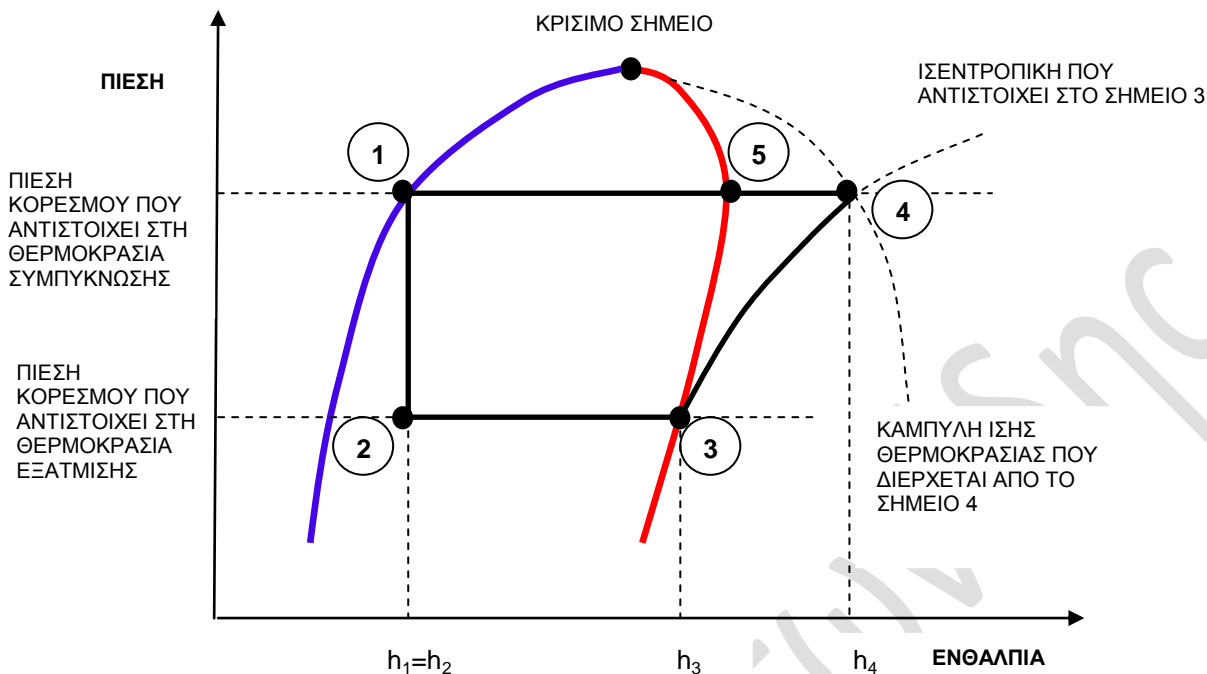


6-11-15

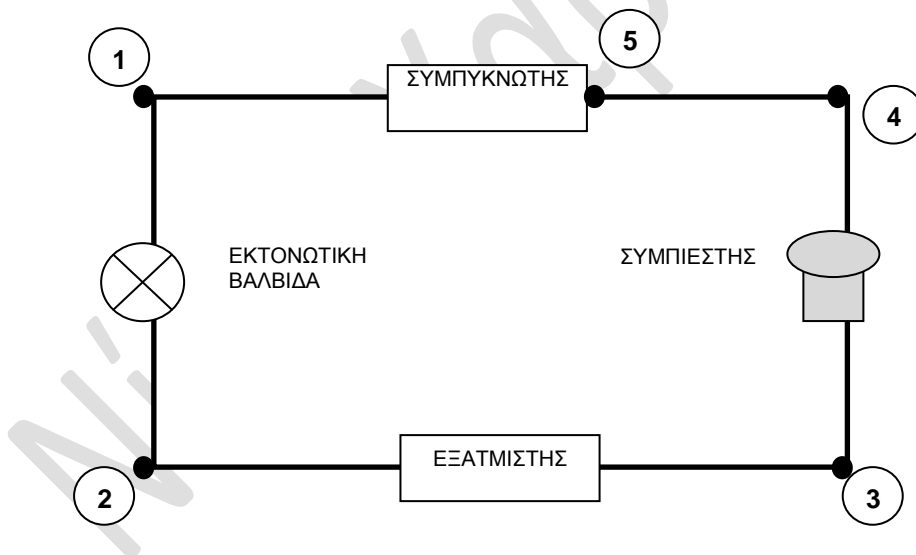
Ο «TRANSCRITICAL» ΨΥΚΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ CO₂

