

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΨΥΞΗΣ

ΨΥΚΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Θεωρία - Λυμένα Παραδείγματα

Νικόλαος Χονδράκης (Εκπαιδευτικός)

.....

Νικόλαος Γ. Χονδράκης (chonniko@gmail.com)

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός

Copyright © Νικόλαος Γ. Χονδράκης, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΨΥΞΗΣ

ΨΥΚΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Θεωρία - Λυμένα Παραδείγματα

**Για τους μαθητές των ΕΠΑΛ και τους υποψήφιους που εξετάζονται
στο μάθημα: Εγκαταστάσεις Ψύξης.**

Νικόλαος Χονδράκης (chonniko@gmail.com)

Πρόλογος

Η πολύχρονη εμπειρία μου ως εκπαιδευτικός μου επιτρέπει να εκδώσω, σε ηλεκτρονική μορφή και σε ελεύθερα επισκέψιμη έκδοση, τις παρούσες σημειώσεις που αφορούν στο κεφάλαιο του Ψυκτικού Κύκλου του μαθήματος των Ψυκτικών Εγκαταστάσεων. Επειδή το μάθημα το έχω διδάξει επί σειρά ετών στα επαγγελματικά σχολεία, πιστεύω ότι είναι ένα χρήσιμο βοήθημα σε εκείνους που ξεκινούν να μάθουν τον τρόπο που παράγεται η ψύξη. Ιδιαίτερα απευθύνεται στους μαθητές που σήμερα παρακολουθούν τον τομέα Μηχανολογίας των ΕΠΑΛ.

Η κατανόηση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε ένα ψυγείο και ένα κλιματιστικό μηχανήμα για την παραγωγή της ψύξης, απαιτεί τη γνώση ορισμένων θερμοδυναμικών μεγεθών. Η ψύξη παράγεται με μεταβολές που συμβαίνουν σε ένα ρευστό, που ονομάζεται ψυκτικό μέσον, και γίνονται μέσα σε σωληνώσεις. Παρακάτω θα δούμε λεπτομερώς τα μεγέθη και τις μεταβολές αυτές και θα εξηγήσουμε το πώς αλλά και το γιατί συμβαίνουν οι αλλαγές στο ψυκτικό μέσο κατά την παραγωγή της ψύξης.

Αρχικά δίνουμε τους απαραίτητους ορισμούς μεγεθών που μας είναι αναγκαία για τις επεξηγήσεις που ακολουθούν. Με παραδείγματα από την καθημερινή ζωή προσπαθούμε να δώσουμε την αντιστοιχία τους με τις διεργασίες που συμβαίνουν στις ψυκτικές εγκαταστάσεις.

Ακολουθώντας κάνουμε περιγραφή του ψυκτικού κυκλώματος εξηγώντας γιατί υπάρχει κάθε εξάρτημα και την εργασία που εκτελεί. Πρέπει σε όλες τις διαδικασίες να γνωρίζουμε τις συναλλαγές θερμότητας που γίνονται από τα τμήματα της διάταξης προς το περιβάλλον.

Στην επόμενη παράγραφο εξηγούμε πως κατασκευάζεται ένα διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας και τις γραμμές που συναντάμε σε αυτό. Η γνώση των διαφόρων λεπτομερειών του διαγράμματος είναι σημαντική για να μπορέσουμε να χαράξουμε ένα ψυκτικό κύκλο. Η χάραξη γίνεται γνωρίζοντας τα μεγέθη για κάθε μεταβολή, πράγμα που αναλύεται διεξοδικά.

Ακολουθούν αναλυτικά λυμένα παραδείγματα κατασκευής ψυκτικών κύκλων, απλών ή με υπερθέρμανση και υπόψυξη. Οι ασκήσεις είναι στο πνεύμα των ασκήσεων του σχολικού βιβλίου και ακολουθούμε τους ίδιους συμβολισμούς στα μεγέθη και στην ονοματολογία.

Στο τέλος των σημειώσεων προτείνονται άλυτες ασκήσεις και δίνονται ορισμένες ερωτήσεις θεωρίας για να ελέγξει ο μαθητής τις γνώσεις του.

Στόχος των σημειώσεων είναι η κατανόηση από τους μαθητές της παραγωγής της ψύξης και του τρόπου που χαράσσουμε ένα ψυκτικό κύκλο στο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας. Στοχεύουμε επίσης να δώσουμε στο μαθητή τα εφόδια ώστε να μπορεί να αντιμετωπίσει ασκήσεις πάνω σε αυτό το αντικείμενο που να είναι στο επίπεδο του σχολικού βιβλίου «Εγκαταστάσεις Ψύξης II». Η επίλυση στα παραδείγματα είναι αρκετά λεπτομερής, ώστε και οι πιο αδύνατοι μαθητές να μπορέσουν να παρακολουθήσουν τον τρόπο που επιλύονται τέτοια θέματα. Οι άλυτες ασκήσεις που προτείνονται έχουν συνήθως πολλές ερωτήσεις, για να ασκήσουν το μαθητή σε όλες τις πιθανές ερωτήσεις που θα αντιμετωπίσουν.

Στο προηγούμενο βιβλίο μας με τίτλο «Εγκαταστάσεις Ψύξης, Στοιχεία θεωρίας – Λυμένα παραδείγματα – Ασκήσεις – Ερωτήσεις θεωρίας» έχουν δοθεί περισσότερα στοιχεία για τις εισαγωγικές έννοιες ορισμένων μεγεθών, που χρησιμοποιούνται και στο παρόν σύγγραμμα. Την έκδοση αυτή θα βρείτε ελεύθερα στη διεύθυνση: <http://goo.gl/9i3PW9>. Εκεί θα βρείτε επίσης, αρκετά στοιχεία για τις μονάδες και τους ορισμούς βασικών μεγεθών, όπως η πίεση και η θερμότητα. Αυτός είναι και ο λόγος που ορισμένα σημεία της θεωρίας δεν δόθηκαν εδώ με πολλές λεπτομέρειες.

Πιστεύουμε ότι οι σημειώσεις στο κεφάλαιο του ψυκτικού κύκλου που ακολουθούν θα βοηθήσουν τους μαθητές στην κατανόηση του αντικειμένου αυτού. Ο συγγραφέας θα δεχτεί με χαρά οποιοσδήποτε παρατηρήσεις και υποδείξεις από εκπαιδευτικούς για να βελτιώσει τις σημειώσεις. Με χαρά θα απαντήσει και σε ερωτήσεις μαθητών στο ηλεκτρονικό ταχυδρομείο με διεύθυνση: chonniko@gmail.com.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015.

Περιεχόμενα

	Πρόλογος	5
	Περιεχόμενα	6
Κεφάλαιο 1.	Εισαγωγικές γνώσεις	7
Κεφάλαιο 2.	Παραγωγή ψύξης – Ψυκτικό κύκλωμα	12
Κεφάλαιο 3.	Διάγραμμα Πίεσης-Ενθαλπίας των Ψυκτικών Μέσων	21
3.1.	Τρόπος κατασκευής διαγράμματος P-h	21
3.2.	Καμπύλες και μεγέθη στο διάγραμμα P-h	26
3.3.	Απεικόνιση μεταβολών στο διάγραμμα P-h	31
Κεφάλαιο 4.	Απεικόνιση Ψυκτικού Κύκλου στο διάγραμμα P-h	36
4.1.	Ψυκτικός Κύκλος χωρίς υπερθέρμανση και χωρίς υπόψυξη	36
4.2.	Ψυκτικός Κύκλος με υπερθέρμανση και υπόψυξη	41
Κεφάλαιο 5.	Θερμιδομετρικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά του Ψυκτικού Κύκλου	46
Κεφάλαιο 6.	Παράγοντες που επιδρούν στον Ψυκτικό Κύκλο	52
Κεφάλαιο 7.	Λυμένα παραδείγματα επί του Ψυκτικού Κύκλου	55
Κεφάλαιο 8.	Προτεινόμενες ασκήσεις	63
Κεφάλαιο 9.	Ερωτήσεις θεωρίας	68
	Παράρτημα	69

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγικές γνώσεις

Ο ψυκτικός κύκλος είναι ένας θερμοδυναμικός κύκλος που παριστάνει σε ένα διάγραμμα τις μεταβολές που γίνονται στο ψυκτικό μέσον από τη στιγμή που συμπιέζεται στον συμπιεστή μέχρι να επιστρέψει σε αυτόν, έχοντας καταφέρει να ψύξει τον χώρο που βρίσκεται ο εξαιμιστής. Ταυτόχρονα μας δίνει πληροφορίες για διάφορα θερμοδυναμικά μεγέθη του ψυκτικού μέσου. Για να κατανοήσετε τον ψυκτικό κύκλο θα πρέπει να γνωρίζετε ορισμένα στοιχεία από το μάθημα της Θερμοδυναμικής. Επειδή το νερό είναι ένα υλικό που το γνωρίζετε καλύτερα από άλλα, θα δώσουμε μερικούς ορισμούς με χρήση των μεταβολών του νερού, ώστε να γίνουν πιο εύκολα κατανοητοί. Οι ίδιοι ορισμοί ισχύουν και για τις άλλες ουσίες, όπως είναι τα διάφορα ψυκτικά μέσα. Όσον αφορά στα θέματα του ψυκτικού κύκλου θα επανέλθουμε παρακάτω.

Όταν η θερμοκρασία είναι πολλή χαμηλή το νερό είναι στην στερεά κατάσταση ή όπως λέγεται αλλιώς **στερεά φάση**. Είναι δηλαδή πάγος. Όταν αρχίσουμε και ζεσταίνουμε τον πάγο, η θερμοκρασία του θα αυξάνεται και κάποια στιγμή θα αρχίσει να λιώνει. Θα μετατρέπεται σε υγρό, το γνωστό νερό. Μετά από κάποιο χρόνο, και εφόσον συνεχίζουμε τη θέρμανση, θα έχει μετατραπεί όλο σε υγρό, θα είναι στην **φάση του υγρού**. Αν συνεχίσουμε τη θέρμανση του νερού η θερμοκρασία του θα αυξάνεται και κάποια στιγμή θα αρχίσει να βράζει. Θα μετατρέπεται σε **ατμό**. Μετά από αρκετό χρόνο θα είναι όλο ατμός, θα έχει μεταβεί στην **αέρια φάση**. Αν συνεχιστεί η θέρμανση του ατμού η θερμοκρασία θα αυξάνεται και άλλο.

Στη διαδικασία που περιγράφηκε πριν, έχουμε τους ορισμούς διαφόρων φαινομένων.

