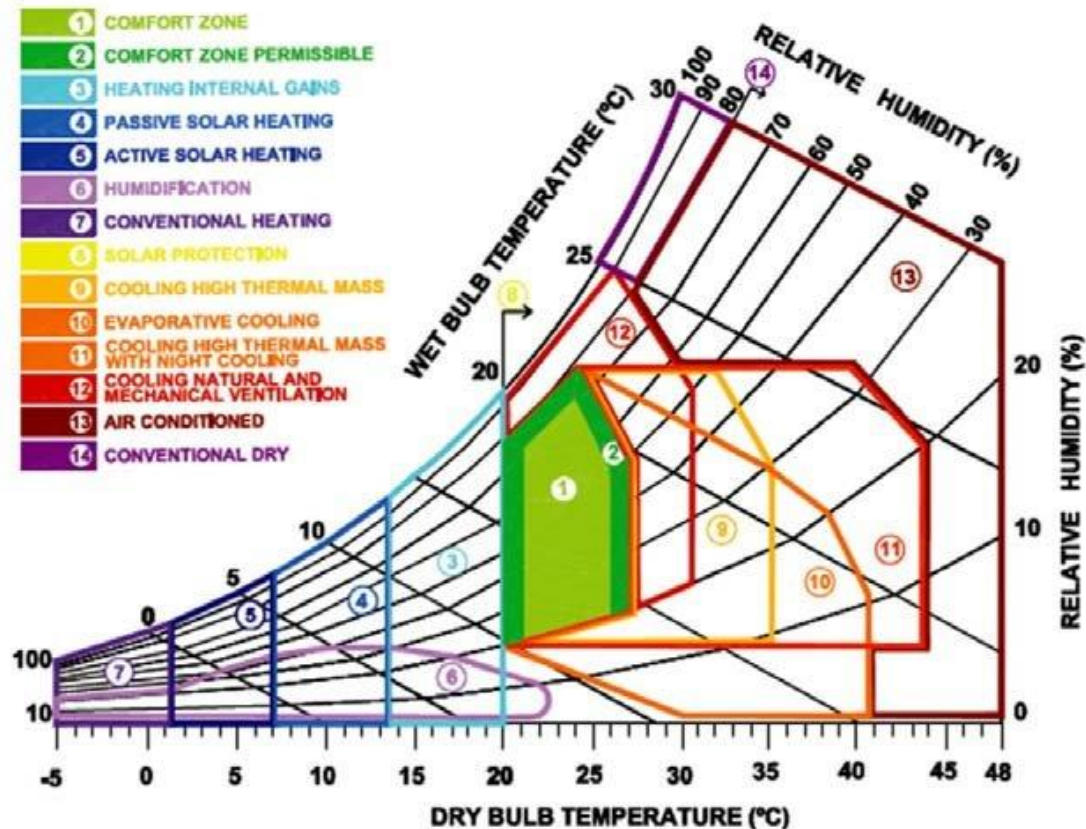


# HUMIDIFIKASI- MENARA PENDINGIN

Dew point,  
relative humidity,  
wet bulb temperature,  
pendinginan adiabatik



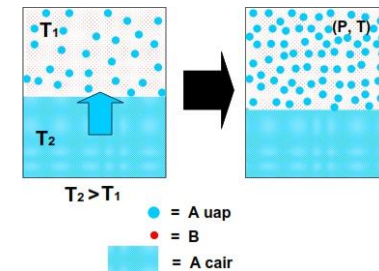
# PENGERTIAN HUMIDIFIKASI

**Humidifikasi** adalah proses perpindahan/penguapan cairan (A) ke dalam campuran [gas (B) dan uap cairan (A)] karena adanya kontak antara cairan (A) (yang temperaturnya lebih tinggi) dengan campurannya.

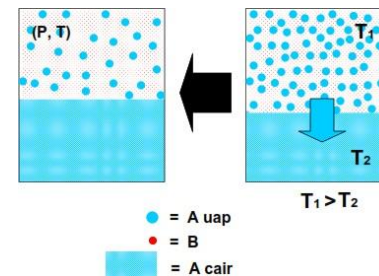
**Dehumidifikasi** adalah proses perpindahan/pengembunan uap cairan (A) dari campuran [uap air (A) dan gas (B)] karena proses pendinginan maupun kontak antara cairan (A) (yang temperaturnya lebih rendah) dengan campurannya.

*Syarat : gas B tidak melarut ke dalam cairan A*

## Humidifikasi

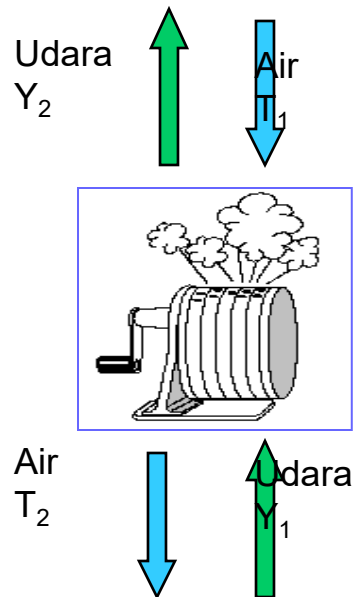


## Dehumidifikasi



# Pengertian Humidifikasi

Peristiwa Penambahan kandungan Uap Air dalam Udara



$$Y_2 > Y_1$$

1. Gradien Temperature
2. Gradien Konsentrasi

# Proses Humidifikasi

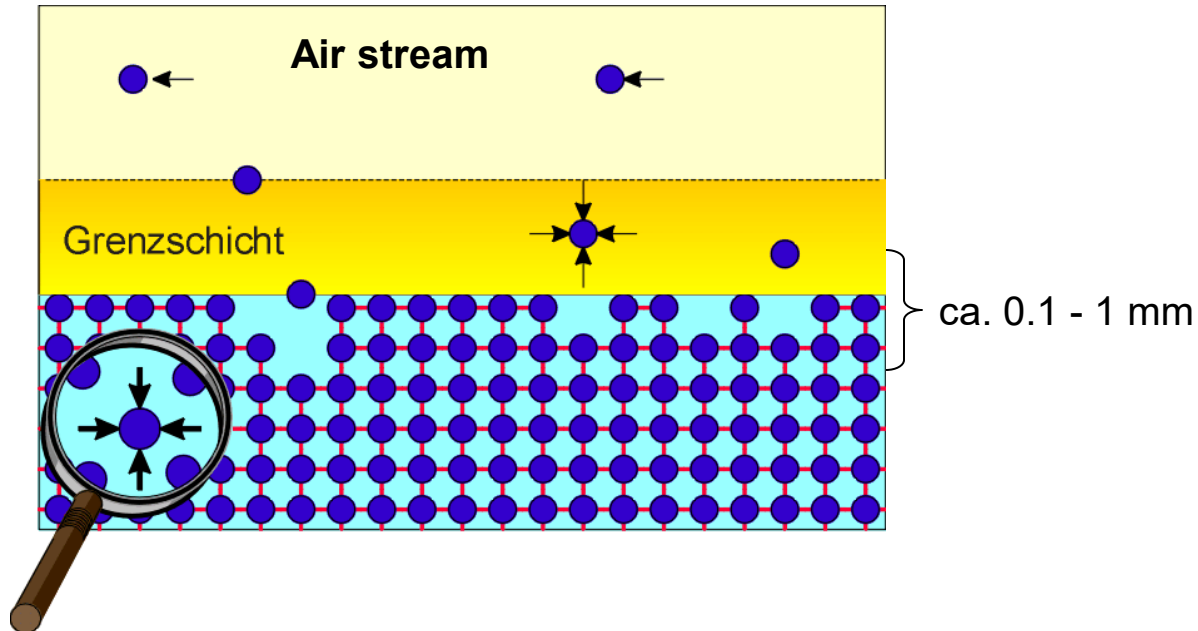
## 1. Perpindahan Massa

- Dari fase cair ke gas
- Perubahan wujud

## 2. Perpindahan Panas

- Panas latent
- Panas Sensibel

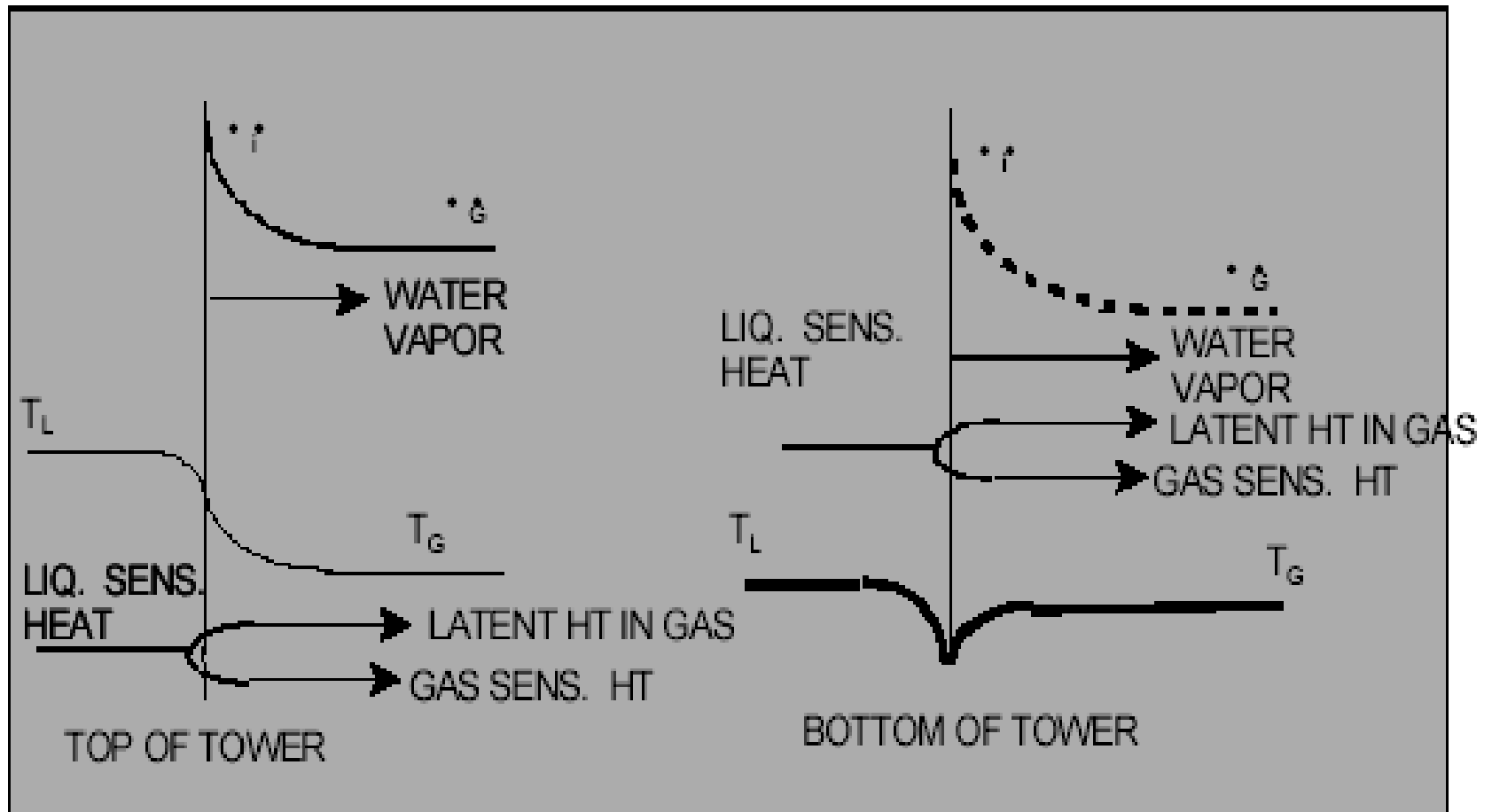
# Why does water evaporate?



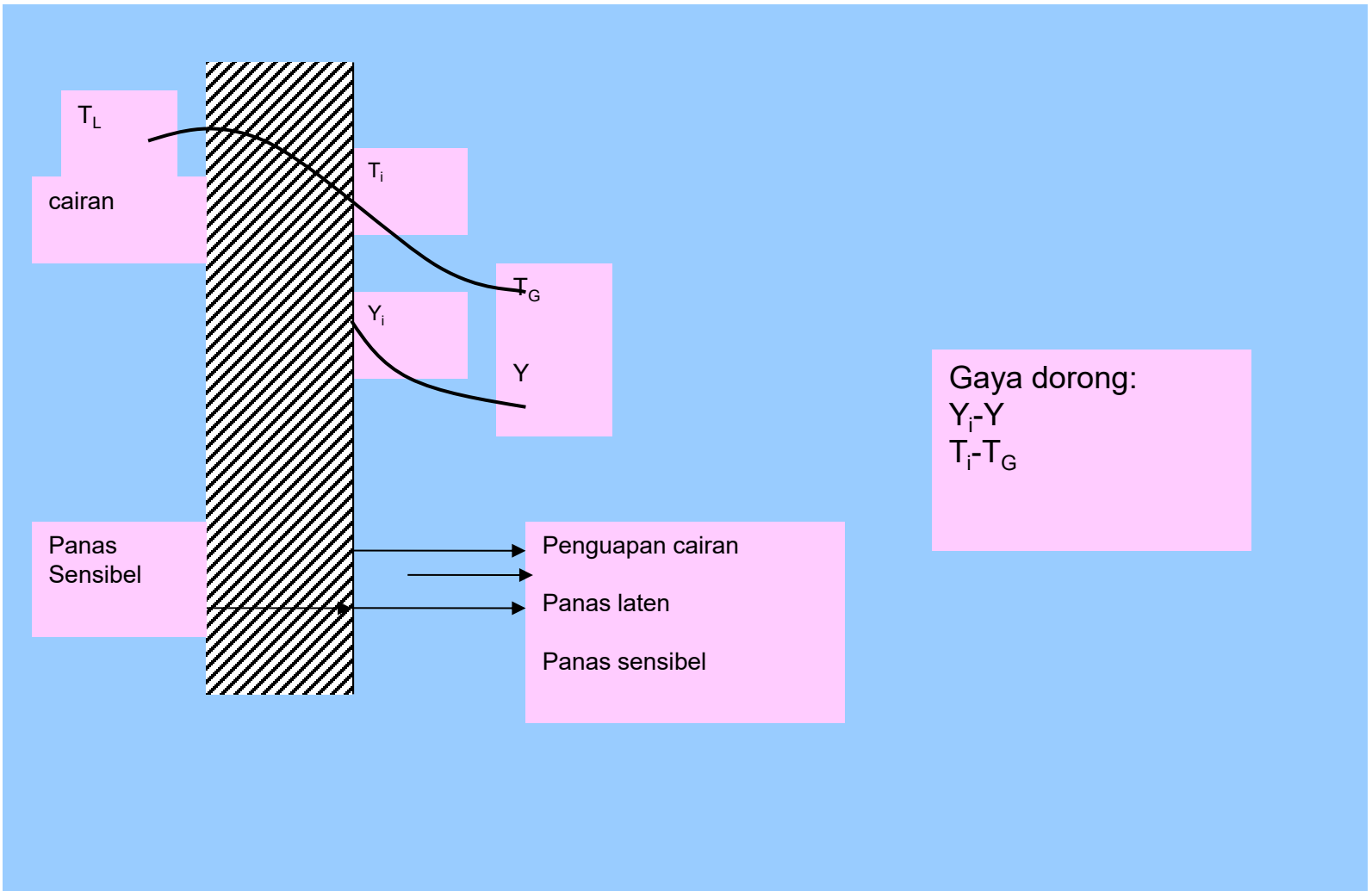
Through an air stream water molecules are torn from the boundary layer and are transported into the air.

Proses penguapan dapat terjadi disebabkan oleh adanya penyerapan energi. Penguapan terjadi ketika zat cair dipanaskan hingga mencapai titik didihnya. Penguapan juga dapat terjadi pada saat zat cair belum mencapai titik didih namun ada tekanan uap yang tinggi.

