θερμοκρασία που αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία υγρού βολβού. Το ποσοστό κορεσμού υπολογίζεται από την καμπύλη του σταθερού ποσοστού κορεσμού που διέρχεται από το συγκεκριμένο σημείο. Η απόλυτη υγρασία προσδιορίζεται σε kg ατμού ανά kg ξηρού αέρα και η ενθαλπία του μίγματος, που προκύπτει από την διαγώνια κλίμακα ενθαλπίας, εκφράζεται σε kJ ανά kg ξηρού αέρα. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί το γεγονός ότι η μηδενική ενθαλπία για τον υδρατμό καθορίζεται πάντα στους 0^0C. Το ίδιο ισχύει και για τον ξηρό αέρα. Από τις εξισώσεις (ΨΥ.6) και (ΨΥ.9) εξάγεται η σχέση (ΨΥ.10):

$$\psi = \frac{\omega}{\omega_g} = \frac{\omega\,(p - p_g)}{0.622 \cdot p_g} \qquad \text{(ΨΥ.10)}$$

Για δεδομένη βαρομετρική πίεση, p, το ποσοστό κορεσμού είναι συνάρτηση των ω και p_g (σημειώνεται ότι η p_g αντιστοιχεί στην θερμοκρασία ξηρού βολβού, t). Ο ψυχρομετρικός χάρτης αναφέρεται σε συγκεκριμένη βαρομετρική πίεση και τα ω και h αποτελούν ανεξάρτητες μεταβλητές. Ένας ψυχρομετρικός χάρτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια μόνο για μικρό εύρος πιέσεων (περίπου ±0.1 bar της καθορισμένης τιμής).

ΨΥ.6 Ειδική Ενθαλπία, Ειδική Θερμότητα και Ειδικός Όγκος Υγρού Αέρα

Η *ενθαλπία* (enthalpy) ενός μίγματος προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους τιμών ενθαλπίας των συστατικών που το συναποτελούν,

$$mh = m_a h_a + m_s h_s \qquad \text{(ΨΥ.11)}$$

όπου m: η μάζα του μίγματος, h: η ενθαλπία του μίγματος ανά μονάδα μάζας μίγματος, m_a: η μάζα του ξηρού αέρα του μίγματος, h_a: η ενθαλπία του ξηρού αέρα ανά μονάδα μάζας ξηρού αέρα, m_s: η μάζα του υδρατμού του μίγματος και h_s: η ενθαλπία του υδρατμού ανά μονάδα μάζας υδρατμού. Η ενθαλπία του μίγματος ανά μονάδα μάζας ξηρού αέρα δίνεται από την εξίσωση που ακολουθεί:

$$\frac{mh}{m_a} = h_a + \frac{m_s h_s}{m_a} = h_a + \omega\, h_s \qquad \text{(ΨΥ.12)}$$

ΨΥ.6.1 ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΘΑΛΠΙΑ

Για μικρές τιμές μερικών πιέσεων, η *ειδική ενθαλπία* (specific enthalpy) του υδρατμού μπορεί να εκφραστεί ως εξής

$$h_s = (h_g\big|_{p_s}) + c_{ps}(t - t_g\big|_{p_s}) \qquad \text{(ΨΥ.13)}$$

όπου η μέση ειδική θερμότητα του υπέρθερμου υδρατμού, c_{ps}, δύναται να θεωρηθεί περίπου ίση με 1.88 kJ/ kg·K.

Εφόσον η ειδική ενθαλπία ενός ατμού εκφράζεται ως προς το σημείο αναφοράς των 0^0C στους πίνακες ατμού, για την έκφραση της ειδικής ενθαλπίας του ξηρού αέρα στο μίγμα θεωρείται το ίδιο σημείο αναφοράς. Επομένως ισχύει,

$$h_a = c_{pa} t \qquad \text{(ΨΥ.14)}$$

όπου η ειδική θερμότητα του ξηρού αέρα, c_{pa}, μπορεί να θεωρηθεί περίπου ίση με 1.005 kJ/ kg·K. Τότε η ενθαλπία του μίγματος ανά μονάδα μάζας ξηρού αέρα είναι:

$$c_{pa}t + [(h_g\big|_{p_s}) + c_{ps}(t - t_g\big|_{p_s})]\omega \qquad (ΨΥ.15)$$

