

## BAB IV

### CAMPURAN GAS IDEAL TAK BEREAKSI DAN PSIKROMETRIK

Untuk menentukan keadaan suatu campuran diperlukan komposisi dan harga dua sifat intensif yang saling tidak bergantung seperti temperatur dan tekanan. Misalkan sebuah sistem tertutup yang berisikan campuran gas dari dua atau lebih komponennya. Komposisi campuran bisa dijelaskan dengan *massa* atau *jumlah mol* dari setiap komponen yang ada. Massa dan jumlah mol dan berat molekul dari sebuah komponen  $i$  dirumuskan:

$$n_i = \frac{m_i}{M_i}$$

dimana,  $m$  = massa

$n$  = jumlah mol

$M_i$  = berat molekul komponen  $i$

Jika  $m_i$  dalam kilogram,  $n_i$  dalam kmol.

Total massa campuran,  $m$ , adalah jumlah massa komponennya :

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_j = \sum m_i$$

Jumlah relatif komponen yang ada di dalam campuran bisa ditentukan sebagai *fraksi massa*. Fraksi massa,  $mf_i$  komponen  $i$  didefinisikan sebagai:

$$mf_i = \frac{m_i}{m}$$

Daftar fraksi massa dari komponen-komponen sebuah campuran disebut sebagai analisis *gravimetrik*.

Jumlah total mol dalam campuran,  $n$ , adalah jumlah dari mol masing-masing komponen :

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_j = \sum n_i$$

Daftar fraksi mol dari komponen-komponen campuran disebut analisis *molar*.

Jumlah relatif komponen didalam campuran disebut *fraksi mol*. Fraksi mol  $y_i$  dari komponen  $i$  didefinisikan sebagai :

$$y_i = \frac{n_i}{n}$$

Berat molekul rata-rata dari campuran,  $M$ , didefinisikan sebagai rasio massa total campuran,  $m$ , terhadap jumlah total mol campuran,  $n$  :

$$M = \frac{m}{n}$$

atau :

$$M = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_j}{n}$$

karena  $m_i = n_i M_i$  maka :

$$M = \frac{n_1 M_1 + n_2 M_2 + \dots + n_j M_j}{n}$$

atau :

$$M = \sum_{i=1}^j y_i M_i$$

Sebagai ilustrasi persamaan diatas, perhatikan udara. Sampel udara atmosfer berisi komponen-komponen gas termasuk uap air dan pengotor seperti debu dsb. Istilah *udara kering* merujuk kepada komponen gas ketika semua uap air dan pengotor disingkirkan. Analisis molar udara kering secara umum diberikan pada tabel 1. Berat molekul udara rata-rata udara kering kira-kira:

$$\begin{aligned} M &= 0,7808(28,02) + 0,2095(32,00) + 0,0093(39,94) + 0,0003(44,01) \\ &= 28,97 \text{ kg/kmol} \end{aligned}$$

Tabel 1. Perkiraan komposisi udara kering

Komponen	Fraksi mol (%)
Nitrogen	78,08
Oksigen	20,95
Argon	0,93
Karbon dioksida	0,03
Neon, helium, metana dll	0,01

### Hubungan $p$ - $v$ - $T$ Untuk Campuran Gas Ideal

Anggaplah sebuah sistem yang terdiri dari sejumlah gas pada bejana tertutup dengan volume  $V$  seperti gambar 1. Temperatur campuran gas adalah  $T$  dan tekanan adalah  $p$ . Campuran keseluruhan dianggap sebagai gas ideal, sehingga  $p$ ,  $V$ ,  $T$ , dan jumlah mol total campuran  $n$  dihubungkan dengan persamaan gas ideal :

$$p = n \frac{RT}{V}$$

Pembahasan keadaan ini dijelaskan dengan dua model yaitu model *Dalton* dan model *Amagat*.

#### **Model Dalton**

Model Dalton konsisten dengan konsep gas ideal yang dibuat dari molekul-molekul yang gaya tekannya bisa diabaikan dan volumenya bisa diabaikan relatif terhadap volume gas. Karena tidak adanya gaya antar molekul, sifat masing-masing komponen tidak dipengaruhi oleh komponen lainnya. Lebih jauh jika volume yang ditempati molekul sangat kecil terhadap volume total, molekul setiap gas bisa bebas bergerak di keseluruhan volume. Dengan penggambaran seperti ini, model Dalton menyimpulkan bahwa setiap komponen campuran berlaku seperti gas ideal seolah-olah ia sendiri pada campuran dengan suhu  $T$  dan volume  $V$ .

Sesuai dengan model Dalton, komponen individu tidak akan mempunyai tekanan campuran  $p$  tetapi mempunyai *tekanan parsial*. Sehingga jumlah tekanan parsial dari komponen-komponen campuran sama dengan tekanan campuran. Tekanan parsial,  $p_i$ , dirumuskan:

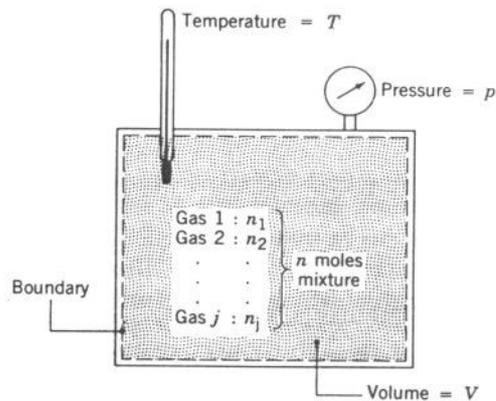
$$p_i = n_i \frac{RT}{V}$$

sehingga :

$$\frac{p_i}{p} = \frac{n_i RT / V}{n RT / V} = \frac{n_i}{n} = y_i$$

dengan :  $p_i$  = tekanan parsial  $i$

$n_i$  = jumlah mol komponen  $i$



Gambar 1. Campuran beberapa gas.