1. **Τήξη**: όταν μεταβαίνει το στερεό στην υγρή φάση (με θέρμανση).
2. **Πήξη ή στερεοποίηση**: όταν πηγαίνει το υγρό στη στερεά φάση (με ψύξη).
3. **Βρασμός ή εξάτμιση**: όταν μεταβαίνει το υγρό στην αέρια φάση (με θέρμανση).
4. **Υγροποίηση**: όταν μεταβαίνει το στερεό στην υγρή φάση (με θέρμανση) ή όταν μεταβαίνει το αέριο στην υγρή φάση (με ψύξη). Στη δεύτερη περίπτωση που το αέριο μετατρέπεται σε υγρό με ψύξη η μεταβολή ονομάζεται **συμπύκνωση**.

Επομένως για τη μετατροπή του πάγου σε ατμό, από τη στερεά φάση στην αέρια, έχουμε τις εξής μεταβολές κατά τη θέρμανση, η οποία θεωρούμε ότι γίνεται συνέχεια σε όλη τη διαδικασία (υποθέτουμε ότι η πίεση είναι μία ατμόσφαιρα):

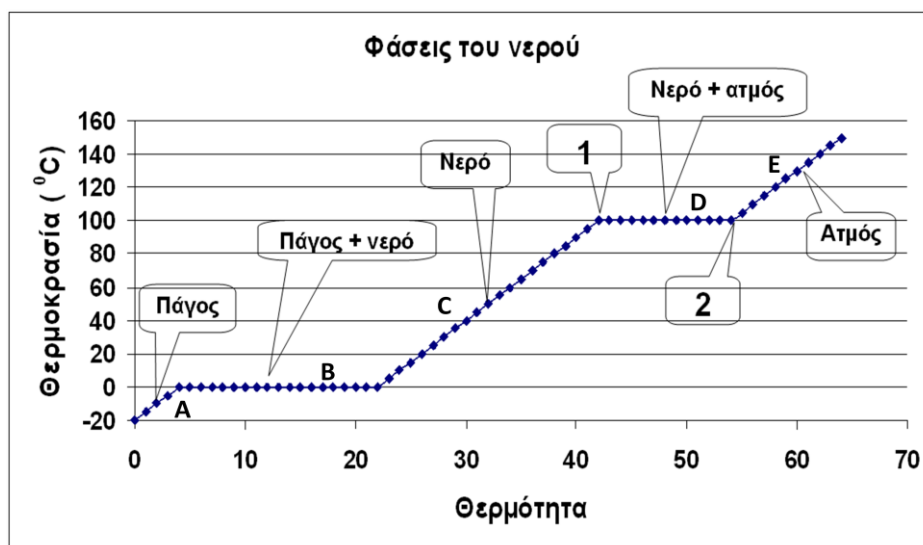
- A. Θέρμανση του πάγου. Άνοδος της θερμοκρασίας του.
- B. Αρχή της υγροποίησης του πάγου στους $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Υγροποίηση με σταθερή θερμοκρασία. Ενώ δηλαδή θερμαίνεται ο πάγος που λιώνει, η θερμοκρασία του δεν μεταβάλλεται. Παραμένει στους $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αυτό συμβαίνει μέχρι να λιώσει όλος ο πάγος.
- C. Μόλις λιώσει όλος ο πάγος και γίνει νερό, αρχίζει και η θερμοκρασία να αυξάνεται. Συνεχίζουμε τη θέρμανση και η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται από την αρχική των $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ μέχρι τους $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τότε αρχίζει ο βρασμός. Στο μάθημά μας ονομάζεται και εξάτμιση.
- D. Κατά τη διάρκεια του βρασμού (ή της εξάτμισης), ενώ το νερό θερμαίνεται, η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στους $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αυτό ισχύει μέχρι να εξατμιστεί όλο το νερό. Μόνο όταν εξατμιστεί όλο το νερό θα αλλάξει η θερμοκρασία.
- E. Όταν εξατμιστεί όλο το νερό και συνεχίσουμε τη θέρμανση, θα αρχίσει η θερμοκρασία να πηγαίνει πάνω από τους $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Θα συνεχίσει να αυξάνεται όσο θερμαίνουμε.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, στις μεταβολές A, C και E η θερμοκρασία του συστήματος μεταβάλλεται ενώ στις B και D, αν και ζεσταίνεται το σύστημα, η θερμοκρασία δεν αλλάζει. Προσέξτε ότι συνέχεια στο σύστημα δίνουμε θερμότητα. Στις τρεις φάσεις που μεταβάλλεται η θερμοκρασία η θερμότητα που δίνουμε ονομάζεται **αισθητή**, ενώ όταν το νερό αλλάζει φάση και η θερμοκρασία δε μεταβάλλεται η θερμότητα ονομάζεται **λανθάνουσα**. Κατά τις αλλαγές φάσεις η λανθάνουσα θερμότητα που δίνουμε γίνεται κινητική ενέργεια των μορίων του νερού, για να αλλάξει φάση. Η αισθητή θερμότητα αυξάνει και αυτή την κινητική ενέργεια των μορίων του νερού αλλά μεταβάλει και τη θερμοκρασία του πάγου, του νερού ή του ατμού. Μπορούμε να πούμε τους ορισμούς:

1. Αισθητή είναι η θερμότητα που δίνουμε σε μία ουσία και η θερμοκρασία της μεταβάλλεται. (Δεν έχουμε αλλαγή φάσης.)
2. Λανθάνουσα είναι η θερμότητα που δίνουμε σε μία ουσία κατά την αλλαγή της φάσης και η θερμοκρασία της δεν μεταβάλλεται.

Έτσι έχουμε τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης όταν γίνεται η τήξη, ή τη λανθάνουσα θερμότητα πήξης όταν γίνεται η πήξη. Αντίστοιχα έχουμε τη λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης (λέγεται και συμπύκνωσης) και ατμοποίησης. Εννοείται ότι κατά την τήξη ή την ατμοποίηση δίνουμε θερμότητα, ενώ κατά την πήξη ή τη συμπύκνωση παίρνουμε.

Ας υποθέσουμε ότι σε ένα δοχείο έχουμε πάγο σε θερμοκρασία -20°C και αρχίζουμε να το θερμαίνουμε δίνοντας χρονικώς σταθερά ποσά θερμότητας. Ο πάγος θα ακολουθήσει τις φάσεις που περιγράφηκαν μόλις πριν. Παρακάτω φαίνεται ένα διάγραμμα με τις μεταβολές που γίνονται. Στον κάθετο άξονα είναι η θερμοκρασία του νερού και στον οριζόντιο η θερμότητα που δίνουμε. Στον οριζόντιο άξονα θα μπορούσε να είναι και ο χρόνος αφού δίνουμε σταθερά ποσά θερμότητας.



Φαίνεται ότι στις φάσεις Α, Γ και Ε η θερμοκρασία αυξάνεται (αισθητή θερμότητα – η γραμμή του διαγράμματος ανέρχεται) ενώ στις φάσεις Β και Δ η θερμοκρασία μένει σταθερή (λανθάνουσα θερμότητα – η γραμμή μένει οριζόντια).

Στο σημείο 1 (σημείο βρασμού και θερμοκρασία βρασμού) αρχίζει η ατμοποίηση του νερού. Εκεί το νερό λέμε ότι είναι στο σημείο **κορεσμένου υγρού**. Αυτό σημαίνει ότι λίγο αν θερμανθεί θα αρχίσει η μετατροπή σε αέριο.

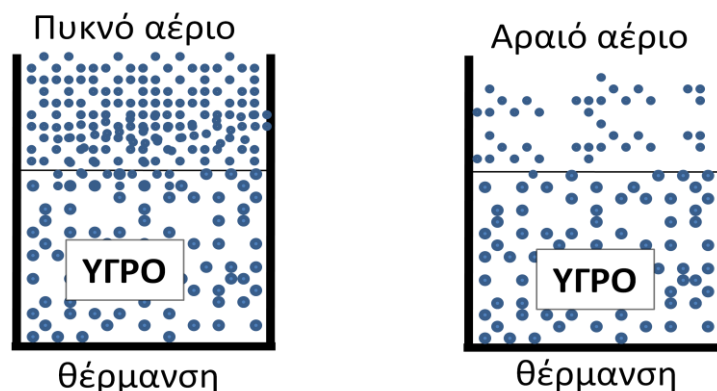
Στο σημείο 2 ο ατμός λέγεται **κορεσμένος**. Αυτό σημαίνει ότι αν τον ψύξουμε λίγο θα αρχίσει η υγροποίηση. Όταν θερμάνουμε τον κορεσμένο ατμό και η θερμοκρασία του υπερβεί τους 100°C τότε λέμε ότι ο ατμός είναι **υπέρθερμος**. Αντίστοιχα όταν το νερό είναι κάτω από τους 100°C λέμε ότι είναι **υπόψυκτο**. **Τελικά όταν θερμάνουμε τον κορεσμένο ατμό, αυτός γίνεται υπέρθερμος. Και όταν ψύξουμε το κορεσμένο νερό αυτό γίνεται υπόψυκτο.**

Σε όλες τις προηγούμενες μεταβολές υποθέσαμε ότι η πίεση ήταν μία ατμόσφαιρα και έμενε σταθερή σε όλη τη διαδικασία. Κάναμε αυτή την υπόθεση, διότι όταν αλλάξει η πίεση τότε αλλάζει και η θερμοκρασία που γίνεται η εξάτμιση και όλες οι αλλαγές φάσης. Συγκεκριμένα, όταν ελαττωθεί η πίεση το νερό βράζει σε χαμηλότερη θερμοκρασία, ενώ βέβαια όταν μεγαλώνει η πίεση τότε αυξάνεται και η θερμοκρασία βρασμού. Αυτός είναι ένας κανόνας που πρέπει οπωσδήποτε να θυμάστε, διότι σε αυτόν στηρίζεται η μετατροπή του ψυκτικού μέσου από υγρό σε αέριο και το αντίστροφο, με αποτέλεσμα να έχουμε την παραγωγή της ψύξης σε ψυγεία και κλιματιστικές εγκαταστάσεις. Πρέπει να γίνει σαφές ότι αν η πίεση που γινόταν το ανωτέρω πείραμα ήταν μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική, τότε θα είχαμε τα ίδια φαινόμενα και μεταβολές φάσεων, αλλά αυτές θα γινόταν σε μεγαλύτερες