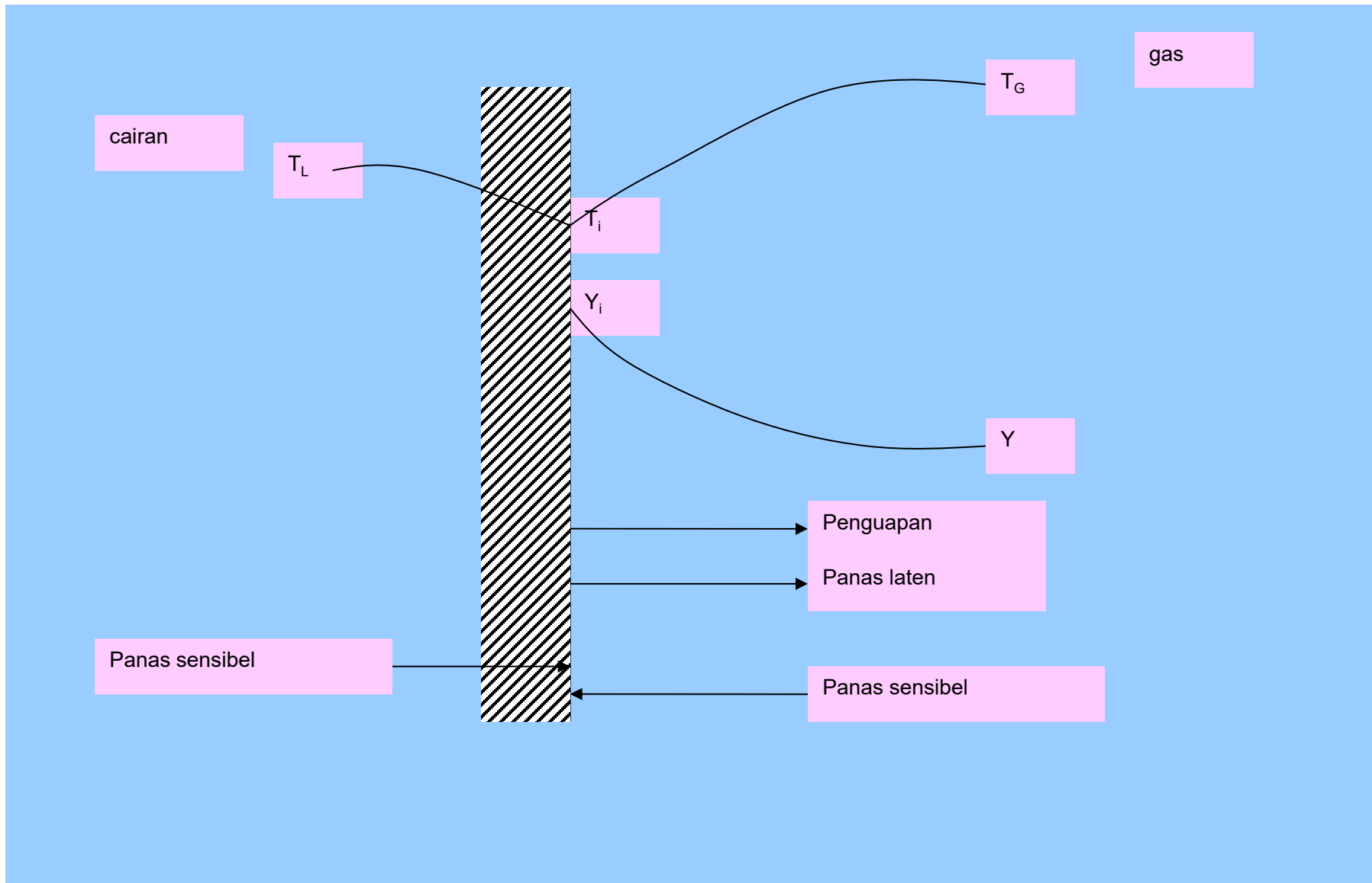
## PROFIL TEMPERATUR DAN HUMIDITY



# Pendinginan Cairan

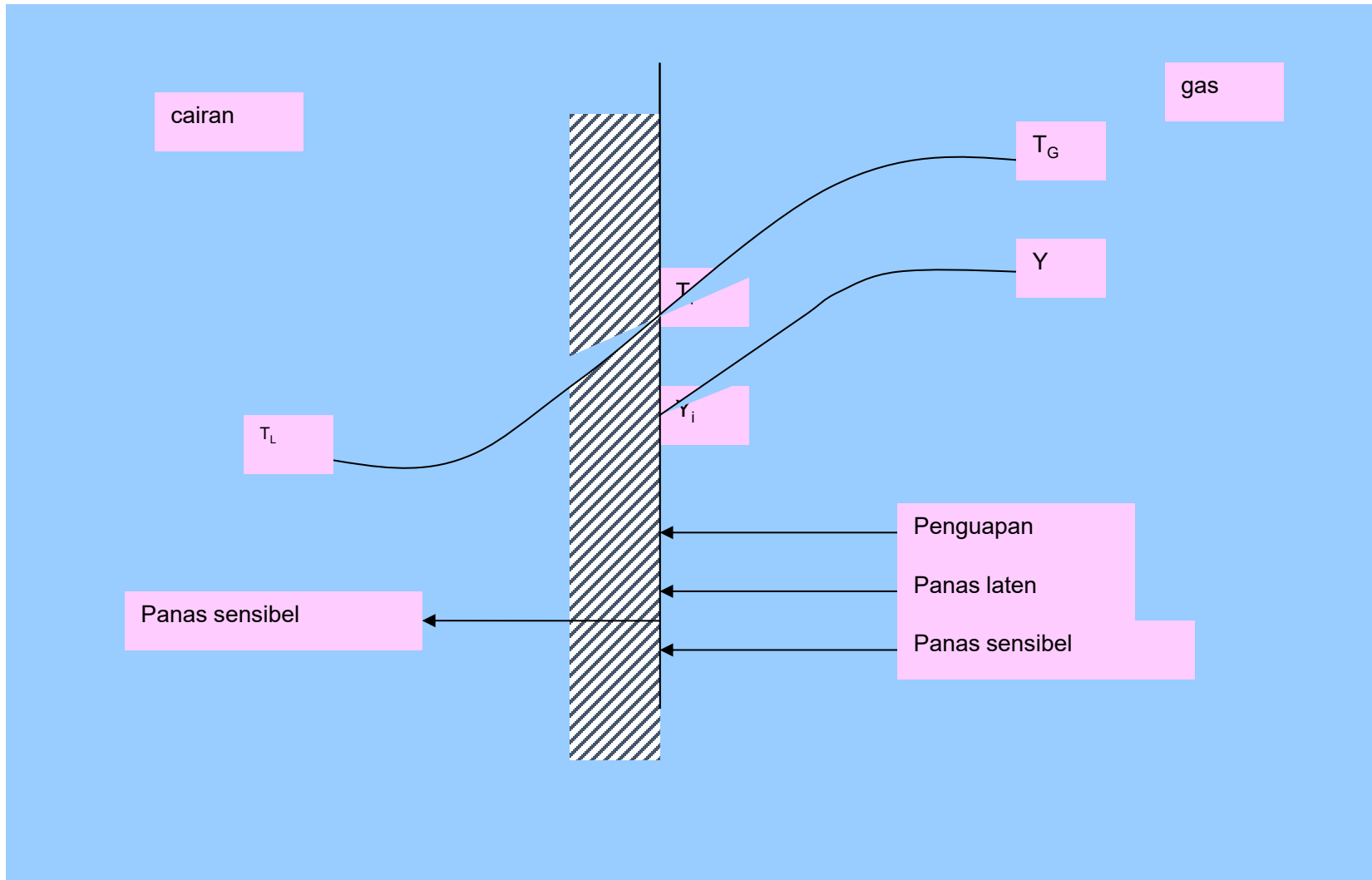


# Humidifikasi



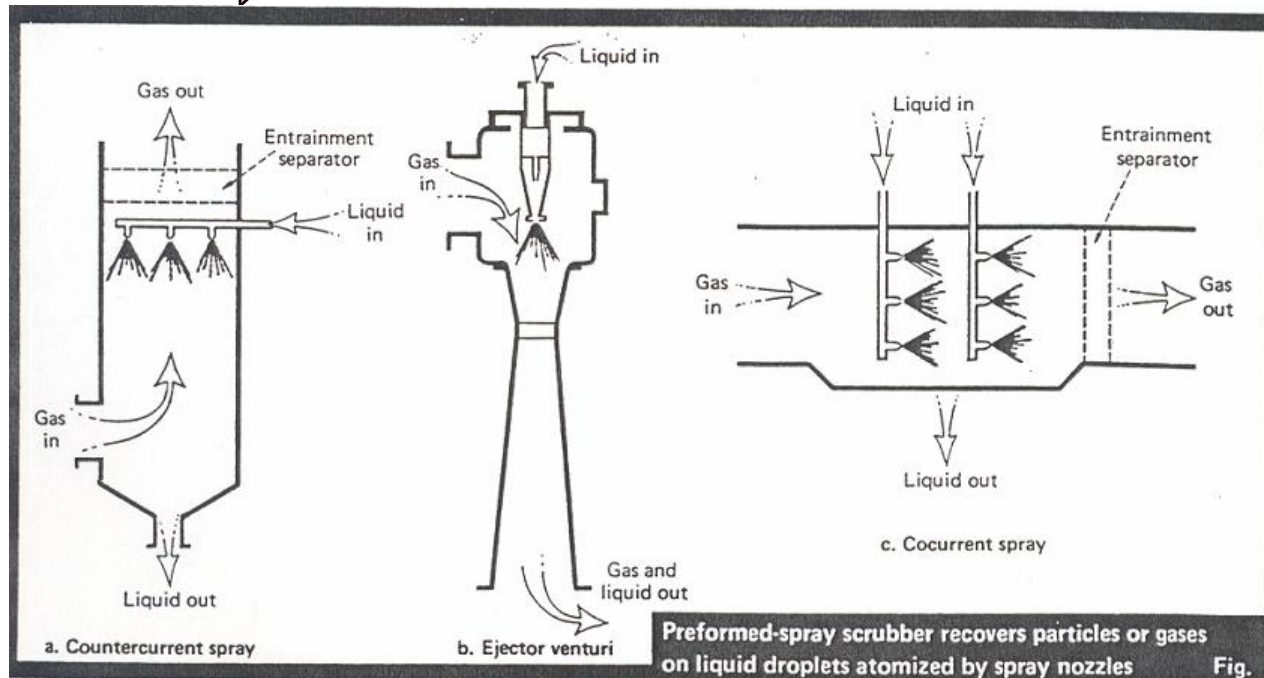


# Dehumidifikasi

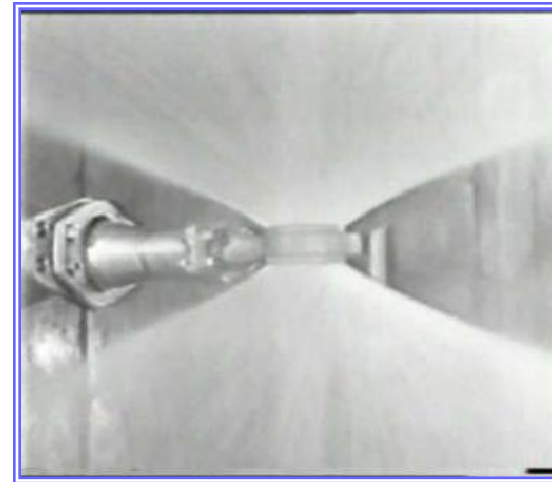
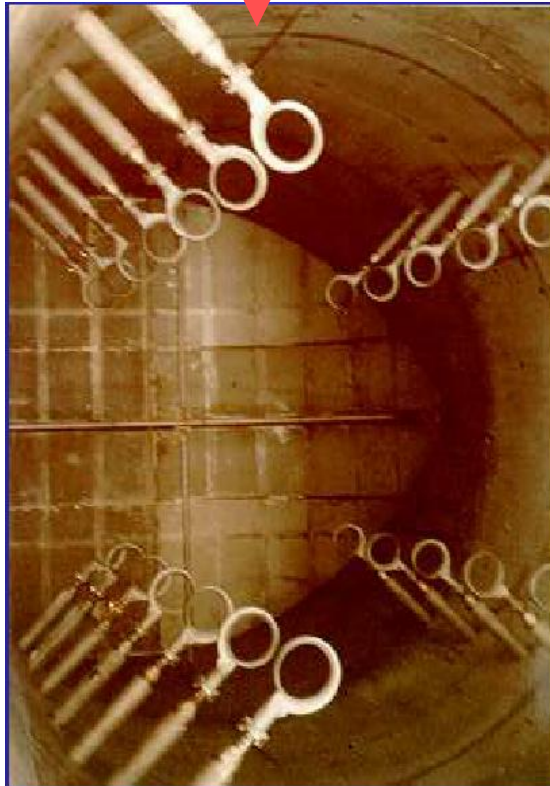


# Alat Humidifikasi

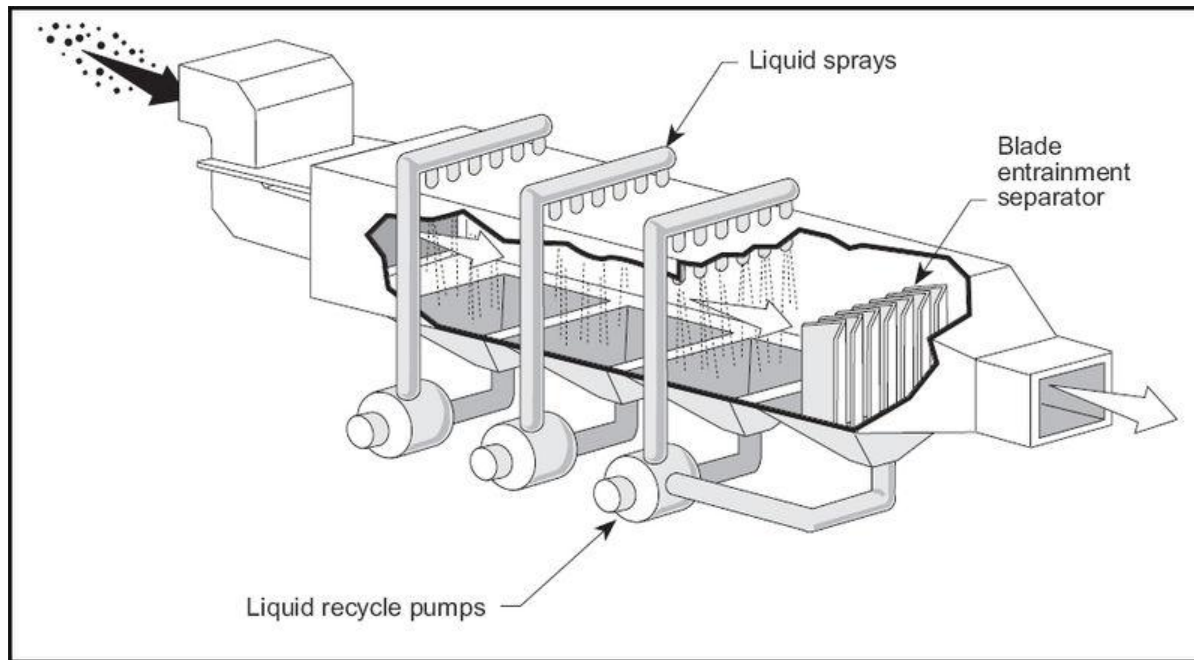
Kolom Percik



Multiple Nozzle

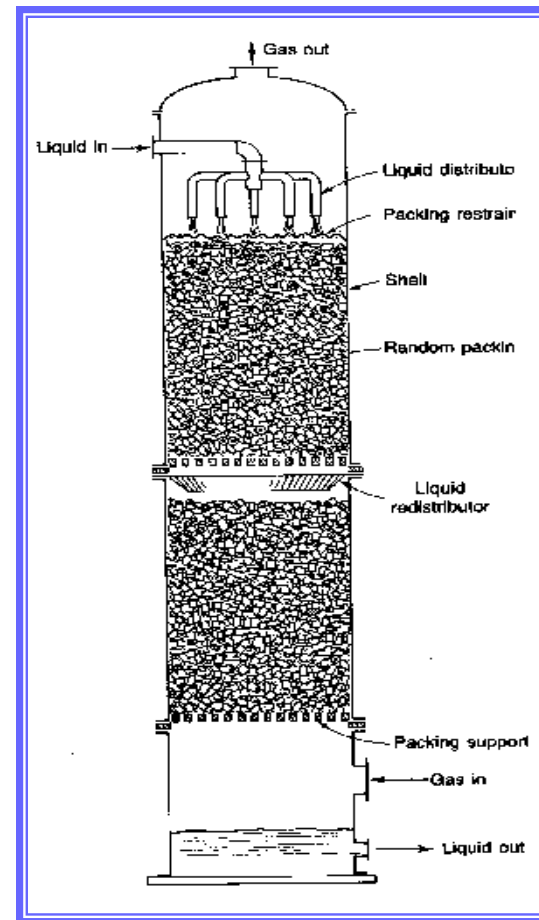


## Crosscurrent spray

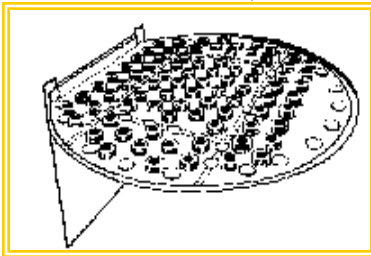


## Kolom Isian

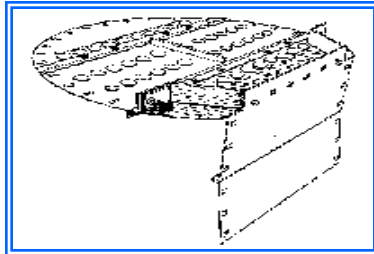
- Beragam jenis packing telah dikembangkan untuk memperluas daerah dan efisiensi kontak gas-liquid
- Ukuran 3 -75mm
- Bahan: Inert dan murah spt tanah liat, porselin, grafit, plastik, etc.
- Packing baik: 60-90% volume total



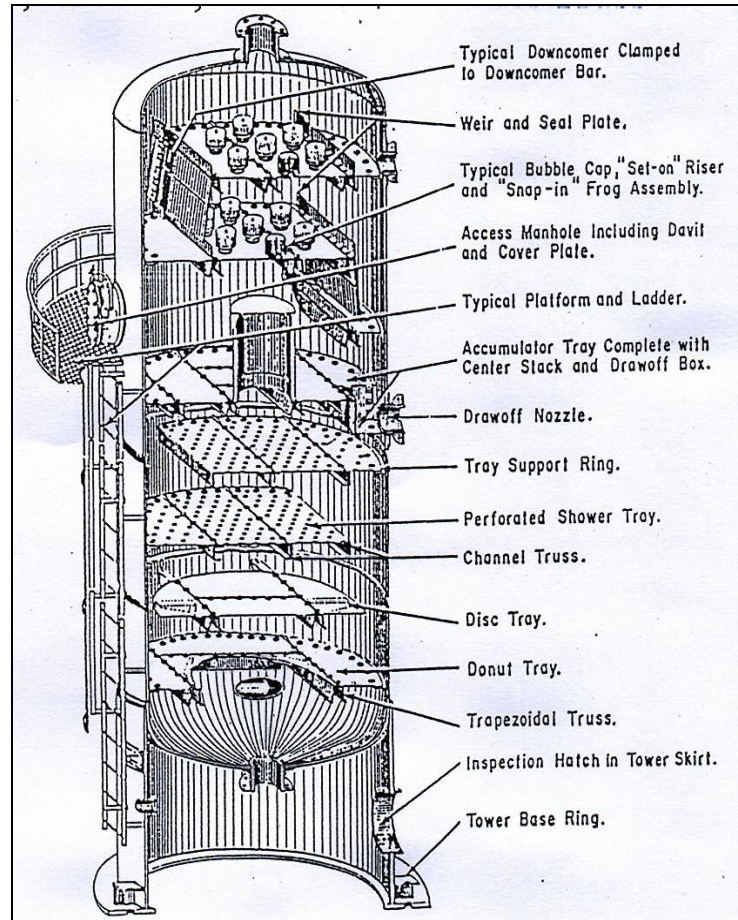
Kolom Piring



Sieve trays



Valve trays

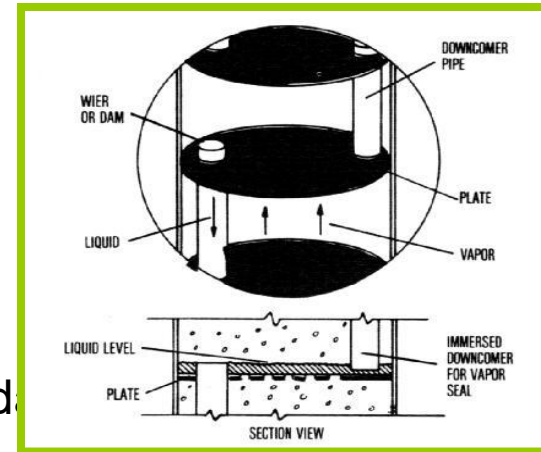


- Sieve tray

- Paling banyak dipakai,
- Bentuk mirip dgn yg dipakai pada distilasi,
- lubang sederhana,  $\varnothing$  3-12 mm, 5-15% luas tray

- Valve tray

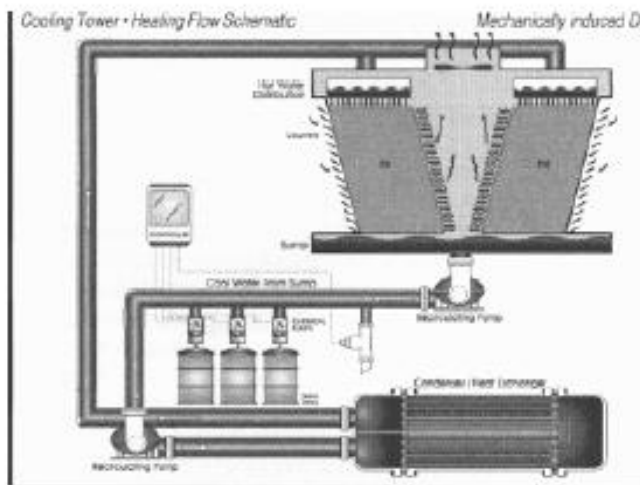
- Modifikasi sieve tray dgn valve untuk mencegah kebocoran liquid pada saat tekanan uap rendah
- Mulai banyak dipakai





# Aplikasi

## 1.Factory

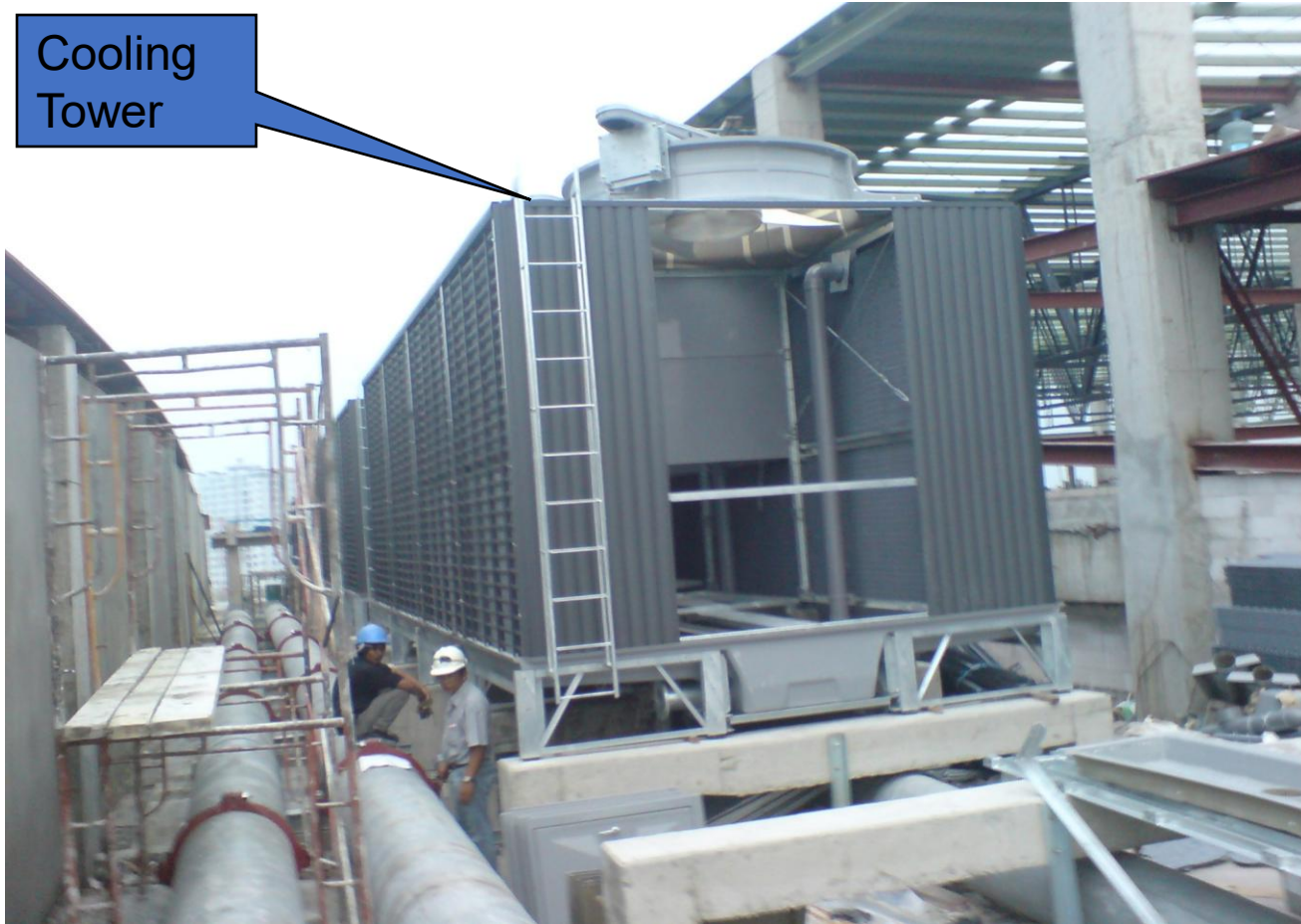




# Equipment



Cooling  
Tower



# TERMINOLOGI DALAM HUMIDIFIKASI

Kelembaban Mutlak (Absolute)

Kelembaban Mutlak Jenuh ( $Y_s$ )

Kelembaban Relative ( $Y_R$ )

% Kelembaban ( $Y_p$ )

Suhu Bola Kering

Titik Embun

Volume lembab ( $V_H$ )

Panas Lembab ( $C_H$ )

Enthalpy

Suhu Penjenuhan Adiabatis

Suhu bola basah



# Absolute Humidity/Kelembaban Absolut

- yaitu massa uap yang dibawa oleh satu satuan massa gas bebas uap, karena itu humidity hanya bergantung pada tekanan bagian uap di dalam campuran bila tekanan total tetap. Kelembaban  $H$  (specific humidity) merupakan massa uap air (dalam lb atau kg) per unit massa udara kering (dalam lb atau kg) (beberapa menggunakan mole uap air per mole udara kering sebagai penjelasan dari kelembaban).