Sehingga tekanan parsial komponen  $i$  bisa dihitung dengan fraksi mol  $y_i$  dan tekanan campuran  $p$ .

$$p_i = y_i p$$

### **Model Amagat**

Yang mendasari model Amagat adalah setiap komponen campuran berlaku seperti gas ideal jika komponen berada terpisah pada tekanan  $p$  dan temperatur  $T$  dari campuran. Volume  $n_i$  komponen  $i$  pada tekanan  $p$  dan temperatur  $T$  disebut *volume parsial*,  $V_i$ . Jumlah volume parsial sama dengan volume total.

$$V_i = n_i \frac{RT}{p}$$

sehingga :

$$\frac{V_i}{V} = \frac{n_i RT / p}{n RT / p} = \frac{n_i}{n} = y_i$$

Volume parsial komponen  $i$  bisa ditulis dalam fraksi mol :

$$V_i = y_i V$$

### **U, H, dan S Untuk Campuran Gas Ideal**

Pada sistem tertutup yang terdiri dari campuran gas ideal:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_j = \sum U_i$$

$$H = H_1 + H_2 + \dots + H_j = \sum H_i$$

dimana  $U_i$  dan  $H_i$  adalah energi dalam dan enthalpi dari komponen  $i$  pada temperatur campuran. Energi dalam dan enthalpi dari gas ideal adalah hanya merupakan fungsi temperatur maka harga energi dalam dan enthalpi dari komponen campuran gas ideal juga merupakan hanya fungsi temperatur. Pada basis molar bisa ditulis :

$$n\bar{u} = n_1\bar{u}_1 + n_2\bar{u}_2 + \dots + n_j\bar{u}_j = \sum n_i\bar{u}_i$$

$$n\bar{h} = n_1\bar{h}_1 + n_2\bar{h}_2 + \dots + n_j\bar{h}_j = \sum n_i\bar{h}_i$$

dimana  $u$  dan  $h$  adalah energi dalam spesifik dan enthalpi spesifik campuran per mol campuran, dan  $u_i$  dan  $h_i$  adalah energi dalam spesifik dan enthalpi spesifik dari komponen  $i$  per mol  $i$ .

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^j y_i u_i$$

$$\bar{h} = \sum_{i=1}^j y_i h_i$$

Dengan menggunakan kalor spesifik didapatkan:

$$c_v = \sum_{i=1}^j y_i v_{v,i}$$

$$c_p = \sum_{i=1}^j y_i c_{p,i}$$

Entropi gas ideal tergantung atas 2 sifat, tidak satu sifat seperti energi dalam dan enthalpi. Untuk campuran :

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_j = \sum S_i$$

dimana entropi komponen,  $S_i$ , dievaluasi pada temperatur campuran  $T$  dan tekanan parsial  $p_i$  (atau pada temperatur  $T$  dan volume total  $V$ ).

$$n\bar{s} = n_1\bar{s}_1 + n_2\bar{s}_2 + \dots + n_j\bar{s}_j = \sum n_i\bar{s}_i$$

dimana  $\bar{s}$  adalah entropi campuran per mol campuran dan  $s_i$  adalah entropi komponen  $i$  per mol  $i$ .

$$\bar{s} = \sum_{i=1}^j y_i \bar{s}_i$$

Konversi dari basis massa ke basis molar untuk campuran adalah :

$$\bar{u} = Mu, \quad \bar{h} = Mh, \quad \bar{c}_p = Mc_p, \quad \bar{c}_v = Mc_v, \quad \bar{s} = Ms$$

dan untuk komponen  $i$ :

$$\bar{u}_i = M_i u_i, \quad \bar{h}_i = M_i h_i, \quad \bar{c}_{p,i} = M_i c_{p,i}, \quad \bar{c}_{v,i} = M_i c_{v,i}, \quad \bar{s}_i = M_i s_i$$

### Proses Pencampuran Pada Komposisi Konstan

Berikut ini dibahas jika campuran gas ideal mengalami proses dari suatu keadaan ke keadaan lainnya dimana komposisinya tidak berubah. Hal ini diperlihatkan pada gambar 2. Perubahan energi dalam dan enthalpi campuran selama proses adalah :

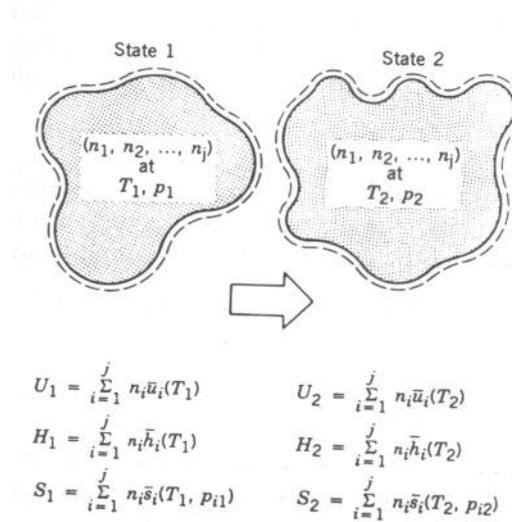
$$U_2 - U_1 = \sum_{i=1}^j n_i [\bar{u}_i(T_2) - \bar{u}_i(T_1)]$$

$$H_2 - H_1 = \sum_{i=1}^j n_i [\bar{h}_i(T_2) - \bar{h}_i(T_1)]$$

dimana  $T_1$  dan  $T_2$  adalah temperatur pada awal dan akhir proses. Dengan membagi dengan jumlah mol campuran,  $n$ , energi dalam campuran dan enthalpi campuran per mol campuran adalah :

$$\Delta u = \sum_{i=1}^j y_i [\bar{u}_i(T_2) - \bar{u}_i(T_1)]$$

$$\Delta h = \sum_{i=1}^j y_i [h_i(T_2) - h_i(T_1)]$$



Gambar 2. Proses campuran gas ideal.