θερμοκρασίες. Αντιθέτως, αν η πίεση στην επιφάνεια του νερού ήταν μικρότερη από την ατμοσφαιρική, τότε τα ίδια φαινόμενα θα συνέβαιναν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Θα αναλύσουμε λίγο περισσότερο τον πιο πάνω κανόνα. Αν πάμε να βράσουμε νερό σε ένα πολύ ψηλό βουνό θα διαπιστώσουμε ότι αυτό γίνεται πιο γρήγορα απ' ό,τι στην επιφάνεια της θάλασσας. Όμως, αν τοποθετήσουμε ένα θερμόμετρο στο νερό που βράζει, θα διαπιστώσουμε ότι η θερμοκρασία είναι λιγότερη από 100 °C. Είναι περίπου 81 °C σε υψόμετρο 6000 μέτρων, ενώ αν πάμε ακόμα ψηλότερα η θερμοκρασία βρασμού του νερού θα πέσει ακόμα χαμηλότερα, στους 70 °C στην κορυφή του Έβερεστ με υψόμετρο 8848 μέτρα. Αυτές οι αλλαγές οφείλονται στην χαμηλότερη πίεση του αέρα που έχουμε σε μεγαλύτερα υψόμετρα. (Σε υψόμετρο 6000 μέτρων η πίεση του αέρα είναι περίπου μισή ατμόσφαιρα και στην κορυφή του Έβερεστ κάπου 0,3 ατμόσφαιρες.) Μπορούμε να εξηγήσουμε την αλλαγή στη θερμοκρασία βρασμού του νερού ως εξής: όταν η πίεση είναι μικρή τότε πάνω από την επιφάνεια του νερού υπάρχουν λιγότερα μόρια αέρα και έτσι τα μόρια του νερού δεν χρειάζονται πολλή ενέργεια για να ξεφύγουν από το σώμα του νερού και να γίνουν ατμός, μαζί και μέσα στον αέρα. Υπενθυμίζουμε ότι το νερό (και κάθε υγρό) ξεκινά να βράζει όταν τα μόριά του αποκτήσουν πολλή ενέργεια λόγω της θέρμανσής τους και ξεπηδήσουν πάνω από την επιφάνεια του υγρού. Αν είναι πυκνό το αέριο πάνω από το υγρό, θα δυσκολευτούν να ξεπηδήσουν τα μόρια του υγρού και αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να το θερμάνουμε περισσότερο, άρα θα ανέβει η θερμοκρασία βρασμού. Αν όμως το αέριο είναι αραιό πάνω από το υγρό, τότε θα ξεπηδήσουν πιο εύκολα και η θερμοκρασία βρασμού θα είναι χαμηλότερη.

Στο επόμενο σχήμα έχουμε παραστήσει το υγρό με τα μόριά του και στην επιφάνεια το αέριο, στην αριστερή πλευρά πιο πυκνό από ότι στη δεξιά εικόνα. Είναι λογικό ότι τα μόρια του υγρού θα δυσκολευτούν στην αριστερή εικόνα σε σχέση με τη δεξιά να αναπηδήσουν και να εισέλθουν μέσα στο αέριο. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να αποκτήσουν μεγαλύτερη ενέργεια, άρα να βρεθούν σε υψηλότερη θερμοκρασία. Ο κανόνας που προαναφέραμε περιγράφει το γεγονός αυτό.



Όπως αναφέρθηκε το παράδειγμα με το βράσιμο του νερού σε χαμηλή πίεση στο βουνό προηγουμένως, θα αναφέρουμε ένα αντίστοιχο παράδειγμα από την καθημερινότητά μας, που αντιστοιχεί στο βράσιμο του νερού σε υψηλή πίεση, λίγο πάνω από την ατμοσφαιρική. Όλοι γνωρίζουμε ότι το μαγείρεμα στη χύτρα ταχύτητας γίνεται πιο γρήγορα, απ' ό,τι στην απλή κατσαρόλα. Αυτή η ταχύτητα στο βράσιμο οφείλεται στο ότι αυτό γίνεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία. Η αύξηση της θερμοκρασίας του φαγητού μέσα στο σκεύος επιτυγχάνεται με την αύξηση της πίεσης μέσα σε αυτό. Η εξήγηση είναι η εξής: Όταν αρχίσει να βράζει στην αρχή-αρχή το φαγητό, αυτό γίνεται στην ατμοσφαιρική πίεση, που υπάρχει μέσα στη χύτρα και πάνω από το περιεχόμενο. Όσο βράζει όμως, ο ατμός που παράγεται δεν βγαίνει από τη χύτρα και έτσι αυξάνεται η πίεση μέσα, διότι η βαλβίδα που υπάρχει δεν αφήνει τον ατμό να βγει έξω. Η βαλβίδα θα ανοίξει και θα επιτρέψει στον ατμό να βγει, μόνο όταν η πίεση φτάσει σε ένα προκαθορισμένο όριο, που συνήθως είναι μισή έως μία ατμόσφαιρα πάνω από την ατμοσφαιρική πίεση. Στη μισή ατμόσφαιρα (δηλαδή στις 1,5 ατμόσφαιρες απόλυτη πίεση) το νερό βράζει περίπου στους 112 °C, ενώ στις 2 ατμόσφαιρες απόλυτη πίεση βράζει στους 120 °C.

Επιβεβαιώσαμε λοιπόν τον κανόνα για την εξάρτηση της θερμοκρασίας βρασμού από την πίεση: όσο μεγαλύτερη η πίεση τόσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία βρασμού, όχι μόνο του νερού αλλά και όλων των άλλων υγρών.

Από τη θερμοδυναμική είναι γνωστό ότι υπό την ίδια πίεση, η θερμοκρασία βρασμού μιας ουσίας είναι ίδια με τη θερμοκρασία συμπύκνωσής της. Συμπύκνωση, όπως είπαμε λίγο πιο πάνω, είναι η αντίστροφη διαδικασία του βρασμού (που στο μάθημά μας ονομάζεται και εξάτμιση), δηλαδή η μετατροπή με ψύξη ενός αερίου σε υγρό. Για παράδειγμα αν έχουμε ατμό νερού θερμοκρασίας 150 °C (υπέρθερμος ατμός) σε πίεση μιας ατμόσφαιρας και τον ψύξουμε στους 100 °C τότε θα αρχίσει η υγροποίησή του (ή συμπύκνωση), που είναι και η θερμοκρασία βρασμού του. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στην παραγωγή της ψύξης: **αν θέλουμε να υγροποιήσουμε υπέρθερμο ατμό μπορούμε να μειώσουμε την θερμοκρασία του χωρίς να μεταβληθεί η πίεση.**

Προχωράμε τώρα σε θέματα σχετικά με τα διαγράμματα. Επειδή ο ψυκτικός κύκλος κατασκευάζεται σε ένα διάγραμμα με άξονες την πίεση και την ενθαλπία, θα πρέπει να εξηγήσουμε τις έννοιες αυτών των δύο μεγεθών. Η πίεση είναι περισσότερο γνωστή από την ενθαλπία, γι' αυτό απλά θα υπενθυμίσουμε λίγα στοιχεία γι αυτήν που πρέπει να γνωρίζετε. Πίεση ορίζεται ως το πηλίκο της δύναμης που ασκείται σε μια επιφάνεια προς το εμβαδόν αυτής της επιφάνειας. Η πίεση ενός αερίου που βρίσκεται σε ένα δοχείο είναι η πίεση που ασκούν τα μόρια του αερίου στα τοιχώματα του δοχείου. Η πίεση που ασκείται σε μια επιφάνεια του δοχείου είναι το άθροισμα των δυνάμεων κάθε μορίου χωριστά που ασκεί στο τοίχωμα προς το εμβαδόν του τοιχώματος. Επειδή τα μόρια του αερίου είναι παρά πολλά, κάθε στιγμή θεωρούμε ότι πέφτει στο τοίχωμα ένας σταθερός αριθμός μορίων με την ίδια ταχύτητα (άρα και δύναμη), που ασκούν μια δύναμη στο τοίχωμα, που αν διαιρεθεί με την επιφάνεια θα μας δώσει την πίεση. Για τις μονάδες της πίεσης έχουν ειπωθεί όσα χρειάζονται στο τέλος του δεύτερου κεφαλαίου του βιβλίου μας που αναφέρθηκε στον πρόλογο και βρίσκεται στην διεύθυνση <http://goo.gl/9i3PW9>.

Η ενθαλπία είναι ένα μέγεθος που δείχνει την ποσότητα της ενέργειας που υπάρχει στη μάζα μιας ουσίας, και έχει ως σύμβολο το H . Η μηχανική ενέργεια που οφείλεται στη θέση και στην ταχύτητα της ουσίας ως σύνολο, θεωρούμε ότι δεν υπολογίζεται σε αυτήν, είτε επειδή είναι μικρή (αμελείται) είτε επειδή δε μας ενδιαφέρει. Επομένως η ενθαλπία συνυπολογίζει την ενέργεια που έχουν τα μόρια της ουσίας, που για το σκοπό του μαθήματος η ουσία είναι πάντα σε **ρευστή κατάσταση**, δηλαδή είναι υγρή, αέρια ή μίγμα αυτών των δύο. Τα μόρια λοιπόν της ουσίας έχουν ενέργεια λόγω της ταχύτητας που έχουν και λόγω της πίεσής τους. Η ταχύτητα των μορίων είναι αντίστοιχη της θερμοκρασίας της ουσίας, και παριστάνει την εσωτερική ενέργεια της ουσίας. Αυτή συμβολίζεται με το γράμμα U . Η πίεση της ουσίας συμμετέχει στην ενθαλπία ουσιαστικά μόνο αν η ουσία είναι σε αέρια κατάσταση και όχι σε υγρή. Η ενέργεια λόγω της πίεσης δίνεται από τη σχέση $P \cdot V$ όπου P είναι η τιμή της πίεσης και V ο όγκος που βρίσκεται το αέριο. Τελικά η ενθαλπία δίνεται από τον τύπο:

$$H = U + P \cdot V$$

Η ενθαλπία έχει μονάδες ενέργειας άρα: kJ. Τις ίδιες μονάδες φυσικά έχει και η εσωτερική ενέργεια U καθώς και το γινόμενο $P \cdot V$. Στην πράξη όμως χρησιμοποιούνται οι μονάδες της ενέργειας ανά μονάδα βάρους της ουσίας, δηλαδή: kJ/kg. Τότε ο συμβολισμός του προηγούμενου τύπου αλλάζει ελαφρώς και γίνεται:

$$h = u + P \cdot v$$

Στον τύπο αυτόν έχουμε ακριβώς τα ίδια μεγέθη, μόνο που εκφράζουν τις έννοιες που συμβολίζουν ανά κιλό ουσίας. Σε αυτή την περίπτωση η ενθαλπία λέγεται «ειδική ενθαλπία», η εσωτερική ενέργεια λέγεται «ειδική εσωτερική ενέργεια» και ο όγκος λέγεται «ειδικός όγκος».

