

22-2-22

ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΨΥΞΗ ΜΕ CO₂ - 2

Νίκος Χαριτωνίδης, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, Master of Engineering Univ. of Sheffield, Γενικός Διευθυντής ΨΥΓΕΙΑ ΑΛΑΣΚΑ ΑΕΒΤΕ & CRYOLOGIC ΕΕ.

Στο προηγούμενο άρθρο αναπτύξαμε τα γενικά πλεονεκτήματα του CO₂ σαν ψυκτικού ρευστού. Ας δούμε τα πρόσθετα πλεονεκτήματά του όταν χρησιμοποιείται σαν δευτερεύον ρευστό, σε σχέση με τα συμβατικά δευτερεύοντα ρευστά μονής φάσης, κυριότερο των οποίων είναι το διάλυμα γλυκόλης. Κατόπιν θα αναπτυχθούν κάποιες τεχνικές λεπτομέρειες των κυκλωμάτων εμπορικής ψύξης με χρήση του CO₂ σαν δευτερεύοντος ρευστού.

ΜΙΑ ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΡΕΥΣΤΟ

Τα συστήματα ψύξης με δευτερεύον ψυκτικό ρευστό (συστήματα έμμεσης ψύξης) εκπροσωπούν μια σημαντική σειρά εφαρμογών, που τα τελευταία χρόνια είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς. Ο βασικός λόγος είναι η σημαντική μείωση της μάζας του (τυπικά επικίνδυνου) ψυκτικού ρευστού: Το τελευταίο περιορίζεται σε ένα κεντρικό μηχανοστάσιο, όπου χρησιμοποιείται σε ένα πρωτεύον ψυκτικό κύκλωμα που παράγει την ψύξη. Εντός ενός εναλλάκτη υγρού - υγρού (και αυτός στο μηχανοστάσιο) ψύχεται ένα "ουδέτερο" ρευστό, που ονομάζεται δευτερεύον ψυκτικό ρευστό. Το "παγωμένο" αυτό ρευστό διανέμεται με αντλία σε απομακρυσμένους χώρους παραγωγής (ψυκτικούς θαλάμους, προθήκες, λοιπούς εναλλάκτες), όπου αφαιρείται (αισθητό στην περίπτωση μη εξατμιζόμενων, ήτοι μονής φάσης ρευστών) θερμικό φορτίο. Το "ζεσταμένο" δευτερεύον ψυκτικό ρευστό επιστρέφει στο κεντρικό εναλλάκτη, όπου αποδίδει το θερμικό του φορτίο στο πρωτεύον ψυκτικό ρευστό (το οποίο εξατμίζεται στον ίδιο εναλλάκτη) και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Η αντλία (κυκλοφορητής) του δευτερεύοντος ρευστού παίρνει εντολή από τη ζήτηση, π.χ. μέσω ενός θερμοστάτη χώρου. Όταν η θερμοκρασία του χώρου ικανοποιηθεί, η αντλία σταματάει οπότε παύει και η παραγωγή της ψύξης.

Το τυπικό κύκλωμα έμμεσης ψύξης με CO₂ αποτελείται από το πρωτεύον ψυκτικό κύκλωμα με κάποιο "μακρόπνοο" ρευστό (τυπικά φυσικό όπως NH₃, CO₂, HC), το οποίο ψύχει ένα βρόχο με υγρό μονής φάσης (γλυκόλη) ή ρευστό δυο φάσεων (CO₂), γνωστού ως "δευτερεύον ψυκτικό κύκλωμα", ο οποίος "εξυπηρετεί" την ψύξη στους χώρους. Με το σύστημα του δευτερεύοντος ρευστού περιορίζεται πολύ η μάζα των "επικίνδυνων" πρωτευόντων ψυκτικών ρευστών (μόνο στο χώρο του μηχανοστασίου), ενώ στους χώρους παραγωγής διανέμεται το "ακίνδυνο" δευτερεύον ψυκτικό ρευστό. Η ποσότητα του πρωτεύοντος ρευστού, για δεδομένο φορτίο,

