

## BAB 9

# Kurva Kelembaban (*Psychrometric*) dan Penggunaannya

### a. Terminologi

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)

$$H = \frac{m_{H_2O}}{m_{udara\text{kering}}} = \frac{18 p_{H_2O}}{29(p_{total} - p_{H_2O})} = \frac{18 n_{H_2O}}{29(n_{total} - n_{H_2O})} \quad (9.1)$$

Terminologi yang berkaitan dengan campuran udara-uap air antara lain :

#### a) *Humid heat* ( $C_s$ )

Merupakan kapasitas panas campuran udara-uap air yang berdasarkan pada basis 1 lb atau kg udara kering.

$$C_s = C_{p\text{udara}} + (C_{p\text{H}_2\text{O}\text{uap}}) \quad (9.2)$$

Asumsi kapasitas panas untuk udara dan uap air adalah konstan di bawah range kondisi tertentu eksperimen pada perhitungan AC dan humidifikasi, sehingga dapat dituliskan pada satuan AE :

$$C_s = 0.240 + 0.45(H) \quad \text{Btu}/(^{\circ}\text{F}) \text{ (lb udara kering)} \quad (9.3)$$

Sedangkan pada satuan SI

$$C_s = 1.00 + 1.88(H) \quad \text{Btu}/(^{\circ}\text{F}) \text{ (lb udara kering)} \quad (9.4)$$

Tabel 9.1 Parameter yang Termasuk dalam Perhitungan Grafik Humidity

Symbol	Meaning	SI value	AE value
$C_{p \text{ air}}$	Heat capacity of air	1.00 kJ/(kg)(K)	0.24 Btu/(lb)(°F)
$C_{p \text{ H}_2\text{O vapor}}$	Heat capacity of water vapor	1.88 kJ/(kg)(K)	0.45 Btu/(lb)(°F)
$\Delta \hat{H}_{\text{vap}}$	Specific heat of vaporization of water at 0°C (32°F)	4502 kJ/kg	1076 Btu/lb
$\Delta \hat{H}_{\text{air}}$	Specific enthalpy of air	Equation (29.10)	Equation (29.9)
$\Delta \hat{H}_{\text{H}_2\text{O vapor}}$	Specific enthalpy of water vapor	steam tables	

**b) Humid volume**

Merupakan volume 1 lb atau kg udara kering plus uap air pada udara. Pada sistem AE :

$$\hat{V} = \frac{359 \text{ ft}^3}{1 \text{ lb mol}} \left| \frac{1 \text{ lb mol udara}}{29 \text{ lb udara}} \right| \frac{T(^{\circ}F) + 460}{32 + 460} + \frac{359 \text{ ft}^3}{1 \text{ lb mol}} \left| \frac{1 \text{ lb mol air}}{18 \text{ lb air}} \right| \frac{T(^{\circ}F) + 460}{32 + 460} \left| \frac{H \text{ lb air}}{\text{lb air}} \right|$$

$$= (0.730T(^{\circ}F) + 336) \left( \frac{1}{29} + \frac{H}{18} \right)$$

dimana  $\hat{V}$  dalam  $\text{ft}^3/\text{lb}$  udara kering. Pada sistem SI :

$$\hat{V} = \frac{22.415 \text{ m}^3}{1 \text{ kg mol}} \left| \frac{1 \text{ kg mol udara}}{29 \text{ kg udara}} \right| \frac{T(K)}{273} + \frac{22.415 \text{ m}^3}{1 \text{ kg mol}} \left| \frac{1 \text{ kg mol air}}{18 \text{ kg air}} \right| \frac{T(K)}{273} \left| \frac{H \text{ kg air}}{\text{kg air}} \right|$$

$$= 2.80 \times 10^{-3} T(K) + 4.56 \times 10^{-3} T(K) H$$

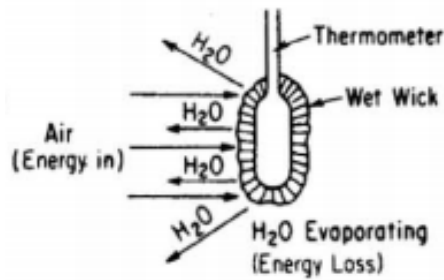
dimana  $\hat{V}$  dalam  $\text{m}^3/\text{kg}$  udara kering.