Εκείνο που πρέπει να σας μείνει κυρίως από την έννοια της ενθαλπίας είναι ότι παριστάνει το συνολικό ποσό ενέργειας που περιλαμβάνεται στην ποσότητα ενός ρευστού. Αυτό σημαίνει πως αν γνωρίζουμε την ενθαλπία μιας ουσίας σε μια κατάσταση και την ενθαλπία σε μια άλλη κατάσταση της ουσίας, τότε η διαφορά των δύο ενθαλπιών δείχνει την αύξηση ή τη μείωση της ενέργειας στην ουσία κατά τη μεταβολή. Για παράδειγμα, έστω ένα αέριο ότι έχει ειδική ενθαλπία 300 kJ/kg και το συμπιέσουμε και η ενθαλπία του αυξηθεί στα 350 kJ/kg. Αυτές τις τιμές θα μπορούσαμε να τις πάρουμε από πίνακες που υπάρχουν για τα

αέρια, εφόσον γνωρίζουμε τις πιέσεις και θερμοκρασίες των δύο καταστάσεων. Η αύξηση της ενθαλπίας κατά 50 kJ/kg οφείλεται στη συμπίεση και μπορούμε να πούμε ότι το μηχανήμα που συμπιέζει το αέριο (συμπιεστής) προσθέτει ενέργεια ίση με 50 kJ σε κάθε κιλό από αυτό. Από αυτή την τιμή των 50 kJ μπορούμε να κάνουμε υπολογισμό για την ενέργεια που καταναλώθηκε από το μηχανήμα συμπίεσης. Γι' αυτό το θέμα θα μιλήσουμε παρακάτω.

Από τις σχέσεις που δίνουν πιο πάνω την ενθαλπία, φαίνεται ότι σε μια ουσία αν αυξηθεί η θερμοκρασία και η πίεση θα αυξηθεί και η ενθαλπία. Αντιθέτως, αν αυτά μειωθούν η ενθαλπία θα μειωθεί. Στον ψυκτικό κύκλο η ενθαλπία υφίσταται τέτοιες μεταβολές, αφού συνεχώς γίνεται συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον του ψυκτικού και έχουμε μεταβολές στην πίεσή του όταν είναι σε αέρια κατάσταση κυρίως. Θα διακρίνουμε αυτές τις περιπτώσεις όταν έρθει η κατάλληλη στιγμή.

Στον ψυκτικό κύκλο, που θα αναπτύξουμε αργότερα, η ενθαλπία αφενός θα βρίσκεται στο διάγραμμα και θα βοηθά με παραστατικό τρόπο να δούμε τις μεταβολές στο ψυκτικό μέσο, αφετέρου με τις τιμές που θα μας δείχνει το διάγραμμα θα μπορούμε να υπολογίζουμε τις αντίστοιχες ενέργειες που δίνει ή παίρνει το ψυκτικό μέσο στα διάφορα τμήματα του ψυκτικού κυκλώματος. Παραδείγματος χάριν, αν το ψυκτικό υγρό λαμβάνει 200 kJ/kg από τα προϊόντα ενός ψυγείου και εξατμίζεται μέχρι να βγει από το χώρο των προϊόντων, τότε αν γνωρίζουμε την παροχή του ψυκτικού στις σωληνώσεις, θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε την ψυκτική ισχύ του ψυγείου. Θα δούμε τέτοιες ασκήσεις στις επόμενες παραγράφους.

Κεφάλαιο 2. Παραγωγή ψύξης – Ψυκτικό κύκλωμα

Η παραγωγή της ψύξης επιτυγχάνεται γενικώς μόνο με εξάτμιση υγρού (ή με την τήξη στερεού). Πολλές φορές για να γίνουν αυτές οι μεταβολές δεν είναι τόσο εύκολο. Αντιθέτως, η παραγωγή της θέρμανσης είναι μία εύκολη υπόθεση (και πολλές φορές ανεπιθύμητη). Θυμηθείτε ότι πολύ εύκολα τρίβοντας τα χέρια μας τα ζεσταίνουμε, ή ανάβοντας ένα ξύλο ζεσταινόμαστε, ή όταν το ηλεκτρικό ρεύμα διαπερνά μια ηλεκτρική αντίσταση εκείνη θερμαίνεται. Όμως για την ψύξη χρειαζόμαστε ένα πολύπλοκο μηχανισμό όπως είναι το ψυγείο ή το κλιματιστικό. Σε όλα τα μηχανήματα που παράγουν την ψύξη, αυτό επιτυγχάνεται με το να εξατμιστεί ένα υγρό. Και στην καθημερινή ζωή όμως έχουμε ψύξη με την εξάτμιση. Θυμηθείτε ότι αν πέσει στο χέρι σας λίγο οινόπνευμα ή βενζίνη, σχεδόν αμέσως το χέρι σας κρυώνει αφού το υγρό εξατμίζεται. Η βενζίνη εξατμίζεται διότι παίρνει θερμότητα από την επιφάνεια του χεριού σας και τα μόριά της αποκτούν μεγαλύτερη ταχύτητα (κινητική ενέργεια) ώστε να πάνε στην αέρια φάση. Ο λόγος που κρυώνουμε εκείνη την ώρα είναι ότι δίνουμε θερμότητα. Γενικά, όταν δίνει ο οργανισμός μας (ή ένα μέλος του) θερμότητα αισθανόμαστε ότι κρυώνουμε.

Προηγουμένως είδαμε ότι η εξάτμιση ενός υγρού γίνεται με τη θέρμανσή του. Γίνεται όμως και με μείωση της πίεσής του, εφαρμόζοντας δηλαδή τον κανόνα που προαναφέραμε, ότι η μείωση της πίεσης σε ένα υγρό μειώνει και τη θερμοκρασία εξάτμισής του. Για παράδειγμα αν έχουμε νερό σε ένα δοχείο και η θερμοκρασία του είναι 70 °C τότε αν μειώσουμε την πίεση στα 0,3 bar θα δούμε το νερό να βράζει, αρκεί να διατηρήσουμε σε αυτά τα επίπεδα την πίεση.

Θα περιγράψουμε ορισμένα φαινόμενα που ίσως έχουν πέσει στην αντίληψή σας. Αν έτυχε να κάνετε συγκολλήσεις με τη λεγόμενη φιάλη μαπ-γκας (MAPP gas) για αρκετά συνεχόμενα λεπτά, θα προσέξατε ότι η φιάλη έγινε αρκετά κρύα στο κάτω μέρος της. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει αν το γκαζάκι του «καφέ» είναι αναμμένο για πολλή ώρα: το φιαλίδιο γίνεται αρκετά κρύο σε σχέση με την αρχική του θερμοκρασία. Μάλιστα αν πάρετε ένα φιαλίδιο καινούριο και το τρυπήσετε, θα αρχίσει το υγρό να βγαίνει στην ατμόσφαιρα εξατμιζόμενο και θα δείτε πολύ σύντομα να παγώνει η εξωτερική του επιφάνεια.

Θα εξηγήσουμε τώρα που οφείλεται η ψύξη των φιαλών αυτών μέσα στις οποίες βρίσκεται ένα υγρό που εξατμίζεται, και θα το ονομάσουμε καύσιμο. Το υγρό στη φιάλη μαπ-γκας είναι υπό πίεση περίπου 6 έως 10 ατμοσφαιρών. Σε θερμοκρασία δωματίου (περίπου 20 °C) βρίσκεται σε υγρή μορφή, ενώ στην ατμοσφαιρική πίεση και μέχρι τις 6 ατμόσφαιρες περίπου είναι αέριο. Το δοχείο περιέχει μια ποσότητα σε υγρή μορφή και ο χώρος του δοχείου πάνω από το υγρό περιέχει ατμούς του καυσίμου. Ποτέ η φιάλη δεν γεμίζεται πλήρως με υγρό, πάντα μένει και χώρος για λίγο αέριο. Άλλωστε όσο καταναλώνεται το υγρό, τόσο η στάθμη του κατεβαίνει και ο όγκος του αερίου μεγαλώνει. Στη φιάλη το υγρό έχει εξατμιστεί τόσο όσο του επιτρέπεται από την πίεση που ασκεί το εξατμισμένο τμήμα του. Αυτό σημαίνει ότι στη φιάλη το υγρό είναι κορεσμένο καθώς και ο ατμός. Σαν μίγμα όμως βρίσκεται σε κατάσταση βρασμού. Είναι αυτό που λέμε δηλαδή ότι συνυπάρχει υγρό και ατμός και η θερμοκρασία είναι η θερμοκρασία βρασμού του καυσίμου για την πίεση που επικρατεί στο δοχείο.

Όταν από το φλόγιστρο, ή από μία τρύπα της φιάλης, το περιεχόμενό της έρθει σε επαφή με το περιβάλλον, θα αρχίσει το αέριο από το επάνω μέρος να εξέρχεται από τη φιάλη, αφού έξω η πίεση είναι μικρότερη από την πίεση στο εσωτερικό της φιάλης. Αυτό θα έχει σαν συνέπεια να ελαττωθεί η πίεση στο εσωτερικό της φιάλης. Αυτό όμως σημαίνει ότι σε αυτή τη χαμηλότερη πίεση, το καύσιμο βράζει σε μικρότερη θερμοκρασία (μικρή πίεση, μικρότερη θερμοκρασία βρασμού) άρα το υγρό θα αρχίζει να βράζει (να εξατμίζεται) μέσα στη φιάλη. Όμως το υγρό όταν μετατρέπεται σε αέριο πρέπει να απορροφήσει ενέργεια για να την πάρουν τα μόριά του και να κινηθούν πιο γρήγορα. Αυτό ακριβώς γίνεται στο υγρό: τα μόριά του που εξαναγκάζονται να εξατμιστούν, αφού ελαττώθηκε η πίεσή τους, παίρνουν ενέργεια από το περιβάλλον τους. Η ενέργεια αυτή δεν είναι άλλη από θερμότητα, άρα παίρνουν θερμότητα από τα τοιχώματα του δοχείου και επομένως ψύχεται ο χώρος γύρω από τη φιάλη. Κατά την αρχή της εξάτμισης το υγρό απορροφά θερμότητα από το ίδιο, με αποτέλεσμα αρχικά να μειώνεται η θερμοκρασία του ίδιου του υγρού. Όταν ψυχθεί αρκετά θα

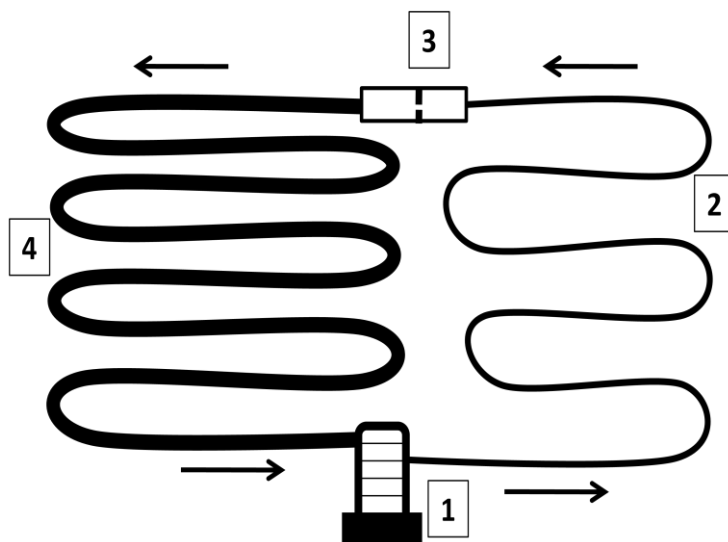
απορροφά τη θερμότητα που χρειάζεται από τα τοιχώματα. Όσο είναι ανοιχτή η τρύπα στη φιάλη, τόσο η πίεση τείνει να μειωθεί και το αποτέλεσμα είναι να εξατμίζεται ακόμα περισσότερο το υγρό, άρα να ψύχει το χώρο γύρω του. Αν κλείσει η τρύπα, τότε η πίεση θα σταθεροποιηθεί και θα σταματήσει και η εξατμηση. Όμως όσο υπάρχει υγρό στη φιάλη και η εξωτερική θερμοκρασία είναι ίδια, τόσο η πίεση στη φιάλη θα είναι ίδια με πριν, όσο υγρό και αν έχει εξατμιστεί. Είναι η πίεση που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, σα να ήταν η θερμοκρασία βρασμού του καυσίμου.

