

Desain Menara Pendingin

Persamaan Merkel

Persamaan Merkel merupakan persamaan fundamental dalam desain menara pendingin. Persamaan ini menghubungkan karakteristik menara dengan driving force perpindahan kalor dan massa.

Bentuk Integral Merkel:

$$KaV/L = \int (T_2 \text{ to } T_1) [Cpw \, dT / (H^* - H)]$$

Dimana:

- KaV/L = Karakteristik menara (m^2/m^3 atau satuan lain)
- K = Koefisien perpindahan massa keseluruhan ($kg/m^2 \cdot s$)
- a = Luas permukaan kontak per volume (m^2/m^3)
- V = Volume menara (m^3)
- L = Laju massa air (kg/s)
- Cpw = Panas spesifik air ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
- H^* = Entalpi udara jenuh pada temperatur air (kJ/kg)
- H = Entalpi udara aktual (kJ/kg)

Bentuk NTU (Number of Transfer Units):

$$NTU = KaV/L$$

NTU merupakan parameter penting yang menggambarkan kesulitan perpindahan kalor dan massa. Semakin besar NTU, semakin besar menara yang diperlukan.

Metode Chebyshev untuk Integrasi Numerik

Karena integral Merkel tidak dapat diselesaikan secara analitis, digunakan metode numerik. Metode Chebyshev 4-titik adalah yang paling umum:

$$KaV/L = (T_1 - T_2)/4 \times \Sigma [Cpw/(H^* - H)]_i$$

Dengan titik evaluasi pada temperatur:

- $T_1' = T_1 - 0.1 \times (T_1 - T_2)$
- $T_2' = T_1 - 0.4 \times (T_1 - T_2)$
- $T_3' = T_1 - 0.6 \times (T_1 - T_2)$
- $T_4' = T_1 - 0.9 \times (T_1 - T_2)$

Dimana:

- KaV/L = Karakteristik menara (m^2/m^3 atau satuan lain)
- K = Koefisien perpindahan massa keseluruhan ($kg/m^2 \cdot s$)
- a = Luas permukaan kontak per volume (m^2/m^3)
- V = Volume menara (m^3)
- L = Laju massa air (kg/s)
- Cpw = Panas spesifik air ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
- H^* = Entalpi udara jenuh pada temperatur air (kJ/kg)
- H = Entalpi udara aktual (kJ/kg)
- T_1 = Temperatur air masuk menara pendingin ($^\circ C$)
- T_2 = Temperatur air keluar menara pendingin ($^\circ C$)

Rasio Air-Udara (L/G)

Rasio L/G sangat mempengaruhi kinerja menara pendingin:

$$L/G = Cpw \times (T_1 - T_2)/(H_2 - H_1)$$

Nilai L/G tipikal berkisar 0.75 - 1.5 untuk menara pendingin counterflow.

Perhitungan Entalpi Udara

Entalpi udara lembab dapat dihitung dengan:

$$H = C_{pa} \times T + W \times (\lambda + C_{pv} \times T)$$

Dimana:

- C_{pa} = Panas spesifik udara kering $\approx 1.005 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$
- T = Temperatur udara ($^\circ\text{C}$)
- W = Kelembaban absolut (kg uap air/kg udara kering)
- λ = Kalor laten penguapan air $\approx 2501 \text{ kJ/kg}$ pada 0°C
- C_{pv} = Panas spesifik uap air $\approx 1.88 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$

Kelembaban Absolut:

$$W = 0.622 \times P_v / (P - P_v)$$

Dimana:

- P_v = Tekanan parsial uap air (kPa)
- P = Tekanan total atmosfer (kPa)

Untuk udara jenuh:

$$W^* = 0.622 \times P_{sat}(T) / (P - P_{sat}(T))$$

Penggunaan Diagram Psikrometrik

Diagram psikrometrik adalah alat grafis yang sangat berguna dalam analisis menara pendingin. Diagram ini menampilkan hubungan antara berbagai properti udara lembab:

- Temperatur dry bulb (sumbu horizontal)
- Kelembaban absolut (sumbu vertikal)
- Temperatur wet bulb (garis miring)
- Kelembaban relatif (kurva)
- Entalpi (garis miring)
- Volume spesifik

Langkah Penggunaan:

1. Tentukan kondisi udara masuk (T_{db} dan T_{wb} atau RH)
2. Baca entalpi H_1 dan kelembaban W_1
3. Tentukan kondisi udara keluar berdasarkan neraca energi
4. Baca entalpi H_2 dan kelembaban W_2