Dengan cara yang sama, perubahan entropi campuran adalah :

$$S_2 - S_1 = \sum_{i=1}^j n_i [\bar{s}_i(T_2, p_{i2}) - \bar{s}_i(T_1, p_{i1})]$$

dimana  $p_{i1}$  dan  $p_{i2}$  masing-masing adalah tekanan parsial pada kondisi awal dan akhir untuk komponen  $i$ . Dengan membagi dengan mol total campuran :

$$\Delta s = \sum_{i=1}^j y_i [\bar{s}_i(T_2, p_{i2}) - \bar{s}_i(T_1, p_{i1})]$$

Persamaan-persamaan diatas bisa diroboh untuk basis massa.

### Tabel Gas Ideal

Harga  $u_i$  dan  $h_i$  untuk beberapa gas ideal bisa dilihat pada tabel A-16 sampai tabel A-22. Tabel A-16 adalah untuk udara dengan basis massa. Tabel gas ideal bisa juga dipakai untuk menghitung perubahan entropi. Perubahan entropi bisa dicari dengan persamaan :

$$\Delta s_i = \bar{s}_i^0(T_2) - \bar{s}_i^0(T_1) - R \ln \frac{p_{i2}}{p_{i1}}$$

Karena komposisi campuran konstan, rasio tekanan parsial di rumus tersebut adalah sama dengan rasio tekanan campuran.

$$\frac{p_{i2}}{p_{i1}} = \frac{y_i p_2}{y_i p_1} = \frac{p_2}{p_1}$$

Pada komposisi konstan, perubahan entropi spesifik komponen  $i$  :

$$\bar{\Delta s}_i = \bar{s}_i^0(T_2) - \bar{s}_i^0(T_1) - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

dimana  $p_1$  dan  $p_2$  adalah tekanan campuran pada kondisi awal dan akhir. Notasi  $s_i^0$  sebagai fungsi temperatur, harganya untuk beberapa gas bisa dilihat pada tabel A-17 sampai tabel A-22. Tabel A-16 adalah harga  $s^0$  untuk udara vs temperatur.

### Evaluasi Kalor Spesifik Konstan

Jika kalor spesifik  $c_{v,i}$  dan  $c_{p,i}$  komponen dianggap konstan, energi dalam spesifik, enthalpi spesifik dan perubahan entropi spesifik dari campuran dan komponennya diberikan oleh persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \bar{\Delta u} &= \bar{c}_{v,i}(T_2 - T_1), & \bar{\Delta u}_i &= \bar{c}_{v,i}(T_2 - T_1) \\ \bar{\Delta h} &= \bar{c}_{p,i}(T_2 - T_1), & \bar{\Delta h}_i &= \bar{c}_{p,i}(T_2 - T_1) \\ \bar{\Delta s} &= \bar{c}_p \ln(T_2/T_1) - \bar{R} \ln(p_2/p_1), & \bar{\Delta s}_i &= \bar{c}_{p,i} \ln(T_2/T_1) - \bar{R} \ln(p_2/p_1) \end{aligned}$$

### Mencampur Gas Ideal

Seperti semua proses yang spontan, mencampur gas yang berbeda adalah proses ireversibel. Pekerjaan mencampur merupakan sumber ireversibel sebab campuran terbentuk secara spontan. Masukan energi dari lingkungan diperlukan untuk memisahkan gas dan mengembalikannya ke kondisi awal.

## **APLIKASI PSIKROMETRIK**

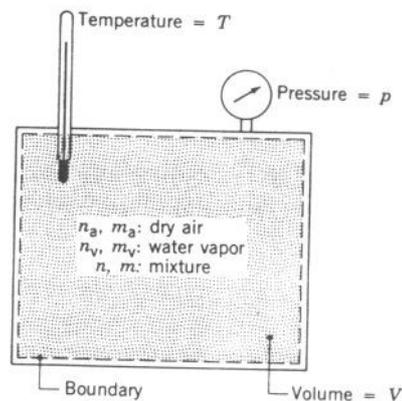
### **Udara Basah**

Udara basah yaitu campuran udara kering dan uap air dimana udara kering dianggap sebagai komponen murni. Oleh sebab itu campuran ini bisa dianggap sesuai dengan konsep campuran gas ideal.

Gambar 3 adalah sebuah sistem tertutup yang terdiri dari udara basah yang menempati volume  $V$  pada tekanan campuran  $p$  dan temperatur campuran  $T$ . Campuran keseluruhan dianggap memenuhi persamaan gas ideal. Sehingga:

$$p = \frac{n\bar{R}T}{V} = \frac{m(\bar{R}/M)T}{V}$$

dimana  $n$ ,  $m$ , dan  $M$  merupakan berturut-turut mol, massa, dan berat molekul campuran.



Gambar 3. Campuran udara kering dan uap air.