Θα δώσουμε τώρα ένα παράδειγμα με συγκεκριμένες τιμές για να γίνουν πιο κατανοητά τα προηγούμενα. Ας πούμε ότι έχουμε το παλιό ψυκτικό μέσο R22 σε μια φιάλη με θερμοκρασία 20 °C. Τότε το μανόμετρο στη φιάλη θα δείχνει 8,19 Bar (η απόλυτη πίεση θα είναι 9,17 Bar αφού η μανομετρική πίεση είναι 1 ατμόσφαιρα μικρότερη), με την προϋπόθεση ότι υπάρχει στη φιάλη ψυκτικό σε υγρή μορφή. Ας υποθέσουμε ότι η φιάλη ζυγίζει 1000 γραμμάρια. Αν ανοίξουμε για λίγο τη βαλβίδα της φιάλης η φιάλη θα ψυχθεί και μια ποσότητα του ψυκτικού θα φύγει στην ατμόσφαιρα. Κλείνουμε τη βαλβίδα και αφήνουμε αρκετή ώρα τη φιάλη να αποκτήσει ξανά τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος των 20 °C. Τώρα η φιάλη θα ζυγίζει λιγότερο, ας πούμε 800 γραμμάρια, αλλά το μανόμετρο θα δείχνει πάλι 8,19 Bar. Ας πάρουμε τώρα τη φιάλη και ας πάμε έξω που κάνει κρύο και η θερμοκρασία είναι +6 °C. Την αφήνουμε να πάρει την θερμοκρασία περιβάλλοντος και κοιτάμε το μανόμετρο. Δείχνει 5,08 Bar, δηλαδή η απόλυτη πίεση θα είναι 6,06 Bar. Η πίεση στη φιάλη μειώθηκε διότι η φιάλη ψύχθηκε και αφενός ελαττώθηκε η πυκνότητα του αερίου (θα μπορούσαμε να πούμε και ο όγκος του αερίου), αφετέρου ένα μέρος του υγροποιήθηκε. Αν ανοίξουμε τώρα τη βαλβίδα θα έχουμε τα ίδια αντιστοίχως αποτελέσματα (διαδικασίες και μεταβολές) με πριν, που η θερμοκρασία ήταν μεγαλύτερη.

Ας βάλουμε τώρα τη φιάλη σε ένα μεγάλο καταψύκτη που η θερμοκρασία είναι -50 °C. Το μανόμετρο τώρα θα δείχνει πίεση κάτω από το μηδέν, η απόλυτη θα είναι 0,65 Bar. Αν ανοίξουμε πάλι τη βαλβίδα θα διαπιστώσουμε ότι δε συμβαίνει καμιά εξατμηση του ψυκτικού. Θα μπει μάλλον λίγος αέρας από τη βαλβίδα και η πίεση του μανομέτρου θα δείχνει μηδέν. Γιατί συμβαίνει αυτό; Διότι στην ατμοσφαιρική πίεση το R22 θα βράσει μόνο αν η θερμοκρασία είναι πάνω από -41 °C. Όπως το νερό στην επιφάνεια της θάλασσας για να βράσει πρέπει η θερμοκρασία να είναι πάνω από 100 °C. Αλλιώς παραμένει στην υγρή κατάσταση.

Από τις προηγούμενες παραγράφους το βασικό που πρέπει να θυμάστε για να προχωρήσουμε είναι το εξής: έστω ένα υγρό που βρίσκεται μέσα σε δοχείο με μια θερμοκρασία Θ και πίεση P , όπου το P είναι εκείνο που το υγρό βράζει σε θερμοκρασία Θ . **Αν βρεθεί σε χώρο με πίεση μικρότερη από την P , τότε το υγρό θα αρχίσει να βράζει και θα ψύχει το χώρο γύρω του. Μάλιστα η θερμοκρασία μέχρι την οποία μπορεί να ψύξει το χώρο είναι εκείνη που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία βρασμού του στη πίεση P .**

Θα δούμε τώρα πως όλα αυτά που αναφέρθηκαν εφαρμόζονται στην παραγωγή της ψύξης. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται διάφορα τμήματα που είναι απαραίτητα για να έχουμε παραγωγή ψύξης, με χρήση ενός συνηθισμένου ψυκτικού μέσου. Όταν λέμε ψυκτικό μέσον θα γνωρίζετε ότι είναι μια ουσία (χημική ένωση ή μίγμα ενώσεων) που έχει θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά κατάλληλα για να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ψύξης. Για παράδειγμα, έχει χαμηλή θερμοκρασία βρασμού, κλπ. Ο τρόπος που θα περιγράψουμε ονομάζεται ψύξη με συμπίεση ατμών. Στο σχήμα φαίνονται τα βασικά μέρη ενός ψυγείου ή ενός κλιματιστικού μηχανήματος. Αν καταλάβετε πως λειτουργούν θα κατανοήσετε την παραγωγή της ψύξης. Τα τμήματα που φαίνονται στο σχήμα περιλαμβάνουν ένα μηχανήμα, το συμπιεστή με αριθμό 1, ένα μικρό όργανο με μια μικρή τρύπα το 3 και τα υπόλοιπα δύο τμήματα (τα 2 και 4) είναι απλές σωληνώσεις από χαλκό σε σχήμα εναλλακτών θερμότητας. Εναλλάκτης είναι ένα σύστημα σωληνώσεων μέσα στο οποίο κυκλοφορεί ένα ρευστό και συναλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον. Εναλλάκτης είναι το καλοριφέρ μέσα στο οποίο κυκλοφορεί νερό, όπως εναλλάκτης είναι και το μπόιλερ που ζεστό νερό μέσα σε μια σπειροειδή σωλήνα ζεσταίνει άλλο νερό που βρίσκεται στο εσωτερικό του μπόιλερ.



Τα μέρη που βλέπετε στο σχήμα αποτελούν ένα απλό ψυκτικό κύκλωμα. Στα τέσσερα τμήματά του κυκλοφορεί εσωτερικά το ψυκτικό μέσο, το οποίο είναι ένα ρευστό που έχει διάφορες ιδιότητες, με πιο ενδιαφέρουσα αυτή τη στιγμή για μας, ότι η θερμοκρασία που βράζει (και αντιστοίχως συμπυκνώνεται) σε σχέση με το νερό είναι πολύ πιο χαμηλή, για τις ίδιες πιέσεις.

Στον επόμενο πίνακα βλέπουμε για ένα τυπικό ψυκτικό μέσο και για το νερό τις θερμοκρασίες βρασμού υπό διάφορες πιέσεις. Μπορείτε να παρατηρήσετε τις διαφορές. Οι πιέσεις που αναγράφονται στην πρώτη γραμμή είναι εκείνες που συνήθως εφαρμόζονται στις εγκαταστάσεις ψύξης, άρα για το ψυκτικό αυτό οι θερμοκρασίες βρασμού είναι κατάλληλες για παραγωγή ψύξης, εφόσον βέβαια καταφέρουμε να επιτύχουμε τις αντίστοιχες πιέσεις. Να προσέξετε ότι για μια πίεση του πίνακα αν η θερμοκρασία, είτε του νερού είτε του ψυκτικού, είναι μικρότερη από εκείνη του πίνακα τότε η ουσία είναι σε υγρή μορφή και αν είναι μεγαλύτερη τότε είναι σε αέρια μορφή. Για παράδειγμα, αν η πίεση είναι 3 bar και η θερμοκρασία μιας ποσότητας νερού είναι κάτω από τους 134 °C τότε το νερό είναι σε υγρή μορφή και αν είναι πάνω από αυτή τη θερμοκρασία τότε έχει γίνει υδρατμός. Για δε το ψυκτικό, αν η θερμοκρασία είναι μικρότερη από τους -15 °C το ψυκτικό είναι υγρό και αν είναι μεγαλύτερη τότε είναι αέριο.

ΠΙΕΣΗ (bar)	0,5	1	2	3	5	8	10	15
ΝΕΡΟ (°C)	81	100	120	134	152	170	180	199
ΨΥΚΤΙΚΟ (°C)	-55	-40	-25	-15	0	12	22	40

Ο συμπιεστής με αριθμό 1 στο σχήμα είναι ένα μηχανήμα σαν το γνωστό κομπρεσέρ που συμπιέζει τον αέρα, π.χ. στο λάστιχο του αυτοκινήτου. Σε αυτόν πηγαίνει από αριστερά ο σωλήνας 4, από τον οποίο ο συμπιεστής αναρροφά το αέριο που ο σωλήνας περιέχει. Πολύ σύντομα θα δούμε πως βρέθηκε εκεί αυτό το αέριο. Θα θυμόμαστε οπωσδήποτε ότι στον συμπιεστή πρέπει να πηγαίνει πάντα το ψυκτικό σε αέρια φάση και ποτέ σε υγρή.

Θα κάνουμε εδώ μια παρένθεση για να αναφέρουμε ότι το ψυκτικό που κυκλοφορεί στις σωληνώσεις του σχήματος, αλλού είναι σε υγρή μορφή και αλλού σε αέρια και η ποσότητά του είναι σταθερή. Όταν βάλουμε στο κύκλωμα των σωληνώσεων μια ποσότητα, αυτή δεν αλλάζει, εκτός αν έχουμε διαρροή, κάτι που είναι ανεπιθύμητο. Δηλαδή, αν βάλουμε μισό κιλό ψυκτικό, αυτή η ποσότητα θα πηγαίνει διαρκώς στο σύστημα του σχήματος και καμία άλλη. Έτσι εργάζονται τα ψυγεία και τα κλιματιστικά.