PROSEDUR DESAIN MENARA PENDINGIN

6.1 Data yang Diperlukan

Untuk mendesain menara pendingin, diperlukan data:

Data Proses:

- Laju alir air yang harus didinginkan (L)
- Temperatur air masuk (T_1)
- Temperatur air keluar yang diinginkan (T_2)
- Beban kalor yang harus dibuang

Data Lingkungan:

- Temperatur dry bulb udara (T_{db})
- Temperatur wet bulb udara (T_{wb}) atau kelembaban relatif
- Tekanan atmosfer

Data Desain:

- Jenis menara (counterflow/crossflow)
- Jenis media packing
- Karakteristik packing (KaV/L vs L/G)

6.2 Langkah-Langkah Desain

Langkah 1: Hitung Beban Kalor

$$Q = L \times C_{pw} \times (T_1 - T_2)$$

Langkah 2: Tentukan Kondisi Udara Masuk Dari T_{db} dan T_{wb} , tentukan:

- Kelembaban absolut W_1
- Entalpi H_1

Langkah 3: Asumsikan Rasio L/G Nilai awal: $L/G \approx 1.0 - 1.2$

Langkah 4: Hitung Laju Alir Udara

$$G = L / (L/G)$$

Langkah 5: Hitung Entalpi Udara Keluar

$$H_2 = H_1 + (L/G) \times C_{pw} \times (T_1 - T_2)$$

Langkah 6: Hitung KaV/L dengan Metode Chebyshev

Tentukan 4 titik temperatur:

- $T_1' = T_1 - 0.1(T_1 - T_2)$
- $T_2' = T_1 - 0.4(T_1 - T_2)$
- $T_3' = T_1 - 0.6(T_1 - T_2)$
- $T_4' = T_1 - 0.9(T_1 - T_2)$

Untuk setiap titik, hitung H^* (entalpi udara jenuh pada temperatur tersebut).

Hitung H pada setiap titik menggunakan interpolasi linear:

$$H = H_1 + (T - T_2)/(T_1 - T_2) \times (H_2 - H_1)$$

Hitung:

$$KaV/L = (T_1 - T_2)/4 \times [Cpw/(H^*_1 - H_1) + Cpw/(H^*_2 - H_2) + Cpw/(H^*_3 - H_3) + Cpw/(H^*_4 - H_4)]$$

Langkah 7: Tentukan Volume Menara Dari karakteristik packing yang dipilih, tentukan KaV/L pada L/G tertentu.

$$V = (KaV/L)_{\text{desain}} \times L/Ka$$

Langkah 8: Tentukan Dimensi Menara

Untuk counterflow tower:

- Tentukan kecepatan superfisial udara (biasanya 2-3 m/s)
- Hitung luas penampang: $A = G/(\rho_{\text{udara}} \times v)$
- Hitung tinggi packing: $Z = V/A$

CONTOH KASUS PERHITUNGAN DESAIN

CONTOH SOAL 1: Desain Menara Pendingin untuk Kondenser Pabrik Kimia

Data Soal:

Sebuah pabrik kimia memerlukan menara pendingin untuk mendinginkan air panas dari kondenser. Data yang tersedia:

Data Air:

- Laju alir air (L) = 50,000 kg/jam
- Temperatur air masuk (T_1) = 40°C
- Temperatur air keluar yang diinginkan (T_2) = 30°C

Data Udara Ambient:

- Temperatur dry bulb (T_{db}) = 28°C
- Temperatur wet bulb (T_{wb}) = 24°C
- Tekanan atmosfer = 101.325 kPa

Data Tambahan:

- Panas spesifik air (C_{pw}) = 4.187 kJ/kg·°C
- Jenis menara: Counterflow mechanical draft
- Asumsikan $L/G = 1.0$

Ditanya:

a) Hitung beban kalor yang harus dibuang b) Hitung laju alir udara yang diperlukan c) Hitung karakteristik menara (KaV/L) menggunakan metode Chebyshev 4-titik d) Tentukan approach dan range e) Hitung efektivitas menara pendingin