Setiap komponen campuran dianggap seolah-olah berdiri sendiri didalam volume  $V$  pada temperatur campuran  $T$  sambil menggunakan sebagian tekanan. Tekanan campuran adalah jumlah tekanan parsial dari udara kering dan uap air. Dengan rumus gas ideal didapatkan :

$$p_a = \frac{n_a \bar{R}T}{V} = \frac{m_a (\bar{R}/M_a)T}{V}$$

$$p_v = \frac{n_v \bar{R}T}{V} = \frac{m_v (\bar{R}/M_v)T}{V}$$

dengan :  $p$  = tekanan parsial komponen

$n$  = jumlah mol komponen

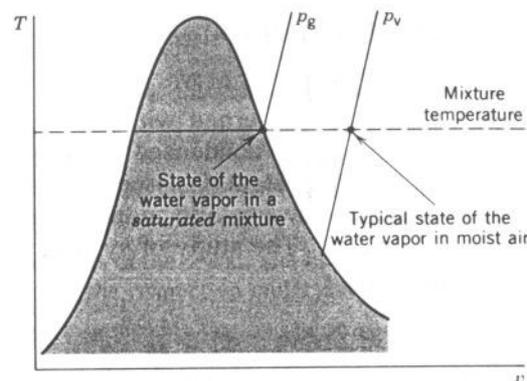
$m$  = berat massa

$M$  = berat molekul

$a, v$  = masing-masing adalah notasi untuk udara kering dan uap air.

Jumlah uap air yang ada biasanya kurang dari jumlah udara kering, sehingga harga  $n_v$ ,  $m_v$  dan  $p_v$  kecil relatif terhadap harga  $n_a$ ,  $m_a$  dan  $p_a$ .

Keadaan umum uap air di dalam udara basah diperlihatkan pada gambar 4. Pada kondisi tekanan parsial  $p_v$  dan temperatur campuran  $T$ , uap adalah panas lanjut (superheat). Jika tekanan parsial uap air adalah sama dengan tekanan jenuh air pada temperatur campuran,  $p_g$ , campuran disebut *jenuh*. *Udara jenuh* adalah campuran udara kering dan uap air jenuh.



Gambar 4. Diagram T-v untuk uap air di dalam campuran udara-air.

## Rasio Kelembaban dan Kelembaban Relatif

Rasio kelembaban,  $\omega$  : adalah rasio massa uap air terhadap massa udara kering.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

Rasio kelembaban (humidity ratio) disebut juga *kelembaban spesifik*.

Lebih lanjut rumus rasio kelembaban bisa dijabarkan :

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_v p_v V / \bar{R} T}{M_a p_a V / \bar{R} T} = \frac{M_v p_v}{M_a p_a}$$

karena  $p_a = p - p_v$  dan rasio berat molekul air terhadap udara kering adalah 0,622, rumus diatas bisa ditulis:

$$\omega = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v}$$

Kelembaban relatif,  $\phi$ , didefinisikan sebagai rasio fraksi mol uap air,  $y_v$  pada udara basah yang diukur terhadap fraksi mol uap air,  $y_{v,sat}$ , pada udara basah jenuh pada temperatur dan tekanan yang sama.

Atau :

$$\phi = \frac{y_v}{y_{v,sat}} \Big|_{T,p}$$

dan  $p_v = y_v \cdot p$ ;  $p_g = y_{v,sat} \cdot p$  maka :

$$\phi = \frac{p_v}{p_g} \Big|_{T,p} \quad (\text{lihat gambar 4}).$$

Rasio kelembaban bisa dicari dengan alat yang bernama : *higrometer* dimana sampel udara basah direaksikan dengan zat kimia hingga semua uap air yang ada diserap. Jumlah uap air yang diserap dicari dengan menimbang zat kimia tersebut. Harga  $U$ ,  $H$  dan  $S$  dari udara basah bisa dicari dengan menjumlahkan harga masing-masing komponen, contohnya harga entalpi udara basah adalah:

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v$$

atau:

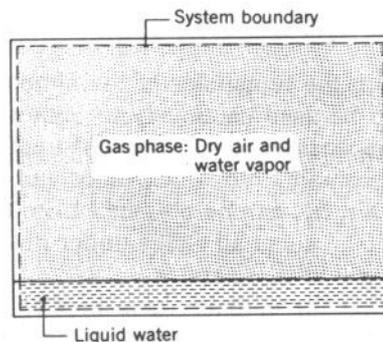
$$\frac{H}{m_a} = h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v = h_a + \omega h_v$$

Harga entalpi udara kering dan uap air pada persamaan diatas diukur pada temperatur campuran. Merujuk ke tabel data uap atau diagram Mollier untuk air menunjukkan bahwa enthalpi uap air panas lanjut pada tekanan uap rendah hampir sama dengan harga uap jenuh pada temperatur yang sama. atau  $h_v \approx h_g(T)$ .

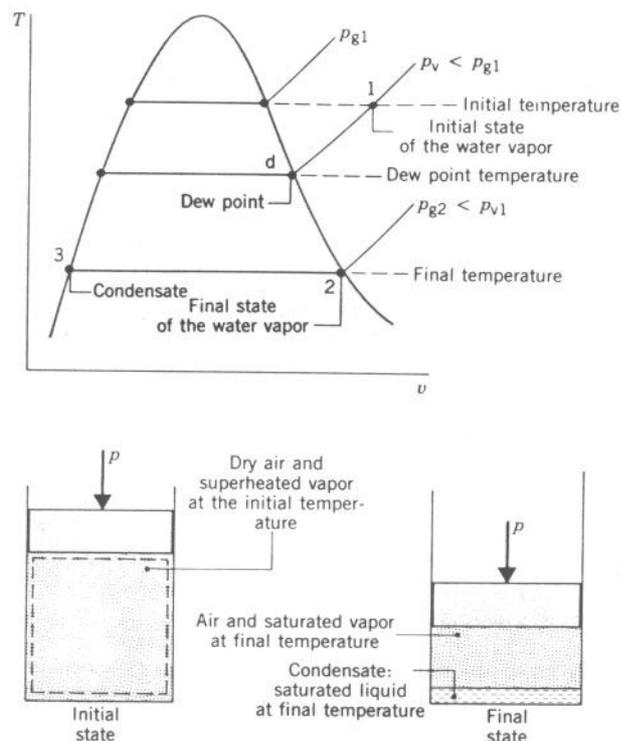
### Titik Embun

Jika temperatur turun, uap air yang ada di udara bisa berkondensasi. Fenomena ini umumnya bisa dijumpai misalnya pada pipa yang mengalirkan air dingin.