Για χαμηλές πιέσεις η ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού είναι περίπου ίση με την τιμή κορεσμού στην ίδια θερμοκρασία, οπότε η σχέση (ΨΥ.15) γίνεται:

$$c_{pa}t + \omega\,(h_g\big|_t) \qquad (ΨΥ.16)$$

ΨΥ.6.2 ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΥΓΡΟΥ ΑΕΡΑ

Υποθέτοντας ότι ο υπέρθερμος ατμός συμπεριφέρεται ως τέλειο αέριο, συμπεραίνεται ότι η *ειδική θερμότητα* (specific heat) του μίγματος ανά μονάδα μάζας μίγματος παρέχεται από την εξίσωση που έπεται:

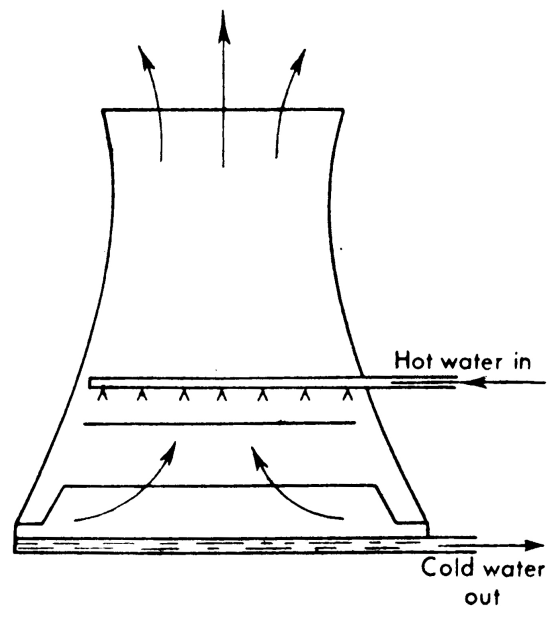
$$c_p = \frac{m_a c_{pa}}{m} + \frac{m_s c_{ps}}{m} \qquad (ΨΥ.17)$$

Από την εξίσωση (ΨΥ.17) γίνεται προφανές ότι η ειδική θερμότητα του μίγματος ανά μονάδα μάζας ξηρού αέρα, c_{pma} (*υγρή θερμότητα*, humid heat) δίνεται από την σχέση:

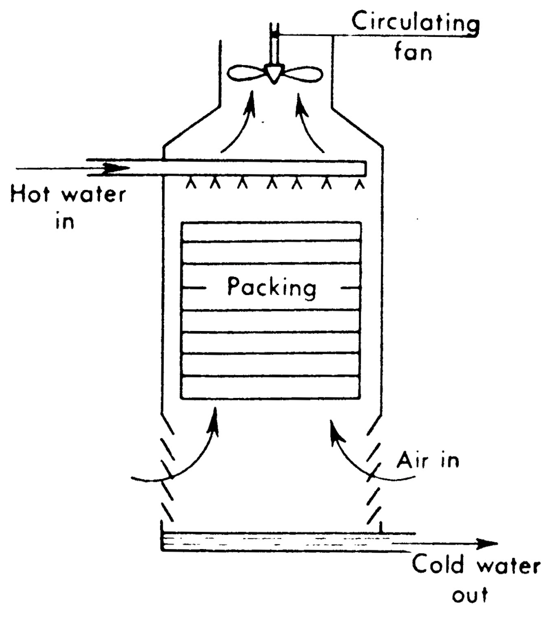
$$c_{pma} = c_{pa} + \frac{m_s c_{ps}}{m_a} \Leftrightarrow c_{pma} = c_{pa} + \omega\, c_{ps} \qquad (ΨΥ.18)$$

