

ΨΥΞΗ ΜΕ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

31-7-11

Το διοξείδιο του άνθρακα (συμβολισμός ψυκτικού ρευστού R-744, χημικός τύπος CO₂) συγκαταλέγεται στην ομάδα των φυσικών ψυκτικών ρευστών¹. Θεωρείται αβλαβές αέριο, όχι εύφλεκτο, μη τοξικό, χωρίς γνωστές μέχρι στιγμής επιπτώσεις σε καρκινογένεση ή μετάλλαξη και χωρίς βλαβερά κατάλοιπα κατά την καύση. Στις συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης, υπάρχει στην ατμόσφαιρα σε αέριο μορφή. Επί του παρόντος, η συγκέντρωση του διοξειδίου στην ατμόσφαιρα ανέρχεται στα 390 ppm².

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) έχει μακρά ιστορία στη παραγωγή ψύξης και είναι ένα από τα πρώτα ψυκτικά αέρια που χρησιμοποιήθηκαν στα πρώτα μηχανικά συγκροτήματα ψύξης, από την αρχή της εμφάνισής τους γύρω στο 1860. Το CO₂ καθιερώθηκε σαν το βασικό ψυκτικό αέριο για θαλάσσιες μεταφορές, τόσο για καταψύξεις, όσο και για συντηρήσεις, διευκολύνοντας έτσι την ανάπτυξη του Διεθνούς Εμπορίου. Η ανάπτυξη των συστημάτων CO₂ συνεχίστηκε μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 40, οπότε κάμφθηκε λόγω της ανακάλυψης των συνθετικών αερίων και κύρια του R-22, το οποίο σταδιακά πήρε τη πρωτοκαθεδρία στα συστήματα παραγωγής ψύξης. Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 60, όλα σχεδόν τα συστήματα CO₂ είχαν αντικατασταθεί από συστήματα συνθετικών αερίων. Από το 1950 και επί 35 χρόνια, υπήρξε ραγδαία ανάπτυξη στα συστήματα των χλωροφθορανθράκων (CFCs), με τυπικό εκπρόσωπο το R-12. Τα αέρια αυτά εκτόπισαν στη κυριολεξία όλα τα άλλα αέρια, εκτός από την αμμωνία στη Βιομηχανική Ψύξη, λόγω των εξαιρετικών θερμοδυναμικών της ιδιοτήτων. Τη δεκαετία του 70 όμως οι επιστήμονες εντόπισαν τις αρνητικές επιπτώσεις που έχουν οι χλωροφθοράνθρακες (π.χ. R-12) και οι υδροχλωροφθοράνθρακες (π.χ. R-22) στη δημιουργία της «τρύπας του όζοντος» και προοδευτικά οι κυβερνήσεις κατήργησαν αυτά τα αέρια (η πιο πρόσφατη κατάργηση είναι η παραγωγή υδροχλωροφθορανθράκων στις ανεπτυγμένες χώρες στις 31/12/2009). Εις αντικατάσταση αυτών των αερίων, αναπτύχθηκαν τα αέρια του τύπου των υδροφθορανθράκων (HFCs), γνωστών και σαν F-GASES. Επόμενες όμως επιστημονικές έρευνες, έδειξαν ότι και αυτά τα αέρια έχουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις, λόγω του ότι προξενούν κλιματικές αλλαγές μέσω του φαινομένου της παγκόσμιας θέρμανσης (Global Warming Potential – GWP).

¹ Το άλλο μεγάλο μέλος της ομάδας είναι η αμμωνία (R-717 / NH₃). Συγκαταλέγονται επίσης και οι υδρογονάνθρακες (HC)

² Το 1850 υπολογίζεται ότι η συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα ήταν της τάξης των 280 ppm. Έκτοτε η συγκέντρωση αυξάνεται διαρκώς, λόγω των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων (καύσεις), οι οποίες προκάλεσαν και το φαινόμενο της παγκόσμιας θέρμανσης. Υπολογίζεται ότι ετησίως η συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα αυξάνεται κατά περίπου 2 ppm.

ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ CO₂

Στο πίνακα 1 παρουσιάζονται κάποια συχνά χρησιμοποιούμενα ψυκτικά αέρια, με τη κατάταξή τους σε ομάδα ασφάλειας³ και δείκτες GWP⁴.

ΨΥΚΤΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	ΟΜΑΔΑ ΑΕΡΙΩΝ	ΧΗΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	ΘΕΡΜΟΚΡ. ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΑΤΜΟΣΦ. ΠΙΕΣΗ (101,3 kpa), °C	ΟΜΑΔΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	ΔΕΙΚΤΗΣ GWP ΣΕ 100 ΧΡΟΝΙΑ
R-22	HCFC	CHClF ₂	-40,8	A1	1700
R-134A	HFC	CF ₃ CH ₂ F	-26,1	A1	1300
R-410A	ΜΙΓΜΑ HFC	50% HFC-32 50% HFC-125	-52,3	A1	2000
R-507A	ΜΙΓΜΑ HFC	50% HFC-125 50% HFC-143a	-47,1	A1	3900
R-717	ΑΜΜΩΝΙΑ	NH ₃	-33,3	B2	0
R-744	ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ	CO ₂	-78,4	A1	1

Πίνακας 1 : Χαρακτηριστικά κοινών ψυκτικών αερίων (ANSI/ASHRAE St. 34)

Στο πίνακα 2 παρουσιάζεται η συγκριτική απόδοση των συχνά χρησιμοποιούμενων αερίων ανά KW ψυκτικού φορτίου, σε συνθήκες εξάτμισης / συμπύκνωσης -15⁰C / 30⁰ C.

³ Ο χαρακτηρισμός A, B αφορά τη τοξικότητα και ο χαρακτηρισμός 1, 2, 3 αφορά την ευκολία ανάφλεξης (B τα πιο τοξικά – 3 τα πιο εύφλεκτα).

⁴ Ορίζεται εξαρχής ότι το CO₂ έχει δείκτη GWP = 1. Οι δείκτες για τα υπόλοιπα αέρια υπολογίζονται σχετικά με το δείκτη του CO₂.

ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΣΤΟΥΣ -15 ⁰ C ΚΑΙ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΣΤΟΥΣ 30 ⁰ C					
ΨΥΚΤΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	ΑΠΟΛΥΤΗ ΠΙΕΣΗ ΣΤΟΝ ΕΞΑΤΜΙΣΤΗ (Μρα)	ΑΠΟΛΥΤΗ ΠΙΕΣΗ ΣΤΟ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗ (Μρα)	ΚΑΘΑΡΟ ΨΥΚΤΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ (ΚJ/kg)	ΠΑΡΟΧΗ ΨΥΚΤΙΚΟΥ (kg/s)	ΕΙΔΙΚΟΣ ΟΓΚΟΣ ΑΕΡΙΟΥ ΣΤΗΝ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗ (m ³ /kg)
R-22	0,30	1,19	162,2	1,7 X 10 ⁻³	2,7 X 10 ⁻³
R-134A	0,16	0,77	147,6	1,9 X 10 ⁻³	4,2 X 10 ⁻³
R-410A	0,48	1,87	167,6	1,7 X 10 ⁻³	1,9 X 10 ⁻³
R-507A	0,38	1,46	110,0	2,6 X 10 ⁻³	1,8 X 10 ⁻³
R-717	0,24	1,16	1100,9	0,26 X 10 ⁻³	17,6 X 10 ⁻³
R-744	2,25	7,18	133,0	1,1 X 10 ⁻³	0,58 X 10 ⁻³

Πίνακας 2 : Συγκριτική απόδοση ψυκτικών αερίων ανά ψυκτικό Kilowatt – εξάτμιση στους -15⁰ C και συμπύκνωση στους 30⁰ C (2009 ASHRAE Handbook – Fundamentals)