**c) Dry-bulb Temperature ( $T_{\text{DB}}$ )**

Merupakan temperature seperti umumnya yang selalu digunakan dengan mengukur pada gas dalam °F, atau °C, (°R atau K).

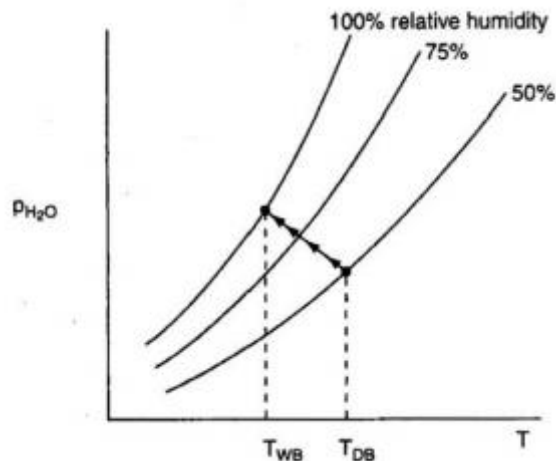
**d) Wet-bulb Temperature ( $T_{\text{WB}}$ )**

Pengukuran temperature dilakukan pada kondisi thermometer yang basah. Misalnya mengukur temperature dengan membasahi thermometer bagian ujung yang berisi merkuri dengan cotton/sumbu (*wick*) basah. Seperti ditunjukkan pada gambar 9.1.



Gambar 9.1 *Wet-bulb temperature*

Pada saat air di sumbu menguap, sumbu tersebut akan menjadi dingin dan terus menjadi dingin sampai laju energi energi yang ditransfer ke sumbu dengan *steady-state* oleh udara yang dialirkan sama dengan energi yang hilang karena air yang menguap dari sumbu. *Wet-bulb temperature* terjadi pada ujung pentolan (*bulb*) saat air pada sumbu berada dalam kondisi kesetimbangan dengan uap air di udara.



Gambar 9.2 Pendinginan karena evaporasi pada sumbu dengan kondisi awal *dry-bulb temperature* ( $T_{DB}$ ) menyebabkan thermometer yang dililit sumbu pada kondisi kesetimbangan untuk mencapai *wet-bulb temperature* ( $T_{WB}$ )

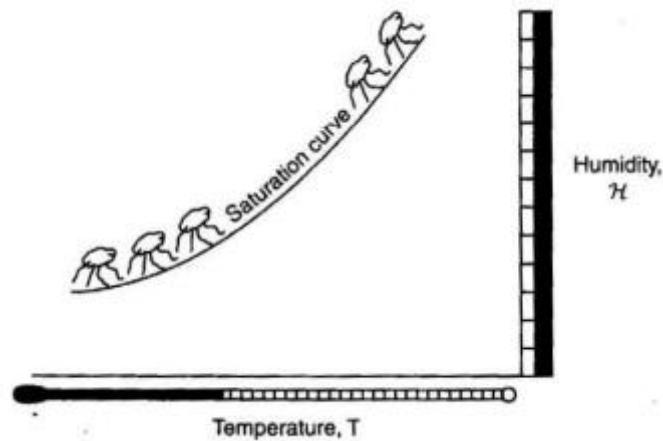
### 9.1 Grafik Humiditi (Psychrometric)

Grafik humidity atau secara formal disebut grafik psikometrik berhubungan dengan berbagai macam parameter yang termasuk di dalam neraca energi dan massa pada udara lembab.

