

ΨΥ.1 Εισαγωγή

Αυτό το κεφάλαιο πραγματεύεται την *ψυχομετρία* (psychrometry), που ορίζεται ως η μελέτη μιγμάτων ξηρού αέρα και υδρατμών (υγρός ατμοσφαιρικός αέρας). Η σημασία της μελέτης αυτής έγκειται στο γεγονός ότι συχνά είναι απαραίτητη η εφαρμογή ελεγχόμενων συνθηκών περιβάλλοντος σε εργαστήρια ή γενικότερα σε μέρη όπου εκτελούνται βιομηχανικές διεργασίες. Σε τέτοιου είδους διαδικασίες πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν οι ιδιότητες του ατμοσφαιρικού αέρα τόσο στον σχεδιασμό, όσο και στην υλοποίηση συγκεκριμένων βιομηχανικών εφαρμογών. Στις τελευταίες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου γίνεται μια σύντομη αναφορά και στους πύργους ψύξης, όπου μεγάλες ποσότητες νερού ψύχονται προκειμένου να ανακυκλωθούν σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες.

ΨΥ.2 Ψυχομετρικά Μίγματα

Κατά την διάρκεια της εξάτμισης του νερού σε κενό χώρο ή σε όγκο που καταλαμβάνεται από αέριο, παρατηρούμε ότι ο υδρατμός υπάρχει στο μίγμα ως *υπέρθερμος ατμός* (superheated vapor) προτού περιέλθει σε κορεσμένη κατάσταση. Στην κατάσταση κορεσμού η μερική πίεση του ατμού μπορεί να υπολογιστεί από τους πίνακες ατμού ως η πίεση που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία του μίγματος. Αν το κενό ή το αέριο δεν είναι κορεσμένα σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, τότε η μερική πίεση του ατμού θα είναι μικρότερη από την πίεση στο σημείο κορεσμού στην αντίστοιχη θερμοκρασία.

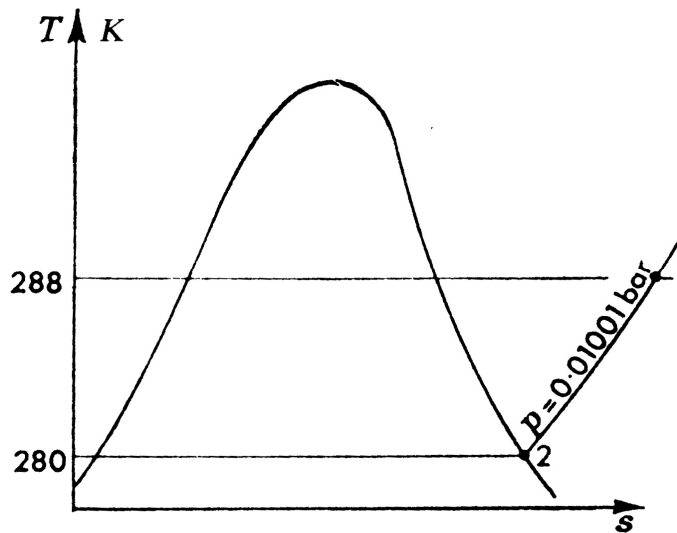
Έστω ότι έχουμε ατμοσφαιρικό αέρα πίεσης 1.013 bar και θερμοκρασίας 15⁰C. Η πίεση στο σημείο κορεσμού του υδρατμού (τάση ατμών) για τους 15⁰C είναι ίση με 0.01704 bar. Αν ο υδρατμός δεν βρίσκεται σε επαφή με το υγρό από το οποίο προήλθε, δεν θα είναι κορεσμένος και η πίεση του θα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη στο σημείο κορεσμού (< 0.01704 bar). Σε συνήθεις περιπτώσεις η ατμόσφαιρα βρίσκεται μακριά από τις συνθήκες κορεσμού. Σε τόσο μικρές τάσεις ατμών (πολύ μικρότερες της μίας ατμόσφαιρας), ο ατμός μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργεί ως τέλειο αέριο και οι ιδιότητες του μίγματος υπολογίζονται από τον νόμο Gibbs-Dalton. Οι ιδιότητες του μίγματος εξαρτώνται από την πίεση και την θερμοκρασία αυτού και για κάθε συγκεκριμένη κατάσταση του αερίου προσδιορίζονται σε σχέση με τις ιδιότητες του κορεσμένου ατμού.