ΨΥ.6.3 ΕΙΔΙΚΟΣ ΟΓΚΟΣ

Εφόσον η ενθαλπία του μίγματος εκφράζεται ανά μονάδα μάζας ξηρού αέρα, είναι πρακτικότερο να χρησιμοποιείται ο *ειδικός όγκος* (specific volume) του ξηρού αέρα, καθώς ο ρυθμός παροχής της μάζας του ξηρού αέρα, $\dot{m}_a$, μπορεί να βρεθεί απ' ευθείας, δεδομένου ότι η



Σχήμα ΨΥ-4α. Πύργος ψύξης φυσικής μεταφοράς



Σχήμα ΨΥ-4β. Πύργος ψύξης εξαναγκασμένης μεταφοράς ογκομετρική παροχή του μίγματος είναι γνωστή:

$$u_a = \frac{R_a T}{p_a} \quad \& \quad \dot{m}_a = \frac{\dot{V}}{u_a} \tag{ΨΥ.19}$$

Ο ειδικός όγκος του ξηρού αέρα αποτυπώνεται γραφικά στον ψυχρομετρικό χάρτη. Όπως φαίνεται στον χάρτη αυτό, η πυκνότητα εκφρασμένη σε kg ξηρού αέρα ανά m^3 μίγματος είναι περίπου 1.2 (π.χ. u_a = 1 / 1.2 = 0.833 m^3/kg ξηρού αέρα). Η εν λόγω τιμή ισχύει προσεγγιστικά στις συνηθισμένες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας δωματίου και είναι χρήσιμη σε πολλά πρακτικά προβλήματα.

ΨΥ.7 Πύργοι Ψύξης

Αρκετές βιομηχανικές διεργασίες απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού ψύξης. Η τοποθεσία του εργοστασίου μπορεί να είναι τέτοια, ώστε η τροφοδοσία με νερό (π.χ. από την θάλασσα ή από παρακείμενο ποταμό) να καθίσταται πρακτικά ανέφικτη και να επιλέγεται ως εναλλακτική λύση η χρήση συστημάτων ανακύκλωσης. Σημαντικό μέρος αυτών των συστημάτων είναι ο ψύκτης που ψύχει το νερό ψύξης. Ένα πρακτικό και φθηνό μέσο ψύξης είναι απαραίτητο στην περίπτωση αυτή και ως τέτοιο μπορεί να επιλεγεί ο ατμοσφαιρικός αέρας. Θα ήταν, λοιπόν, δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ένας κλασικός εναλλάκτης θερμότητας, στον οποίο το νερό που διατρέχει τους υπάρχοντες σωλήνες ψύχεται, καθώς αυτοί βρίσκονται εκτεθειμένοι στην ροή του ατμοσφαιρικού αέρα. Μια πιο αποτελεσματική μέθοδος βασίζεται στην εξάτμιση του νερού, η οποία επιτυγχάνεται ψεκάζοντας το νερό στον αέρα που περνά μέσα από έναν πύργο ψύξης. Στην μέθοδο αυτή ένα ρεύμα αέρα ανέρχεται μέσα στον πύργο ψύξης, με φυσική ή εξαναγκασμένη συναγωγή, ενώ το ζεστό νερό εισάγεται από κατάλληλο σημείο και ψεκάζεται στον αέρα. Η ψύξη που επιτυγχάνεται είναι αποτελεσματικότερη σε συνθήκες εξαναγκασμένης συναγωγής λόγω της αυξημένης ροής του αέρα.