Pada gambar 5, adalah sebuah sistem tertutup yang didalamnya terdapat udara basah. Udara didinginkan pada tekanan konstan, diagram  $T-v$  nya bisa dilihat pada gambar 6.



Gambar 5. Sistem yang terdiri dari udara basah yang bersinggungan dengan air.



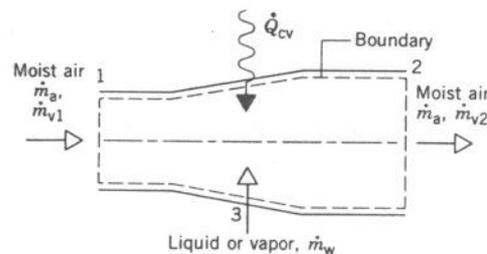
Gambar 6. Keadaan air pada udara basah yang didinginkan pada tekanan campuran konstan.

Pertama-tama, uap air adalah pada kondisi panas lanjut dititik 1. Pada tahap pertama pendinginan, tekanan dan komposisi uap air konstan. Karena  $p_v = y_v p$ , tekanan parsial uap air berada dalam keadaan konstan dan uap air akan dingin pada  $p_v$  konstan dari titik 1 ke titik d yang disebut *titik embun*. Temperatur

jenuh pada  $p_v$  disebut *temperatur embun*. Pada bagian selanjutnya dari proses pendinginan, sistem akan didinginkan dibawah temperatur titik embun dan uap air akan mulai berkondensasi. Sisa uap air yang masih berupa gas akan jenuh pada temperatur akhir (final), titik 2 pada gambar 6, dengan tekanan parsial sama dengan tekanan jenuh  $p_{g2}$ . Kondensat akan menjadi cairan jenuh pada temperatur akhir, titik 3 pada gambar 6. Tekanan parsial turun dari  $p_v$  ke  $p_{g2}$  karena fraksi mol uap air yang ada pada kondisi akhir lebih rendah dibandingkan dengan kondisi awal karena adanya kondensasi.

### Penerapan Konservasi Massa dan Konservasi Energi pada Sistem Psikrometrik

Piranti-piranti pada proses pengkondisian udara (AC) seperti pemanasan, pendinginan, pelembaban atau penurunan kelembaban biasanya dianalisis pada basis volume atur. Gambar 7, memperlihatkan piranti dengan dua saluran masuk dan satu saluran keluar. Aliran udara basah masuk pada seksi 1, aliran udara basah keluar pada seksi 3, dan aliran air masuk pada seksi 3. Aliran air bisa cair atau uap. Perpindahan kalor dengan laju  $\dot{Q}_{cv}$  bisa terjadi antara volume atur dengan lingkungannya.



Gambar 7. Sistem untuk pengkondisian udara basah.

Pada kondisi stedi, berlaku:

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (\text{udara kering})$$

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_w = \dot{m}_{v2} \quad (\text{air})$$

sedangkan :

$$\dot{m}_{v1} = \omega_1 \dot{m}_a \quad \text{dan} \quad \dot{m}_{v2} = \omega_2 \dot{m}_a$$

kesetimbangan massa air:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1)$$

Jika air ditambahkan pada seksi 3,  $\omega_2$  akan lebih besar dari  $\omega_1$ .

Dengan mengasumsikan  $W_{cv} = 0$  dan mengabaikan semua efek energi kinetik dan potensial, kesetimbangan laju energi pada kondisi stedi menjadi:

$$0 = \dot{Q}_{cv} + (\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{v1}) + \dot{m}_w h_w - (\dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{av2})$$

Untuk analisis piranti AC, entalpi uap air masuk dan keluar bisa dievaluasi sebagai entalpi uap jenuh, sehingga menghasilkan:

$$0 = \dot{Q}_{cv} + (\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{g1}) + \dot{m}_w h_w - (\dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{g2})$$

dan:

$$0 = \dot{Q}_{cv} + \dot{m}_a (h_{a1} + \omega_1 h_{g1}) + \dot{m}_w h_w - \dot{m}_a (h_{a2} + \omega_2 h_{g2})$$

$$0 = \dot{Q}_{cv} + \dot{m}_a [(h_{a1} - h_{a2}) + \omega_1 h_{g1} + (\omega_2 - \omega_1) h_w - \omega_2 h_{g2}]$$

Yang bergaris pertama bisa dievaluasi dari Tabel A-16 dan yang bergaris kedua bisa dievaluasi menggunakan data tabel uap bersama-sama dengan harga  $\omega_2$  dan  $\omega_1$  yang diketahui.

### Saturasi Adiabatik Dan Temperatur Wet Bulb (Basah)

Rasio kelembaban campuran uap air – udara bisa ditentukan jika tiga parameter sifat campuran diketahui yaitu : tekanan  $p$ , temperatur  $T$ , dan temperatur saturasi adiabatik  $T_{as}$ . Persamaan yang menghubungkan ketiga ini adalah:

$$\omega = \frac{h_a(T_{as}) - h_a(T) + \omega' [h_g(T_{as}) - h_f(T_{as})]}{h_g(T) - h_f(T_{as})}$$

dimana:  $h_f$  dan  $h_g$  adalah entalpi air jenuh dan uap air jenuh.