Στα συνηθισμένα ψυκτικά ρευστά, η απόρριψη θερμότητας γίνεται υπό σταθερά θερμοκρασία, που είναι η θερμοκρασία συμπύκνωσης του ψυκτικού ρευστού. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1, στα «συνηθισμένα» ψυκτικά ρευστά, κατά τη φάση συμπύκνωσης έχουμε μετατροπή του αερίου σε υγρή μορφή, όπου η θερμότητα αποβάλλεται με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης. Η θερμοκρασία και πίεση συμπύκνωσης είναι χαμηλότερες αυτών του κρίσιμου σημείου, για τούτο και επιτυγχάνεται υγροποίηση.

Οι κύκλοι, όπου η θερμότητα απορρίπτεται σε σημείο χαμηλότερο του κρίσιμου σημείου, ονομάζονται **υποκρίσιμοι κύκλοι** (subcritical cycles). Τέτοιοι κύκλοι είναι της αμμωνίας και των αλογονανθράκων. Υπάρχει όμως η δυνατότητα, η απόρριψη της θερμότητας να γίνει σε σημείο ψηλότερο του κρίσιμου σημείου, ενώ η απορρόφηση της θερμότητας (εξάτμιση) βεβαίως γίνεται σε σημείο χαμηλότερο του κρίσιμου σημείου.



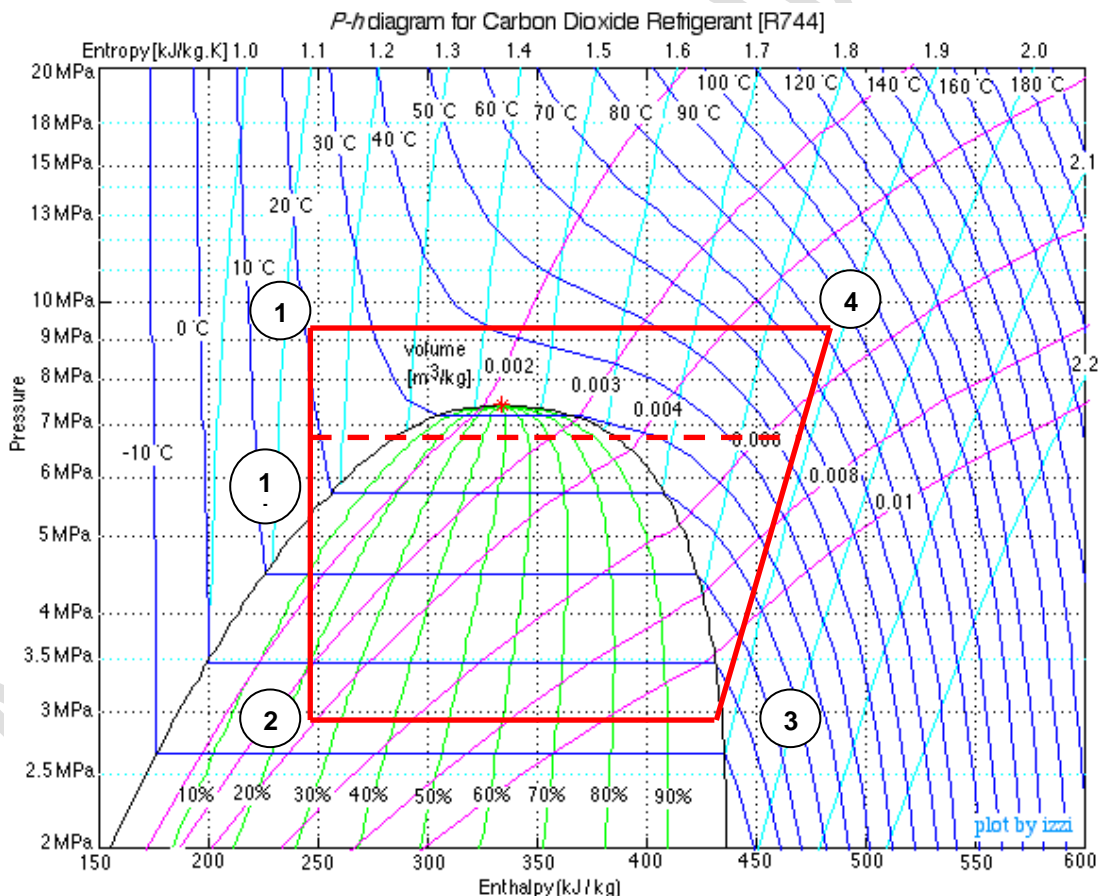
(α) Διάγραμμα Πίεσης – Ενθαλπίας τυπικού ψυκτικού κύκλου συμπίεσης - εκτόνωσης