Καθώς το νερό πέφτει, ένα μέρος του εξατμίζεται. Για να εξασφαλιστεί η διεξαγωγή της διεργασίας υπό τις βέλτιστες δυνατές συνθήκες, ο πύργος περιέχει *πληρωτικό υλικό* (packing), το οποίο σπάει το ρεύμα σε μικρότερα και αυξάνει την επιφάνεια επαφής αέρα-νερού. Ως πληρωτικά υλικά χρησιμοποιούνται συνήθως κυτταρινικά υλικά εμπλουτισμένα με πλαστικά λόγω της υψηλής απορροφητικότητάς τους σε νερό, της μεγάλης διάρκειας ζωής τους και του μικρότερου τελικού μεγέθους του πύργου ψύξης. Το θερμό νερό ψύχεται, ενώ η θερμοκρασία του αέρα αυξάνεται και ο αέρας γίνεται σχεδόν κορεσμένος σε υδρατμό. Το νερό ψύξης θεωρητικά μπορεί να ψυχθεί μέχρι την θερμοκρασία του υγρού βολβού του εισερχόμενου αέρα, ωστόσο στην πράξη δεν συμβαίνει αυτό εξαιτίας του πεπερασμένου μεγέθους του πύργου ψύξης. Έτσι, όταν σχεδιάζονται πύργοι ψύξης θεωρείται ότι το ψυχρό νερό που εξέρχεται από τον πύργο έχει θερμοκρασία περίπου 8^0C υψηλότερη της θερμοκρασίας υγρού βολβού. Κάποιο μέρος του νερού ψύξης χάνεται στην ατμόσφαιρα κατά την διάρκεια της εξάτμισης στον πύργο και είναι απαραίτητη η αναπλήρωση του με πρόσθετη ποσότητα νερού. Πύργοι ψύξης, φυσικής (Σχήμα ΨΥ-4α) και εξαναγκασμένης (Σχήμα ΨΥ-4β) μεταφοράς απεικονίζονται στα παραπάνω σχήματα.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Παράδειγμα ΨΥ-1:

Έστω ότι ο αέρας που διοχετεύεται σε ένα δωμάτιο τον χειμώνα έχει θερμοκρασία 17^0C και σχετική υγρασία 60%. Αν η βαρομετρική πίεση ισούται με 1.01325 bar, τότε υπολογίστε την απόλυτη υγρασία. Ποιο θα είναι το σημείο δρόσου κάτω από αυτές τις συνθήκες;

Λύση:

Στους 17^{0}C έχουμε p_g = 0.01936 bar.

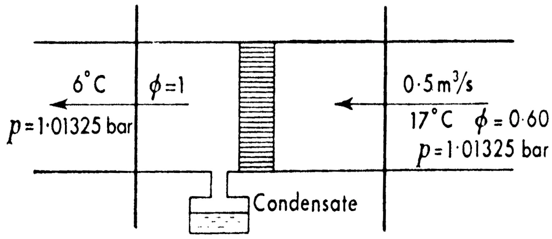
Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (ΨΥ.8) έχουμε $0.6 = \dfrac{p_s}{0.01936} \Leftrightarrow p_s = 0.6 \cdot 0.01936 = 0.011616\text{bar}$.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (ΨΥ.6) έχουμε $\omega = 0.622\dfrac{0.011616}{1.01325 - 0.011616} = 0.007213$.

Η ατμόσφαιρα περιέχει 0.007213 kg υδρατμού ανά kg ξηρού αέρα. Αν ο αέρας εψύχετο υπό σταθερή πίεση, ο υδρατμός θα άρχιζε να συμπυκνώνεται στην θερμοκρασία κορεσμού που αντιστοιχεί στα 0.011616 bar.

Από τους πίνακες ατμού, το σημείο δρόσου είναι $t_d = 9 + (10-9) \cdot \left(\dfrac{0.011616 - 0.01147}{0.01227 - 0.01147}\right) = 9.18^0\text{C}$.

Παράδειγμα ΨΥ-2:



Αν ο αέρας στις συνθήκες του προηγούμενου παραδείγματος κινείται με ρυθμό 0.5 m^3/s πάνω από σπείρα ψύξεως που βρίσκεται σε θερμοκρασία 6^{0}C, να υπολογίσετε το ποσό του ατμού που θα συμπυκνωθεί. Υποθέστε ότι η βαρομετρική πίεση είναι ίδια με αυτήν του προηγούμενου πειράματος και ότι ο αέρας που εγκαταλείπει τη σπείρα είναι κορεσμένος.