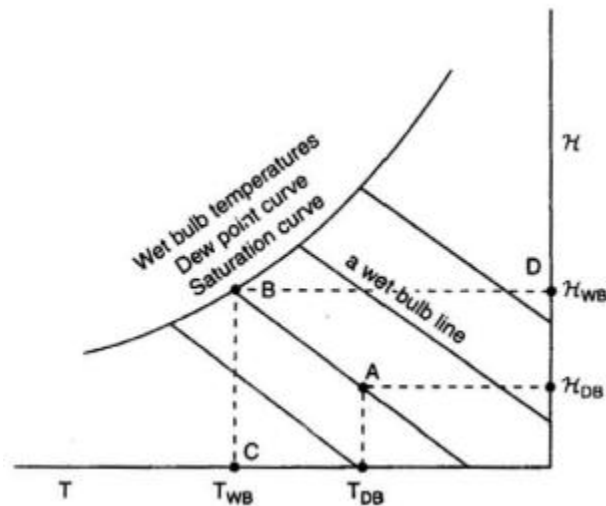
Pada grafik humiditi, bagian sumbu vertical (pada bagian kanan) adalah *specific humidity*, sedangkan bagian sumbu horizontal merupakan *dry-bulb temperature*.

### Garis *Wet-bulb* (Persamaan)

*Wet-bulb temperature* berdasarkan pada kesetimbangan antara laju energi ke pentolan (bulb) dan evaporasi air.



Gambar 9.3 Koordinat utama grafik humiditi



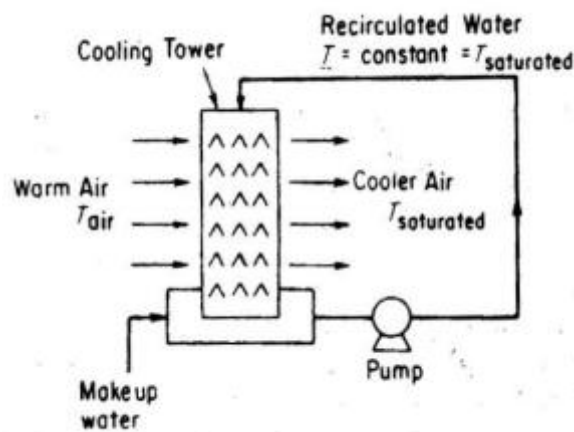
Gambar 9.4 Representasi proses *wet-bulb* pada grafik  $H(\text{humidity})-T$

Sebagai contoh, pada proses *wet-bulb* dengan kondisi awal  $T_{DB}$  (sepanjang garis horisontal) dan  $\mathcal{H}_{DB}$  (sepanjang garis vertikal) kombinasi kedua garis tersebut adalah titik A. Garis ditarik ke arah kiri melalui *wet-bulb line* menuju kurva

saturasi (di titik B). Lalu dari titik B ditarik garis ke bawah sehingga diperoleh  $T_{WB}$  (di titik C), dan ditarik garis ke samping arah kanan dari titik B sehingga diperoleh  $H_{DB}$  (di titik D).

### Garis Pendinginan Adiabatis (Persamaan)

Pendinginan adiabatic disebut juga humidifikasi seperti ditunjukkan pada gambar 9.5.