## Kelembaban Mutlak (absolut)



Perbandingan berat uap  
terhadap berat gas

$$Y = \frac{W_A}{W_B} = \frac{P_A}{P - P_A} \times \frac{M_A}{M_B}$$

Satuan Y = kg H<sub>2</sub>O/kg Udara kering

# Saturation Humidity/Kelembaban jenuh

- yaitu udara dalam uap air yang berkesetimbangan dengan air pada suhu dan tekanan tertentu. Dalam campuran ini, tekanan parsial uap air dalam campuran udara-air adalah sama tekanan uap air murni pada temperatur tertentu

## Saturation Humidity/Kelembaban jenuh

JENUH

tekanan partial uap yang dimuatnya  
sama besar dengan tekanan uap jenuh  
 $P_{as}=P_0$

$$Y_s = \frac{M_A}{M_B} \times \frac{P_{AS}}{P - P_{AS}}$$

Satuan  $Y_s$  = kg H<sub>2</sub>O/kg Udara kering



# Relative Humidity/Kelembaban relatif

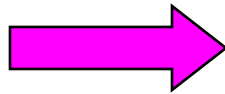
- yaitu ratio antara tekanan bagian dan tekanan uap zat cair pada suhu gas. Besaran ini dinyatakan dalam persen (%) sehingga kelembaban 100% berarti gas jenuh sedang kelembaban 0 % berarti gas bebas uap.



## Kelembaban Relatif ( $Y_R$ )

Perbandingan antara tekanan parsial uap dengan tekanan uap jenuhnya

$$Y_R = \frac{P_A}{P_{AS}} \times 100$$

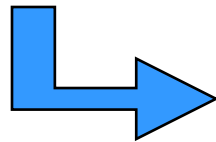


Dinyatakan dalam %

## % Kelembaban ( $Y_p$ )

perbandingan kelembaban mutlak udara dengan kelembaban jenuh pada suhu dan tekanan yang sama


$$Y_p = \frac{Y}{Y_s} \times 100$$



$$Y_p = \frac{\frac{18}{29} \times \frac{P_A}{P - P_A} \times 100}{\frac{18}{29} \times \frac{P_{AS}}{P - P_{AS}}} = \frac{P_A}{P_{AS}} \times \frac{P - P_{AS}}{P - P_A} \times 100$$

$$Y_R \neq Y_P$$

## Dew Point/ Titik Embun

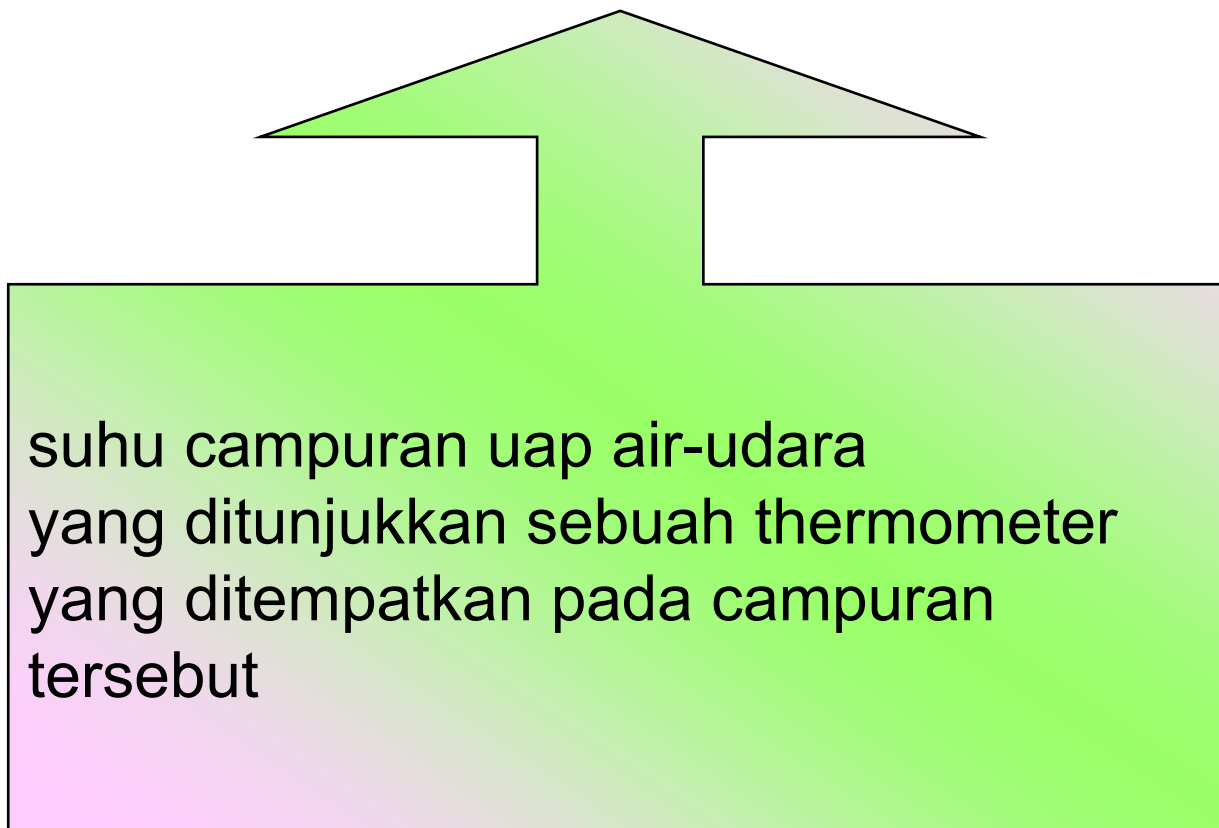


suhu dimana campuran  
uap – gas menjadi jenuh  
(uap mulai mengembun /  
kondensasi)

# Dry Bulb temperature/Suhu Bola Kering ( Td )

- Biasanya disebut sebagai suhu udara, merupakan istilah yang umum digunakan. Ketika orang menyebut suhu udara, biasanya mereka mengacu pada temperatur bola kering. Disebut suhu bola kering karena dalam mekanisme kerjanya tidak terpengaruh oleh kelembaban udara. Suhu bola kering dapat diukur dengan menggunakan termometer normal yang terkena udara bebas, tetapi terlindung dari radiasi dan kelembaban. Satuan suhu yang biasa digunakan adalah derajat Celcius ( $^{\circ}\text{C}$ ), derajat Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ) dan satuan Kelvin (K). titik Nol pada Kelvin setara dengan  $273^{\circ}\text{C}$

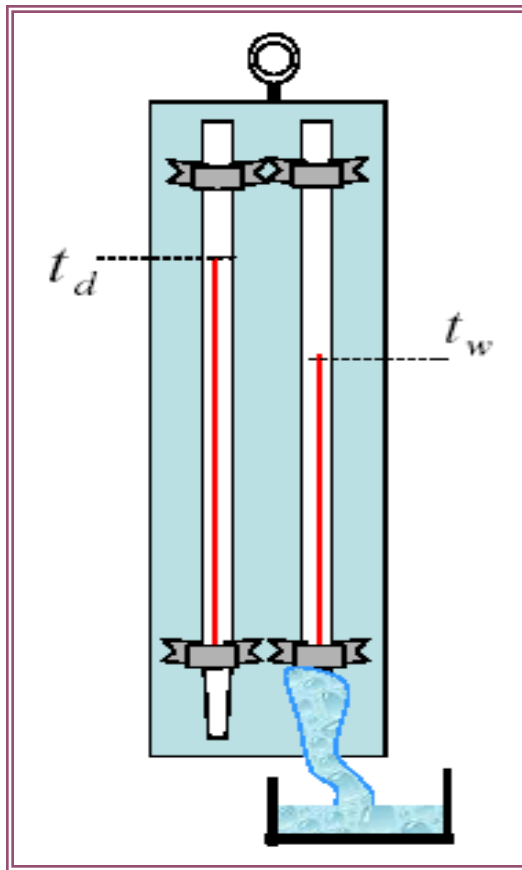
## Suhu Bola Kering / Dry Bulb Temperature



# Wet Bulb Temperature/ Suhu Bola Basah ( $T_w$ )

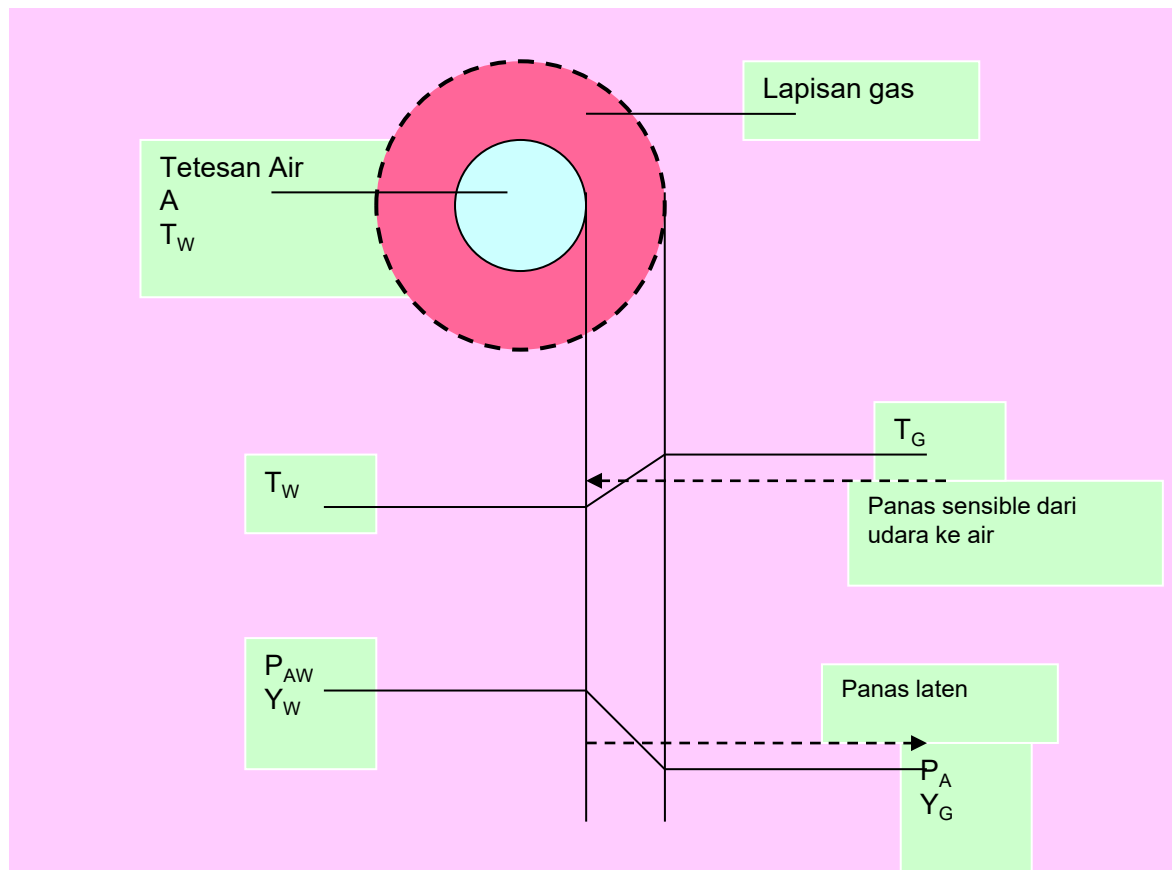
Suhu bola basah adalah temperatur adiabatik yang jenuh. merupakan suhu yang ditunjukkan oleh thermometer bola basah yang terkena aliran udara. Diukur menggunakan thermometer yang terbungkus kain kasa basah. Penguapan adiabatik dari air pada thermometer dan akibat pendinginan yang ditunjukkan untuk membaca bahwa suhu lebih basah dibanding dari suhu kering di udara. Tingkat penguapan dari kain kasa yang basah pada thermometer dan perbedaan antara suhu bola kering dan suhu bola basah tergantung pada kelembaban udara. Penguapan berkurang ketika udara mengandung uap air lebih banyak. Suhu bola basah selalu lebih rendah dibanding suhu bola kering, namun akan identik dengan kelembaban relatif 100 % dimana suhu udara berada pada titik jenuh.

## Suhu Bola Basah



penguapan air tidak  
merubah kelembaban  
maupun suhu aliran  
udara yang keluar  
dan udara tidak  
berada dalam  
kesetimbangan  
dengan air

**Menentukan kelembaban menggunakan  
hubungan  $T_{db}$  dan  $T_{wb}$   
Mekanisme pada suhu bola basah**





## Volume Lembab ( $V_H$ )

Volum lembab  
suatu campuran  
uap – gas

volum satuan massa gas kering  
ditambah volum uap yang dikandungnya

$$V_H = 22,41 \times \frac{1}{P} \times \frac{T}{273} \times \left( \frac{1}{M_B} + \frac{1}{M_A} Y \right)$$

SI

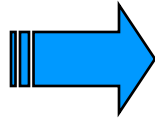
A = air (BM= 18)  
B = Udara (BM = 29)

$$V_H = 359 \times \frac{1}{P} \times \frac{T}{492} \times \left( \frac{1}{29} + \frac{1}{18} Y \right)$$

British

untuk campuran jenuh  $Y = Y_s$

## Panas Lembab ( $C_H$ )



kapasitas panas satu satuan massa gas kering beserta kandungan uap yang dikandungnya

Untuk system udara – Gas  
 $C_B = C_{\text{gas}} = 1,005 \text{ KJ/Kg.K}$   
 $C_A = C_{\text{air}} = 1,88 \text{ KJ/Kg.K}$

$$C_H = C_B + Y.C_A$$

$$C_H = 1,005 + 1,88Y$$

$$C_H = 0,24 + 0,45Y$$

(KJ/Kg udara kering.K)

(Btu/lbm udara kering.°F)

# Total Enthalpy / $H_y$

Total entalpi 1 kg udara ditambah uap airnya adalah  $H_y$  dalam satuan J/kg atau kJ/kg udara kering. Jika  $T_0$  adalah suhu acuan yang dipilih untuk kedua komponen.

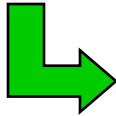
total entalpi adalah kalor sensibel campuran udara-uap air ditambah kalor laten dalam J/kg atau kJ/kg uap air pada  $T_0$

$$H_y \text{ kJ/kg dry air} = c_s(T - T_0) + H\lambda_0 \Rightarrow (1.005 + 1.88H)(T - T_0^\circ\text{C}) + H\lambda_0 \quad (9.3-8)$$

$$H_y \text{ btu/lb}_m \text{ dry air} = (0.24 + 0.45H)(T - T_0^\circ\text{F}) + H\lambda_0$$

# Enthalpy

dihitung atas dasar  
satu kondisi rujukan (referensi)



untuk komponen A dan B dapat tidak sama

komponen A (yang dapat mengembun),  
diambil keadaan cair

$$H_Y = H_B + Y.H_A$$

Dimana:

$H_Y$  = enthalpy campuran uap –gas

$H_A$  = enthalpy kompponen A (uap)

$H_B$  = enthalpy kompponen B (gas)