(β) Συστατικά τυπικού ψυκτικού κύκλου συμπίεσης - εκτόνωσης

Σχήμα 1 : Ο τυπικός ψυκτικός κύκλος συμπίεσης - εκτόνωσης

Ο κύκλος, όπου η απόρριψη της θερμότητας γίνεται σε σημείο ψηλότερο του κρίσιμου σημείου ονομάζεται **διακρισιμος κύκλος** (transcritical cycle), για το λόγο ότι το κρίσιμο σημείο βρίσκεται ενδιάμεσα των φάσεων απορρόφησης και απόρριψης της θερμότητας. Ένας τέτοιος κύκλος φαίνεται στο σχήμα 2. Παρατηρούμε, ότι η βασική διαφορά του transcritical από το subcritical κύκλο, είναι ότι, ενώ η απόρριψη θερμότητας στο subcritical γίνεται υπό σταθερά θερμοκρασία, στον transcritical η θερμοκρασία πέφτει προοδευτικά κατά την απόρριψη της θερμότητας και βεβαίως δεν υπάρχει το φαινόμενο της συμπύκνωσης (υγροποίησης). Η διαδικασία απόρριψης της θερμότητας σε ένα κύκλο transcritical ονομάζεται **ψύξη αερίου** (gas cooling). Να σημειωθεί, ότι αν οι εξωτερικές συνθήκες θερμοκρασίας πέσουν αρκετά κάτω από το κρίσιμο σημείο, θα έχουμε συνδυασμένη ψύξη αερίου με συμπύκνωση (διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 9).



Σχήμα 2 : Transcritical κύκλος για το CO₂ (R-744). Παρατηρήστε ότι ο κύκλος λαμβάνει χώρα και από τις δυο πλευρές του κρίσιμου σημείου.

Μελετώντας τον «transcritical» (στο εξής TC) κύκλο του CO₂, **κάνουμε τις εξής βασικές παρατηρήσεις :**