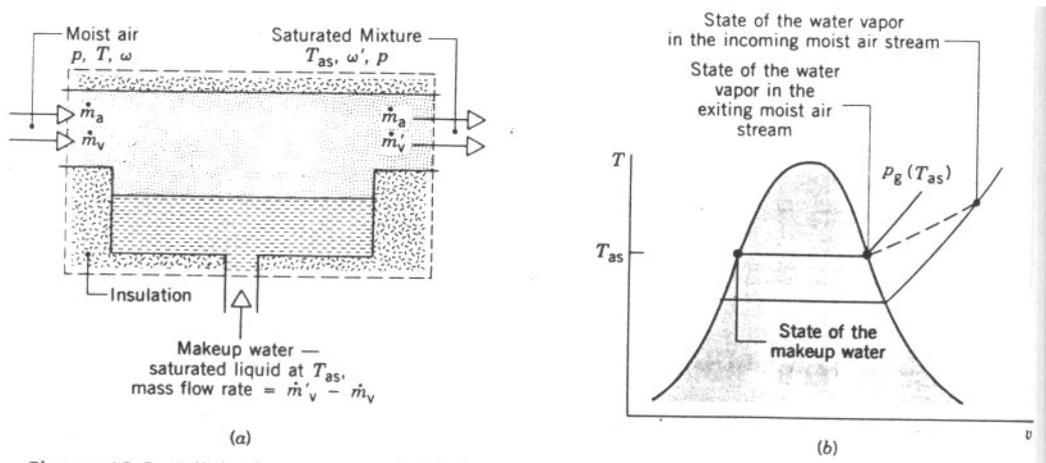
$h_a$  = entalpi udara kering.

$$\omega' = 0,622 \frac{p_g(T_{as})}{p - p_g(T_{as})}$$

$p_g(T_{as})$  = tekanan jenuh pada temperatur saturasi adiabatik

$p$  = tekanan campuran

Gambar 8 memperlihatkan proses saturasi adiabatik, udara basah mengalir melalui dua saluran masuk dan satu saluran keluar. Tidak ada perpindahan kalor ke lingkungan.



Gambar 8. Saturator adiabatik. (a) Skema. (b) Gambaran Proses.

Campuran uap air – udara dengan rasio kelembaban yang tidak diketahui memasuki peralatan pada tekanan  $p$  dan temperatur  $T$ . Ketika campuran mengalir didalam piranti, campuran bersinggungan dengan air. Jika campuran yang masuk berada pada kondisi tidak jenuh ( $\phi < 100\%$ ), sebagian air akan menguap. Energi yang diperlukan untuk menguapkan air diambil dari udara basah, sehingga temperatur campuran akan menurun. Untuk saluran yang panjang, campuran akan menjadi jenuh (saturasi) pada sisi keluar ( $\phi = 100\%$ ). Karena campuran jenuh dicapai tanpa energi dari lingkungan, temperatur campuran pada sisi keluar disebut temperatur *saturasi adiabatik*.

Kesetimbangan energi untuk gambar diatas:

$$(\dot{m}_a h_a + \dot{m}_v h_v)_{\text{udara basah masuk}} + [(\dot{m}_v' - \dot{m}_v) h_w]_{\text{air penambah}} = (\dot{m}_a h_a + \dot{m}_v' h_v)_{\text{udara basah keluar}}$$

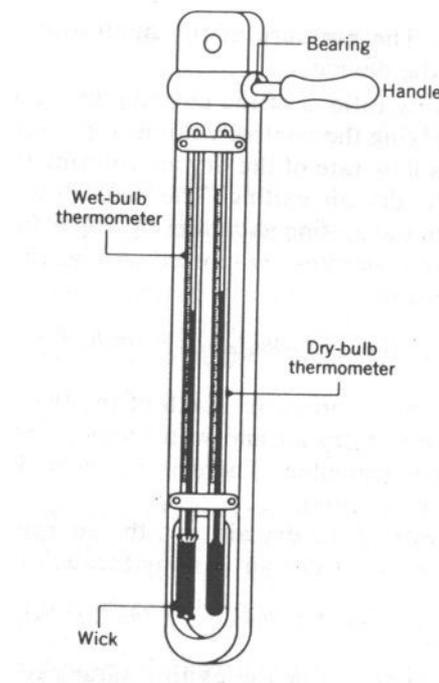
atau dalam satuan massa udara kering ( $m_a$ ) :

$$(h_a + \omega h_g)_{\text{udara basah masuk}} + [(\omega' - \omega) h_f]_{\text{air penambah}} = (h_a + \omega' h_g)_{\text{udara basah keluar}}$$

dimana:  $\omega = \dot{m}_v / \dot{m}_a$ , dan  $\omega' = \dot{m}_v' / \dot{m}_a$

Untuk campuran udara – uap air pada jangkauan tekanan dan temperatur normal udara atmosfer, temperatur saturasi adiabatik hampir sama dengan temperatur udara basah  $T_{wb}$ . Karenanya untuk menentukan rasio kelembaban  $\omega$  untuk campuran tersebut, temperatur basah bisa digunakan bagi persamaan-persamaan sebelumnya.

Temperatur basah bisa diukur dari termometer *wet bulb*. Piranti *psikrometer sling* bisa digunakan untuk mengukur temperatur basah dan temperatur kering bersamaan.