Apabila referensi suhu  
sama untuk kedua komponen (A dan B) yaitu  $T_o$

$$H_Y = C_B(T - T_o) + Y.\lambda_o + C_A(T - T_o)$$

$$H_Y = C_H(T - T_o) + Y.\lambda_o$$

Untuk system Uap air – Udara

$$H_Y = (1,005 + 1,88Y)(T - T_o) + (Y.\lambda_o)$$

SI

$$H_Y = (0,24 + 0,45Y)(T - T_o) + (Y.\lambda_o)$$

British

# CARA PENGUKURAN HUMIDITY

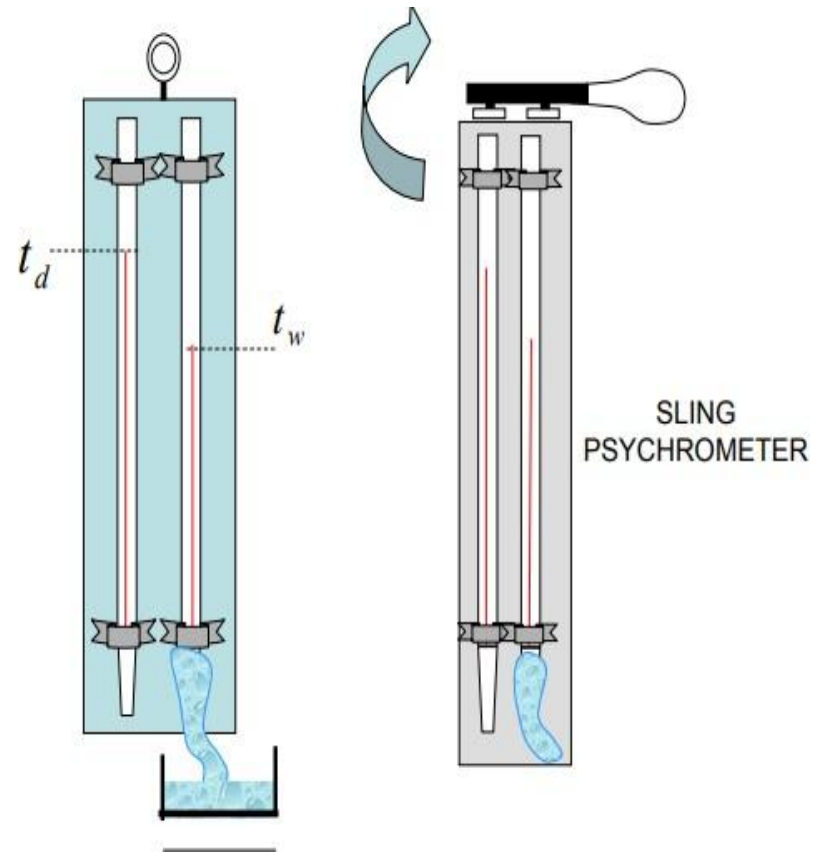
## ➤ Cara Tidak Langsung

Mengukur  $t_d$  dan  $t_w$

Dengan menggunakan bantuan diagram Psikhrometrik didapat humidity

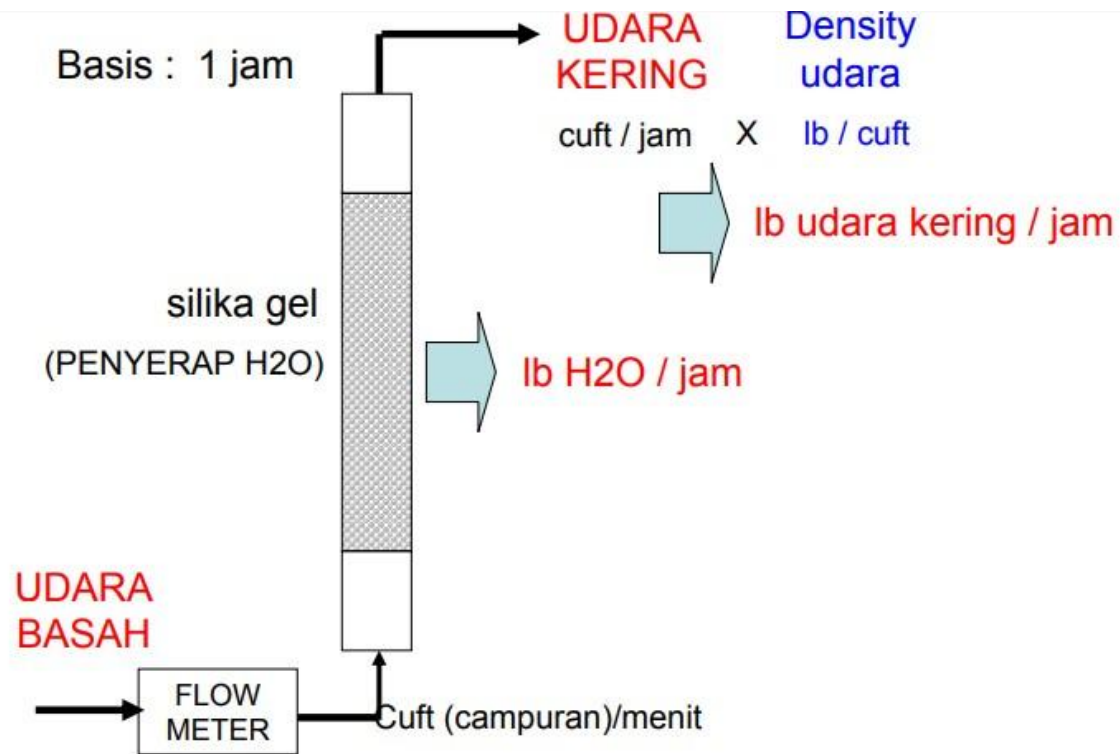
## ➤ Cara Langsung

Mengukur berat  $H_2O$  dan berat udara kering



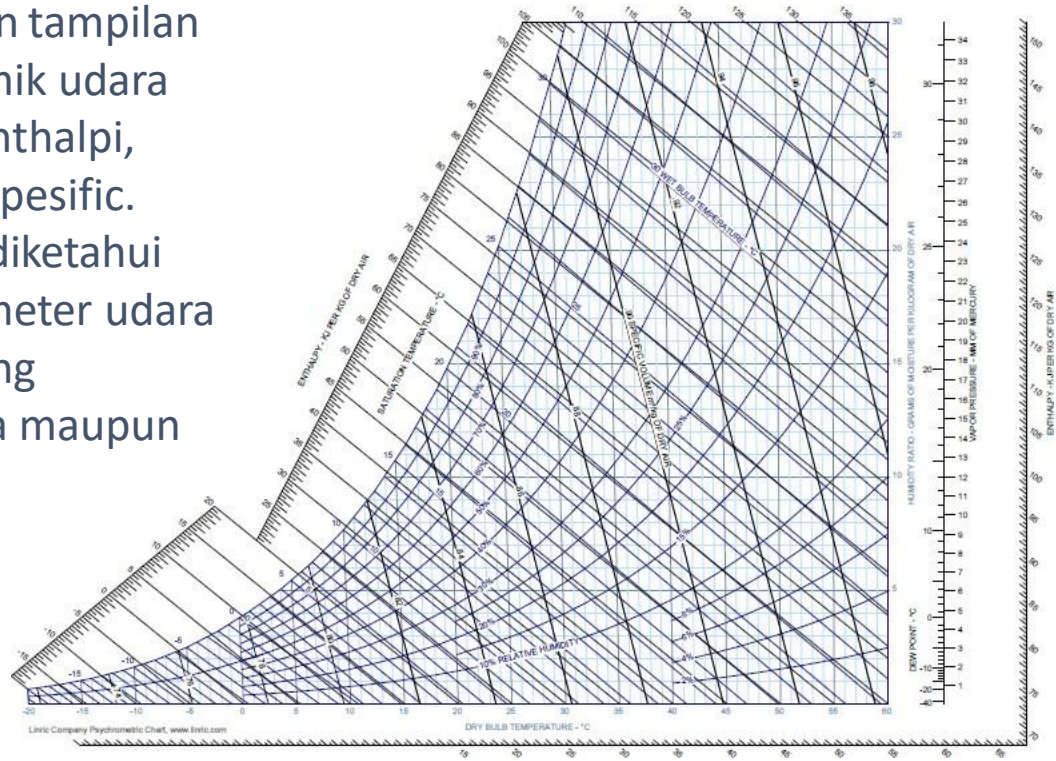
Teknik mengukur  $t_d$  dan  $t_w$

# DIAGRAM ALIR HUMIDIFIKASI



# DIAGRAM PSIKHROMETRIK

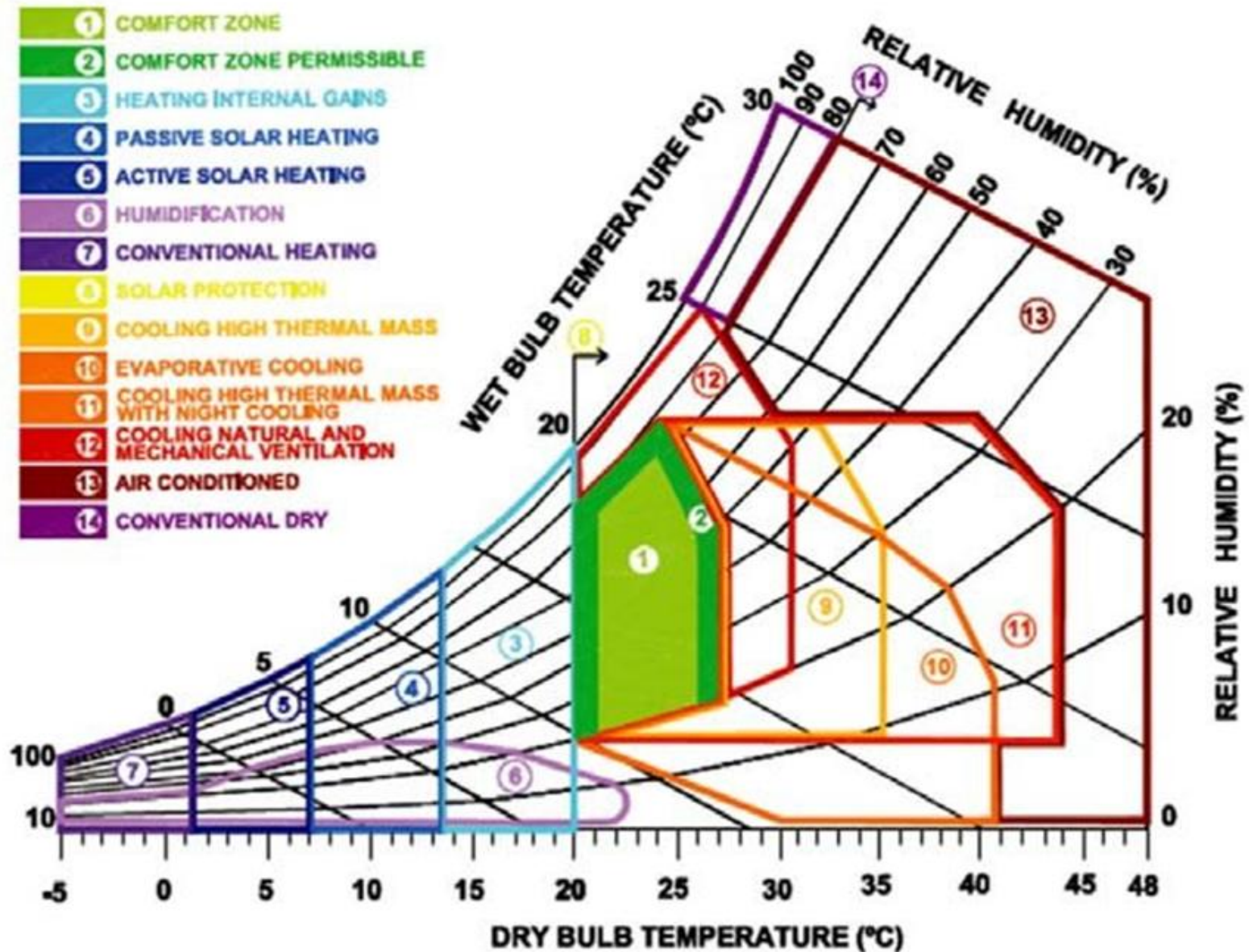
Diagram psikrometrik merupakan tampilan secara grafikal sifat thermodinamik udara antara lain suhu, kelembaban, enthalpi, kandungan uap air dan volume spesifik. Dalam chart ini dapat langsung diketahui hubungan antara berbagai parameter udara secara cepat dan persisi, baik yang berkaitan dengan sifat fisik udara maupun sifat thermiknya.



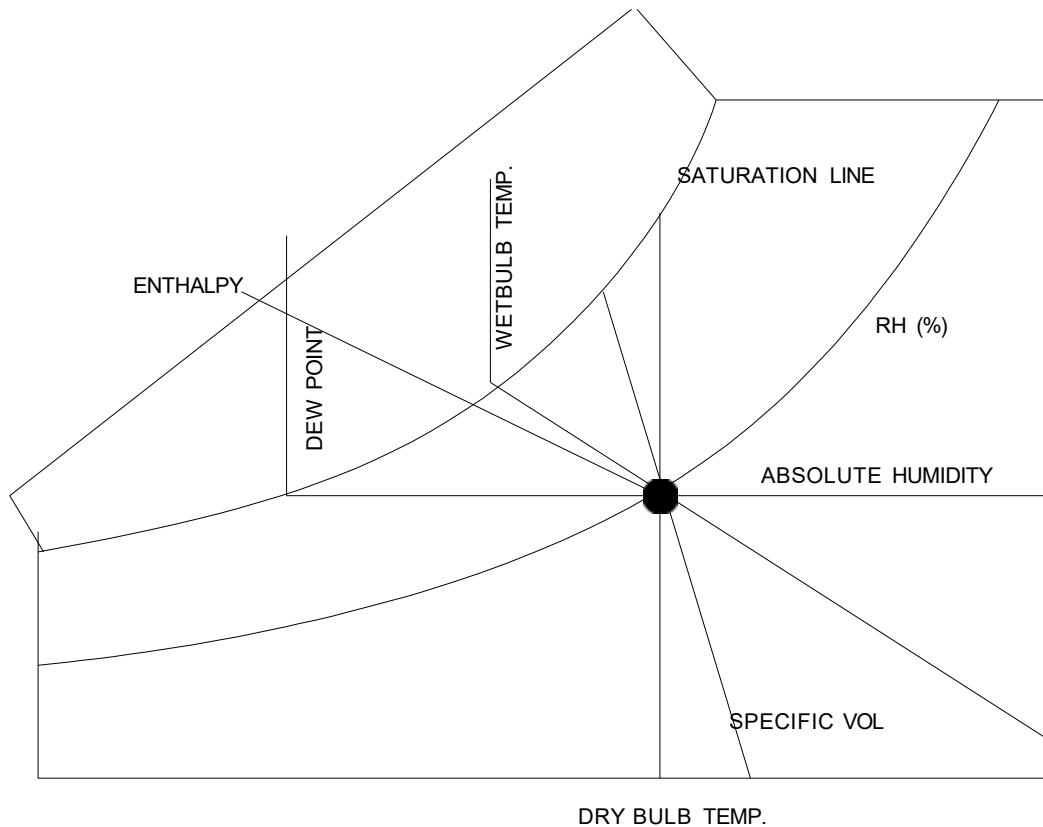


# Diagram Psikometrik

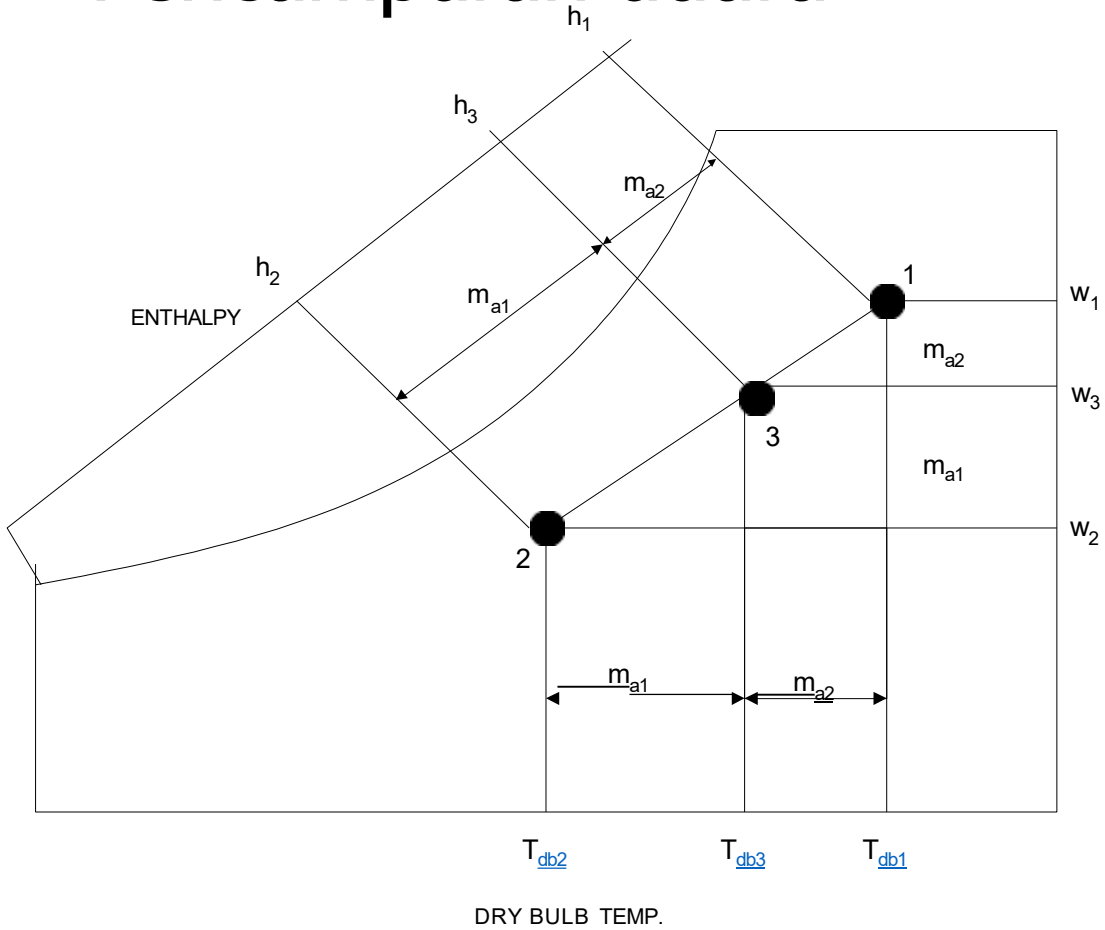
Adalah diagram hubungan termodinamik antara campuran uap air dan udara.



# Psychrometric chart



# Pencampuran udara



Udara

$m_1$

1



2



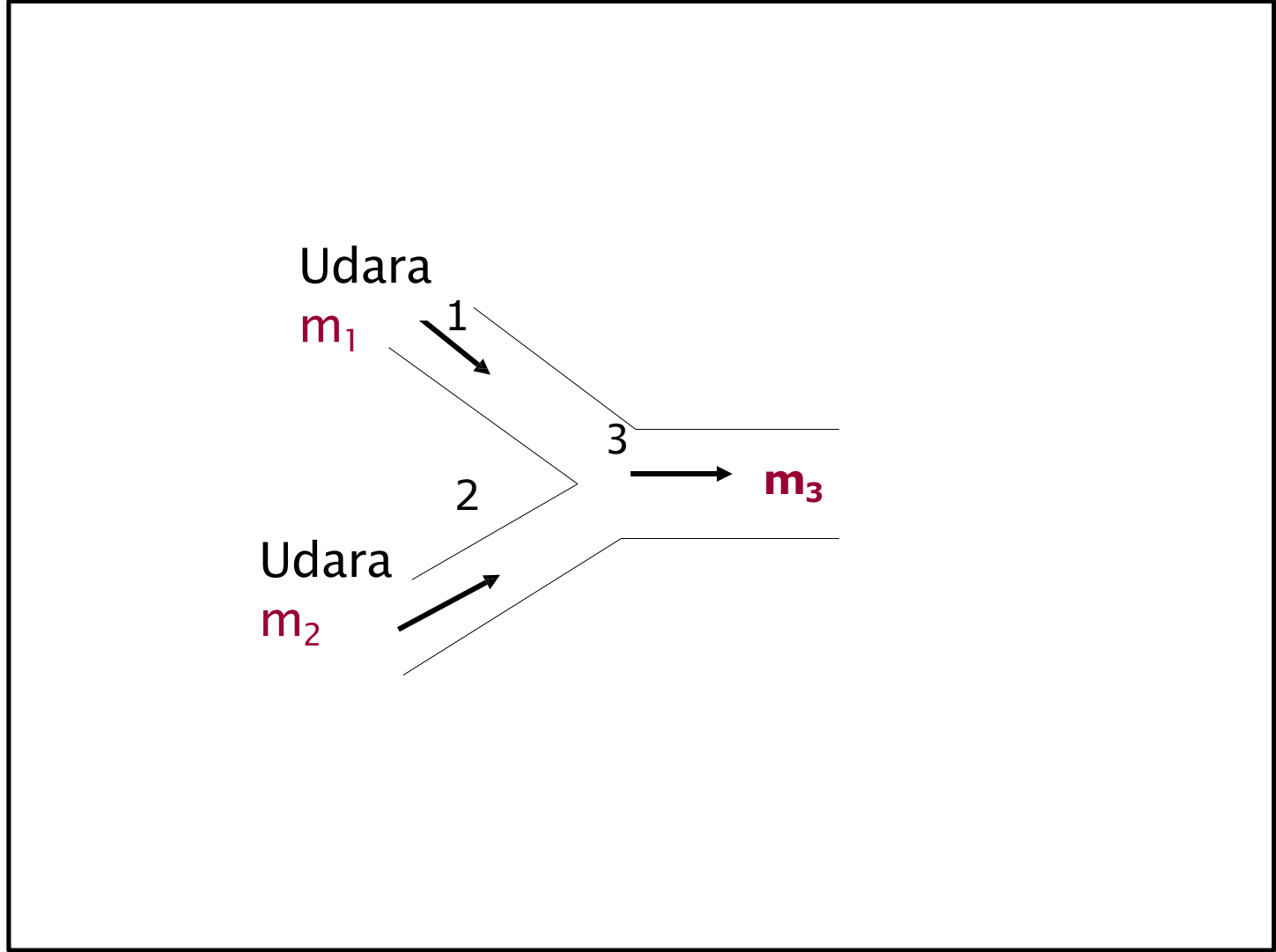
3



$m_3$

Udara

$m_2$



*Bila udara kondisi 1 dicampur dengan kondisi 2 yang masing-masing dengan massa  $m_1$  dan  $m_2$ , suhu  $T_{db1}$  dan  $T_{db2}$ , kelembaban absolut  $W_1$  dan  $W_2$ , entalpi  $h_1$  dan  $h_2$ , maka keseimbangan massa dan energi sebagai berikut :*

$$m_1 + m_2 = m_3$$

$$m_1 W_1 + m_2 W_2 = m_3 W_3$$

$$m_1 (W_3 - W_1) = m_2 (W_2 - W_3)$$

$$m_1 h_1 + m_2 h_2 = m_3 h_3$$

$$m_1 (h_3 - h_1) = m_2 (h_2 - h_3)$$

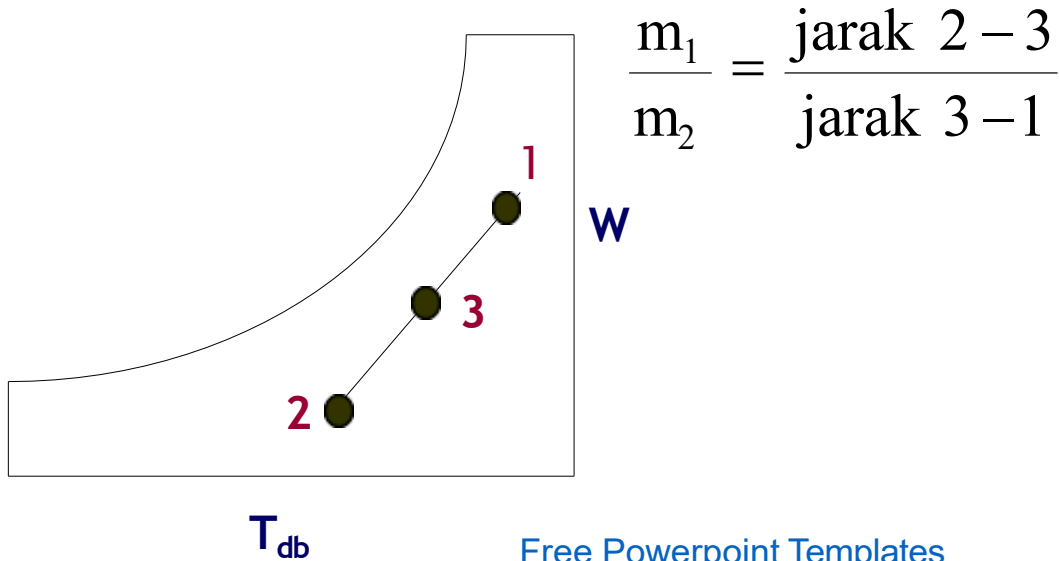
*Sehingga :*

$$\frac{h_3 - h_1}{W_3 - W_1} = \frac{h_3 - h_2}{W_3 - W_2}$$

*Dan :*

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1}$$

*Skala dari kelembaban absolut dan entalpi adalah linier, sehingga keempat kedudukan dari campuran 2 aliran udara tersebut terletak pada garis lurus yang menghubungkan titik 1 dan 2 pada grafik psikhrometrik. Sehingga dapat ditulis :*