Ας θεωρήσουμε ότι σε δεδομένη ποσότητα ατμοσφαιρικού αέρα η μερική πίεση του ατμού είναι 0.01001 bar στους 15⁰C, με την ολική πίεση να ισούται με 1.013 bar. Τότε ισχύει,

$$p = p_a + p_s \Leftrightarrow p_a = p - p_s = 1.013 - 0.01001 = 1.003 \text{ bar} \quad (\Psi\Upsilon.1)$$

όπου p_a είναι η μερική πίεση του ξηρού αέρα και p_s : η μερική πίεση του υπέρθερμου ατμού. Η θερμοκρασία κορεσμού για τα 0.01001 bar είναι 7⁰C, επομένως ο ατμός κάτω από αυτές τις συνθήκες στον ατμοσφαιρικό αέρα έχει *βαθμό υπερθέρμανσης* (degree of superheat) $15 - 7 = 8\text{K}$. Αυτή η κατάσταση αποδίδεται στο σχήμα ΨΥ-1 (Διάγραμμα T- s, όπου T: θερμοκρασία και s: εντροπία) με το σημείο 1. Ας θεωρήσουμε τώρα ένα μεταλλικό δοχείο που περιέχει νερό κάτω από αυτές τις συνθήκες και το οποίο ψύχεται σταδιακά με την προσθήκη πάγου. Σε συγκεκριμένη θερμοκρασία του νερού παρατηρείται η έναρξη του φαινομένου της συμπύκνωσης στην εξωτερική επιφάνεια του δοχείου. Ο ατμός που βρίσκεται σε επαφή με το δοχείο ψύχεται υπό σταθερή πίεση στους 7⁰C (σημείο 2 στο σχήμα ΨΥ-1), φθάνοντας έτσι στην κατάσταση κορεσμού, ενώ περαιτέρω ψύξη οδηγεί στην συμπύκνωση του υδρατμού. Αυτή η θερμοκρασία καλείται *σημείο δρόσου* (dew point) του μίγματος και είναι η θερμοκρασία στην

οποία πρέπει να ψυχθεί το ακόρεστο μίγμα για να γίνει κορεσμένο. Το σημείο δρόσου δηλώνεται με το σύμβολο t_d .



Σχήμα ΨΥ-1. Διάγραμμα T-s

Ως σχετικά παραδείγματα μπορούν να αναφερθούν τα εξής: α) αν ένα δωμάτιο είναι ζεστό σε αντίθεση με το κρύο εξωτερικό περιβάλλον, τότε στην εσωτερική επιφάνεια του παραθύρου, που είναι πιο κρύο από τους τοίχους του δωματίου, παρατηρούνται φαινόμενα συμπύκνωσης, β) ένα άτομο που φοράει γυαλιά και εισέρχεται σε ζεστό δωμάτιο μετά από παραμονή κάποιας ώρας σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, ανακαλύπτει ότι ο ατμός στον αέρα του δωματίου συμπυκνώνεται πάνω στους κρύους φακούς του, καθώς ψύχεται στο σημείο δρόσου του, γ) φαινόμενα συμπύκνωσης παρατηρούνται επίσης σε κρύους σωλήνες νερού που βρίσκονται σε ατμόσφαιρα με υψηλή θερμοκρασία και υγρασία, κ.ά.

ΨΥ.3 Απόλυτη Υγρασία, Ποσοστό Κορεσμού και Σχετική Υγρασία

Η *απόλυτη υγρασία* (absolute humidity) ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του υδρατμού προς την μάζα του ξηρού αέρα σε δεδομένο όγκο μίγματος και δηλώνεται με το σύμβολο ω (kg H₂O / kg ξηρού αέρα),

$$\omega = \frac{m_s}{m_a} \quad (\Psi\Upsilon.2)$$

όπου ο δείκτης s δηλώνει τον ατμό και ο δείκτης a τον ξηρό αέρα. Εφόσον και οι δυο μάζες καταλαμβάνουν όγκο V , η παραπάνω σχέση μορφοποιείται ως ακολούθως,

$$\omega = \frac{m_s/V}{m_a/V} = \frac{1/u_s}{1/u_a} = \frac{u_a}{u_s} \quad (\Psi\Upsilon.3)$$

όπου u_a και u_s : οι ειδικοί όγκοι του ξηρού αέρα και του ατμού αντίστοιχα. Θεωρώντας ότι τόσο ο ξηρός αέρας, όσο και ο ατμός συμπεριφέρονται ως τέλεια αέρια, προκύπτει ότι:

$$m_s = \frac{p_s VM_s}{R_0 T} \quad \& \quad m_a = \frac{p_a VM_a}{R_0 T} \quad (\Psi\Upsilon.4)$$