Λύση:

Ο ρυθμός ροής της μάζας του ξηρού αέρα, $\dot{m}_a$, δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m}_a = \frac{p_a V}{R_a T}$$

Από την εξίσωση (ΨΥ.1) έχουμε $p_a = p - p_s \Leftrightarrow p_a = 1.01325 - 0.011616 = 1.00163\text{bar}$, άρα:

$$\dot{m}_a = \frac{p_a V}{R_a T} \Leftrightarrow \dot{m}_a = \frac{10^5 \cdot 1.00163 \cdot 0.5}{10^3 \cdot 0.287 \cdot 290} = 0.6017\text{kg/s}.$$

Η μάζα του αέρα παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της διαδικασίας. Βάσει της εξίσωσης (ΨΥ.2), η απόλυτη υγρασία βρέθηκε ότι είναι ίση με 0.007213, οπότε ισχύει $\dot{m}_{s_1} = 0.007213 \cdot \dot{m}_a$.

Όταν ο αέρας εγκαταλείπει την σπείρα ψύξεως, η σχετική υγρασία φ ταυτίζεται με την μονάδα, αφού ο αέρας είναι κορεσμένος.

Από την σχέση (ΨΥ.8) γι' αυτές τις συνθήκες προκύπτει η ισότητα $p_s = p_g$ και στους 6^{0}C η p_g αποκτά την τιμή 0.009346 bar, οπότε από την εξίσωση (ΨΥ.6) απορρέει το εξής:

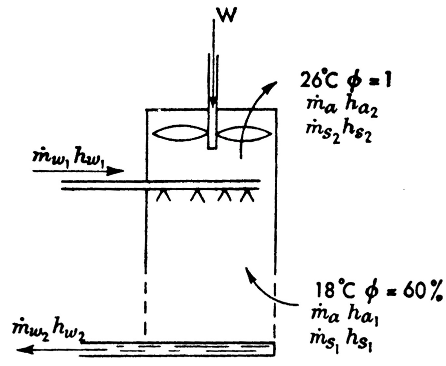
$$\omega_2 = 0.622\left(\frac{0.009346}{1.01325 - 0.009346}\right) = 0.00579$$

Άρα $\dot{m}_{s_2} = 0.00579 \cdot \dot{m}_a$ και επομένως, η μάζα του συμπυκνώματος είναι:

$\dot{m}_{s_1} - \dot{m}_{s_2} = (0.007213 - 0.00579) \cdot \dot{m}_a = 0.001423 \cdot 0.6017 \cdot 3600 = 3.082$ kg/h .

<u>Παράδειγμα ΨΥ-3</u>:

Ένας πύργος ψύξης μικρού μεγέθους έχει σχεδιαστεί για να ψύχει 5.5 lt/sec νερού, το οποίο εισέρχεται στον πύργο στους 44^{0}C. Ο ανεμιστήρας στην οροφή του πύργου "τραβάει" 9m^3/s αέρα διαμέσου του πύργου και η ισχύς που απορροφάται είναι 4.75 kW. Ο εισερχόμενος αέρας έχει θερμοκρασία 18^{0}C και σχετική υγρασία 60%. Ο αέρας- θερμοκρασίας 26^{0}C- που εξέρχεται από τον πύργο θεωρείται ότι είναι κορεσμένος. Υπολογίστε την τελική θερμοκρασία του νερού και το ποσό του νερού αναπλήρωσης που απαιτείται ανά δευτερόλεπτο. Υποθέστε ότι η πίεση παραμένει σταθερή σε κάθε σημείο του πύργου και συγκεκριμένα ίση με 1.013 bar.