# SIFAT THERMODINAMIKA CAMPURAN UDARA KERING DAN UAP AIR

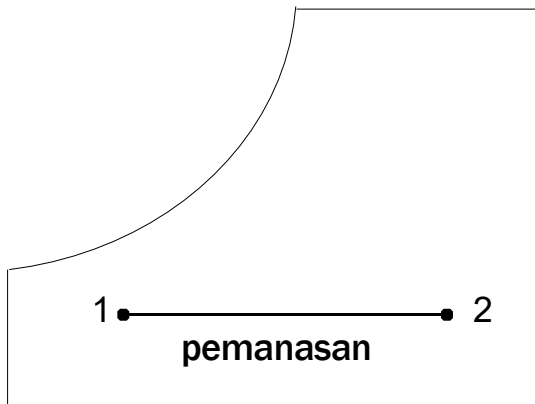
- Udara lembab (campuran uap air + udara kering) mengikuti hukum gas ideal

**Udara kering:**  
**massa =  $m_a$  kg**  
**sp. Vol.=  $v_a$  m<sup>3</sup>/kg**

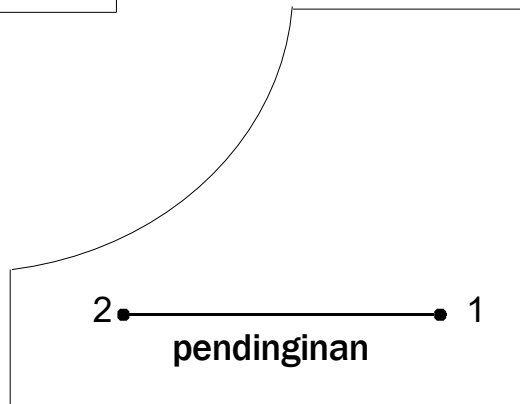
**Uap air:**  
**massa =  $m_v$  kg**  
**sp. Vol.=  $v_v$  m<sup>3</sup>/kg**

**Volume     $V$**   
**Massa       $m$**   
**Tekanan    $P$**   
**Suhu        $T$**





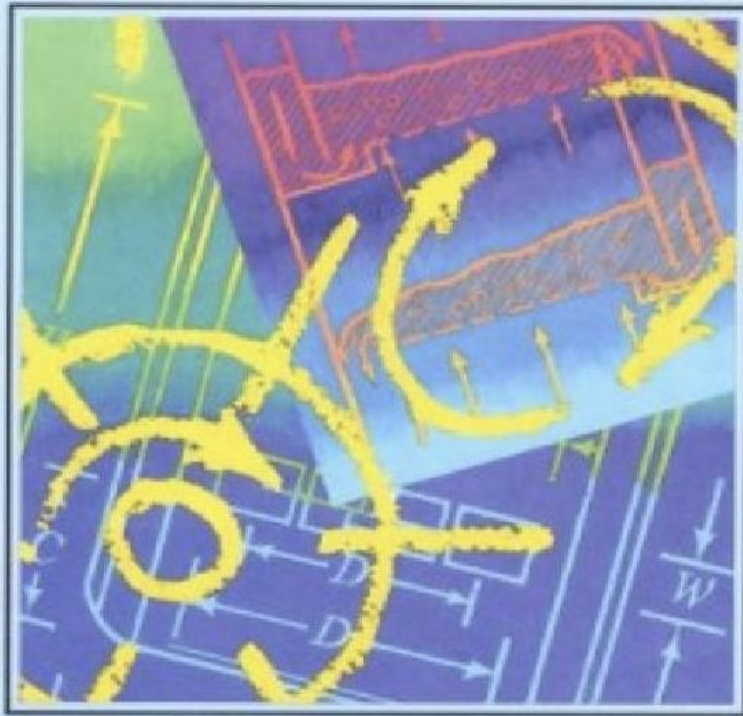
$T_{db}$



$T_{db}$

# Transport Processes and Unit Operations

Third Edition



Christie J. Geankoplis

## Chapter 9 Drying of Process Materials

- 9.1 Introduction and Methods of Drying
- 9.2 Equipment for Drying
- 9.3 Vapor Pressure of Water and Humidity
- 9.4 Equilibrium Moisture Content of Materials
- 9.5 Rate of Drying Curves

520

520

521

525

533

536

# Fase diagram air

Gambar 9.3-1 menggambarkan berbagai keadaan fisik air dan hubungan tekanan-suhu pada kesetimbangan. Pada Gambar 9.3-1 ditunjukkan daerah keadaan padat, cair, dan uap. Sepanjang garis AB, fase cair dan uap akan berdampingan. Sepanjang garis AC, fase es dan cair akan berdampingan. Sepanjang garis AD, es dan uap akan berdampingan. Jika es pada titik (1) dipanaskan pada tekanan konstan, suhu naik dan kondisi fisik ditunjukkan bergerak secara horizontal. Saat garis melintasi AC, benda padat mencair, dan saat melintasi AB, benda cair menguap. Bergerak dari titik (3) ke (4), es menyublim (menguap) menjadi uap tanpa menjadi cair. Cairan dan uap akan berdampingan dalam kesetimbangan sepanjang garis AB, yang merupakan garis tekanan uap air. Mendidih terjadi ketika tekanan uap air sama dengan tekanan total di atas permukaan air. Misalnya, pada suhu  $100^{\circ}\text{C}$  ( $212^{\circ}\text{F}$ ) tekanan uap air adalah  $101,3 \text{ kPa}$  ( $1,0 \text{ atm}$ ), dan karenanya air akan mendidih pada tekanan  $1 \text{ atm}$ . Pada suhu  $65,6^{\circ}\text{C}$  ( $150^{\circ}\text{F}$ ), dari tabel uap di Lampiran A.2, tekanan uap air adalah  $25,7 \text{ kPa}$  ( $3,72 \text{ psia}$ ). Oleh karena itu, pada suhu  $25,7 \text{ kPa}$  dan  $65,6^{\circ}\text{C}$ , air akan mendidih. Jika panci berisi air dipertahankan pada suhu  $65,6^{\circ}\text{C}$  di ruangan dengan tekanan abs  $101,3 \text{ kPa}$ , tekanan uap air akan kembali menjadi  $25,7 \text{ kPa}$ .

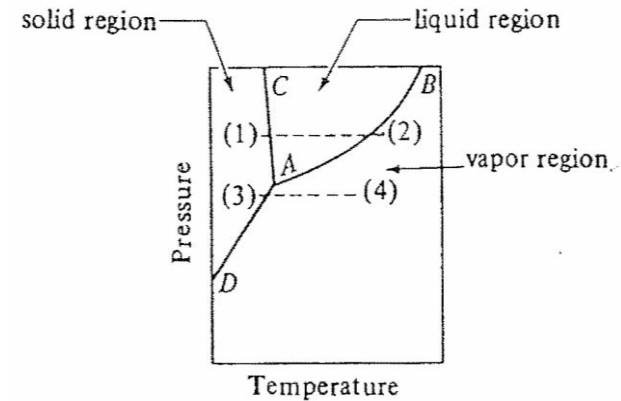
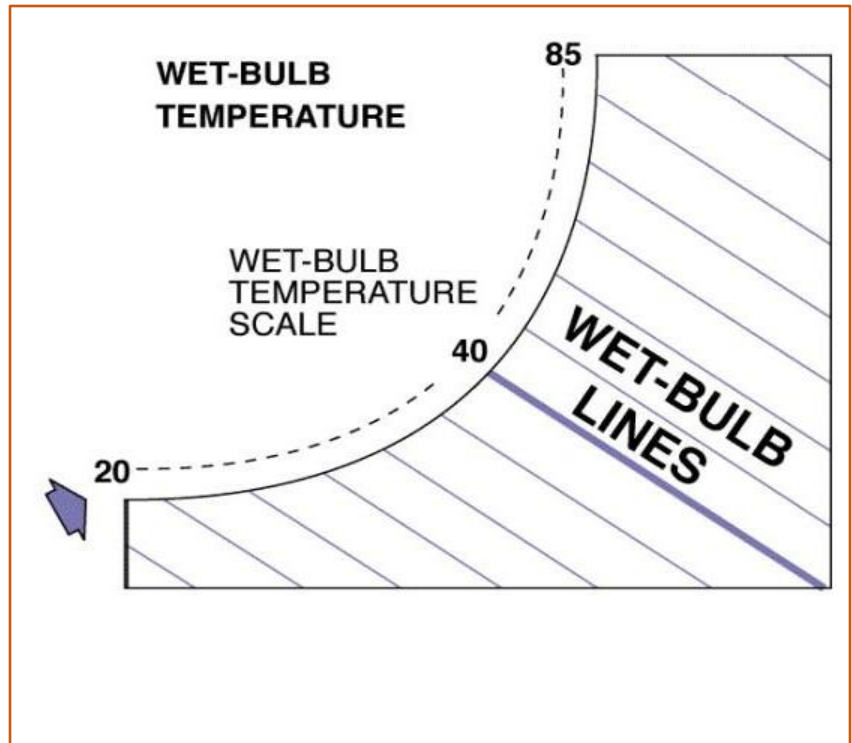
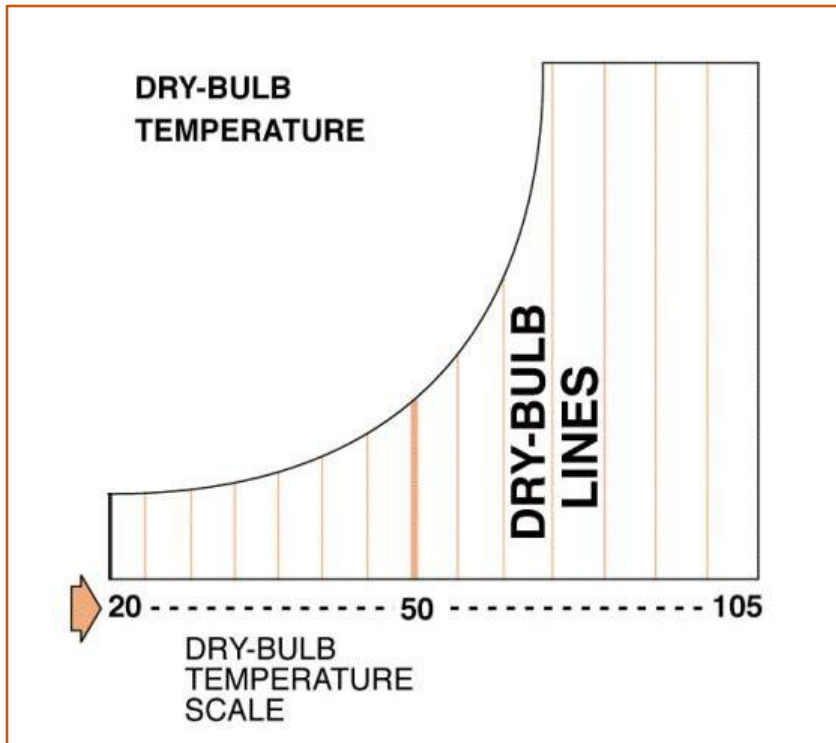
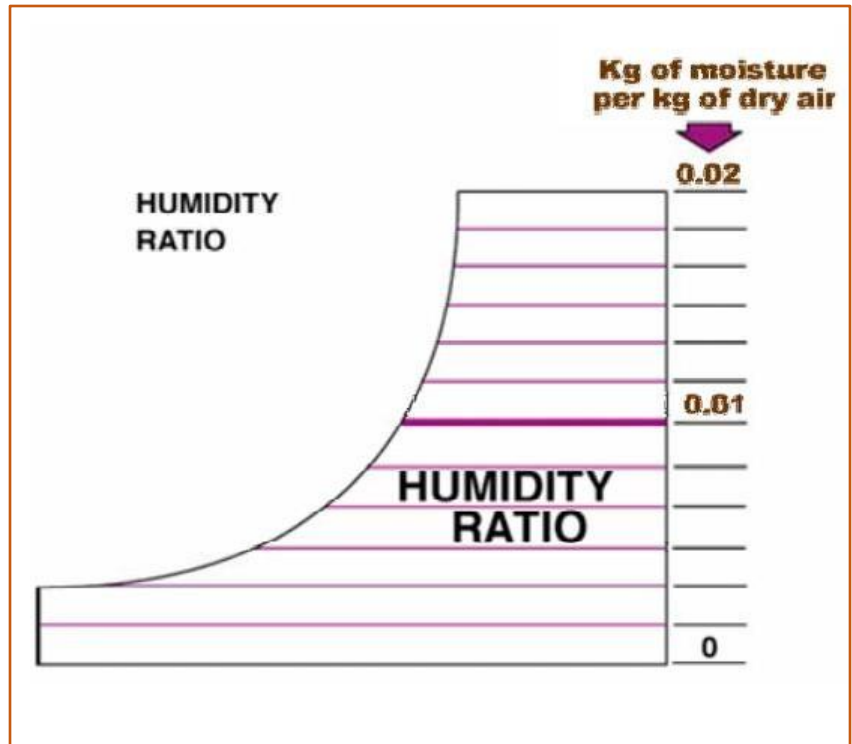
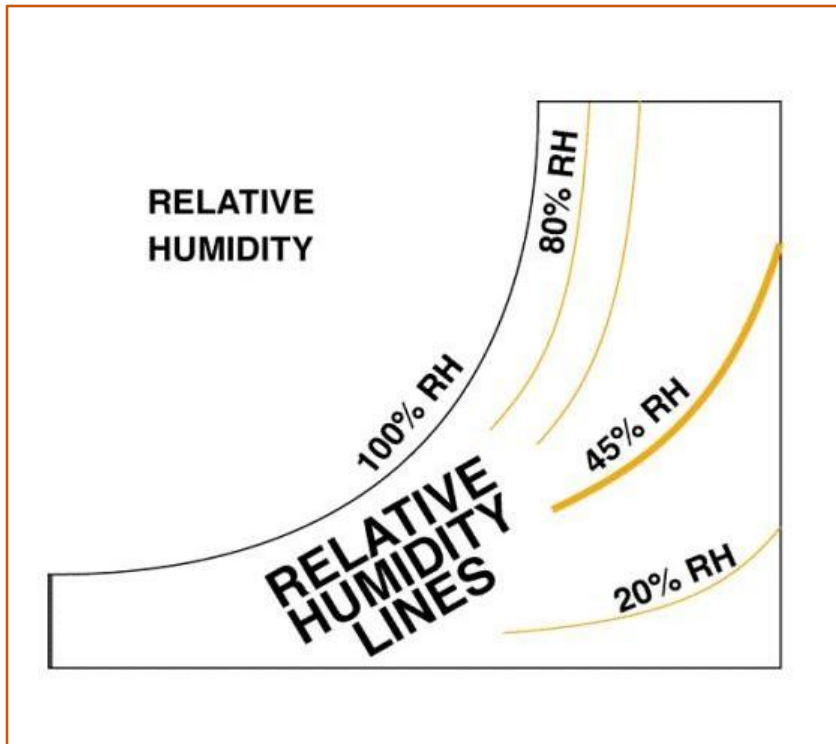


FIGURE 9.3-1. Phase diagram for water.