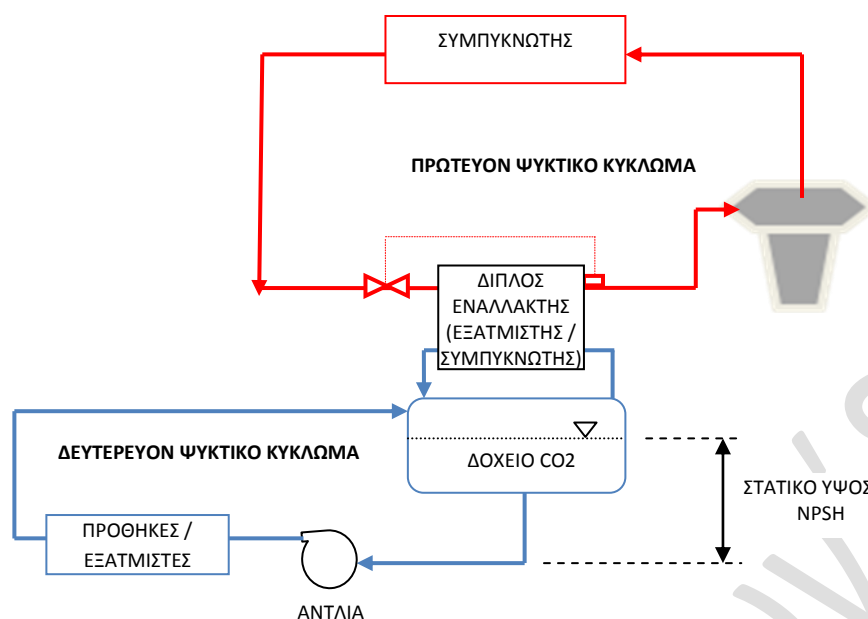
μπορεί να μειωθεί μέχρι και 90%. Το αρνητικό σημείο του συστήματος με δευτερεύον ψυκτικό ρευστό είναι το "παραπανίσιο" βήμα εναλλαγής θερμότητας στον εναλλάκτη των δυο ρευστών.

ΤΟ CO₂ ΣΑΝ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΨΥΚΤΙΚΟ ΡΕΥΣΤΟ

Το CO₂ μπορεί να χρησιμοποιείται σαν δευτερεύον ψυκτικό ρευστό με μια σειρά πλεονεκτημάτων, τα οποία του προσδίδουν ελκυστικά χαρακτηριστικά για την επιλογή του από τους σχεδιαστές. Τα βασικότερα είναι:

- ❖ Το CO₂ είναι ένα δευτερεύον ρευστό **δυο φάσεων** (υγρό / αέριο) και όχι μιας φάσης (υγρής), όπως η γλυκόλη. Έτσι αξιοποιείται η λανθάνουσα αφαίρεση θερμότητας, που μάλιστα στο CO₂ είναι αρκετά ψηλή. Σε αντίθεση, τα συμβατικά δευτερεύοντα ρευστά μονής φάσης, όπως τα διαλύματα προπυλενικής γλυκόλης, αφαιρούν μόνο αισθητή θερμότητα που είναι πολύ μικρότερη ανά kg που κυκλοφορεί. Ως εκ τούτου, η παροχή μάζας CO₂ είναι σχετικά μικρότερη (μικρότερη αντλία, μικρότερες σωλήνες). Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι η ειδική θερμότητα διαλύματος 25% κ.ο. προπυλενικής γλυκόλης στους -10° C είναι 3,93 KJ/kg.K, ενώ η λανθάνουσα θερμότητα του υγρού CO₂ στους -10° C είναι 258,62 KJ/kg.
- ❖ Το CO₂ είναι ένα ρευστό μικρού ιξώδους και υφίσταται μικρότερες πτώσεις πίεσης από τα συμβατικά (πολύ μεγαλύτερου ιξώδους) δευτερεύοντα ρευστά. Ταυτόχρονα, το χαρακτηριστικό του μικρού θερμοκρασιακού penalty βοηθάει ακόμα περισσότερο. Για παράδειγμα, το δυναμικό ιξώδες της προπυλενικής γλυκόλης 25% κ.ο. είναι $10,22 \times 10^{-3}$ Pa's, ενώ το αντίστοιχο μέγεθος για το CO₂ στην ίδια θερμοκρασία είναι $0,118 \times 10^{-3}$ Pa's (μόλις το 1,2% αυτού της γλυκόλης). Το αποτέλεσμα είναι πάλι μικρότερη αντλία / σωλήνες.
- ❖ Ο βρασμός του CO₂ που γίνεται στον εξατμιστή και η τυρβώδης ροή του μίγματος υγρού - αερίου εξασφαλίζει μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής μεταφοράς από την πλευρά του ρευστού, σε σχέση με τη στρωτή ροή του 100% υγρού συμβατικού δευτερεύοντος ρευστού. Τούτο αποτελεί έναν ακόμα παράγοντα προς την πλευρά της μικρότερης διατομής ροής.
- ❖ Το CO₂ είναι ένα σχετικά ακίνδυνο ρευστό και λαμβανομένων των μέτρων ασφάλειας (που είδαμε σε προηγούμενο άρθρο) δεν προκαλούν σοβαρά προβλήματα οι διαρροές του.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένα τυπικό κύκλωμα δευτερεύοντος ρευστού με CO₂.