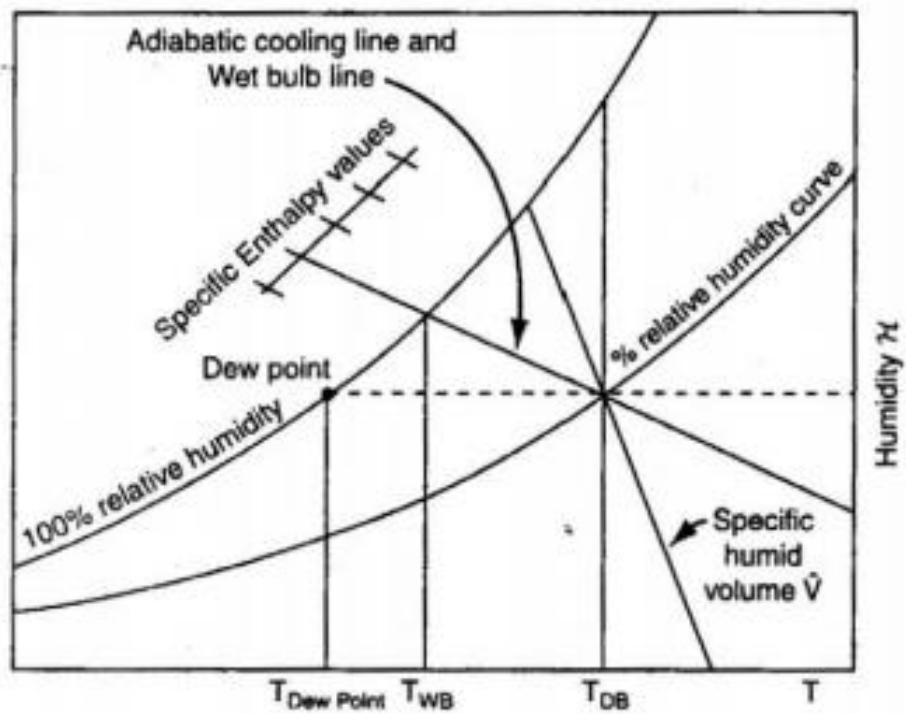
Gambar 9.5 Proses Humidifikasi Adiabatis dengan Air yang di-recycle

Pada proses ini, udara didinginkan dan dihumidifikasi (kandungan air naik) sedangkan sedikit air yang diresirkulasi diuapkan sehingga dibutuhkan *makeup