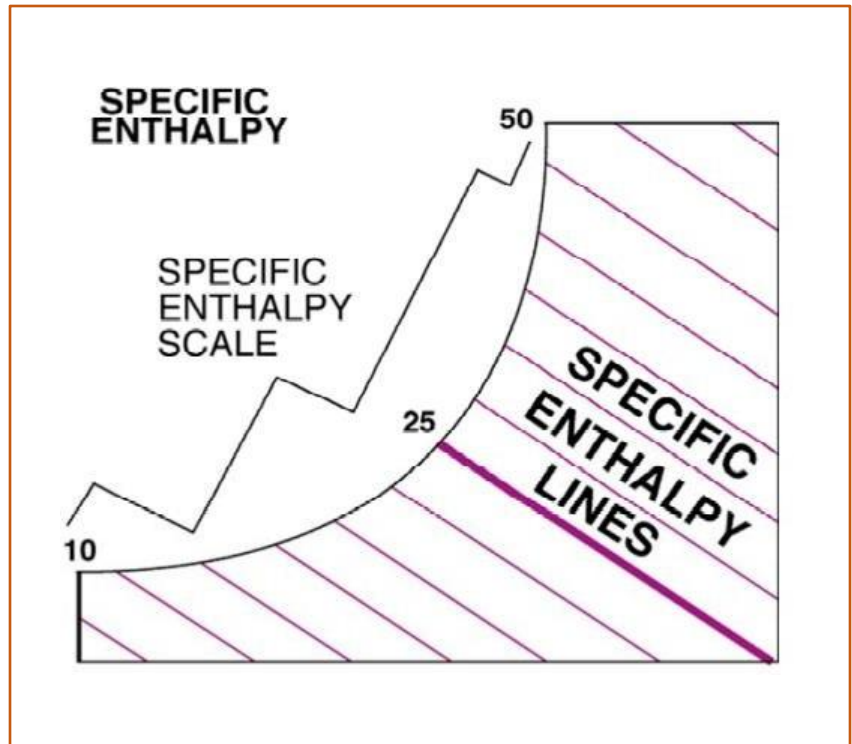
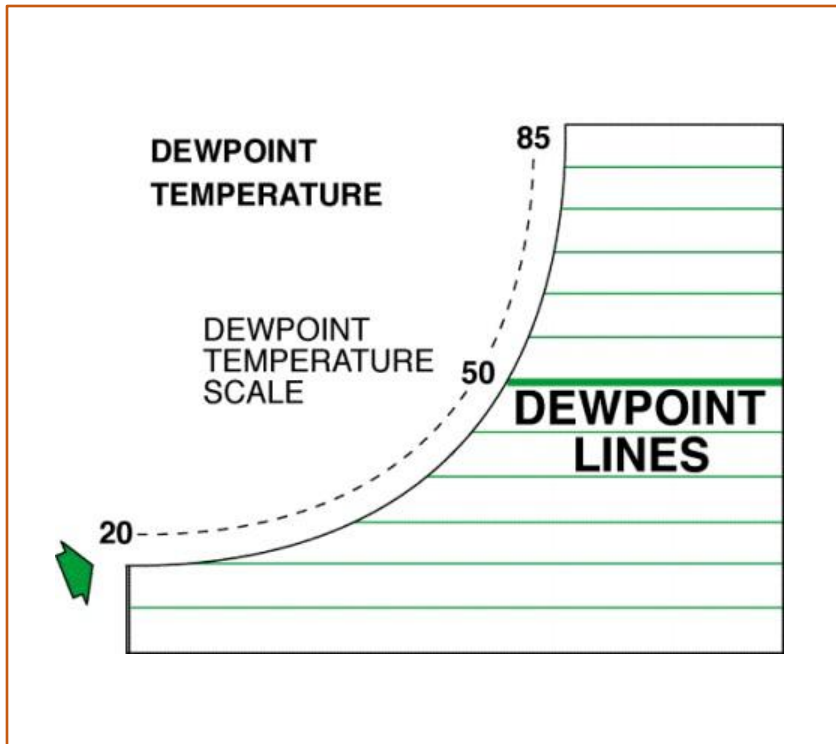
# CARA MEMBACA DIAGRAM PSIKHROMETRIK



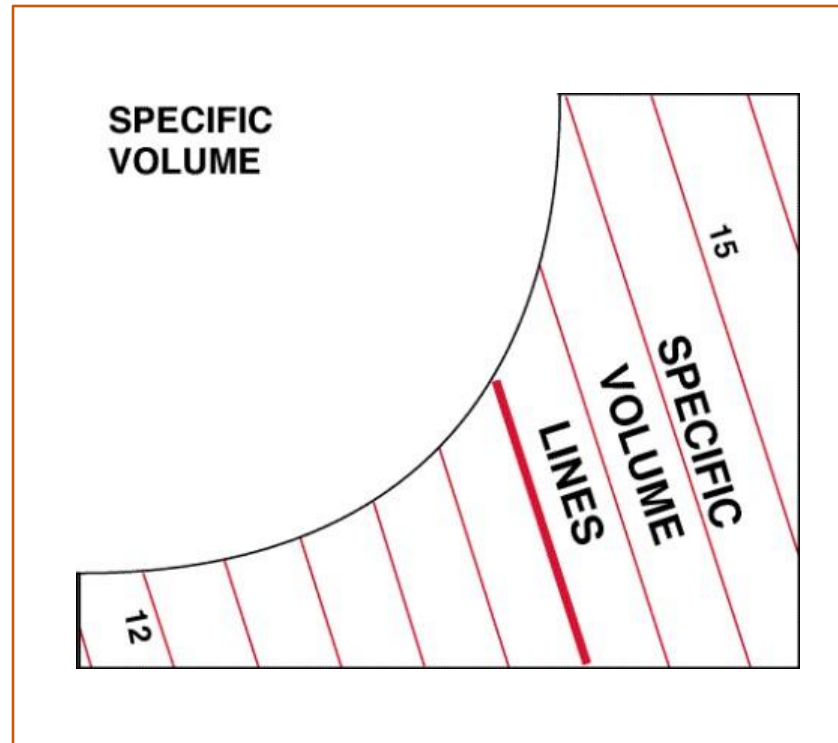
# CARA MEMBACA DIAGRAM PSIKHROMETRIK



# CARA MEMBACA DIAGRAM PSIKHROMETRIK



# CARA MEMBACA DIAGRAM PSIKHROMETRIK



# Contoh Soal

Sebuah hasil pengukuran suatu ruangan dengan menggunakan sling psikometric didapatkan hasil sebagai berikut :

- *Dry Bulb Temperature* =  $77^{\circ}\text{F}$
- *Wet Bulb Temperature* =  $68^{\circ}\text{F}$

Berdasarkan data hasil pengukuran di atas maka dengan menggunakan *Psychometric chart*, tentukanlah nilai-nilai dari :

1. *Dew Point Temperature* ?
2. *Relative Humidity* ?
3. *Humidity Ratio* ?
4. *Specific Entalpy* ?
5. *Spesific Volume* ?



## Penyelesaian :

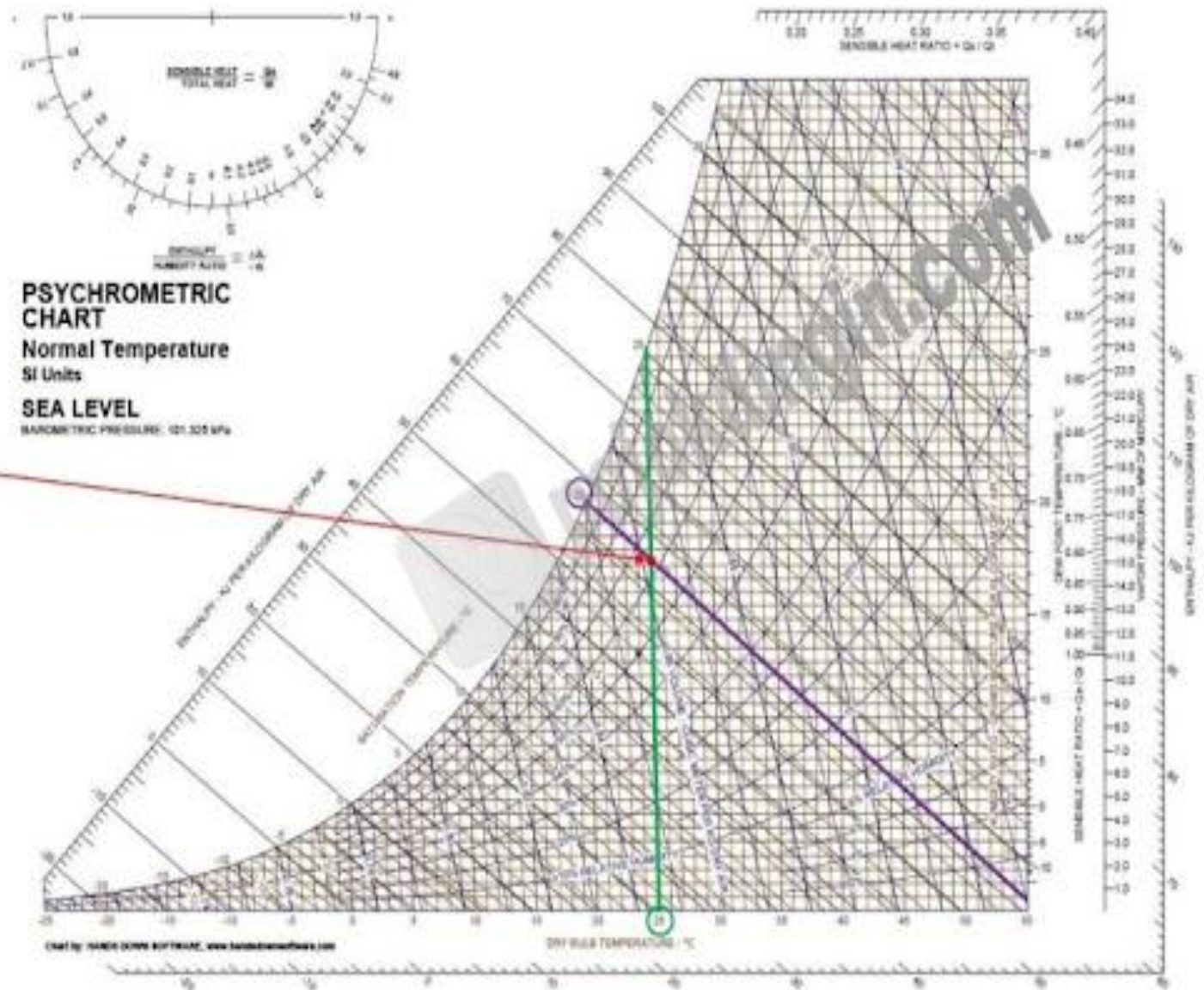
Karena *Psychometric chart* yang kita pakai menggunakan satuan celsius, maka ubahlah nilai *Dry Bulb* dan *Wet Bulb Temperature* ke dalam satuan °C

$$\begin{aligned}\bullet \text{Dry Bulb : } 77^{\circ}\text{F} &= 5/9 \times (77-32) \\ &= 5/9 \times 45 \\ &= 5 \times 5 \\ &= \mathbf{25^{\circ}\text{C}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Wet Bulb : } 68^{\circ}\text{F} &= 5/9 \times (68-32) \\ &= 5/9 \times 36 \\ &= 5 \times 4 \\ &= \mathbf{20^{\circ}\text{C}}\end{aligned}$$

Selanjutnya kita lihat *Psychometric chart* dan tentukan perpotongan antara nilai *Dry Bulb* ( $25^{\circ}\text{C}$ ) dan nilai *Wet Bulb* ( $20^{\circ}\text{C}$ )

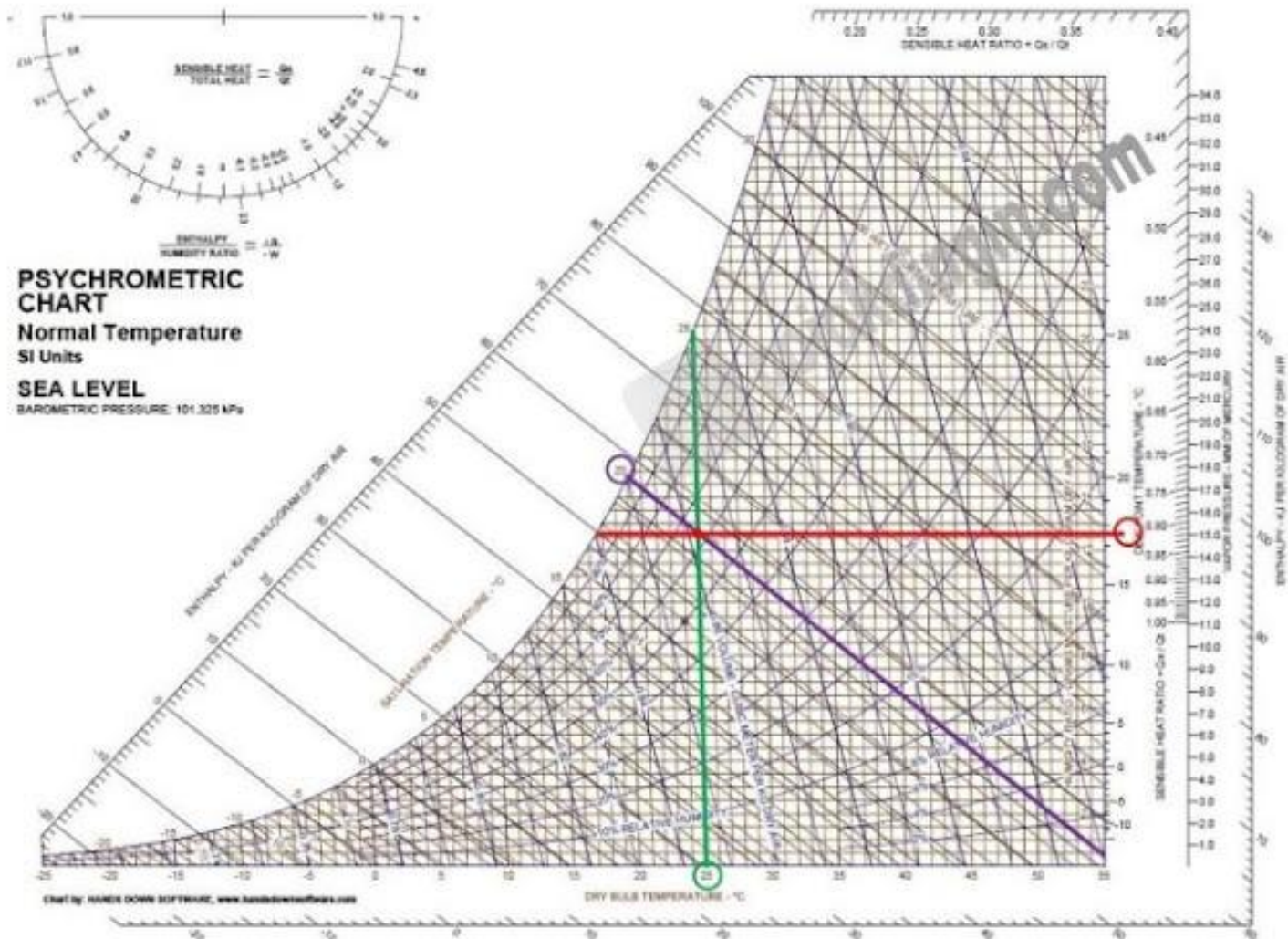
Tentukan titik  
perpotongan antara  
nilai Dry Bulb ( $25^{\circ}\text{C}$ )  
warna hijau dan  
nilai Wet Bulb ( $20^{\circ}\text{C}$ )  
warna ungu pada  
chart psychometric :



## 1. Menentukan nilai *Dew Point Temperature* (DP)

Dari titik perpotongan yang sudah di dapatkan sebelumnya, selanjutnya kita cari garis *Dew Point* yang tepat melalui titik tersebut. (lihat gambar di bawah berikut) :

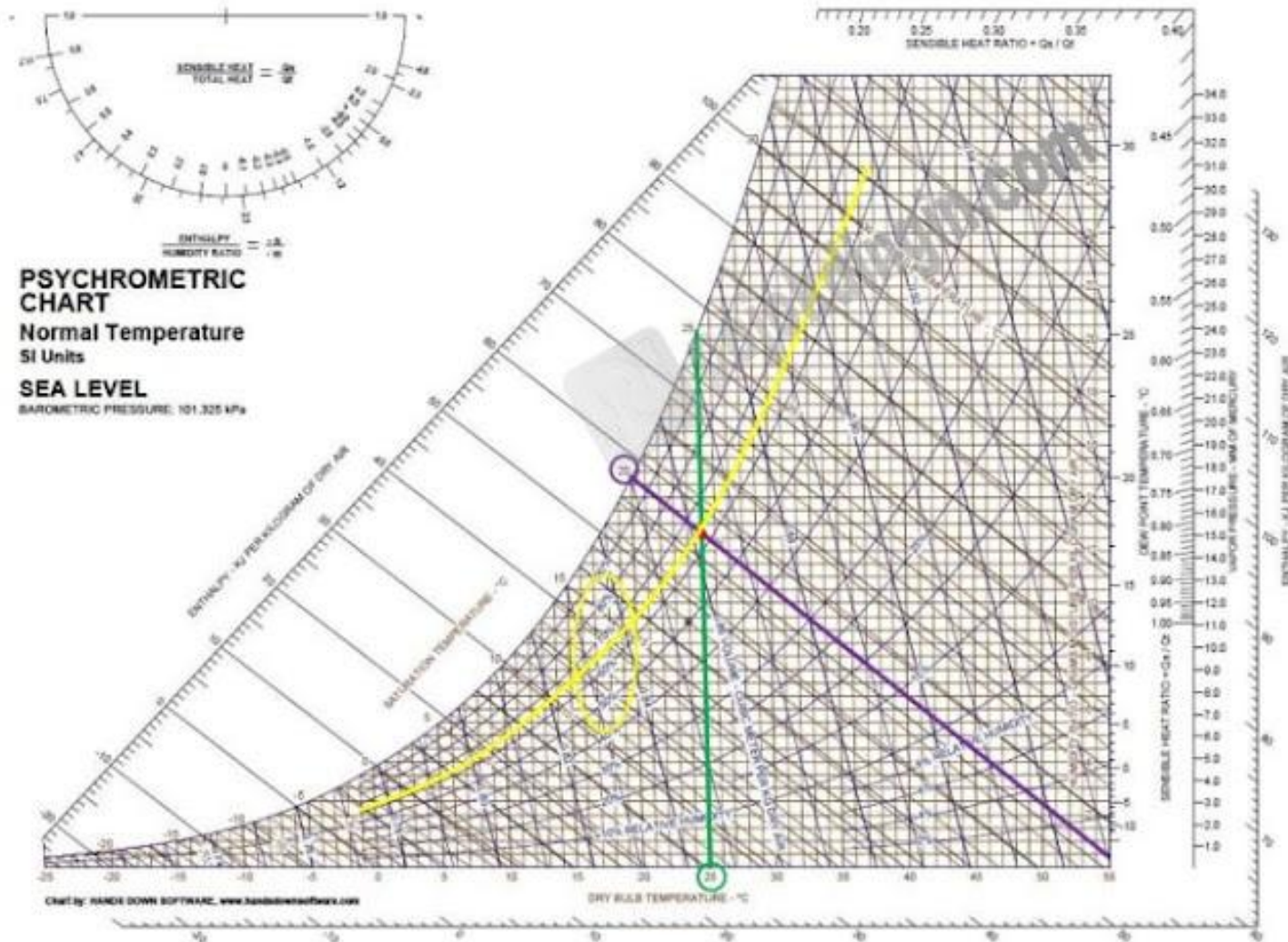
Dari gambar kita lihat nilai Dew Point pada garisberwarna merah menunjukkan nilai **17,5 °C**





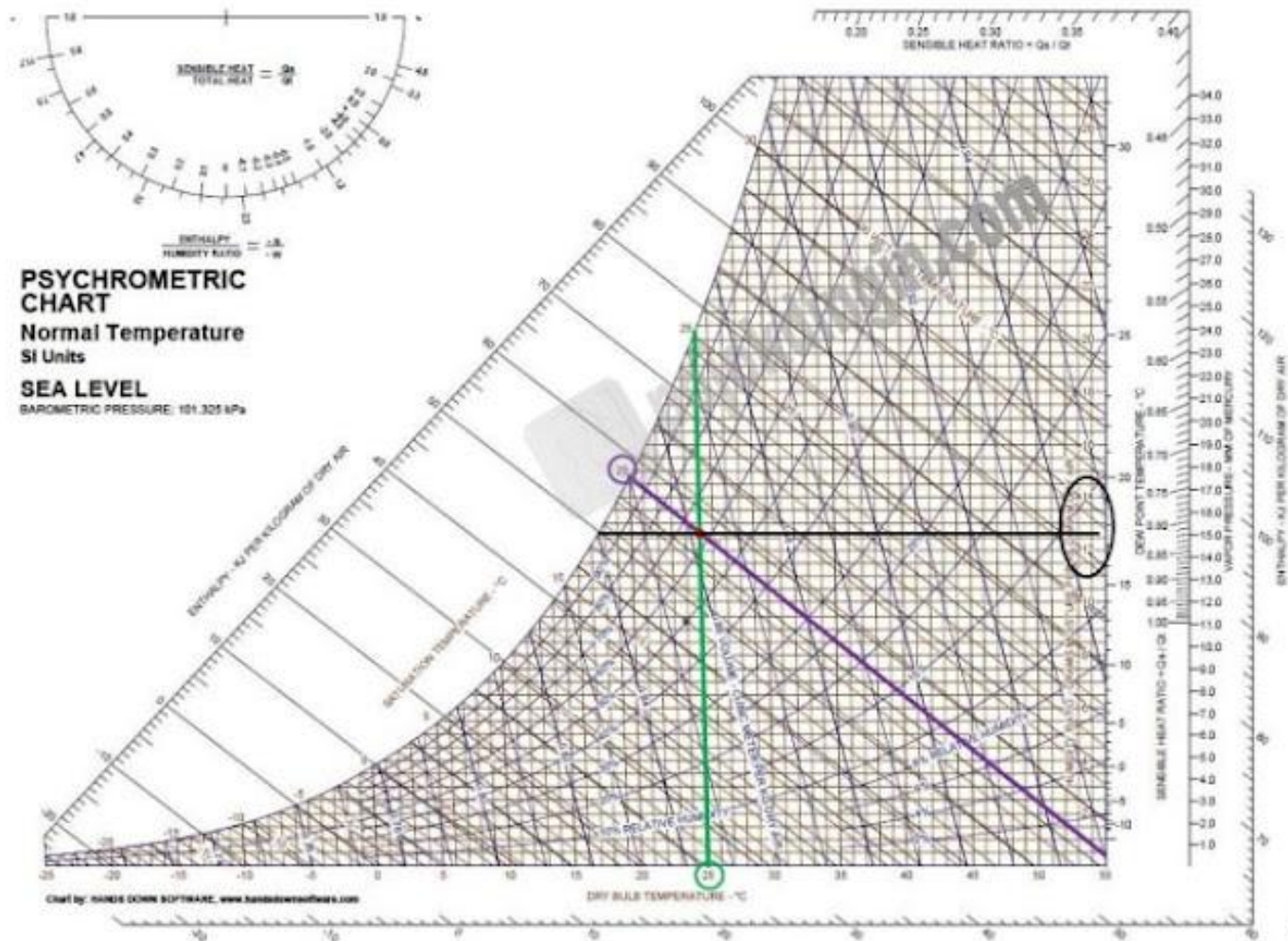
## 2. Menentukan nilai Relative Humidity (RH)