Κύκλωμα εμπορικής ψύξης με δευτερεύον ψυκτικό ρευστό CO₂.

Η διάταξη του προηγούμενου σχήματος παραπέμπει ουσιαστικά στο σύστημα της υπετροφοδότησης με αντλία: Η παροχή μάζας του υγρού που προσάγεται (με αντλία) στον εναλλάκτη είναι πολλαπλάσια της απαραίτητα εξατμιζόμενης ποσότητας προς κάλυψη του ψυκτικού φορτίου. Ο λόγος της συνολικά τροφοδοτούμενης μάζας, προς την εξατμιζόμενη μάζα ονομάζεται λόγος ανακυκλοφορίας. Αν για παράδειγμα, ο λόγος ανακυκλοφορίας είναι 2, τότε στην έξοδο του εναλλάκτη έχουμε ίσες μάζες υγρού - αερίου (η μια μάζα εξατμίστηκε και η άλλη παρέμεινε υγρή). Η ρύθμιση του λόγου ανακυκλοφορίας επιτυγχάνεται μέσω της παροχής της αντλίας (συνολική παροχή). Μια καλή πρακτική είναι να εξασφαλίζεται λόγος ανακυκλοφορίας μεταξύ 1 και 2 στις συνθήκες δυσμενέστερου φορτίου (μέγιστη εξάτμιση). Σε κάθε περίπτωση πάντως, η απορροφώμενη ισχύς της αντλίας CO₂ είναι πολύ χαμηλότερη απ' ό,τι στα ρευστά μονής φάσης. Τούτο βασικά οφείλεται στο πολύ χαμηλό ιξώδες του CO₂.

Ένα σοβαρό θέμα που προκύπτει στα συστήματα άντλησης CO₂, όπως σε αυτά που χρησιμοποιείται σαν δευτερεύον ρευστό, είναι ο κίνδυνος της σπηλαιώσης της αντλίας. Η σπηλαιώση είναι η απότομη μετάπτωση του υγρού σε αέριο εντός του σώματος της αντλίας, λόγω απότομης και μεγάλης πτώσης πίεσης. Το φαινόμενο αυτό καταπονεί την αντλία και μπορεί ακόμα και να την καταστρέψει. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με εξασφάλιση επαρκούς υψομετρικής διαφοράς μεταξύ στάθμης υγρού στο δοχείο και στομίου αναρρόφησης της αντλίας (βλέπε σχήμα). Η στήλη αυξάνει την πίεση του υγρού τροφοδοσίας της αντλίας (με την προσθήκη της στατικής πίεσης), καθιστώντας το έτσι επαρκώς υπόψυκτο. Το "επαρκώς"

αναφέρεται στα περιθώρια της υπόψυξης, που εξασφαλίζουν την παραμονή του ρευστού σε κατάσταση 100% υγρού, παρόλη την (έντονη) πτώση πίεσης.