PENYELESAIAN:

a) Beban Kalor

$$Q = L \times C_{pw} \times (T_1 - T_2)$$

$$Q = 50,000 \text{ kg/jam} \times 4.187 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \times (40 - 30)^\circ\text{C}$$

$$Q = 50,000 \times 4.187 \times 10$$

$$Q = 2,093,500 \text{ kJ/jam}$$

$$Q = 581.53 \text{ kW}$$

Beban kalor yang harus dibuang = 2,093,500 kJ/jam atau 581.53 kW

b) Laju Alir Udara

Dengan $L/G = 1.0$:

$$G = L/(L/G) = 50,000/1.0 = 50,000 \text{ kg udara kering/jam}$$

c) Perhitungan Entalpi Udara

Udara Masuk ($T_{db} = 28^\circ\text{C}$, $T_{wb} = 24^\circ\text{C}$):

Dari tabel psikrometrik atau perhitungan:

- Kelembaban relatif (RH) $\approx 63\%$
- Tekanan uap jenuh pada 28°C : $P_{sat} = 3.782 \text{ kPa}$
- Tekanan uap parsial: $P_v = 0.63 \times 3.782 = 2.383 \text{ kPa}$

Kelembaban absolut:

$$W_1 = 0.622 \times P_v / (P - P_v)$$

$$W_1 = 0.622 \times 2.383 / (101.325 - 2.383)$$

$$W_1 = 1.482 / 98.942$$

$$W_1 = 0.01498 \text{ kg uap/kg udara kering}$$

Entalpi udara masuk:

$$H_1 = C_{pa} \times T + W_1 \times (\lambda_0 + C_{pv} \times T)$$

$$H_1 = 1.005 \times 28 + 0.01498 \times (2501 + 1.88 \times 28)$$

$$H_1 = 28.14 + 0.01498 \times (2501 + 52.64)$$

$$H_1 = 28.14 + 0.01498 \times 2553.64$$

$$H_1 = 28.14 + 38.25$$

$$H_1 = 66.39 \text{ kJ/kg udara kering}$$

Udara Keluar:

Dari neraca energi:

$$H_2 = H_1 + (L/G) \times C_{pw} \times (T_1 - T_2)$$

$$H_2 = 66.39 + 1.0 \times 4.187 \times (40 - 30)$$

$$H_2 = 66.39 + 41.87$$

$$H_2 = 108.26 \text{ kJ/kg udara kering}$$

d) Perhitungan KaV/L dengan Metode Chebyshev

Titik-titik evaluasi:

$$T_1' = T_1 - 0.1(T_1 - T_2) = 40 - 0.1(10) = 39^\circ\text{C}$$

$$T_2' = T_1 - 0.4(T_1 - T_2) = 40 - 0.4(10) = 36^\circ\text{C}$$

$$T_3' = T_1 - 0.6(T_1 - T_2) = 40 - 0.6(10) = 34^\circ\text{C}$$

$$T_4' = T_1 - 0.9(T_1 - T_2) = 40 - 0.9(10) = 31^\circ\text{C}$$

Untuk setiap titik, hitung H (entalpi udara jenuh):*

Titik 1 ($T = 39^\circ\text{C}$):

- $P_{\text{sat}}(39^\circ\text{C}) = 7.090 \text{ kPa}$
- $W^* = 0.622 \times 7.090 / (101.325 - 7.090) = 0.04678 \text{ kg/kg}$
- $H^*_1 = 1.005 \times 39 + 0.04678 \times (2501 + 1.88 \times 39)$
- $H^*_1 = 39.195 + 0.04678 \times 2574.32$
- $H^*_1 = 39.195 + 120.43 = 159.63 \text{ kJ/kg}$

Titik 2 ($T = 36^\circ\text{C}$):

- $P_{\text{sat}}(36^\circ\text{C}) = 5.947 \text{ kPa}$
- $W^* = 0.622 \times 5.947 / (101.325 - 5.947) = 0.03880 \text{ kg/kg}$
- $H^*_2 = 1.005 \times 36 + 0.03880 \times (2501 + 1.88 \times 36)$
- $H^*_2 = 36.180 + 0.03880 \times 2568.68$
- $H^*_2 = 36.180 + 99.66 = 135.84 \text{ kJ/kg}$

Titik 3 ($T = 34^\circ\text{C}$):

- $P_{\text{sat}}(34^\circ\text{C}) = 5.324 \text{ kPa}$
- $W^* = 0.622 \times 5.324 / (101.325 - 5.324) = 0.03451 \text{ kg/kg}$
- $H^*_3 = 1.005 \times 34 + 0.03451 \times (2501 + 1.88 \times 34)$
- $H^*_3 = 34.170 + 0.03451 \times 2564.92$
- $H^*_3 = 34.170 + 88.49 = 122.66 \text{ kJ/kg}$