Dari titik perpotongan yang sudah di dapatkan sebelumnya, selanjutnya kita cari garis Relative Humidity yang tepat melalui titik tersebut. Dari gambar kita lihat nilai Relative Humidity pada garis berwarna kuning menunjukkan nilai 65 %



### 3. Menentukan nilai Humidity Ratio (HR)

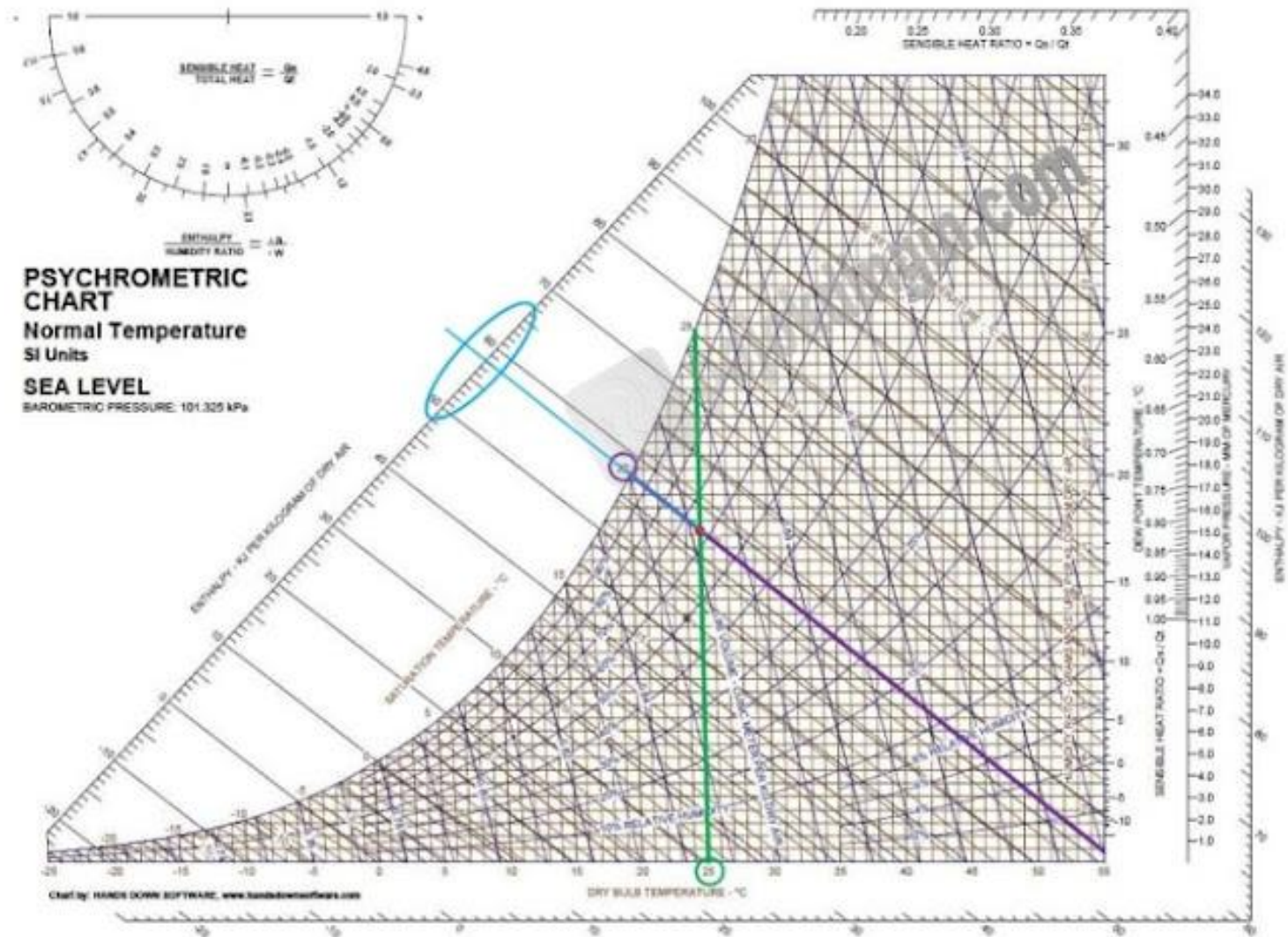
Dari titik perpotongan yang sudah di dapatkan sebelumnya, selanjutnya kita cari garis Humidity Ratio yang tepat melalui titik tersebut. :Dari gambar dapat kita lihat nilai Humidity Ratio pada garis berwarna hitam menunjukkan nilai 12,6 gr/kg





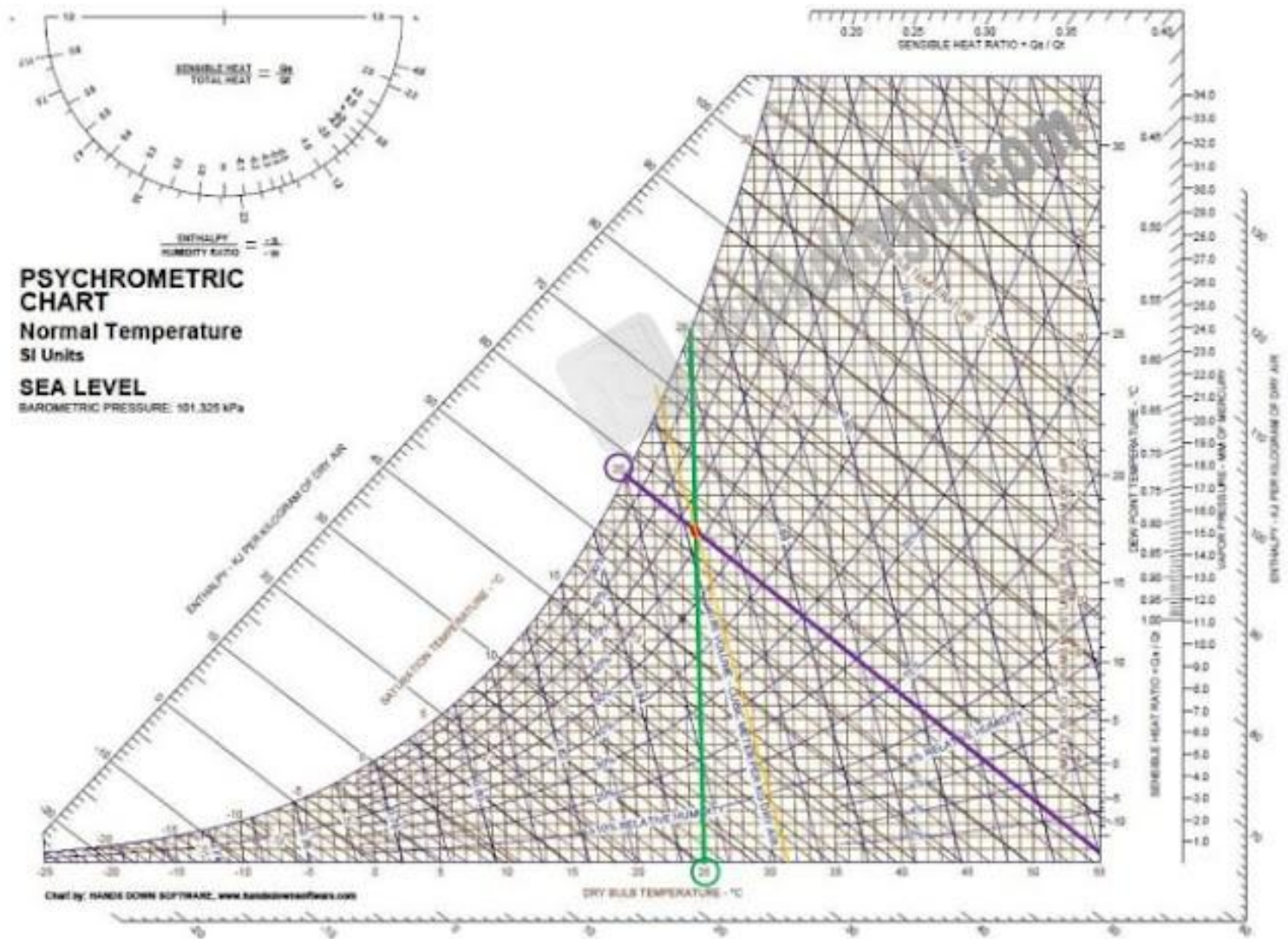
#### 4. Menentukan nilai Entalpy (Hy)

Dari titik perpotongan yang sudah di dapatkan sebelumnya, selanjutnya kita cari garis Specific Entalpy yang tepat melalui titik tersebut. Dari gambar di atas maka dapat kita lihat nilai Specific Entalpy pada garis berwarna Biru menunjukkan nilai 58 kJ/kg



## 5. Menentukan nilai Spesific Volume (SV)

Dari titik perpotongan yang sudah di dapatkan sebelumnya, selanjutnya kita cari garis Specific Volume yang tepat melalui titik tersebut. Dari gambar maka dapat kita lihat nilai Specific Volume pada garis berwarna Orange menunjukkan menunjukkan nilai 0,86 m<sup>3</sup>/kg



**EXAMPLE 9.3-4. Wet Bulb Temperature and Humidity**

A water vapor–air mixture having a dry bulb temperature of  $T = 60^{\circ}\text{C}$  is passed over a wet bulb as shown in Fig. 9.3-4, and the wet bulb temperature obtained is  $T_w = 29.5^{\circ}\text{C}$ . What is the humidity of the mixture?

**Solution:** The wet bulb temperature of  $29.5^{\circ}\text{C}$  can be assumed to be the same as the adiabatic saturation temperature  $T_s$ , as discussed. Following the adiabatic saturation curve of  $29.5^{\circ}\text{C}$  until it reaches the dry bulb temperature of  $60^{\circ}\text{C}$ , the humidity is  $H = 0.0135 \text{ kgH}_2\text{O/kg dry air}$ .



**EXAMPLE 9.3-2. Use of Humidity Chart**

Air entering a dryer has a temperature (dry bulb temperature) of  $60^{\circ}\text{C}$  ( $140^{\circ}\text{F}$ ) and a dew point of  $26.7^{\circ}\text{C}$  ( $80^{\circ}\text{F}$ ). Using the humidity chart, determine the actual humidity  $H$ , percentage humidity  $H_p$ , humid heat  $c_s$ , and the humid volume  $v_H$  in SI and English units.

**Solution:** The dew point of  $26.7^{\circ}\text{C}$  is the temperature when the given mixture is at 100% saturation. Starting at  $26.7^{\circ}\text{C}$ , Fig. 9.3-2, and drawing a vertical line until it intersects the line for 100% humidity, a humidity of  $H = 0.0225 \text{ kg H}_2\text{O/kg dry air}$  is read off the plot. This is the actual humidity of the air at  $60^{\circ}\text{C}$ . Stated in another way, if air at  $60^{\circ}\text{C}$  and having a humidity  $H = 0.0225$  is cooled, its dew point will be  $26.7^{\circ}\text{C}$ . In English units,  $H = 0.0225 \text{ lb H}_2\text{O/lb dry air}$ .

Locating this point of  $H = 0.0225$  and  $t = 60^{\circ}\text{C}$  on the chart, the percentage humidity  $H_p$  is found to be 14%, by linear interpolation vertically between the 10 and 20% lines. The humid heat for  $H = 0.0225$  is, from

Eq. (9.3-6),

$$\begin{aligned}c_s &= 1.005 + 1.88(0.0225) \\&= 1.047 \text{ kJ/kg dry air} \cdot \text{K} \quad \text{or} \quad 1.047 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \\c_s &= 0.24 + 0.45(0.0225) \\&= 0.250 \text{ btu/lb}_m \text{ dry air} \cdot ^\circ\text{F} \quad (\text{English})\end{aligned}$$

The humid volume at  $60^\circ\text{C}$  ( $140^\circ\text{F}$ ), from Eq. (9.3-7), is

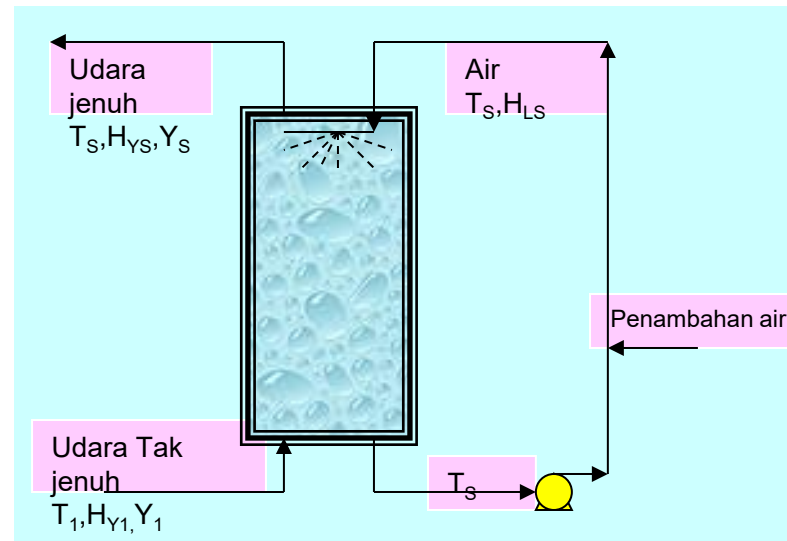
$$\begin{aligned}v_H &= (2.83 \times 10^{-3} + 4.56 \times 10^{-3} \times 0.0225)(60 + 273) \\&= 0.977 \text{ m}^3/\text{kg dry air}\end{aligned}$$

In English units,

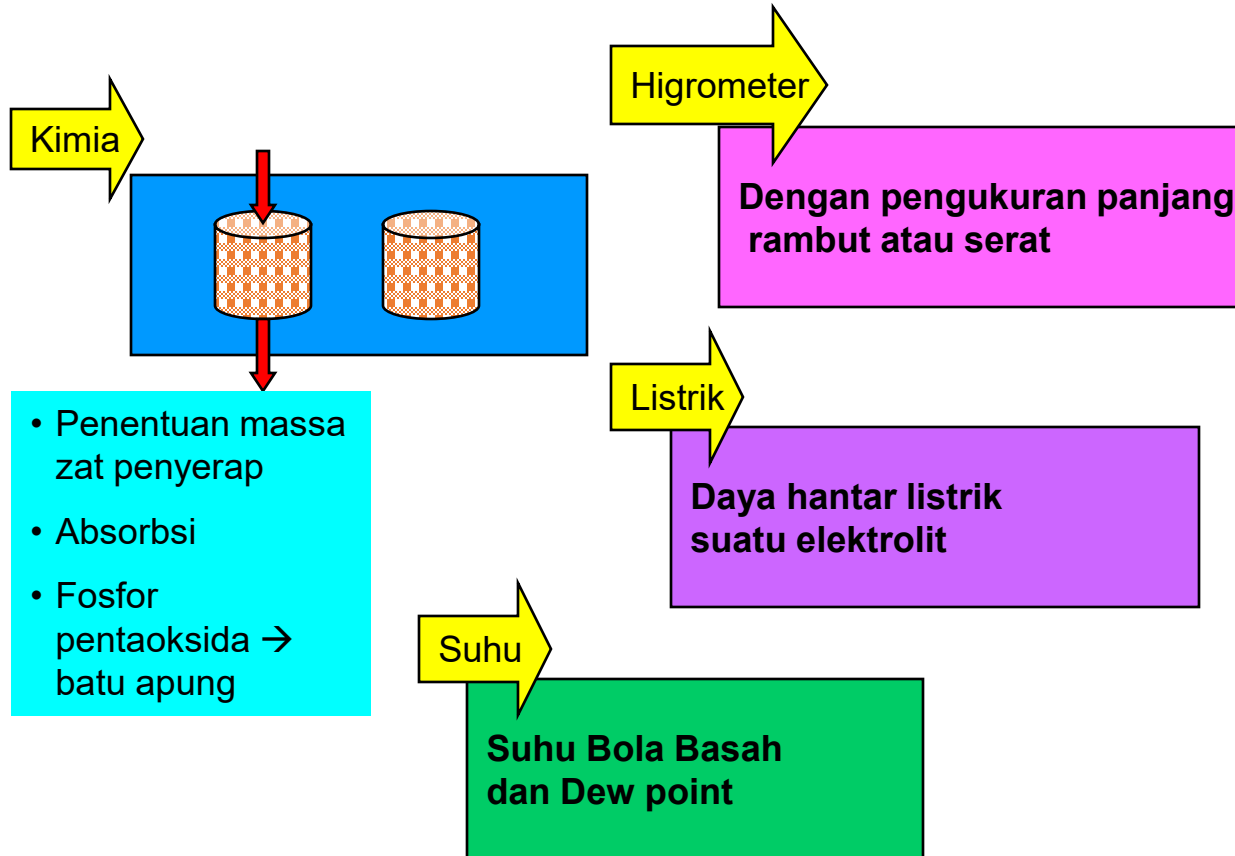
$$v_H = (0.0252 + 0.0405 \times 0.0225)(460 + 140) = 15.67 \text{ ft}^3/\text{lb}_m \text{ dry air}$$

# Suhu Penjenuhan Adiabatik

suhu yang akan dicapai suatu campuran uap-gas tak jenuh apabila campuran tersebut dijenuhkan dengan proses adiabatik.



# Menentukan Kelembaban



# TEMPERATUR UDARA

**Tiga suhu udara** yang perlu dipahami :

- **Suhu bola kering** (*dry bulb temperature*) – nilai yang tercatat oleh thermometer biasa.
- **Suhu bola basah** (*wet bulb temperature*) adalah temperatur yang ditunjukkan oleh thermometer yang dibalut kain kasa basah dengan udara yang lewat kasa dengan kecepatan  $\pm 5\text{m/s}$
- **Titik embun** (*dewpoint temperature*) adalah suhu dimana terjadi **kondensasi** bila udara lembab didinginkan pada **kelembaban mutlak** (*absolute humidity*) konstan.

# TEMPERATUR UDARA

**Tiga suhu udara** yang perlu dipahami :

- **Suhu bola kering** (*dry bulb temperature*) – nilai yang tercatat oleh thermometer biasa.
- **Suhu bola basah** (*wet bulb temperature*) adalah temperatur yang ditunjukkan oleh thermometer yang dibalut kain kasa basah dengan udara yang lewat kasa dengan kecepatan  $\pm 5\text{m/s}$
- **Titik embun** (*dewpoint temperature*) adalah suhu dimana terjadi **kondensasi** bila udara lembab didinginkan pada **kelembaban mutlak** (*absolute humidity*) konstan.

