthal 1400°C, SiC 1600°C, $MoSi_2$ 1800°C) dan kendali daya Y/Δ ($P_\Delta = 3P_Y$).
2. **Pemanasan Induksi:** Kedalaman kulit $\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}$ memungkinkan pengerasan permukaan roda gigi secara selektif.
3. **Rekayasa Pencahayaan:** Metode Lumen ($N = \frac{E \cdot A}{\Phi \cdot CU \cdot LLF}$), standar K3 (500 lux untuk CNC), dan mitigasi bahaya stroboskopik.

Penugasan Minggu 14 & Menuju UAS

- **LKM 14:** Perancangan dapur pemanas Y/Δ, *skin depth* roda gigi, & desain lampu bengkel.
- **Problem Set 14 (C1–C6):** Analisis termal-optik & simulasi **GNU Octave**.
- **Minggu 15:** Kapita Selekta, Audit Energi Pabrik, & Presentasi Proyek.
- **Minggu 16: UAS** (Materi Minggu 9 s.d. 15).

Program Studi S-1 Teknik Mesin FT UNIB