Titik 4 ($T = 31^\circ\text{C}$):

- $P_{\text{sat}}(31^\circ\text{C}) = 4.496 \text{ kPa}$
- $W^* = 0.622 \times 4.496 / (101.325 - 4.496) = 0.02887 \text{ kg/kg}$
- $H^*_4 = 1.005 \times 31 + 0.02887 \times (2501 + 1.88 \times 31)$
- $H^*_4 = 31.155 + 0.02887 \times 2559.28$
- $H^*_4 = 31.155 + 73.89 = 105.04 \text{ kJ/kg}$

Hitung H pada setiap titik (interpolasi linear):

$$H = H_1 + (T - T_2) / (T_1 - T_2) \times (H_2 - H_1)$$

Titik 1 (T = 39°C):

$$H_1' = 66.39 + (39 - 30)/(40 - 30) \times (108.26 - 66.39)$$

$$H_1' = 66.39 + 0.9 \times 41.87 = 66.39 + 37.68 = 104.07 \text{ kJ/kg}$$

Titik 2 (T = 36°C):

$$H_2' = 66.39 + (36 - 30)/(40 - 30) \times 41.87$$

$$H_2' = 66.39 + 0.6 \times 41.87 = 66.39 + 25.12 = 91.51 \text{ kJ/kg}$$

Titik 3 (T = 34°C):

$$H_3' = 66.39 + (34 - 30)/(40 - 30) \times 41.87$$

$$H_3' = 66.39 + 0.4 \times 41.87 = 66.39 + 16.75 = 83.14 \text{ kJ/kg}$$

Titik 4 (T = 31°C):

$$H_4' = 66.39 + (31 - 30)/(40 - 30) \times 41.87$$

$$H_4' = 66.39 + 0.1 \times 41.87 = 66.39 + 4.19 = 70.58 \text{ kJ/kg}$$

Hitung driving force dan sumasi:

$$1/(H^*_1 - H_1') = 1/(159.63 - 104.07) = 1/55.56 = 0.0180$$

$$1/(H^*_2 - H_2') = 1/(135.84 - 91.51) = 1/44.33 = 0.0226$$

$$1/(H^*_3 - H_3') = 1/(122.66 - 83.14) = 1/39.52 = 0.0253$$

$$1/(H^*_4 - H_4') = 1/(105.04 - 70.58) = 1/34.46 = 0.0290$$

$$\text{Jumlah: } \Sigma[1/(H^* - H)] = 0.0180 + 0.0226 + 0.0253 + 0.0290 = 0.0949$$

Karakteristik Menara:

$$KaV/L = (T_1 - T_2)/4 \times C_{pw} \times \Sigma[1/(H^* - H)]$$

$$KaV/L = (40 - 30)/4 \times 4.187 \times 0.0949$$

$$KaV/L = 2.5 \times 4.187 \times 0.0949$$

$$KaV/L = 0.993$$

Karakteristik menara KaV/L = 0.993

e) Approach, Range, dan Efektivitas

Range:

$$\text{Range} = T_1 - T_2 = 40 - 30 = 10^\circ\text{C}$$

Approach:

$$\text{Approach} = T_2 - T_{wb} = 30 - 24 = 6^\circ\text{C}$$

Efektivitas:

$$\eta = (T_1 - T_2)/(T_1 - T_{wb}) \times 100\%$$

$$\eta = (40 - 30)/(40 - 24) \times 100\%$$

$$\eta = 10/16 \times 100\%$$

$$\eta = 62.5\%$$

Estimasi Volume Menara:

Jika menggunakan packing dengan karakteristik $K_a = 2.0 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ (nilai tipikal untuk packing modern):

$$V = (K_a V/L) \times L/K_a$$

$$V = 0.993 \times (50,000/3600)/2.0$$

$$V = 0.993 \times 13.89/2.0$$

$$V = 6.90 \text{ m}^3$$

Untuk menara counterflow dengan kecepatan superfisial udara 2.5 m/s dan densitas udara $\approx 1.15 \text{ kg/m}^3$:

Estimasi Dimensi Menara:

Asumsi: Packing dengan $K_a = 2.0 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ (packing modern, efisiensi tinggi)

Volume Packing:

$$V = (K_a V/L) \times L/K_a$$

$$V = 0.993 \times (50,000/3600)/2.0$$

$$V = 0.993 \times 13.89/2.0$$

$$V = 6.90 \text{ m}^3$$

Kecepatan Superfisial Udara: 2.5 m/s (standar untuk counterflow)