όπου R_0 : η παγκόσμια σταθερά των αερίων και M_s, M_a : οι σχετικές μοριακές μάζες του ατμού και του ξηρού αέρα αντιστοίχως. Αντικαθιστώντας στην σχέση (ΨΥ.2) τελικά παίρνουμε:

$$\omega = \frac{M_s p_s}{M_a p_a} = \frac{18}{28 \cdot 96} \frac{p_s}{p_a} = 0.622 \frac{p_s}{p_a} \quad (\Psi\Upsilon.5)$$

Αν η ολική πίεση είναι p , τότε από τις εξισώσεις (ΨΥ.1) & (ΨΥ.5) έχουμε:

$$\omega = 0.622 \left(\frac{p_s}{p - p_s} \right) \quad (\Psi\Upsilon.6)$$

όπου συνήθως η ολική πίεση p ταυτίζεται με την βαρομετρική πίεση.

Η *σχετική υγρασία* (relative humidity) της ατμόσφαιρας υπολογίζεται από τον λόγο της μάζας του υδρατμού σε δεδομένο όγκο προς την μάζα του κορεσμένου υδρατμού στην ίδια θερμοκρασία και συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα ϕ (kg H₂O / kg H₂O):

$$\phi = \frac{m_s}{(m_s)_{sat}} \quad (\Psi\Upsilon.7)$$

Εφόσον οι μάζες του υδρατμού και του κορεσμένου υδρατμού δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις, καταλήγουμε σε μια άλλη έκφραση της σχετικής υγρασίας,

$$m_s = \frac{p_s V M_s}{R_0 T} \quad \& \quad (m_s)_{sat} = \frac{p_g V M_s}{R_s T} \quad \Leftrightarrow \quad \phi = \frac{p_s}{p_g} \quad (\Psi\Upsilon.8)$$

όπου p_g : η πίεση κορεσμού στην θερμοκρασία του μίγματος.

Ως *ποσοστό κορεσμού* (percentage saturation) ορίζεται ο λόγος της απόλυτης υγρασίας του μίγματος προς την απόλυτη υγρασία του κορεσμένου μίγματος στην ίδια θερμοκρασία και δηλώνεται με το σύμβολο ψ :

$$\psi = \frac{\omega}{\omega_g} = \phi \frac{(p - p_g)}{(p - p_s)} \quad (\Psi\Upsilon.9)$$

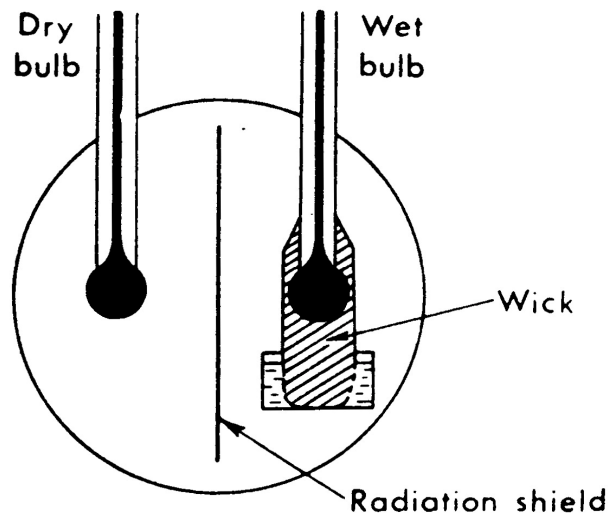
ΨΥ.4 Μέτρηση της Σχετικής Υγρασίας

Το όργανο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της σχετικής υγρασίας είναι το υγρασιόμετρο. Ένα απλό υγρασιόμετρο μπορεί να καθορίσει την σχετική υγρασία από τον υπολογισμό του σημείου δρόσου σε ένα μεταλλικό δοχείο που περιέχει νερό και ψύχεται.