Το ψυκτικό αέριο αφού συμπιεστεί στο συμπιεστή, θα βγει από το σωλήνα στη δεξιά πλευρά και θα πάει στη σωληνώση με αριθμό 2 του σχήματος. Εκεί πηγαίνει με μεγάλη

θερμοκρασία διότι με τη συμπίεση η θερμοκρασία των αερίων μεγαλώνει πολύ. Αυτός είναι ένας νόμος της θερμοδυναμικής: όταν συμπιέζεται ένα αέριο αυξάνεται εκτός από την πίεσή του και η θερμοκρασία του. Η εξήγηση γι αυτό είναι ότι αναγκάζονται τα μόρια του αερίου να κινηθούν πιο γρήγορα, παίρνοντας την ενέργεια από τη συμπίεση, και αυτό σημαίνει ότι μεγαλώνει η θερμοκρασία.

Η σωλήνωση 2 είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας που ονομάζεται συμπυκνωτής. Στο συμπυκνωτή το ψυκτικό πηγαίνει, όπως είπαμε, σε αέρια μορφή με μεγάλη θερμοκρασία και πίεση και εδώ είναι που πρέπει να μετατραπεί σε υγρό. Αυτό θα γίνει με ψύξη του συμπυκνωτή. Εφαρμόζουμε δηλαδή εκείνο που λέγαμε πιο πριν: για να υγροποιηθεί ένα αέριο θα πρέπει να μειώσουμε ή τη θερμοκρασία του ή να αυξήσουμε την πίεσή του. Εδώ το αέριο εισέρχεται με μεγάλη πίεση και θα πρέπει να μειωθεί η θερμοκρασία του για να υγροποιηθεί. Για να γίνει όλη αυτή η διαδικασία θα πρέπει η πίεση να παραμένει υψηλή, όπως τη δημιουργεί ο συμπιεστής. Για να το πετύχουμε αυτό, στο τέλος της σωλήνωσης του συμπυκνωτή βάζουμε ένα όργανο, με αριθμό 3 στο σχήμα, που ουσιαστικά να φανταστείτε ότι έχει μια μικρή τρυπούλα που αφήνει ελάχιστο ψυκτικό να προχωρεί. Άρα το περισσότερο ψυκτικό εγκλωβίζεται στο συμπυκνωτή με αποτέλεσμα να μεγαλώνει η πίεσή του. Στην ουσία μένει συνέχεια ψηλή.

Σε υψηλή πίεση, όπως γνωρίζουμε, είναι πιο εύκολο να υγροποιηθεί ένα ψυκτικό αέριο, αφού η θερμοκρασία πρέπει να κατέβει σε επίπεδα συνηθισμένων θερμοκρασιών. Ας ρίξουμε μια ματιά στον πίνακα που προηγήθηκε: αν η πίεση είναι 15 bar η θερμοκρασία που το αέριο θα υγροποιηθεί είναι 40 °C, ενώ αν η πίεση είναι 2 bar η θερμοκρασία που πρέπει να πάει το αέριο για να υγροποιηθεί είναι -25 °C, που είναι πολύ χαμηλή και αν την είχαμε δεν θα χρειαζόταν το ψυγείο. Το αέριο ψυκτικό στην έξοδο του συμπυκνωτή θα έχει θερμοκρασία της τάξης των 60 °C και αν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι γύρω στους 30 °C, είναι εύκολο να μειωθεί στους 40 °C η θερμοκρασία του ψυκτικού με τον αέρα του περιβάλλοντος. Αυτά περίπου γίνονται στο συμπυκνωτή στα ψυγεία και στα κλιματιστικά. Εννοείται ότι, για να πετύχουμε τη συμπύκνωση του ψυκτικού στο συμπυκνωτή πρέπει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος να είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, ώστε να μπορέσουμε να «ρίξουμε» όσο χρειάζεται τη θερμοκρασία του ψυκτικού.

Στα οικιακά ψυγεία συνήθως έχουμε ένα συμπυκνωτή που ουσιαστικά είναι ένας μακρύς λεπτός σωλήνας μέσα στον οποίο προχωρά το ψυκτικό. Μέχρι να φτάσει στο τέλος του έχει ψυχθεί αρκετά, από τον αέρα του περιβάλλοντος, ώστε να έχει μετατραπεί σε υγρό. Και σημειώστε ότι όλο αυτό γίνεται στην ίδια σχεδόν με την αρχική υψηλή πίεση. Στα κλιματιστικά ο συμπυκνωτής είναι συμπαγούς μορφής και ψύχεται με τον αέρα του περιβάλλοντος με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα και αυτό τον κάνει να ψύχεται πιο γρήγορα. Υπάρχουν και άλλων ειδών συμπυκνωτές, ανάλογα με το σκοπό και τις ιδέες του κατασκευαστή.

Για το όργανο με αριθμό 3 είπαμε ότι είναι σαν μία μικρή τρύπα που περιορίζει το ψυκτικό στο συμπυκνωτή, ώστε η πίεση σε αυτόν να μένει υψηλή. Αυτό όμως έχει σαν συνέπεια η πίεση στην επόμενη σωλήνωση με αριθμό 4 να μένει σχετικά χαμηλή. Εκεί είναι ο εξατμιστής ή ατμοποιητής, όπου γίνεται η εξάτμιση και η παραγωγή της ψύξης. Το όργανο 3 ονομάζεται εκτονωτικό μέσο, διότι εκτονώνει το ψυκτικό, δηλαδή του μειώνει την πίεση και αυτός είναι ο σκοπός του. Βέβαια, αν και θα μπορούσε, δεν είναι μια απλή τρύπα αλλά μπορεί να είναι από ένα απλό σωληνάκι μέχρι ένα σύνθετο όργανο. Πάντως ο σκοπός είναι ο ίδιος: η μείωση της πίεσης του ψυκτικού, καθώς θα περάσει από αυτό.

Το πιο απλό εκτονωτικό μέσο είναι ένας τριχοειδής σωλήνας, ένας σωλήνας με εσωτερική διάμετρο λίγο πάνω, λίγο κάτω από ένα χιλιοστό. Όπως περνά από μέσα το ψυκτικό λόγω των τριβών μειώνεται συνεχώς η πίεσή του. Γι αυτό είναι πολύ λεπτός: για να έχει το ψυκτικό πολλές τριβές. Στα οικιακά ψυγεία, που χρησιμοποιείται ο τριχοειδής σωλήνας, έχει μήκος αρκετά μέτρα για να πετύχει την επιθυμητή μείωση της πίεσης. Στα επαγγελματικά ψυγεία συχνά είναι όντως μια τρύπα. Όμως όλο το όργανο είναι έτσι κατασκευασμένο ώστε να μπορεί το μέγεθος της τρύπας να αυξομειώνεται ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του ψυγείου.

Ο εξατμιστής είναι ο τελικός αποδέκτης του ψυκτικού και εκεί θα πάρουμε το ψυκτικό αποτέλεσμα για το οποίο γίνονται όλα αυτά. Μόλις το ψυκτικό υγρό μπει σε αυτόν θα νιώσει τη χαμηλή πίεση και αμέσως θα αρχίσει να εξατμίζεται, όπως ήδη γνωρίζουμε σε τέτοιες

περιπτώσεις. Η εξάτμισή του είναι κάτι αναγκαστικό διότι η πίεση είναι πολύ χαμηλή. Φυσικά σημασία έχει και η θερμοκρασία του χώρου έξω από τη σωλήνωση, η οποία πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία βρασμού του ψυκτικού στην πίεση που έχει εσωτερικά ο εξατμιστής.

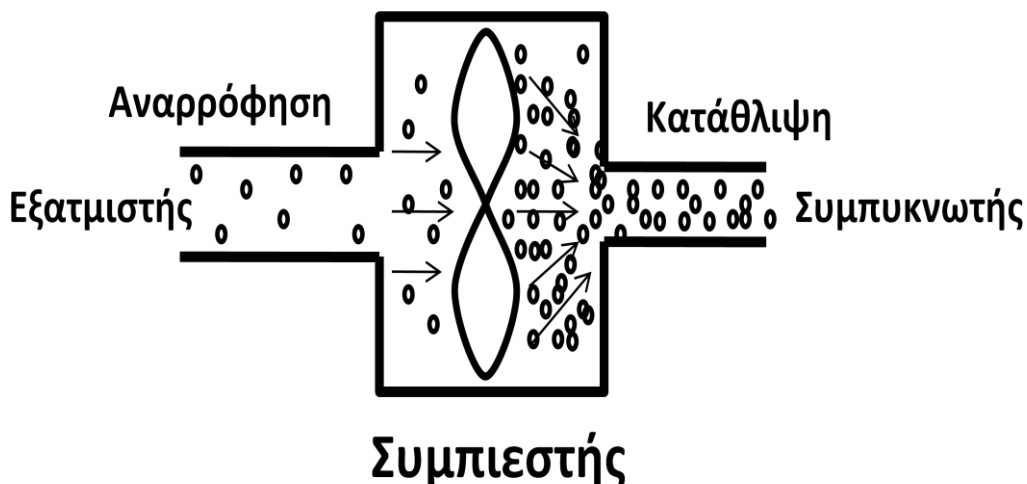
Όλη η διαδικασία του ψυκτικού κύκλου γίνεται για να φτάσει το ψυκτικό μέσο σε υγρή μορφή στον εξατμιστή, ώστε να μπορέσει να μετατραπεί σε αέριο με την εξάτμιση και έτσι να απορροφήσει τη θερμότητα του χώρου ή των προϊόντων του ψυγείου. Όταν έχει γίνει αέριο, μετά τον εξατμιστή, πρέπει πάλι να ξαναγίνει υγρό ώστε να ξανάρθει στον εξατμιστή και να κάνει την ίδια μετατροπή σε αέριο. Φεύγοντας από τον εξατμιστή το αέριο πρέπει να οδηγηθεί στα υπόλοιπα εξαρτήματα ώστε να μετατραπεί σε υγρό. Αυτός είναι ο στόχος. Αν το ψυκτικό ήταν κάτι φθινό και αβλαβές θα το βάζαμε με σωλήνες στα ψυγεία και στα κλιματιστικά και ας έφευγε στην ατμόσφαιρα μετά την εξάτμιση. Έτσι κάνουμε με το νερό, που είναι σχετικά φθινό. Το βάζουμε στις γλάστρες και δεν έχουμε κάνει ένα σύστημα που να το μαζεύει και να το ξαναχρησιμοποιούμε.

Προσέξτε ότι, όπως είπαμε νωρίτερα, συμπιέζουμε το ψυκτικό για να μπορέσουμε σε υψηλή πίεση να το υγροποιήσουμε ξανά πιο εύκολα.