Το CO₂ είναι πλέον ένα ελκυστικό αέριο στα σύγχρονα συστήματα ψύξης και αυτό οφείλεται στις πλεονεκτικές θερμοδυναμικές του ιδιότητες, επιπρόσθετα στο ότι πρόκειται για ένα φυσικό αέριο : Έχει χαμηλό ιξώδες, μεγάλη θερμική αγωγιμότητα και μεγάλη πυκνότητα ατμών⁵. Όλα αυτά οδηγούν στη δυνατότητα επιλογής εξοπλισμών (εξατμιστές, συμπυκνωτές, συμπιεστές) μικρότερου μεγέθους, σε σχέση με τους HCFCs και τους HFCs. Τελικά, το CO₂ είναι ένα ψυκτικό ρευστό ευρείας εφαρμογής, που καλύπτει σχεδόν όλες τις εφαρμογές ψύξης και κλιματισμού (βιομηχανική ψύξη, κλιματισμός, οικιακά ψυγεία, κλιματιστικά αυτοκινήτων, καταψύκτες). Στο πίνακα 3 φαίνονται τα βασικά συστήματα που χρησιμοποιούν CO₂ :

⁵ Τούτο σημαίνει μικρό απαιτούμενο μέγεθος συμπιεστή

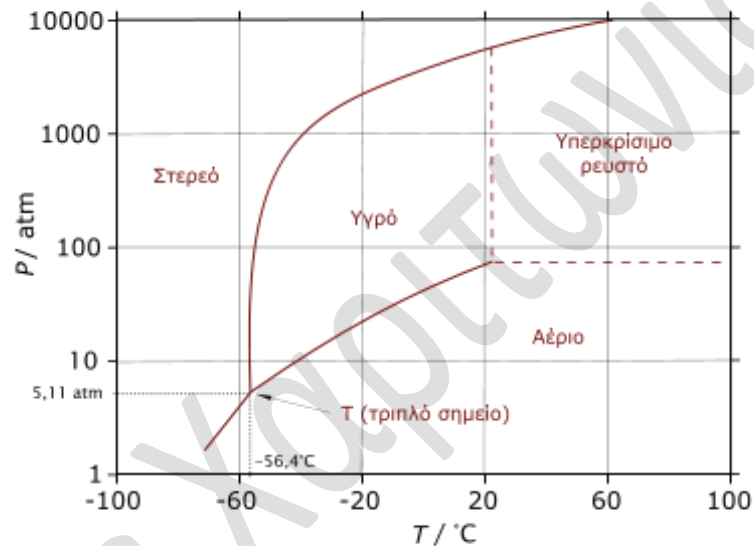
ΕΦΑΡΜΟΓΗ	ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΥΤ/ΤΩΝ	Κύριο ψυκτικό ρευστό CO ₂
ΟΙΚΙΑΚΗ ΨΥΞΗ	
ΨΥΓΕΙΑ SUPER MARKET	
ΠΡΟΘΗΚΕΣ ΑΝΑΨΥΚΤΙΚΩΝ	
ΨΥΓΕΙΑ SUPER MARKET	Κύριο ψυκτικό ρευστό αμμωνία (R-717) ή HFCs και δευτερεύον ψυκτικό ρευστό CO ₂
ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΝΕΡΟΥ	Ανάκτηση θερμότητας από τη φάση συμπίεσης CO ₂ πάνω από το κρίσιμο σημείο (transcritical cycle)
ΜΕΓΑΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ ΤΥΠΟΥ "CASCADE" (ΚΛΙΜΑΚΟΕΙΔΗ)	Στη χαμηλή βαθμίδα χρησιμοποιείται CO ₂ , ενώ στη ψηλή βαθμίδα χρησιμοποιείται αμμωνία (R-717) ή R-507A
ΜΕΣΑΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΨΥΞΗΣ ΤΥΠΟΥ "CASCADE" (ΚΛΙΜΑΚΟΕΙΔΗ)	Στη χαμηλή βαθμίδα χρησιμοποιείται CO ₂ , ενώ στη ψηλή βαθμίδα χρησιμοποιούνται HFCs ή HCs (υδρογονάνθρακες)