<u>Λύση</u>:

Στους 18^{0}C έχουμε p_g = 0.02063 bar, οπότε χρησιμοποιώντας την εξίσωση (ΨΥ.8) προκύπτει:

$$\varphi = \frac{p_{s_1}}{p_g} \Leftrightarrow p_{s_1} = 0.6 \cdot 0.02063 = 0.01238 \text{bar}$$

Από τον νόμο του Dalton, έχουμε $p_{a_1} = 1.013 - 0.01238 = 1.0006$ bar . Τότε:

$$m_a = \frac{10^5 \cdot 1.0006 \cdot 9}{10^3 \cdot 0.287 \cdot 291} = 10.78 \text{ kg/s} \quad \& \quad m_{s_1} = \frac{10^5 \cdot 0.01238 \cdot 9}{10^3 \cdot 0.4618 \cdot 291} = 0.0829 \text{ kg/s} .$$

Στο ρεύμα εξόδου στους 26^{0}C έχουμε φ = 1 και p_g = 0.03360 bar, οπότε από την εξίσωση (ΨΥ.8) απορρέει ότι:

$$\varphi = \frac{p_{s2}}{p_g} \Leftrightarrow p_{s_2} = 1 \cdot 0.03360 = 0.03360 \text{bar} .$$

Με την βοήθεια της σχέσης (ΨΥ.6) προσδιορίζεται η απόλυτη υγρασία όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\omega_2 = 0.622 \left(\frac{p_{s_2}}{p - p_{s_2}} \right) = 0.622 \left(\frac{0.03360}{1.013 - 0.03360} \right) = 0.02133 .$$

Στην συνέχεια, από την εξίσωση (ΨΥ.2) παίρνουμε $m_{s_2} = 10.78 \cdot 0.02133 = 0.23$ kg/s . Δηλαδή το νερό που χρειάζεται για την αναπλήρωση είναι $0.23 - 0.0829 = 0.1471$kg/s .

Επίσης, $\dot{m}_{w_1} = 5.5 \cdot 1 = 5.5$ kg/s και $\dot{m}_{w_2} = 5.5 - 0.1471 = 5.353$ kg/s . Εφαρμόζοντας το ισοζύγιο ενέργειας για σταθερή ροή και αγνοώντας τις μεταβολές τόσο της κινητικής, όσο και της δυναμικής ενέργειας, έχουμε:

$$W + \dot{m}_{w_1} h_{w_1} + \dot{m}_{a_1} h_{a_1} + \dot{m}_{s_1} h_{s_1} = \dot{m}_{a_2} h_{a_2} + \dot{m}_{s_2} h_{s_2} + \dot{m}_{w_2} h_{w_2}$$
$$W = 4.75\text{kW} = 4.75\text{kJ/s}$$

Υπολογίζοντας τις ενθαλπίες βάσει του σημείου αναφοράς των 0^0C λαμβάνονται τα ακόλουθα:

$$h_{w_1} = h_f\Big|_{44^0\text{C}} = 184.2\ \text{kJ/kg}$$
$$h_{a_1} = 1.005(18 - 0) = 18.09\ \text{kJ/kg}$$
$$h_{s_1} = 2519.4 + 1.86(18 - 10.13) = 2534\ \text{kJ/kg}$$
$$h_{s_2} = h_g\Big|_{26^0\text{C}} = 2548.4\ \text{kJ/kg}$$
$$h_{a_2} = 1.005(26 - 0) = 26.13\ \text{kJ/kg}$$

Ο ατμός είναι υπέρθερμος στο 1, καθώς βρίσκεται πάνω από τους 10.13^0C που είναι η θερμοκρασία κορεσμού στα 0.01238 bar. Οπότε, κατόπιν αντικατάστασης, έχουμε:

$$W + \dot{m}_{w_1} h_{w_1} + \dot{m}_{a_1} h_{a_1} + \dot{m}_{s_1} h_{s_1} = \dot{m}_{a_2} h_{a_2} + \dot{m}_{s_2} h_{s_2} + \dot{m}_{w_2} h_{w_2} \Leftrightarrow$$
$$4.75 + 5.5 \cdot 184.2 + 10.78 \cdot 18.09 + 0.0829 \cdot 2534 = 10.78 \cdot 26.03 + 0.23 \cdot 2548.4 + 5.353 \cdot h_{w_2} \Leftrightarrow$$
$$5.353 \cdot h_{w_2} = 556.3 \Leftrightarrow h_{w_2} = 104\ \text{kJ/kg}$$

Με την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής βρίσκεται ότι $h_f = 104\ \text{kJ/kg}$ στους 24.8^0C.