Να εξηγήσουμε όμως λίγο περισσότερο πως ο εξατμιστής καταφέρει να έχει χαμηλή πίεση. Οφείλεται στο ότι ο συμπιεστής τραβά συνεχώς το παραγόμενο από αυτόν αέριο. Βεβαίως, και το εκτονωτικό μέσο παίζει το ρόλο του, όμως αν δεν αφαιρούσε και ο συμπιεστής συνεχώς αέριο, θα γέμιζε ο εξατμιστής ψυκτικό και πλέον η πίεση θα αυξανόταν. Όλοι οι συμπιεστές είναι έτσι κατασκευασμένοι που λειτουργούν έτσι ώστε το αέριο που συμπιέζουν, από κάπου θα πρέπει να το αναρροφούν. Η αναρρόφηση στις ψυκτικές διατάξεις γίνεται από τον εξατμιστή. Με το επόμενο απλό σχήμα μπορούμε να καταλάβουμε τι συμβαίνει. Παρατηρούμε τα αραιά μόρια του εξατμιστή και πως πυκνώνουν στον συμπυκνωτή.

Ο συμπιεστής επομένως έχει δυο σωλήνες συνδεδεμένους σε αυτόν: ο ένας φέρνει το ψυκτικό από τον εξατμιστή και ονομάζεται **αναρρόφηση** και ο άλλος προωθεί το ψυκτικό στον συμπυκνωτή και ονομάζεται **κατάθλιψη**. Ο σωλήνας της αναρρόφησης έχει μεγαλύτερη διάμετρο από εκείνον της κατάθλιψης.

Οφείλουμε να σημειώσουμε κάτι που δεν είναι πάντα αντιληπτό σε πολλούς μαθητές: η ποσότητα του ψυκτικού που ρέει στους σωλήνες των δύο προηγούμενων σχημάτων είναι σταθερή και ίδια σε όλα τα σημεία. Αν δηλαδή από ένα σημείο του συμπυκνωτή περνούν 50 γραμμάρια ψυκτικού κάθε λεπτό, η ίδια ποσότητα περνά και από κάθε σημείο του εξατμιστή, και μέσα από το εκτονωτικό μέσο και από το συμπιεστή. Αυτός είναι «ο νόμος της συνέχειας» στα ρευστά. Όταν ένα σύστημα είναι κλειστό (δεν αλλάζει η ποσότητα του ρευστού που κυκλοφορεί σε αυτό) από κάθε διατομή του συστήματος περνά ίδια ποσότητα ρευστού. Αν από ένα σημείο περνούσε λιγότερο ψυκτικό, τότε το ρευστό θα μαζευόταν σιγά-σιγά όλο πριν από αυτό το σημείο.



Αφού κατανοήσαμε τις μεταβολές που γίνονται σε ένα κύκλωμα που παράγει ψύξη και γνωρίσαμε τα βασικά εξαρτήματά του, ας δούμε ένα αναλυτικό παράδειγμα με ένα τυπικό ψυκτικό μέσο. Οι τιμές των πιέσεων και των θερμοκρασιών, που αναγράφονται στο επόμενο σχήμα με το ψυκτικό κύκλωμα, είναι αντιπροσωπευτικές ενός ψυγείου και δίνονται για να γίνουν περισσότερο κατανοητές οι διεργασίες στο κύκλωμα. Υποθέτουμε ότι δεν υπάρχουν τριβές στο κύκλωμα.

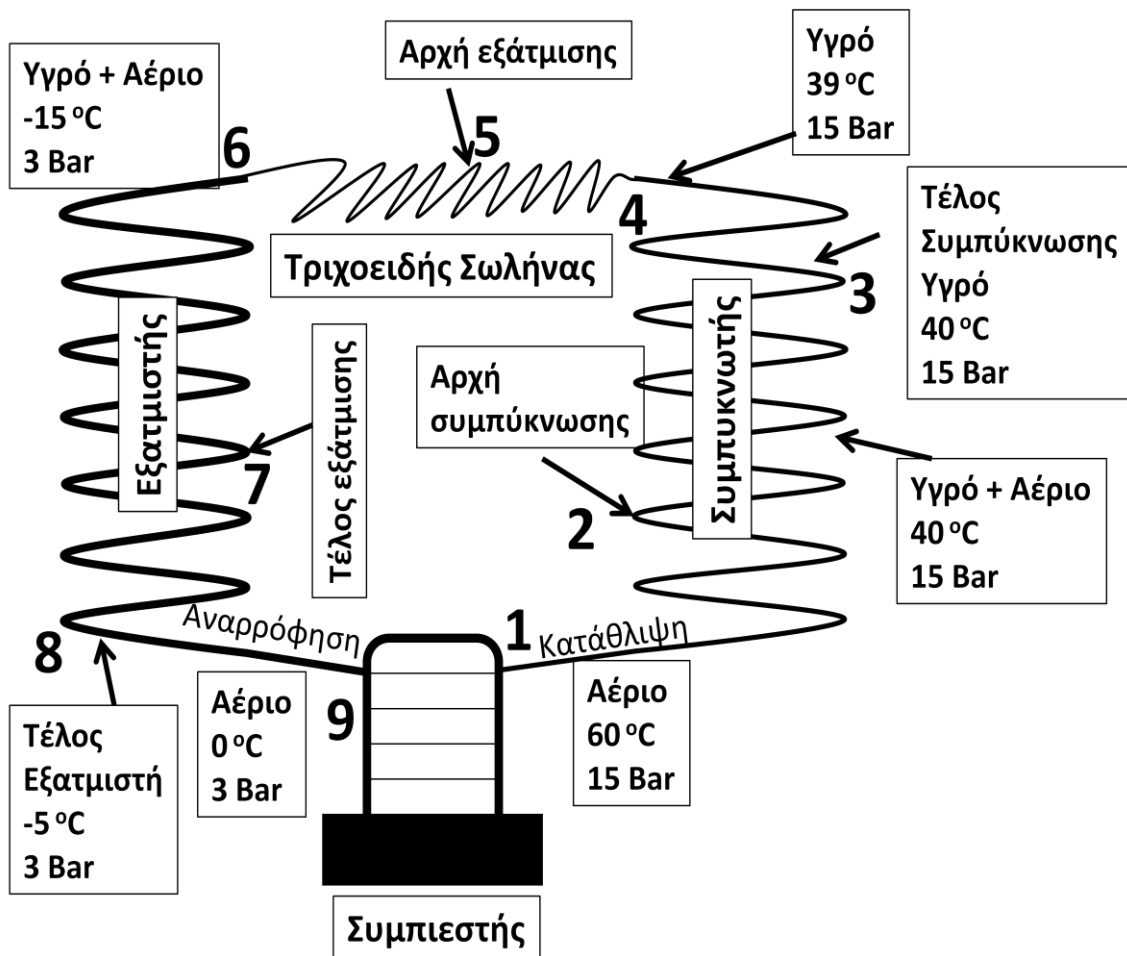
Το σημείο 1 είναι η κατάθλιψη του συμπιεστή, δηλαδή ο σωλήνας μέσα στον οποίο εισέρχεται το συμπιεσμένο **αέριο** που πλέον έχει υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Η θερμοκρασία του είναι **60 °C** και η πίεση **15 bar**. Επειδή στο συμπιεστή με τη συμπίεση έχουμε αύξηση θερμοκρασίας και πίεσης θα έχουμε και αύξηση της ενθαλπίας του ψυκτικού. Υπενθυμίζουμε ότι η ενθαλπία μεγαλώνει με την αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης. Από την κατάθλιψη μπαίνει στον συμπυκνωτή. Ουσιαστικά η κατάθλιψη είναι η αρχή του συμπυκνωτή. Αν υποθέσουμε ότι ο συμπυκνωτής βρίσκεται σε ένα χώρο με θερμοκρασία 25 °C, τότε όσο το αέριο προχωρά μέσα στο συμπυκνωτή, ψύχεται από το περιβάλλον και η θερμοκρασία του μειώνεται μέχρι να φτάσει τους 40 °C. Δηλαδή από το 1 ως το 2 έχουμε ψύξη του αερίου. Η τιμή των 40 °C είναι η θερμοκρασία βρασμού που αντιστοιχεί στο ψυκτικό του ψυγείου για την πίεση των 15 bar. Πρέπει να φτάσει το ψυκτικό στους 40 °C για να αρχίσει να μετατρέπεται από αέριο σε υγρό. Στο σημείο 2 του σχήματος είναι που το ψυκτικό αέριο μόλις έχει φτάσει στους 40 °C και αρχίζει η υγροποίησή του, εφόσον συνεχίζεται η ψύξη του.

Η υγροποίηση συνεχίζεται σχεδόν σε όλο το μήκος του συμπυκνωτή, μέχρι το σημείο 3, που έχει ολοκληρωθεί η συμπύκνωση. Δηλαδή, όλο το αέριο έχει μετατραπεί σε υγρό. Από εκεί και μετά, μέχρι τον τριχοειδή σωλήνα, όλο το ρευστό είναι σε υγρή μορφή. Στην σωλήνωση του συμπυκνωτή από το 2 ως το 3, έχουμε ψύξη του συμπυκνωτή, αλλά η **θερμοκρασία μένει σταθερή** γιατί το ψυκτικό αλλάζει φάση. Άρα η θερμότητα που συναλλάσσεται με το περιβάλλον είναι λανθάνουσα θερμότητα. Επομένως από το 2 ως το 3 συνυπάρχει η υγρή και η αέρια φάση του ψυκτικού. Μετά από το σημείο 3, που έχει ολοκληρωθεί η υγροποίηση, το υγρό είναι υπόψυκτο, μέχρι να αρχίσει η εξάτμισή του, που θα γίνει μέσα στον τριχοειδή σωλήνα. Όταν φτάσει στον τριχοειδή σωλήνα η θερμοκρασία του υγρού έχει μειωθεί λίγο μέχρι τους 39 °C στο σημείο με αριθμό 4. Από το 3 ως το 4 έχουμε τη λεγόμενη υπόψυξη. Η υπόψυξη είναι επιθυμητή γιατί μας εξασφαλίζει ότι στο εκτονωτικό μέσο το ψυκτικό θα φτάσει σε υγρή κατάσταση.

Σε όλη την πορεία του ψυκτικού στο συμπυκνωτή, επειδή έχουμε ψύξη, η ενθαλπία του μειώνεται συνεχώς.