Το CO₂ σαν δευτερεύον ρευστό δυο φάσεων επιτυγχάνει στον εξατμιστή συνολικό συντελεστή θερμικής μεταφοράς πολύ καλύτερο από τα ρευστά μονής φάσης, λόγω ακριβώς της δράσης του βρασμού. Επίσης, η πρακτικά σταθερή θερμοκρασία του CO₂ σε όλο το μήκος του εναλλάκτη¹ (θερμοκρασία κορεσμού) προσφέρει καλύτερη ποιότητα ψύξης, ενώ σε εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών ο σχηματισμός πάγου είναι ομοιόμορφος κατά μήκος του εναλλάκτη, πράγμα που κάνει ευκολότερη την απόψυξη. Ακόμη, ο ρυθμός σχηματισμού πάγου θα είναι μικρότερος, αφού ο εναλλάκτης CO₂ λειτουργεί με ψηλότερη θερμοκρασία ρευστού (λόγω καλύτερου συνολικού συντελεστή θερμικής μεταφοράς).

Το CO₂ σε εφαρμογές μεσαίων θερμοκρασιών έχει θερμοκρασία της τάξης των -5° C. Στα επίπεδα αυτά, η πίεση του CO₂ είναι της τάξης των 30 bar, αρκετά μικρότερη των 40 bar που είναι συνήθως διαβαθμισμένα τα συμβατικά δίκτυα². Τούτο καθιστά εφικτή τη χρήση του παλιού δικτύου (με μικρομετατροπές) όταν γίνεται μετάπτωση σε CO₂, όπως π.χ. συστημάτων R-22 ή R-404a κατευθείαν εκτόνωσης.

Συγκρίνοντας το δευτερεύον κύκλωμα CO₂ με τα κυκλώματα κατευθείαν (ξηρής) εκτόνωσης που πιθανά καλείται να αντικαταστήσει (π.χ. R-404a) από άποψη ενεργειακής απόδοσης, υπάρχει ένα σημαντικό μειονέκτημα για το CO₂: Ένα πρόσθετο βήμα εναλλαγής θερμότητας στον εναλλάκτη - συμπυκνωτή (πρόσθετο ΔΤ). Για παράδειγμα, αν η θερμοκρασία του CO₂ είναι -5° C η θερμοκρασία εξατμίσεως του πρωτεύοντος ρευστού πρέπει να είναι -10° C. Τούτο "κατεβάζει" την απαιτούμενη θερμοκρασία αναρρόφησης του πρωτεύοντος κυκλώματος, επιβαρύνοντας έτσι τη κατανάλωση του συμπιεστή. Επιπρόσθετα, υπάρχει και το κόστος κατανάλωσης της αντλίας, που όμως είναι όπως αναφέρθηκε πολύ χαμηλό σε σχέση με τα δευτερεύοντα ρευστά μονής φάσης. Σε αντιστάθμιση, υπάρχουν τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα (μικρές πτώσεις πίεσης, θερμοκρασιών κορεσμού κλπ), που κρίνονται πολύ σημαντικά ειδικά σε μακρές γραμμές αναρρόφησης, που είναι συχνό φαινόμενο στα σούπερ μάρκετ.

¹ Στα δευτερεύοντα ρευστά μονής φάσης έχουμε αισθητή μεταφορά θερμότητας, άρα το ρευστό ζεσταίνεται όσο προχωράει στον εναλλάκτη. Η θερμοκρασία του στην έξοδο μπορεί να είναι 2-3 K ψηλότερη απ' ότι στην είσοδο. Το πρόβλημα της ανομοιομορφίας της θερμοκρασίας εξατμιστή ισχύει και στα συστήματα ξηρής εκτόνωσης. Στο "ξηρό" τμήμα του εναλλάκτη το ρευστό είναι υπέρθερμο, δηλαδή θερμότερο απ' ότι στο "βρεγμένο".

² Δεν πρέπει να δημιουργεί ιδιαίτερο φόβο τυχόν υπέρβαση αυτής της πίεσης, λόγω του ότι στα κυκλώματα CO₂ είναι σχετικά ακίνδυνη η απελευθέρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα μέσω ανακουφιστικών βαλβίδων εφόσον βεβαίως αυτές προβλέπονται, όπως αναπτύξαμε σε προηγούμενο άρθρο.