Πίνακας 3 : Εφαρμογές ψύξης με CO₂

Το CO₂ έχει ιδιαιτερότητες στις αλλαγές φάσεων. Στο εμπόριο διατίθεται και σε στερεά και σε υγρή / αέριο μορφή. Στη στερεά του μορφή είναι γνωστό σαν «ξηρός πάγος» και χρησιμοποιείται συχνά για διατήρηση ψύξης σε μεταφερόμενα πακέτα. Στην ατμοσφαιρική πίεση (101 kPa / 1,01 bar) ο ξηρός πάγος εξαχνούται⁶ στους -78,5⁰ C, με λανθάνουσα θερμότητα 571 KJ/kg. Το υγρό CO₂ μεταφέρεται σε ειδικά δοχεία ψηλής πίεσης, που συχνά διαθέτουν δικό τους, ανεξάρτητο σύστημα ψύξης, ώστε να διατηρούν τη πίεση υπό έλεγχο. Το CO₂ θεωρείται σήμερα ένα πολύ φθηνό ψυκτικό ρευστό, με κόστος μόλις ένα μικρό ποσοστό από τα άλλα συνήθη ψυκτικά ρευστά. Αυτό, σε συνδυασμό με θέματα που αφορούν το περιβάλλον και την ασφάλεια, προσδίδουν στο CO₂ ένα θετικό μέλλον στα συστήματα μηχανικής ψύξης, όπου χρησιμοποιείται είτε σαν πρωτεύον είτε σαν δευτερεύον ψυκτικό ρευστό. Σε κάθε περίπτωση, για να καταλάβει κανείς πως λειτουργεί το CO₂, πρέπει να κατανοήσει σε βάθος τις συνθήκες, που η ουσία αυτή είναι στερεό, υγρό ή αέριο. Ιδιαίτερα σημαντικά είναι το **τριπλό σημείο** και το **κρίσιμο σημείο**. Σαν τριπλό σημείο ορίζεται το σημείο ισορροπίας, όπου συνυπάρχουν και οι τρεις φάσεις (στερεά, υγρά και αέριος). Σαν κρίσιμο σημείο ορίζεται το σημείο πίεσης και θερμοκρασίας, πέρα από το οποίο, είτε σε μεγαλύτερη πίεση, είτε σε

⁶ Εξάχνωση ορίζεται το φαινόμενο μετατροπής ενός στερεού κατευθείαν σε αέριο, χωρίς τη μεσολάβηση της υγρής φάσης. Ένα άλλο υλικό, γνωστό για αυτή την ιδιότητα, είναι η ναφθαλίνη.

μεγαλύτερη θερμοκρασία, είτε μεγαλύτερα και τα δυο, δεν υπάρχουν διακριτή αέριος ή υγρή φάση⁷. Η κρίσιμη θερμοκρασία του CO₂ είναι 31⁰ C και η κρίσιμη πίεση 74 bar. Τούτο σημαίνει, ότι είναι αδύνατον να υγροποιηθεί το αέριο CO₂ σε θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας (heat rejection) μεγαλύτερη από 31⁰ C. Η θερμοκρασία αυτή θεωρείται χαμηλή, σε σχέση με τα άλλα ψυκτικά ρευστά (για την αμμωνία είναι 132⁰ C / 113 bar και για το R-404A είναι 72⁰ C / 38 bar). Ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, για τη κατανόηση των παραπάνω, είναι το **διάγραμμα φάσεων**, όπου σε μια γραφική παράσταση με άξονες ΠΙΕΣΗ / ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ, παριστάνονται οι περιοχές, όπου η ουσία βρίσκεται σε στερεά, υγρά, αέριο ή σε κατάσταση υπερκρίσιμου ρευστού (supercritical fluid). Στο σχήμα 8, φαίνεται το διάγραμμα φάσεων του CO₂ :



Σχήμα 1 : Διάγραμμα φάσεων του Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂)

⁷ Όσο προσεγγίζεται η κρίσιμη θερμοκρασία, οι ιδιότητες υγρού – αερίου αλληλοπροσεγγίζονται και στο κρίσιμο σημείο καταλήγουν στη φάση του ομογενούς «υπερκρίσιμου ρευστού», όπου δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ των δυο φάσεων (η λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσης είναι μηδέν). Υπεράνω της κρίσιμης θερμοκρασίας, είναι αδύνατη η μετατροπή σε ρευστό, **όσο και να αυξηθεί η πίεση.**