water*. Pada kondisi **kesetimbangan** dan *steady-state*, temperature udara keluar sama dengan temperature air, dan udara yang keluar jenuh pada kondisi temperature ini.

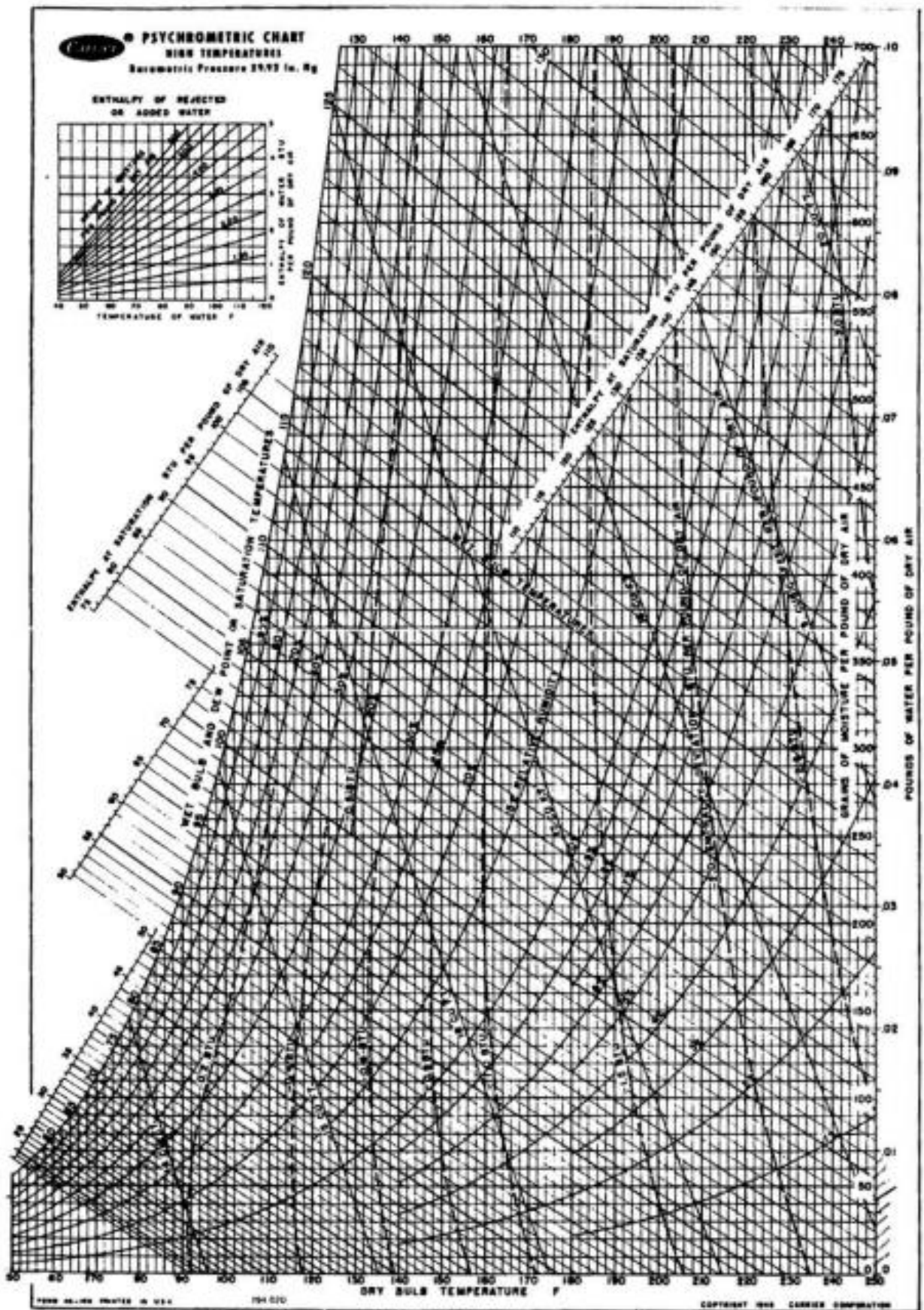
Catatan untuk garis dan kurva pada grafik humidity :