Laju Volumetrik Udara:

$$Q_{\text{udara}} = G/(\rho_{\text{udara}} \times 3600)$$

$$Q_{\text{udara}} = 50,000/(1.15 \times 3600)$$

$$Q_{\text{udara}} = 12.08 \text{ m}^3/\text{s}$$

Luas Penampang:

$$A = Q_{\text{udara}}/v$$

$$A = 12.08/2.5$$

$$A = 4.83 \text{ m}^2$$

Tinggi Packing:

$$Z = V/A$$

$$Z = 6.90/4.83$$

$$Z = 1.43 \text{ m}$$

Dimensi Menara (persegi):

- **Panjang × Lebar:** 2.20 m × 2.20 m
- **Tinggi packing:** 1.43 m
- **Tinggi total menara** (termasuk distribusi, drift eliminator, basin): $\approx 3.5\text{-}4.0 \text{ m}$

Estimasi Konsumsi Air:

Evaporasi:

$$E \approx 0.001 \times L \times \text{Range}$$

$$E = 0.001 \times 50,000 \times 10$$

$$E = 500 \text{ kg/jam} = 12 \text{ ton/hari}$$

Drift Loss (dengan drift eliminator modern):

$$D = 0.0002 \times 50,000 = 10 \text{ kg/jam}$$

Blowdown (COC = 4):

$$B = E/(\text{COC}-1) = 500/3 = 167 \text{ kg/jam}$$

Makeup Water Total:

$$M = E + D + B = 500 + 10 + 167 = 677 \text{ kg/jam} \approx 16.2 \text{ ton/hari}$$

Estimasi Biaya Operasional (per tahun):

Power Fan (asumsi 5 kW, operasi 8000 jam/tahun):

Energi = $5 \text{ kW} \times 8000 \text{ jam} = 40,000 \text{ kWh/tahun}$

Biaya listrik ($\text{Rp } 1,500/\text{kWh}$) = $\text{Rp } 60,000,000/\text{tahun}$

Makeup Water ($16.2 \text{ ton/hari} \times 365 \text{ hari}$):

Volume = $5,913 \text{ m}^3/\text{tahun}$

Biaya air ($\text{Rp } 5,000/\text{m}^3$) = $\text{Rp } 29,565,000/\text{tahun}$

Water Treatment (chemical):

Estimasi = $\text{Rp } 20,000,000/\text{tahun}$

Total Biaya Operasional $\approx \text{Rp } 110,000,000/\text{tahun}$

Evaluasi Desain:

✓ **Approach = 6°C → SANGAT BAIK**

- Berada dalam rentang ekonomis ($3\text{-}6^\circ\text{C}$)
- Tidak terlalu kecil (biaya investasi wajar)
- Tidak terlalu besar (efisiensi cukup tinggi)

✓ **Efektivitas = 62.5% → DAPAT DITERIMA**

- Berada dalam rentang normal ($60\text{-}75\%$)
- Menunjukkan kinerja menara yang cukup baik
- Masih ada ruang untuk optimasi jika diperlukan

✓ **Rasio L/G = 1.0 → OPTIMAL**

- Nilai tipikal untuk counterflow tower ($0.75\text{-}1.5$)
- Memberikan keseimbangan antara ukuran menara dan konsumsi energi

Interpretasi Engineering:

 **Dari sisi teknis:** Desain ini sangat feasible dan optimal untuk aplikasi pabrik kimia dengan beban kalor 581.53 kW .

 **Dari sisi ekonomis:** Approach 6°C memberikan balance terbaik antara CAPEX (investasi awal) dan OPEX (biaya operasional).

 **Dari sisi operasional:** Dimensi yang kompak ($2.2\text{m} \times 2.2\text{m}$) memudahkan instalasi dan maintenance.

 **Dari sisi energi:** L/G ratio = 1.0 mengoptimalkan konsumsi energi fan.

💧 **Dari sisi sustainability:** Konsumsi air 16.2 ton/hari dapat dikurangi dengan meningkatkan COC melalui water treatment yang lebih baik.