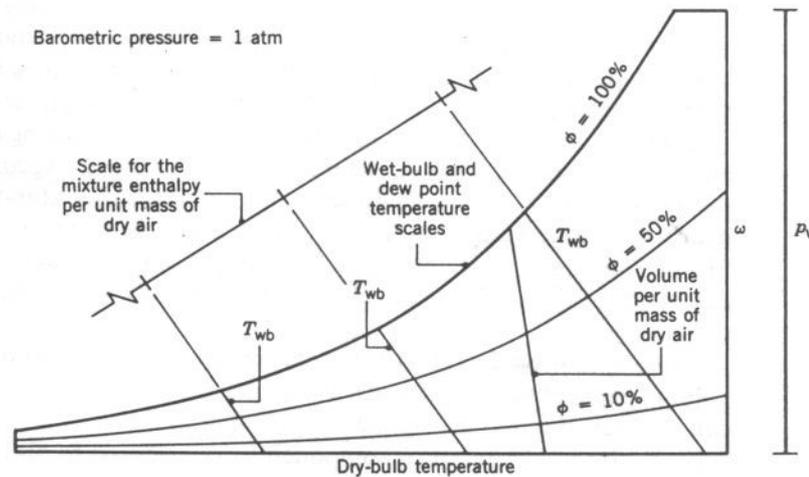


Gambar 9. Psikrometer sling.

## Grafik Psikrometrik

Penggambaran secara grafik beberapa sifat penting udara basah diberikan dalam bentuk *grafik psikrometrik*. Bentuk umumnya bisa dilihat pada gambar 10. grafik yang lebih komplit bisa dilihat pada Gambar A-9. Grafik ini dibatasi hanya untuk tekanan 1 atm, tetapi bisa dikembangkan untuk tekanan yang lain.

Dari gambar 10, absisi adalah temperatur kering (dry bulb temperatur) dan ordinat adalah rasio kelembaban. Untuk grafik SI, temperatur dalam °C dan  $\omega$  dalam kg atau g uap air per kg udara kering.



Gambar 10. Char Psychrometric.

Temperatur embun untuk kondisi udara basah tertentu bisa dicari dengan mengikuti garis  $\omega$  konstan hingga  $\phi = 100\%$ , dan titik embun adalah temperatur udara kering pada titik ini.

Parameter penting lainnya yang bisa dilihat pada grafik psikrometrik adalah temperatur basah ( $T_{wb}$ ). Seperti terlihat pada gambar 10, garis  $T_{wb}$  konstan bergerak dari kiri atas ke kanan bawah.

## APLIKASI PSIKROMETRIK

### Dehumidifikasi

Jika aliran udara basah didinginkan pada tekanan campuran konstan ke temperatur dibawah temperatur titik embun, sebagian kondensasi akan terjadi. Gambar 11 menggambarkan sebuah *dehumidifier* (alat dehumidifikasi) yang menggunakan prinsip ini. Udara basah memasuki titik 1 dan mengalir melalui koil pendingin (cooling coil). Beberapa uap air yang ada di udara basah mengkondensasi, dan campuran udara basah jenuh keluar *dehumidifier* pada titik 2. Udara dari titik 2 kemudian melalui koil pemanas (heating coil) supaya temperatur udara naik kembali setelah turun pada saat terjadinya kondensasi.

Pada kondisi stedi,

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} \quad (\text{udara kering})$$

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_w + \dot{m}_{v2} \quad (\text{air})$$

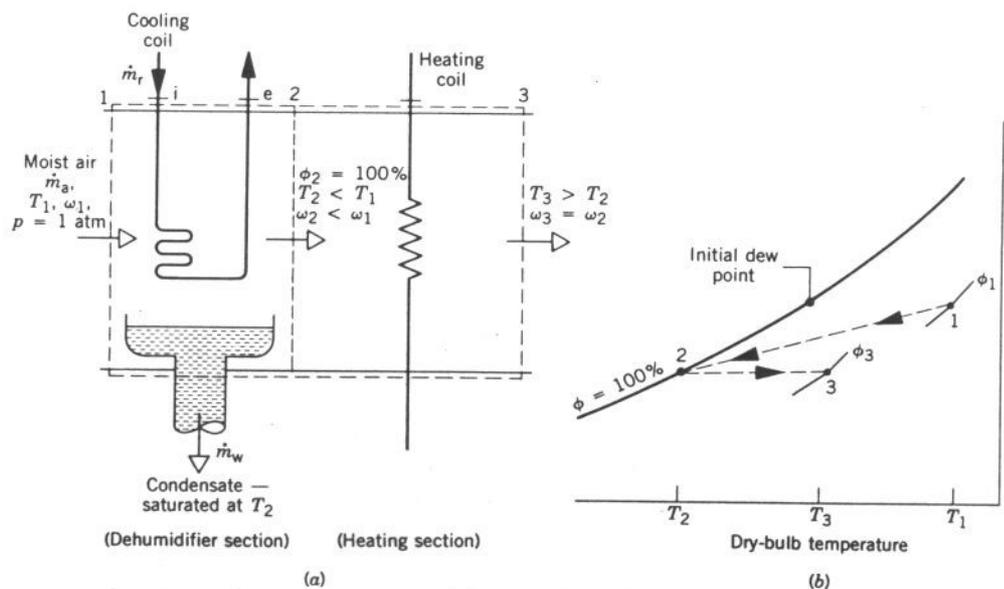
$$\dot{m}_w = \dot{m}_{v1} - \dot{m}_{v2}$$

sedangkan :

$$\dot{m}_{v1} = \omega_1 \dot{m}_a \quad \text{dan} \quad \dot{m}_{v2} = \omega_2 \dot{m}_a$$

jumlah air yang mengalami kondensasi per satuan massa udara kering yang mengalir adalah:

$$\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} = \omega_1 - \omega_2$$



Gambar 11. Dehumidifikasi. (a) Skema peralatan. (b) Gambaran bagan psikrometrik.