1. *Relative humidity* konstan diindikasikan dalam persen
2. Humid volume konstan
3. Garis pendinginan adiabatik dimana sama dengan *wet-bulb* atau **garis psikometrik**.
4. Kurva *relative humidity* 100% (contoh : kurva udara jenuh)
5. Entalpi spesifik per massa udara kering untuk campuran udara jenuh-uap

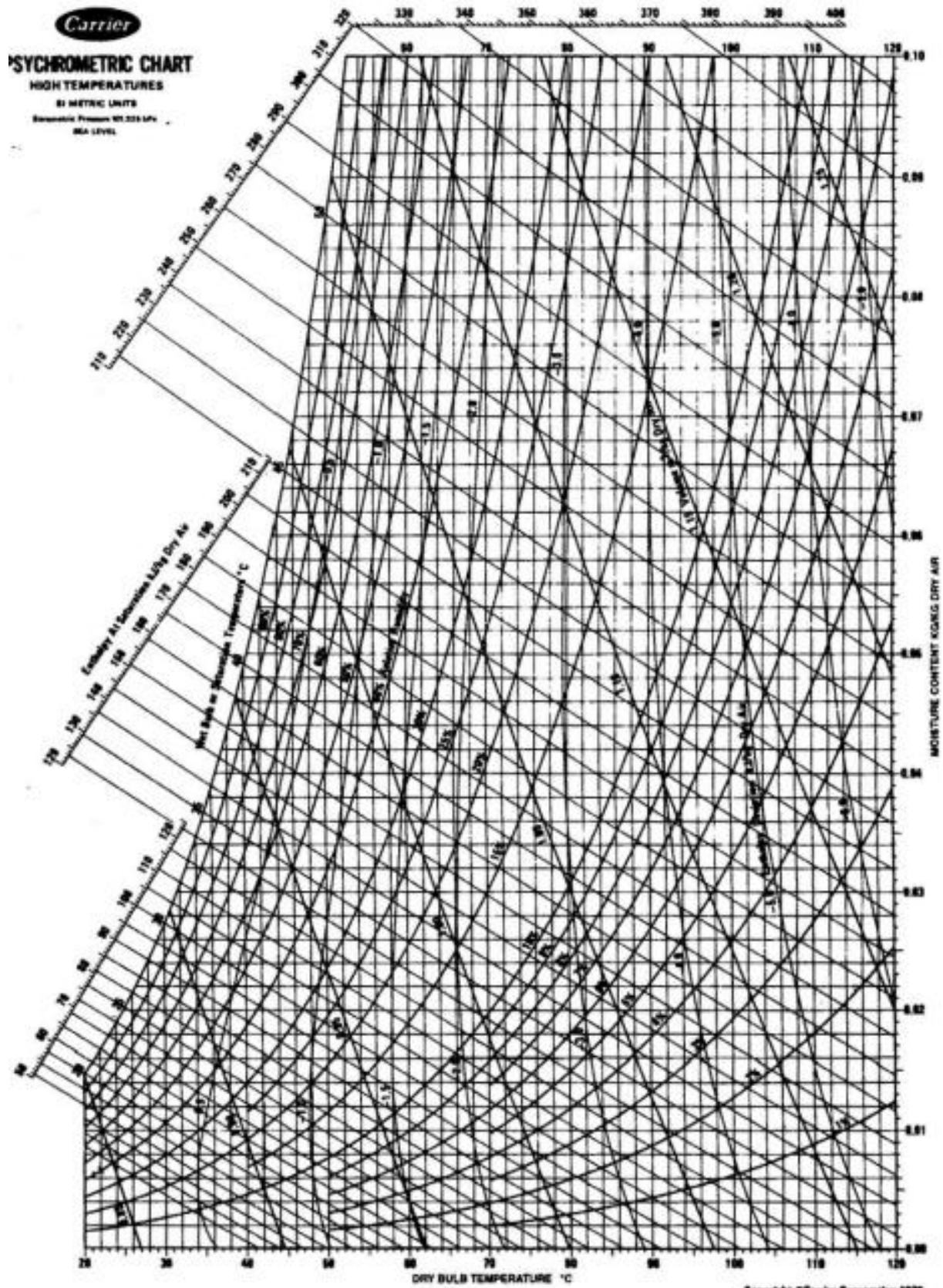
$$\text{air : } \Delta \hat{H} = \Delta \hat{H}_{\text{udara}} + \Delta \hat{H}_{\text{uap air}} (\text{Humidity})$$



Gambar 9.6 Kerangka Grafik humidity (psikometrik) menunjukkan hubungan temperature, dewpoint, wet- and dry-bulb temperature, relative humidity, specific humid volume, humidity enthalpy, adiabatic cooling/wet-bulb line.