- Οι πιέσεις λειτουργίας του TC κύκλου CO₂ είναι πολύ ψηλότερες από αυτές που συνηθίζουμε στους κύκλους των HFCs, HCFCs και της αμμωνίας.
- Στο TC κύκλο, ο συμπιεστής ανεβάζει τη πίεση λειτουργίας πάνω από το κρίσιμο σημείο και η θερμότητα απορρίπτεται στην ατμόσφαιρα, με ψύξη του υπέρθερμου ατμού της κατάθλιψης, **χωρίς συμπύκνωση**. Συσκευή που εκτελεί το έργο της ψύξης του αερίου ονομάζεται **ψύκτης αερίου** (gas cooler). Όταν το αέριο που έχει ψυχθεί διέλθει μέσω της εκτονωτικής βαλβίδας (φάση εκτόνωσης 1-2), υφίσταται μείωση της πίεσής του υπό σταθερή ενθαλπία (κατακόρυφη πτώση στο διάγραμμα). Κατά τη διαδρομή αυτή, κάποια στιγμή «θα συναντήσει» τη γραμμή κορεσμού (σημείο 1'), όπου μετατρέπεται σε 100% κορεσμένο υγρό (βλέπε σχήμα 1). Όσο «πέφτει» προς τα κάτω, μετατρέπεται σε μίγμα υγρού – ατμού.
- Η “transcritical” λειτουργία κάποιες θερμές εποχές του χρόνου δεν αποκλείει την λειτουργία του ίδιου συγκροτήματος σε “subcritical” κύκλο κάποιες άλλες ψυχρές εποχές. Απλά, όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι αρκετά χαμηλότερη από την κρίσιμη θερμοκρασία του CO₂ (31° C), το υπέρθερμο CO₂ στη κατάθλιψη του συμπιεστή «κατορθώνει» να υγροποιηθεί, εκτελώντας έτσι ένα συμβατικό (υποκρίσιμο) ψυκτικό κύκλο (διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 2).
- Αν υποθεθεί ότι η θερμοκρασία του αερίου στην έξοδο του ψύκτη αερίου είναι δεδομένη και ανεξάρτητη από τη πίεση κατάθλιψης, παρατηρώντας το σχήμα 2 συμπεραίνουμε ότι αν ανέβει η πίεση κατάθλιψης (πρόσθετο έργο συμπίεσης), μετατίθεται προς τα αριστερά το σημείο 1, λόγω του ότι οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες έχουν κλίση προς τα αριστερά. Αυτή η μετάθεση προς τα αριστερά του σημείου 1 μειώνει την ενθαλπία του αερίου, δίνοντάς του έτσι αυξημένο ψυκτικό αποτέλεσμα (μεγαλώνει το τμήμα 2-3, άρα κάθε κιλό απορροφάει περισσότερη θερμότητα). Ο συλλογισμός αυτός οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι υπάρχει μια βέλτιστη πίεση κατάθλιψης, όπου μεγιστοποιείται η απόδοση του ψυκτικού κύκλου (max COP). Έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι, όπου εξασφαλίζεται βέλτιστη λειτουργία, με συνεχή μέτρηση της πίεσης εξάτμισης και της θερμοκρασίας αερίου στην έξοδο του ψύκτη αερίου και ρύθμιση της ροής του CO₂, έτσι ώστε να διατηρείται η βέλτιστη πίεση κατάθλιψης.

- Σύμφωνα με αναφορές σε ναυτικά ημερολόγια, κατά τη πλεύση πλοίων – ψυγείων με κύκλωμα CO₂ από το κανάλι του Σουέζ στη δεκαετία του 20 (1), οι μηχανικοί στραγγάλιζαν την έξοδο του ψύκτη αερίου, για να πετύχουν καλύτερη απόδοση στα θερμά θαλάσσια νερά της περιοχής (που τα χρησιμοποιούσαν στο ψύκτη αερίου). Με τον τρόπο αυτό ανέβαζαν τη πίεση κατάθλιψης και βελτιώναν την απόδοση.
- Αποτελεί πρόκληση, η επίτευξη όσο γίνεται χαμηλότερης θερμοκρασίας αερίου στην έξοδο του ψύκτη αερίου, εφόσον αυτό οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση. Η χρήση εξατμιστικού ψύκτη αερίου είναι θεωρητικά η καλύτερη λύση, δεδομένου ότι στον εξατμιστικό, η θερμοκρασία του αέρα ψύξης είναι μάλλον η θερμοκρασία υγρού βολβού παρά του ξηρού βολβού¹.
- Η ενθαλπία του εκτονούμενου αερίου (διαδρομή 1-2) θα μπορούσε να μειωθεί και με τη χρήση ενός εκτονωτή², όπου το ανακτώμενο μηχανικό έργο χρησιμοποιείται για υποβοήθηση του συμπιεστή.

Αναφορές:

1. ASHRAE handbook refrigeration chapter 3: Carbon Dioxide Refrigeration Systems.
2. International Institute of Refrigeration “CO₂ as a refrigerant”, editor A. B. Pearson, 2014

¹ Η θερμοκρασία υγρού βολβού είναι πάντα μικρότερη από τη θερμοκρασία ξηρού βολβού.

² Σύμφωνα με το θεωρητικό κύκλο του CARNOT, η εκτόνωση ακολουθεί την ισεντροπική καμπύλη που διέρχεται από το σημείο 1'. Η καμπύλη αυτή έχει μια ελαφρά κλίση προς τα αριστερά (προοδευτική μείωση της ενθαλπίας κατά τη διαδρομή 1-2).