Rekomendasi Desain:

1. **Jenis Menara:** Counterflow Mechanical Draft dengan induced draft fan
2. **Jenis Packing:** Film fill (PVC/PP) untuk efisiensi tinggi
3. **Material Konstruksi:** FRP (Fiber Reinforced Plastic) atau concrete
4. **Sistem Distribusi:** Pressure nozzle system untuk distribusi merata
5. **Drift Eliminator:** Wave-type dengan efisiensi $\geq 99.95\%$
6. **Fan Motor:** VFD (Variable Frequency Drive) untuk efisiensi energi

KESIMPULAN SOAL 1:

Menara pendingin dengan spesifikasi hasil perhitungan di atas **LAYAK dan OPTIMAL** untuk mendinginkan 50,000 kg/jam air dari 40°C menjadi 30°C pada kondisi ambient $T_{db}=28^{\circ}\text{C}$ dan $T_{wb}=24^{\circ}\text{C}$. Desain ini memberikan keseimbangan terbaik antara kinerja teknis, efisiensi ekonomis, dan kemudahan operasional.

CONTOH SOAL 2: Evaluasi Kinerja Menara Pendingin

Data Soal:

Sebuah menara pendingin counterflow eksisting di pembangkit listrik memiliki spesifikasi berikut:

Data Menara:

- Volume packing (V) = 120 m^3
- Luas penampang (A) = 40 m^2
- Karakteristik packing: $KaV/L = 1.5$ pada $L/G = 1.2$
- Tinggi packing = 3.0 m

Kondisi Operasi:

- Laju alir air (L) = $180,000 \text{ kg/jam}$
- Temperatur air masuk (T_1) = 45°C
- Temperatur air keluar terukur (T_2) = 32°C

Data Udara Ambient:

- Temperatur dry bulb (T_{db}) = 30°C
- Temperatur wet bulb (T_{wb}) = 26°C
- Tekanan atmosfer = 101.325 kPa

Ditanya:

a) Verifikasi apakah menara beroperasi sesuai desain b) Hitung laju alir udara aktual c) Evaluasi efektivitas menara d) Jika temperatur air keluar yang diinginkan adalah 30°C , berapa laju alir air maksimum yang dapat ditangani?

PENYELESAIAN:

a) Verifikasi Operasi terhadap Desain

Dari karakteristik menara yang diberikan: $KaV/L = 1.5$ pada $L/G = 1.2$

Hitung KaV untuk menara ini:

$$KaV = (KaV/L) \times L$$

$$KaV = 1.5 \times 180,000$$

$$KaV = 270,000 \text{ kg/jam}$$

Perhitungan Entalpi Udara Masuk:

Pada $T_{db} = 30^{\circ}\text{C}$, $T_{wb} = 26^{\circ}\text{C}$:

- Dari tabel/perhitungan: $RH \approx 65\%$
- $P_{sat}(30^{\circ}\text{C}) = 4.246 \text{ kPa}$
- $P_v = 0.65 \times 4.246 = 2.760 \text{ kPa}$

$$W_1 = 0.622 \times 2.760 / (101.325 - 2.760)$$

$$W_1 = 1.717 / 98.565$$

$$W_1 = 0.01742 \text{ kg/kg udara kering}$$

$$H_1 = 1.005 \times 30 + 0.01742 \times (2501 + 1.88 \times 30)$$

$$H_1 = 30.15 + 0.01742 \times 2557.4$$

$$H_1 = 30.15 + 44.55$$

$$H_1 = 74.70 \text{ kJ/kg udara kering}$$

Dari $L/G = 1.2$, hitung G :

$$G = L / (L/G) = 180,000 / 1.2 = 150,000 \text{ kg/jam}$$

Hitung H_2 dari neraca energi:

$$H_2 = H_1 + (L/G) \times C_{pw} \times (T_1 - T_2)$$

$$H_2 = 74.70 + 1.2 \times 4.187 \times (45 - 32)$$

$$H_2 = 74.70 + 1.2 \times 4.187 \times 13$$

$$H_2 = 74.70 + 65.32$$

$$H_2 = 140.02 \text{ kJ/kg udara kering}$$

Perhitungan KaV/L dengan Metode Chebyshev:

$$\text{Range} = 45 - 32 = 13^{\circ}\text{C}$$

Titik evaluasi:

$$T_1' = 45 - 0.1(13) = 43.7^{\circ}\text{C}$$

$$T_2' = 45 - 0.4(13) = 39.8^{\circ}\text{C}$$

$$T_3' = 45 - 0.6(13) = 37.2^{\circ}\text{C}$$

$$T_4' = 45 - 0.9(13) = 33.3^{\circ}\text{C}$$

Entalpi udara jenuh pada setiap titik:

$$T = 43.7^{\circ}\text{C}:$$

- $P_{\text{sat}} \approx 8.67 \text{ kPa}$
- $W^* = 0.622 \times 8.67 / (101.325 - 8.67) = 0.05822 \text{ kg/kg}$
- $H^*_1 = 1.005 \times 43.7 + 0.05822 \times (2501 + 1.88 \times 43.7)$
- $H^*_1 = 43.92 + 0.05822 \times 2583.16 = 43.92 + 150.39 = 194.31 \text{ kJ/kg}$

$$T = 39.8^{\circ}\text{C}:$$

- $P_{\text{sat}} \approx 7.30 \text{ kPa}$
- $W^* = 0.622 \times 7.30 / (101.325 - 7.30) = 0.04829 \text{ kg/kg}$
- $H^*_2 = 1.005 \times 39.8 + 0.04829 \times (2501 + 1.88 \times 39.8)$
- $H^*_2 = 40.00 + 0.04829 \times 2575.82 = 40.00 + 124.39 = 164.39 \text{ kJ/kg}$

$$T = 37.2^{\circ}\text{C}:$$

- $P_{\text{sat}} \approx 6.40 \text{ kPa}$
- $W^* = 0.622 \times 6.40 / (101.325 - 6.40) = 0.04192 \text{ kg/kg}$
- $H^*_3 = 1.005 \times 37.2 + 0.04192 \times (2501 + 1.88 \times 37.2)$
- $H^*_3 = 37.39 + 0.04192 \times 2570.94 = 37.39 + 107.77 = 145.16 \text{ kJ/kg}$

$$T = 33.3^{\circ}\text{C}:$$

- $P_{\text{sat}} \approx 5.14 \text{ kPa}$
- $W^* = 0.622 \times 5.14 / (101.325 - 5.14) = 0.03325 \text{ kg/kg}$
- $H^*_4 = 1.005 \times 33.3 + 0.03325 \times (2501 + 1.88 \times 33.3)$
- $H^*_4 = 33.47 + 0.03325 \times 2563.60 = 33.47 + 85.24 = 118.71 \text{ kJ/kg}$

Entalpi udara aktual (interpolasi):

$$H = H_1 + (T - T_2) / (T_1 - T_2) \times (H_2 - H_1)$$

$$T = 43.7^{\circ}\text{C}:$$

$$H_1' = 74.70 + (43.7 - 32) / (45 - 32) \times (140.02 - 74.70)$$

$$H_1' = 74.70 + (11.7 / 13) \times 65.32 = 74.70 + 58.79 = 133.49 \text{ kJ/kg}$$

$$T = 39.8^{\circ}\text{C}:$$

$$H_2' = 74.70 + (39.8 - 32) / 13 \times 65.32$$

$$H_2' = 74.70 + (7.8 / 13) \times 65.32 = 74.70 + 39.19 = 113.89 \text{ kJ/kg}$$

$$T = 37.2^{\circ}\text{C}:$$

$$H_3' = 74.70 + (37.2 - 32)/13 \times 65.32$$

$$H_3' = 74.70 + (5.2/13) \times 65.32 = 74.70 + 26.13 = 100.83 \text{ kJ/kg}$$

$$T = 33.3^\circ\text{C}:$$

$$H_4' = 74.70 + (33.3 - 32)/13 \times 65.32$$

$$H_4' = 74.70 + (1.3/13) \times 65.32 = 74.70 + 6.53 = 81.23 \text{ kJ/kg}$$

Driving force:

$$1/(H^*_1 - H_1') = 1/(194.31 - 133.49) = 1/60.82 = 0.01644$$

$$1/(H^*_2 - H_2') = 1/(164.39 - 113.89) = 1/50.50 = 0.01980$$

$$1/(H^*_3 - H_3') = 1/(145.16 - 100.83) = 1/44.33 = 0.02256$$

$$1/(H^*_4 - H_4') = 1/(118.71 - 81.23) = 1/37.48 = 0.02668$$

$$\Sigma = 0.01644 + 0.01980 + 0.02256 + 0.02668 = 0.08548$$

KaV/L aktual:

$$\text{KaV/L} = (T_1 - T_2)/4 \times \text{Cpw} \times \Sigma[1/(H^* - H)]$$

$$\text{KaV/L} = 13/4 \times 4.187 \times 0.08548$$

$$\text{KaV/L} = 3.25 \times 4.187 \times 0.08548$$

$$\text{KaV/L} = 1.163$$

Perbandingan dengan Desain:

- KaV/L desain = 1.5
- KaV/L aktual = 1.163
- Deviasi = $(1.5 - 1.163)/1.5 \times 100\% = 22.5\%$

Kesimpulan: Menara beroperasi di bawah kapasitas desain. Hal ini bisa disebabkan oleh:

- Fouling pada packing
- Distribusi air tidak merata
- Karakteristik udara berbeda dari desain
- Degradasi packing

b) Laju Alir Udara Aktual

$$G = L/(L/G) = 180,000/1.2 = 150,000 \text{ kg/jam}$$

$$G = 41.67 \text{ kg/s}$$

Verifikasi kecepatan superfisial:

$$\text{Laju volumetrik} = G/\rho_{\text{udara}} = 150,000/(1.15 \times 3600) = 36.23 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Kecepatan} = 36.23/40 = 0.906 \text{ m/s}$$

Kecepatan ini lebih rendah dari tipikal 2-3 m/s, mengindikasikan kemungkinan fan tidak beroperasi optimal.

c) Evaluasi Efektivitas

Range:

$$\text{Range} = 45 - 32 = 13^\circ\text{C}$$

Approach:

$$\text{Approach} = T_2 - T_{wb} = 32 - 26 = 6^\circ\text{C}$$

Efektivitas:

$$\eta = (T_1 - T_2)/(T_1 - T_{wb}) \times 100\%$$

$$\eta = (45 - 32)/(45 - 26) \times 100\%$$

$$\eta = 13/19 \times 100\%$$

$$\eta = 68.4\%$$

Efektivitas 68.4% masih dalam rentang yang baik (60-75%).

d) Laju Alir Maksimum untuk $T_2 = 30^\circ\text{C}$

Target: $T_1 = 45^\circ\text{C}$, $T_2 = 30^\circ\text{C}$, Range baru = 15°C

Dengan menara yang sama ($KaV/L = 1.5$ pada desain):

Menggunakan karakteristik desain dan kondisi udara sama:

- $H_1 = 74.70 \text{ kJ/kg}$ (sama)
- $L/G = 1.2$ (pertahankan)

neraca energi:

$$H_2 = H_1 + (L/G) \times C_{pw} \times (T_1 - T_2)$$

$$H_2 = 74.70 + 1.2 \times 4.187 \times 15$$

$$H_2 = 74.70 + 75.37$$

$$H_2 = 150.07 \text{ kJ/kg}$$

Metode Chebyshev untuk Range = 15°C:

Titik evaluasi:

$$T_1' = 45 - 0.1(15) = 43.5^\circ\text{C}$$

$$T_2' = 45 - 0.4(15) = 39.0^\circ\text{C}$$

$$T_3' = 45 - 0.6(15) = 36.0^\circ\text{C}$$

$$T_4' = 45 - 0.9(15) = 31.5^\circ\text{C}$$

(Perhitungan H^* sama seperti sebelumnya untuk temperatur yang mirip)

Dari analisis, untuk mencapai $KaV/L = 1.5$ dengan kondisi baru:

$$L = KaV / (KaV/L)$$

$$L = 270,000 / 1.5$$

$$L = 180,000 \text{ kg/jam}$$

Namun, dengan range yang lebih besar (15°C vs 13°C), beban kalor lebih besar:

$$Q = L \times C_{pw} \times \Delta T$$

$$Q = L \times 4.187 \times 15$$

Untuk kapasitas menara yang sama, laju alir harus dikurangi:

$$L_{\text{max}} = L_{\text{existing}} \times (\text{Range}_{\text{existing}} / \text{Range}_{\text{new}})$$

$$L_{\text{max}} = 180,000 \times (13/15)$$

$$L_{\text{max}} \approx 156,000 \text{ kg/jam}$$

KESIMPULAN SOAL 2:

1. **Verifikasi operasi:** Menara beroperasi 22.5% di bawah kapasitas desain (KaV/L aktual = 1.163 vs desain = 1.5)
2. **Laju alir udara:** 150,000 kg/jam (41.67 kg/s) dengan kecepatan superfisial rendah (0.906 m/s)
3. **Efektivitas:** 68.4% (masih dalam rentang baik)
4. **Laju alir maksimum untuk $T_2 = 30^\circ\text{C}$:** Sekitar 156,000 kg/jam (pengurangan 13.3%)