Gambar 9.7 Grafik humidity (psikometrik) dalam satuan AE



Gambar 9.8 Grafik humidity (psikometrik) dalam satuan SI

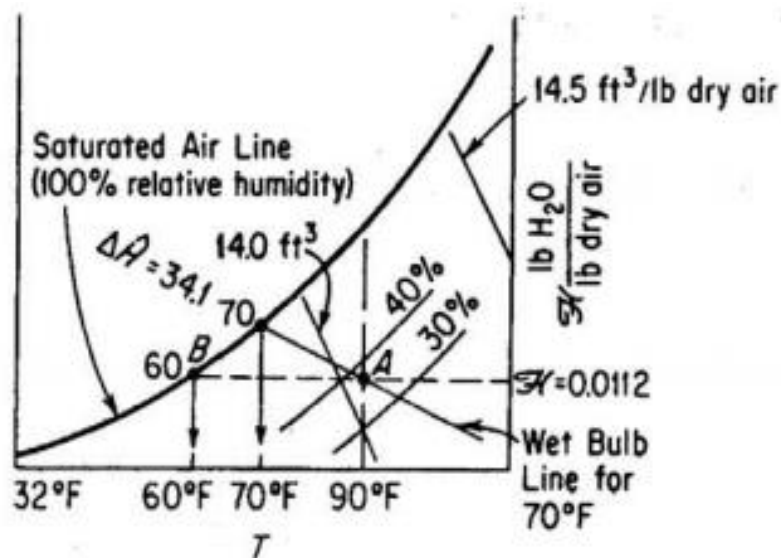


### Contoh 9.1 Menentukan Properti Udara Basah dengan Grafik Humiditi

Tuliskan semua properti yang dapat Anda temukan di grafik humidity (satuan AE) untuk udara basah pada *dry-bulb temperature*  $90^{\circ}\text{F}$  and *wet-bulb temperature*  $70^{\circ}\text{F}$ . Dapat diasumsikan bahwa seseorang dapat mengukur *dry-bulb temperature* menggunakan thermometer raksa dan *wet-bulb temperature* menggunakan *sling psychrometer*.

### Penyelesaian :

Penyelesaian dengan melihat grafik humidity satuan AE.



Penjelasan grafik :

Menentukan titik A dari *dry-bulb temperature* ( $90^{\circ}\text{F}$ ) dan *wet-bulb temperature* ( $70^{\circ}\text{F}$ ) dengan menarik garis ke atas dari  $T_{DB} = 90^{\circ}\text{F}$  kemudian berpotongan dengan garis *wet-bulb* pada suhu  $70^{\circ}\text{F}$  dan menariknya ke kiri hingga mencapai *saturated air line* (100% relative humidity). Dari titik A, ditarik ke arah kiri sampai dengan garis humidity ( $H$ ).

Properti yang lain bisa ditentukan setelah titik A fixed, properti tersebut antara lain :

a) *Dew Point*

Saat udara pada titik A didinginkan pada tekanan tetap (efeknya adalah humidity konstan) sehingga mencapai temperature dimana udara tersebut mulai terkondensasi. Proses ini dapat diketahui di grafik dengan menarik garis horizontal dari titik A ke kiri sampai berpotongan dengan *saturated air line*. *Dew point* ditunjukkan pada titik B yaitu pada suhu 60 °F.

b) *Relative humidity*

Diperoleh dengan menginterpolasi antara garis *Relative humidity* 30% dan 40%, sehingga dapat ditentukan *relative humidity* untuk titik A adalah sekitar 37%.

c) *Humidity (H)*

*Humidity* dapat diperoleh dengan menarik garis dari titik A ke kanan sehingga diperoleh nilai 0.0112 lb H<sub>2</sub>O/lb udara kering.

d) *Humid volume*

Melalui interpolasi antara garis *humid volume* 14.0 ft<sup>3</sup>/lb dan 14.5 ft<sup>3</sup>/lb, sehingga diperoleh *humid volume* sebesar 14.1 ft<sup>3</sup>/lb udara kering.

e) *Enthalpy*

Entalpi untuk udara jenuh pada kondisi *wet-bulb temperature* 70 °F adalah 34.1 Btu/lb udara kering. Deviasi entalpi ditunjukkan pada garis putus-putus pada gambar 9.7. Pada keadaan kurang dari udara jenuh, entalpi adalah -0.2 Btu/ lb udara kering sehingga entalpi udara yang sesungguhnya pada *relative humidity* 37% adalah  $34.1 - 0.2 = 33.9$  Btu/lb udara kering.

**b. Aplikasi Grafik Humiditi**

Pada beberapa proses industri, dapat ditemukan beberapa properti yang terdapat dalam grafik *humidity* antara lain :

- a) Proses pengeringan (udara basah masuk dan udara dengan kandungan air lebih sedikit keluar pda proses).
- b) Humidifikasi (air liquid diuapkan menjadi udara basah).
- c) Pembakaran (udara basah masuk ke proses dan air tambahan ditambahkan ke udara basah tersebut dari hasil pembakaran).
- d) *Air conditioning* (udara bersih dipanaskan dan didinginkan)

Kondensasi (udara kering didinginkan di bawah suhu jenuhnya)