Karena tidak ada uap air yang ditambahkan atau dikeluarkan pada bagian pemanas maka:  $\omega_2 = \omega_3$ . Laju refrigeran yang melalui koil pendingin adalah  $\dot{m}_r$ , dan  $W_{cv} = 0$  maka keseimbangan energi menjadi:

$$0 = \dot{m}_r (h_i - h_e) + (\dot{m}_a h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{v1}) - \dot{m}_w h_w - (\dot{m}_a h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{v2})$$

dimana  $h_i$  dan  $h_e$  adalah masing-masingnya harga entalpi regridiran sisi masuk dan sisi keluar. Sehingga:

$$0 = \dot{m}_r (h_i - h_e) + \dot{m}_a [(h_{a1} - h_{a2}) + \omega_1 h_{g1} - \omega_2 h_{g2} - (\omega_1 - \omega_2) h_{f2}]$$

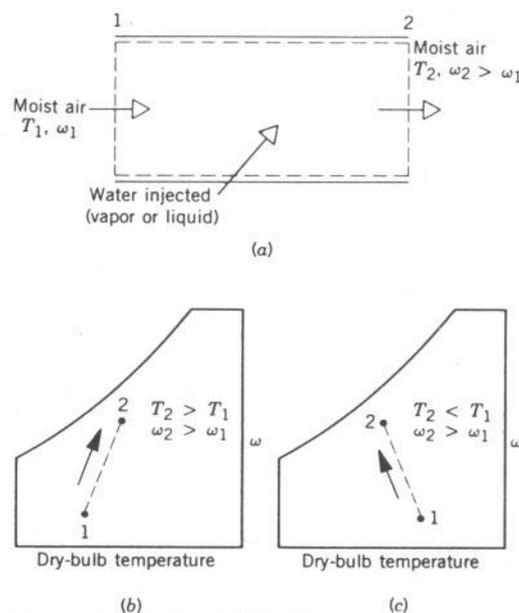
Pada  $T_2$ ,  $h_w = h_{f2}$ , maka laju aliran massa regridiran per satuan massa udara kering yang melalui alat ini adalah:

$$\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_a} = \frac{(h_{a1} - h_{a2}) + \omega_1 h_{g1} - \omega_2 h_{g2} - (\omega_1 - \omega_2) h_{f2}}{h_e - h_i}$$

Proses ini pada grafik psikrometrik bisa dilihat pada gambar 11b.

### Humidifikasi

Humidifikasi adalah kebalikan dari dehumidifikasi, dimana dalam hal ini kandungan uap air di dalam udara dinaikkan. Satu cara dalam melakukan ini adalah dengan menginjeksikan uap air. Alternatif lain dengan air disemprot ke udara. Kedua cara ini secara skematik bisa dilihat pada gambar 12.



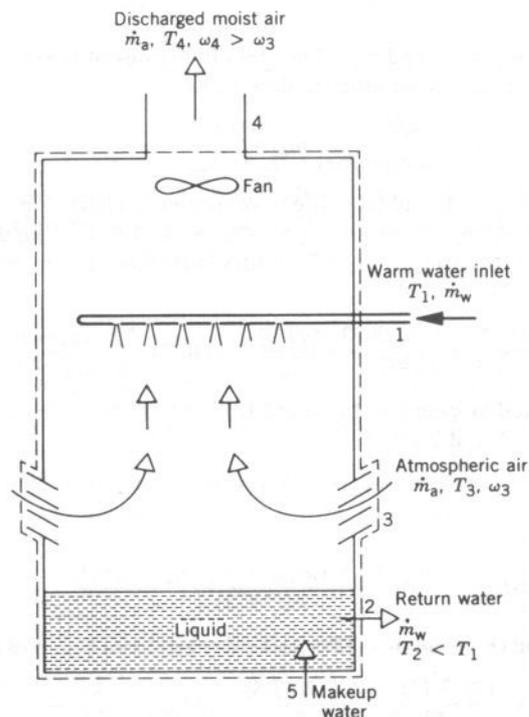
Gambar 12. Humidifikasi. (a) Volume diatur. (b) Uap diinjeksikan. (c) Cairan diinjeksikan.

Temperatur udara basah ketika keluar *humidifier* (alat untuk humidifikasi) tergantung kondisi air yang diberikan. Jika temperatur uap yang diinjeksikan

relatif tinggi, rasio kelembaban dan temperatur kering akan naik. Hal ini bisa dilihat pada gambar 12b. Jika air diinjeksikan, udara basah yang keluar humidifier akan mempunyai temperatur lebih rendah dari temperatur udara pada sisi masuk. Hal ini digambarkan oleh gambar 12c.

### Cooling Tower (Menara Pendingin)

Menara pendingin digunakan untuk membuang sejumlah energi ke lingkungan dengan proses perpindahan panas. Menara pendingin bisa beroperasi secara alami atau konveksi paksa. Gambar 15 memperlihatkan salah satu contoh konstruksi menara pendingin. Air panas masuk pada sisi 1 dan disemprotkan dari puncak menara. Udara atmosfer ditarik masuk pada sisi 3 oleh kipas angin di puncak menara. Ketika dua aliran berinteraksi, sejumlah kecil fraksi aliran air menguap ke udara basah, yang keluar pada sisi 4 dengan rasio kelembaban yang lebih besar dibandingkan ketika masuk pada sisi 3. Energi yang diperlukan untuk penguapan diberikan oleh air yang tidak menguap sehingga air yang keluar pada sisi 2 akan mempunyai temperatur lebih rendah dari pada ketika masuk disisi 1. Karena adanya penguapan air yang terjadi maka harus dilakukan penambahan air pada sisi 5 sehingga jumlah air yang keluar sama dengan jumlah air yang masuk.



Gambar 15. Skema Menara Pendingin (Cooling Tower).