Μια άλλη μέθοδος προσδιορισμού βασίζεται στις θερμοκρασίες υγρού και ξηρού βολβού (Σχήμα ΨΥ-2). Δυο θερμομέτρα που είναι τοποθετημένα παράλληλα μεταξύ τους και διαχωρίζονται με κατάλληλη ασπίδα ακτινοβολίας, βρίσκονται σε περιβάλλον ακόρεστου αέρα. Ένα από αυτά δείχνει την θερμοκρασία του αέρα και ονομάζεται θερμομέτρο *ξηρού βολβού* (dry bulb). Το δεύτερο, ο βολβός του οποίου περιβάλλεται από ένα πανί που είναι βυθισμένο σε έναν μικρό περιέκτη με νερό, καλείται θερμομέτρο *υγρού βολβού* (wet bulb). Καθώς το ρεύμα αέρα περνά από το υγρό πανί, μέρος του νερού εξατμίζεται προκαλώντας πτώση της θερμοκρασίας στον βολβό. Ταυτόχρονα όμως, θερμότητα μεταφέρεται από τον αέρα στο πανί και τελικά επιτυγχάνεται μια μόνιμη κατάσταση (μη-ισορροπίας), στην οποία ο υγρός βολβός δείχνει χαμηλότερη θερμοκρασία από τον αντίστοιχο ξηρό. Το ποσοστό αυτής της *μείωσης* στον *υγρό βολβό* (wet bulb depression) εξαρτάται από την σχετική υγρασία του αέρα. Αν η

σχετική υγρασία είναι χαμηλή, ο ρυθμός εξάτμισης στον υγρό βολβό είναι μεγαλύτερος, με συνέπεια η μείωση της θερμοκρασίας να είναι μεγαλύτερη.

Το εν λόγω όργανο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνθήκες στις οποίες ο αέρας είναι στάσιμος, ωστόσο, όπως προκύπτει από την υπάρχουσα πειραματική εμπειρία, καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν υπάρχει ρεύμα αέρα μεταξύ των βολβών με ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ 1.8 και 40 m/s. Σε αυτήν την κλίμακα τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μια οιοονεί σταθερότητα και έτσι η σχετική υγρασία υπολογίζεται από τις λαμβανόμενες θερμοκρασίες.



Σχήμα ΨΥ-2. Μέτρηση σχετικής υγρασίας

Το ρεύμα αέρα μπορεί να παραχθεί είτε από μικρό ανεμιστήρα (οδηγώντας έτσι τον αέρα στους δυο βολβούς) είτε τοποθετώντας τα δυο θερμοόμετρα σε κατάλληλη διάταξη, η οποία περιστρέφεται με το χέρι (sling psychrometer). Άλλα όργανα παρόμοιου τύπου φέρουν ανεμιστήρα που περιστρέφεται με την βοήθεια μπαταρίας ή γραναζιών. Οι θερμοκρασίες υγρού και ξηρού βολβού μετρούνται με θερμοστοιχεία, τα οποία πλεονεκτούν έναντι των κοινών θερμομέτρων ως προς τον χώρο που καταλαμβάνουν (απαιτούν μικρό χώρο), αλλά και ως προς τον χρόνο απόκρισης (ταχεία απόκριση).

Επίσης, υπάρχουν όργανα που παρέχουν μια συνεχή ένδειξη της σχετικής υγρασίας με την μορφή ηλεκτρικού σήματος, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέρος ενός συστήματος ελέγχου. Ένα τέτοιο όργανο περιλαμβάνει ένα λεπτό στρώμα πολυμερούς στο οποίο γίνεται απορρόφηση και εκρόφιση υγρασίας, με αποτέλεσμα την μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς του, δηλαδή της χωρητικότητάς του. Με την ταυτόχρονη μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός της ενθαλπίας, γεγονός που αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμο σε συστήματα αυτοματισμού. Αυτά τα όργανα όμως χρειάζονται βαθμονόμηση, σε αντίθεση με τα προηγούμενα standard όργανα που βασίζονται σε θεμελιώδεις αρχές μέτρησης. Ένας πιο ακριβής τύπος οργάνου χρησιμοποιεί ένα οπτικό-ηλεκτρονικό σύστημα ανίχνευσης της συμπίκνωσης ατμών επάνω σε ένα ηλεκτρικά ψυχόμενο κάτοπτρο από χρυσό.

ΨΥ.5 Ψυχομετρικός Χάρτης

Οι ιδιότητες του υγρού αέρα παρέχονται σε ειδικούς πίνακες, αλλά η σχετική υγρασία και το ποσοστό κορεσμού υπολογίζονται πιο εύκολα με τον *ψυχομετρικό χάρτη* (psychrometric chart) του σχήματος ΨΥ-3. Φέρνοντας μια κάθετη ευθεία από το σημείο της θερμοκρασίας ξηρού βολβού και βρίσκοντας το σημείο τομής της με την διαγώνια γραμμή, προσδιορίζεται η