# ENTHALPY DAN VOLUME SPESIFIK

- **Enthalpy** udara lembab adalah **kandungan panas** dari udara **persatuan berat udara kering** pada temperatur acuan (*reference*) tertentu [**J/kg**]
- **Volume spesifik** (***specific volume***) udara lembab didefinisikan sebagai volume per satuan berat udara kering [**m<sup>3</sup>/kg**]

**Catatan:** kedua sifat thermodinamik ini ditentukan dalam basis udara kering seperti juga pada kelembaban mutlak (*absolute humidity*)

➤ Kelembaban absolut (W)

Perbandingan massa uap air yang dikandung terhadap massa udara kering pada keadaan tertentu

➤ Kelembaban Relatif (RH)

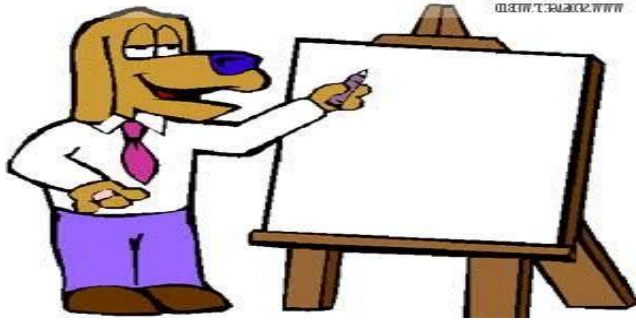
Perbandingan tekanan parsial uap air ( $P_v$ ) terhadap tekanan parsial uap air dalam udara jenuh ( $P_s$ ) pada suhu yang sama



SISTEM KERJA  
MESIN  
PENDINGIN  
(KULKAS)

# HUKUM II TERMODINAMIKA

*“Kalor mengalir secara alami dari benda yang panas ke benda yang dingin, kalor tidak akan mengalir secara spontan dari benda dingin ke benda yang panas”.*





**BAGAIMANA KULKAS  
DAPAT  
MENDINGINKAN  
MAKANAN?**

# 1. Kompresor

Kompresor merupakan unit tenaga dalam sistem mesin pendingin. Kompresor berfungsi memompa bahan pendingin keseluruhan bagian kulkas. Kompresor akan memompa gas *refrigerant* dibawah tekanan dan panas yang tinggi pada sisi tekanan tinggi dari sistem dan menghisap gas bertekanan rendah pada sisi *intake* (sisi tekanan rendah).

Ada 3 kerja yang dilakukan oleh kompresor yaitu :

1. Fungsi penghisap : proses ini membuat cairan *refrigerant* dari *evaporator* dikondensasi dalam temperatur yang rendah ketika tekanan *refrigerant* dinaikkan.
2. Fungsi penekanan : proses ini membuat gas *refrigerant* dapat ditekan sehingga membuat temperatur dan tekanannya tinggi lalu disalurkan ke kondensor, dan dikabutkan pada temperatur yang tinggi.
3. Fungsi pemompaan: proses ini dapat dioperasikan secara kontinu dengan mensirkulasikan *refrigerant* berdasarkan hisapan dan kompresi.



### 3. Filter (*Receiver Drier*)

*Receiver drier* merupakan tabung penyimpan *refrigerant* cair, dan ia juga berisikan fiber dan *desiccant* (bahan pengering) untuk menyaring benda-benda asing dan uap air dari sirkulasi *refrigerant*. Filter / *Receiver drier* mempunyai 3 fungsi ,yaitu menyimpan *refrigerant*, menyaring benda-benda asing dan uap air dengan *desiccant* dan filter agar tidak bersirkulasi pada sistem mesin pendingin, dan memisahkan gelembung gas dengan cairan *refrigerant* sebelum dimasukkan ke katup ekspansi. *Receiver drier* menerima cairan *refrigerant* bertekanan tinggi dari kondensor dan disalurkan ke katup ekspansi (katup ekspansi).



## 4. *Evaporator*

Zat pendingin cair dari *receiver drier* dan kondensor harus dirubah kembali menjadi gas dalam *evaporator*, dengan demikian *evaporator* harus menyerap panas, agar penyerapan panas ini dapat berlangsung dengan sempurna, pipa-pipa evaporator juga diperluas permukaannya dengan memberi kisi-kisi (elemen) dan kipas listrik (*blower*), supaya udara dingin juga dapat dihembus ke dalam ruangan.



## 5. *Thermostat*

Jika suhu pengabutan *refrigerant* menurun dibawah  $0^{\circ}\text{C}$  maka akan terbentuk pembekuan (*frost*) pada *fan evaporator* dan hal ini menyebabkan menurunnya aliran udara serta kapasitas pendinginan menurun.. Untuk mencegah seperti pembekuan / *frosting* ini, dan agar temperatur ruang dalam kendaraan dapat disetel sesuai dengan suhu yang diinginkan, maka *thermostats* dipasang.



## 6. *Heater*

Untuk menghancurkan salju yang ada dalam mesin pendingin kulkas. Hampir keseluruhan kulkas *nofrost* dan sebagian kecil kulkas *defrost* dilengkapi dengan pemanas ( *heater* ). Pemanas berfungsi mencairkan bunga es yang terdapat di *evaporator*. selain itu pemanas dapat mencegah terjadinya penimbunan bunga es pada bagian rak es dan rak penyimpanan buah di bawah rak es.



- **7. Fan Motor**

*Fan motor* atau kipas angin berguna untuk menghembuskan angin. Pada mesin pendingin kulkas ada dua jenis *fan*:

*Fan motor evaporator*

- Berfungsi menghembuskan udara dingin dari evaporator keseluruhan bagian rak ( rak es , sayur , dan buah ).

*Fan motor kondensor*

- Kipas angin ini diletakkan pada bagian bawah kulkas yang memiliki kondensor yang berukuran kecil yang berfungsi mengisap atau mendorong udara melalui kondensor dan kompresor. Selain itu berfungsi mendinginkan kompresor.

## **8. Overload Motor Protector**

*Overload Motor Protector* adalah komponen pengaman yang letaknya menyatu dengan terminal kompresor. Cara kerjanya serupa dengan sekering yang dapat menyambung dan memutus arus listrik. Alat ini dapat melindungi komponen kelistrikan dari kerusakan, akibat arus yang dihasilkan kompresor melebihi arus acuan normal.

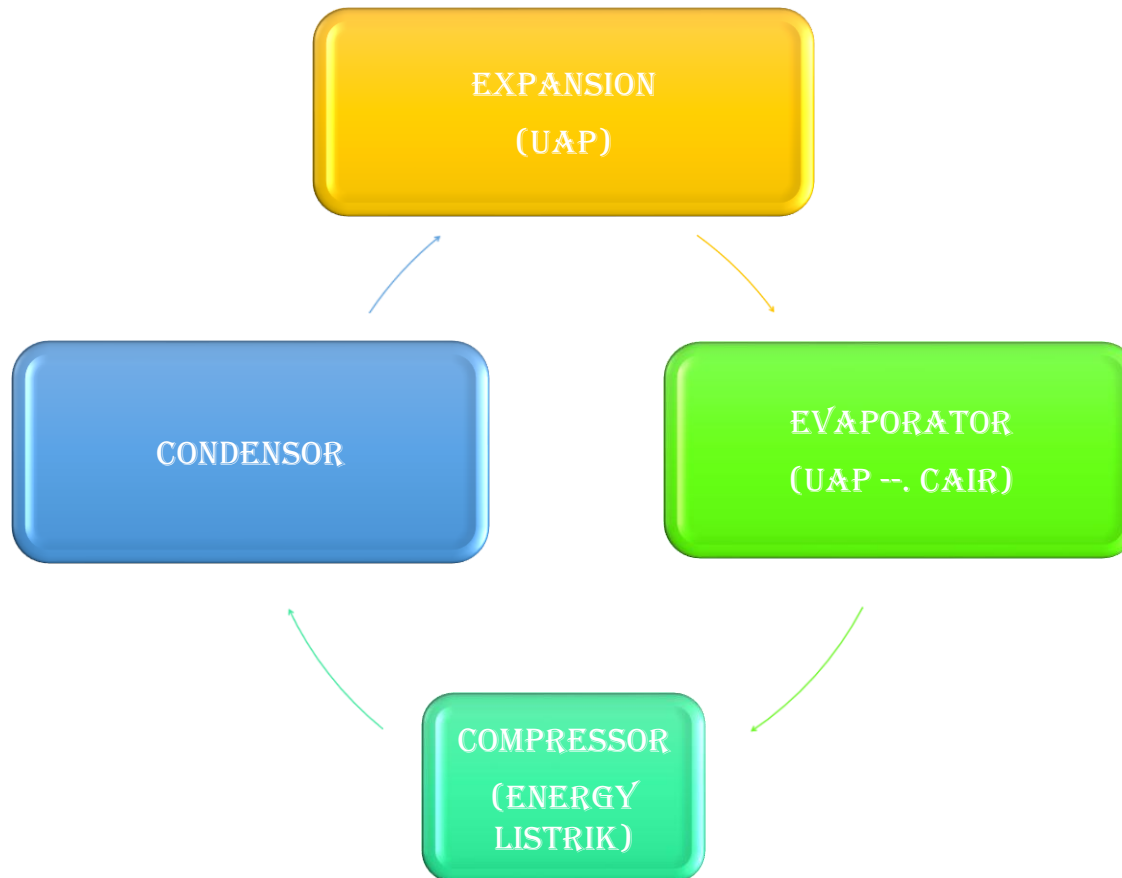
# PRINSIP KERJA MESIN PENDINGIN (KULKAS)

1. Saat refrigerant system melewati evaporator, terjadi perpindahan panas dari ruang pendingin sehingga menyebabkan refrigerant menguap (proses penguapan)
2. Refrigerant yang meninggalkan evaporator kemudian melewati compressor sehingga tekanan dan temperature (suhu) meningkat, energy ( $w$ ) yang diperlukan compressor agar dapat beroperasi diperoleh dari energy listrik
3. Selanjutnya refrigerant akan melewati condenser di mana refrigerant akan mengembun dengan cara melepaskan panas ( $q$ ) ke lingkungan yang temperaturnya lebih rendah
4. Akhirnya refrigerant akan sampai memasuki kantung ekspansi hingga temperature ( $t$ ) dan tekanan ( $p$ ) berkurang, dimana pada keadaan ini refrigerant berwujud fase uap air

# CONTOH MESIN PENDINGIN:



# SIKLUS KERJA MESIN PENDINGIN



Mesin pendingin pada dasarnya mengambil (melepaskan) kalor dari sistem ke lingkungan atau memindahkan kalor dari reservoir dingin ke reservoir panas dengan menggunakan Usaha.

Jadi usaha  $W$  yang dilakukan kepada sistem adalah selisih kalor yang diserap di reservoir suhu rendah  $Q_2$  dengan kalor yang dilepaskan di reservoir suhu tinggi  $Q_1$ .

$$W = Q_1 - Q_2$$

Kinerja mesin pendingin dinilai berdasarkan nilai koefisien kinerjanya. Koefisien kinerja  $C_p$  adalah perbandingan antara kalor yang diserap di reservoir suhu rendah dan usaha yang dikerjakan.

$$C_p = Q_2/W = Q_2/(Q_1 - Q_2) = T_2/(T_1 - T_2)$$

# Pendinginan Adiabatik

# Definisi

Pendinginan Adiabatik adalah proses pendinginan udara yang terjadi ketika udara mengalami penurunan suhu tanpa kehilangan atau mendapatkan panas dari lingkungan sekitarnya.

Dalam prosesnya, adiabatic cooling merubah energi panas menjadi energi kinetik. Saat molekul udara bergerak lebih cepat, yang mengakibatkan terjadinya penurunan suhu pada udara secara efektif.

# Adiabatic Saturation Temperature (suhu saturasi adiabatik)

Gas yang masuk dari campuran uap air-udara bersentuhan dengan semprotan air cair. Gas yang keluar memiliki kelembaban dan suhu yang berbeda dan prosesnya disebut dengan adiabatik. Air disirkulasikan kembali, dengan sedikit air pengganti (make up water) yang ditambahkan. Suhu air yang disirkulasikan kembali mencapai suhu keadaan tetap yang disebut suhu saturasi adiabatik,  $T_s$ . Jika gas yang masuk pada suhu  $T$  yang memiliki kelembaban  $H$  tidak jenuh,  $T_s$  akan lebih rendah dari  $T$ . Jika kontak antara gas yang masuk dan semprotan tetesan cukup untuk membawa gas dan cairan ke keseimbangan, udara yang keluar jenuh pada  $T_s$ , memiliki kelembaban  $H_s$ . Entalpi dari  $H_2O$  pengganti adalah nol. Ini berarti bahwa total entalpi campuran gas yang masuk = entalpi campuran gas yang keluar,

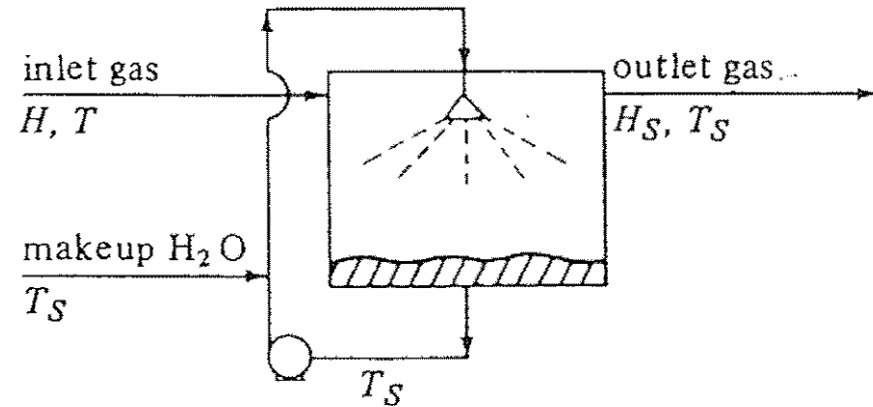


FIGURE 9.3-3. *Adiabatic air-water vapor saturator.*



# Dua kategori sistem pendingin adiabatik:

Pendinginan Adiabatik Langsung: Umumnya disebut sebagai pendinginan evaporatif, jenis ini menggunakan interaksi langsung antara air dan udara di dalam sistem. Proses pendinginan dimulai dengan menguapkan air ke dalam aliran udara. Saat udara mengasimilasi energi panas selama penguapan air, suhunya berkurang. Udara yang didinginkan dan dilembabkan ini kemudian disirkulasi ulang, secara efektif menurunkan suhu sistem atau ruang yang ditentukan.

Pendinginan Adiabatik Tidak Langsung: Berbeda dengan metode langsung, sistem ini menjalankan proses pendinginan di dalam penukar panas. Udara hangat yang berasal dari sistem membantu penguapan air. Namun, alih-alih resirkulasi, udara dingin ini dibuang ke luar. Bersamaan dengan itu, penukar panas mengeksplotasi efek pendinginan berikutnya untuk menipiskan suhu aliran udara sekunder yang disirkulasikan di dalam sistem atau ruang. Akibatnya, kelembaban sistem atau ruang tetap tidak terpengaruh, berbeda dengan metode pendinginan adiabatik langsung.

Setiap sistem pendingin membawa kelebihan dan kekurangan yang berbeda. Seleksi bergantung pada serangkaian pertimbangan, termasuk kebutuhan pendinginan khusus, kondisi iklim lokal, dan faktor berpengaruh lainnya. Varian pendinginan adiabatik ini menunjukkan keragaman dan kemampuan beradaptasi dari metodologi pendinginan yang efisien dan ramah lingkungan ini.

# Pendinginan adiabatik

Adiabatic cooling system sering kita gunakan dalam sistem pendingin udara evaporatif, untuk memproses udara luar yang akan masuk ke dalam ruangan. Udara luar yang panas akan melewati media basah atau saat menyemprotkannya dengan air sebelum terdistribusikan ke dalam ruangan.

Dengan demikian, suhu udara yang masuk ke dalam ruangan akan berubah menjadi lebih rendah. Yang tentunya akan memberikan kenyamanan bagi penghuni yang berada di dalamnya.

Prinsip dasar dari adiabatic cooling system adalah memanfaatkan perubahan fase air dari cair ke gas (penguapan). Untuk menghilangkan panas dari udara dan menghasilkan pendinginan.

Adiabatic cooling juga dapat kita temukan dalam fenomena alam. Seperti pada saat hujan atau ketika embun terbentuk. Ketika uap air dalam udara mendingin dan mencapai titik jenuh, uap air akan berubah menjadi tetes air. Selanjutnya melepaskan panas latent (energi panas yang terkandung dalam fase uap) ke sekitarnya.

Proses ini menyebabkan penurunan suhu udara di sekitar titik kondensasi. Dan dapat terasa sebagai pendinginan saat hujan turun atau embun terbentuk di permukaan yang lebih dingin.

**EXAMPLE 9.3-3. Adiabatic Saturation of Air**

An air stream at  $87.8^{\circ}\text{C}$  having a humidity  $H = 0.030 \text{ kg H}_2\text{O/kg dry air}$  is contacted in an adiabatic saturator with water. It is cooled and humidified to 90% saturation.

- (a) What are the final values of  $H$  and  $T$ ?
- (b) For 100% saturation, what would be the values of  $H$  and  $T$ ?

**Solution:** For part (a), the point  $H = 0.030$  and  $T = 87.8^{\circ}\text{C}$  is located on the humidity chart. The adiabatic saturation curve through this point is followed upward to the left until it intersects the 90% line at  $42.5^{\circ}\text{C}$  and  $H = 0.0500 \text{ kg H}_2\text{O/kg dry air}$ .

For part (b), the same line is followed to 100% saturation, where  $T = 40.5^{\circ}\text{C}$  and  $H = 0.0505 \text{ kg H}_2\text{O/kg dry air}$ .

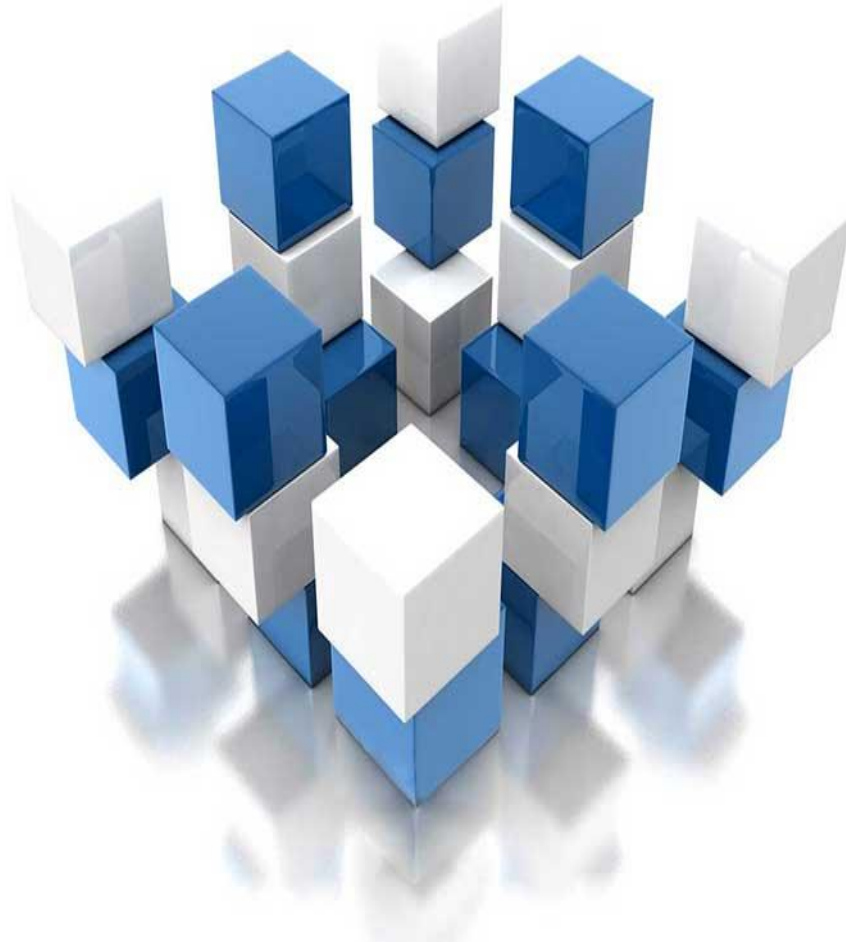
# DAFTAR PUSTAKA

1. Geankoplis : Transport Processes and Unit Phenomena

[https://www.academia.edu/36865213/Transport\\_Processes\\_and\\_Unit\\_Operations\\_Geankoplis\\_pdf](https://www.academia.edu/36865213/Transport_Processes_and_Unit_Operations_Geankoplis_pdf)

<http://wuccycling2018.uminho.pt/geankoplis-transport-processes-and-separation-process-principles-solution-manual.pdf>

2. <https://www.pojokdingin.com/2021/09/cara-membaca-psychrometric-chart.html>



**TERIMAKASIH**