Στο σημείο 4 μπαίνει το υγρό στον τριχοειδή, όπου λόγω της μικρής του διατομής δημιουργούνται πολλές τριβές, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλη πτώση πίεσης. Βλέπουμε στο σχήμα ότι στον τριχοειδή εισέρχεται με πίεση 15 bar, την πίεση δηλαδή που επικρατεί στον συμπυκνωτή. Αμέσως αρχίζει να μειώνεται η πίεση του ψυκτικού υγρού λόγω των τριβών. Η πτώση της πίεσης εκτός από εκτόνωση ονομάζεται και στραγγαλισμός, γι αυτό και το εκτονωτικό μέσο ονομάζεται επίσης και στραγγαλιστής. Η πτώση της πίεσης στο υγρό το φέρνει σε συνθήκες εξάτμισης, αφού έχουμε πει ότι με την ελάττωση της πίεσης μπορούμε να εξατμίσουμε ένα υγρό. Έτσι λοιπόν το υγρό αρχίζει αν εξατμίζεται, απορροφώντας θερμότητα από τον ίδιο τον εαυτό του, με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία του. Άρα ταυτόχρονα με την πτώση της πίεσης στον στραγγαλιστή έχουμε και μείωση της θερμοκρασίας του ψυκτικού.

Επομένως η πτώση της πίεσης έχει σαν αποτέλεσμα να αρχίσει η εξάτμιση του υγρού αρκετά πριν φτάσει στην έξοδο του τριχοειδούς σωλήνα. Ας κοιτάξουμε τον πίνακα με τις πιέσεις και τις θερμοκρασίες λίγες σελίδες πριν. Αν η πίεση του ψυκτικού στον τριχοειδή μειωθεί από τα 15 bar στα 10 bar τότε η θερμοκρασία εξάτμισης θα φτάσει στους 22 °C και θα αρχίσει να εξατμίζεται. Αν η πίεση είναι μεγαλύτερη από τα 10 bar, 12 bar για παράδειγμα, τότε η εξάτμιση δεν θα αρχίσει στους 22 °C αλλά νωρίτερα σε μεγαλύτερη θερμοκρασία. Ίσως πάλι η εξάτμιση αρχίσει όταν η πίεση φτάσει στα 5 bar και η θερμοκρασία έχει μειωθεί στους 0 °C.



Ας πούμε ότι η εξάτμιση θα αρχίσει στο σημείο με αριθμό 5. Από εκεί και μετά θα έχουμε συνύπαρξη της υγρής και της αέριας φάσης του ψυκτικού. Δηλαδή από το 5 μέχρι το 6 (αλλά και μέχρι το 7, όπως θα δούμε σε λίγο) θα έχουμε αλλαγή φάσης, εξάτμιση. Να προσέξουμε ότι παρά το ότι γίνεται εξάτμιση και παρά την αλλαγή φάσης που συμβαίνει, η θερμοκρασία μειώνεται συνεχώς γιατί μειώνεται και η πίεση μέχρι το σημείο 6. Η ενθαλπία κατά την εκτόνωση θεωρείται ότι μένει σταθερή. Χωρίς να το εξηγήσουμε περισσότερο θα αναφέρουμε ότι αυτό γίνεται γιατί ο στραγγαλισμός θεωρείται αδιαβατική μεταβολή και γι αυτό θα είναι και ισενθαλπική.

Συνοψίζοντας, στον τριχοειδή σωλήνα έχουμε μείωση της πίεσης, μείωση της θερμοκρασίας και η ενθαλπία μένει σταθερή. Το ψυκτικό μπαίνει σε μεγάλη θερμοκρασία και πίεση και εξέρχεται με χαμηλές τιμές και στα δύο αυτά μεγέθη.

Στο σημείο υπ' αριθμόν 6, αμέσως μετά το τέλος του εκτονωτικού μέσου, αρχίζει ο εξατμιστής, το μέρος όπου παίρνουμε την επιθυμητή ψύξη. Όπως είπαμε έχει αρχίσει ήδη η εξάτμιση και στον εξατμιστή μπαίνει μίγμα υγρού και αερίου. Ασφαλώς η εξάτμιση συνεχίζεται στην σωλήνωση που αποτελεί τον εξατμιστή. Το ψυκτικό εδώ παίρνει τα θερμικά φορτία των προϊόντων του ψυγείου, και γενικότερα του χώρου στον οποίο βρίσκεται, και έτσι γίνεται η εξάτμισή του. Στον εξατμιστή η πίεση παραμένει σταθερή (θεωρούμε ότι δεν έχουμε μεγάλες τριβές όπως πριν στον τριχοειδή σωλήνα), άρα, αφού έχουμε αλλαγή φάσης, η θερμοκρασία επίσης δεν αλλάζει και είναι η θερμοκρασία εξάτμισης (βρασμού) που αντιστοιχεί στην πίεση του εξατμιστή. Επαναλαμβάνουμε ότι η πίεση διατηρείται χαμηλή διότι ταυτόχρονα με τη χρήση του εκτονωτικού μέσου η αναρρόφηση του συμπιεστή δεν αφήνει να συσσωρευτεί πολύ ψυκτικό στη σωλήνωση του εξατμιστή.

Όσο περισσότερα ζεστά προϊόντα υπάρχουν στο χώρο εξωτερικά από τον εξατμιστή (στο ψυγείο), τόσο πιο γρήγορα θα τελειώσει η εξάτμιση του υγρού, αφού θα ζεσταθεί πιο γρήγορα. Στο σχήμα το σημείο αυτό συμβολίζεται με τον αριθμό 7. Εκεί τελειώνει η εξάτμιση

και από εδώ και μετά έχουμε στον εξατμιστή μόνο αέριο. Στο σημείο 7 το αέριο εννοείται ότι είναι κορεσμένο και στη συνέχεια, αφού θερμαίνεται περαιτέρω από τα προϊόντα, γίνεται υπέρθερμο. Υπέρθερμο θα είναι μέχρι να φτάσει στο συμπιεστή (αλλά και μετά από αυτόν). Επομένως στο σημείο 7 έχουμε τη θερμοκρασία εξάτμισης $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ και στο σημείο 8 η θερμοκρασία έχει ανέβει στους $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Άρα η υπερθέρμανση θα είναι $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$-5 - (-15) = 10$], αφού ως υπερθέρμανση ορίζεται η διαφορά της θερμοκρασίας εξόδου του ψυκτικού αερίου από τον εξατμιστή, από τη θερμοκρασία εξάτμισης. Μετά το τέλος του εξατμιστή και μέχρι το ψυκτικό να φτάσει, μέσω του σωλήνα της αναρρόφησης, στον συμπιεστή η θερμοκρασία του αερίου αυξάνεται λίγο ακόμα. Ας πούμε ότι φτάνει στους $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ στο σημείο με αριθμό 9 του σχήματος. Αν και αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας είναι υπερθέρμανση του αερίου, συνήθως δεν θεωρείται ως τέτοια, λόγω του ορισμού που προαναφέρθηκε.

Σε όλη τη διάρκεια της εξάτμισης, αλλά και της υπερθέρμανσης, επειδή το ψυκτικό θερμαίνεται, η ενθαλπία του θα αυξάνεται. Η πίεση από την είσοδο στο 6 μέχρι την αναρρόφηση στο 9 μένει σταθερή στα 3 bar. Όσο για τη θερμοκρασία, είπαμε ότι μέχρι το τέλος της εξάτμισης μένει σταθερή και μετά αυξάνεται μέχρι το συμπιεστή. Γενικά όμως θα λέγαμε ότι μένει σε χαμηλές τιμές.

Το ψυκτικό αέριο φτάνοντας στο συμπιεστή ξαναρχίζει την πορεία που μόλις περιγράψαμε. Στον πίνακα της επόμενης σελίδας συγκεντρώσαμε τις μεταβολές που περιγράψαμε και τα διάφορα χαρακτηριστικά σε κάθε μία από αυτές.

Κάναμε την περιγραφή του ψυκτικού κυκλώματος αρκετά αναλυτικά και με τις αναγκαίες εξηγήσεις. Θα δώσουμε τώρα μια συνοπτική περιγραφή, ώστε να μπορέσετε να τη μάθετε καλύτερα και ίσως να τη θυμάστε πιο εύκολα:

Ο συμπιεστής συμπιέζει το αέριο που έρχεται σε αυτόν από την αναρρόφηση σε χαμηλή πίεση και θερμοκρασία. Μέσω της κατάθλιψης το αέριο σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση πηγαίνει στον συμπυκνωτή. Εκεί ψύχεται συνεχώς και η θερμοκρασία του μειώνεται μέχρι τη θερμοκρασία συμπύκνωσης που αντιστοιχεί στην πίεση του συμπυκνωτή. Η υγροποίηση του ψυκτικού αερίου συνεχίζεται μέχρι να γίνει όλο υγρό. Το υγρό ψυκτικό ωθείται στο εκτονωτικό μέσο όπου στην έξοδό του η πίεσή του έχει μειωθεί μέχρι την πίεση που θέλουμε να έχει στον εξατμιστή. Φτάνοντας στον εξατμιστή το ψυκτικό έχει αρχίσει να εξατμίζεται και η πίεση που έχει είναι μικρή και η θερμοκρασία του επίσης μικρή, όση η θερμοκρασία εξάτμισης που αντιστοιχεί στην πίεση που επικρατεί στον εξατμιστή. Πριν την έξοδο από τον εξατμιστή η εξάτμιση τελειώνει και αρχίζει η υπερθέρμανση του αερίου πλέον ψυκτικού. Σε αυτή την κατάσταση φτάνει στο συμπιεστή για να αρχίσει ξανά η ίδια διαδικασία.

Σημείο Ψυκτικού Κυκλώματος	Όργανο Ψυκτικού Κυκλώματος	Διεργασία	Κατάσταση ψυκτικού μέσου	Πίεση	Θερμο- κρασία	Ενθαλπία
Συμπιεστής	Συμπιεστής	Συμπίεση	Αέριο	Αυξάνεται	Αυξάνεται	Αυξάνεται
1 →	Κατάθλιψη	Ψύξη	Αέριο	Σταθερή	Μειώνεται	Μειώνεται
1 - 2	Συμπυκνωτής	Ψύξη	Αέριο	Σταθερή	Μειώνεται	Μειώνεται
2 →	Συμπυκνωτής	Αρχή συμπύκνωσης	Κορεσμένο Αέριο	Σταθερή	Σταθερή	Μειώνεται
2 - 3	Συμπυκνωτής	Συμπύκνωση	Αέριο + Υγρό	Σταθερή	Σταθερή	Μειώνεται
3 →	Συμπυκνωτής	Τέλος συμπύκνωσης	Κορεσμένο Υγρό	Σταθερή	Σταθερή ↓	Μειώνεται
3 - 4	Συμπυκνωτής	Υπόψυξη	Υγρό	Σταθερή	Μειώνεται	Μειώνεται
4 →	Αρχή τριχοειδούς σωλήνα	Εκτόνωση	Υγρό	Μειώνεται	Μειώνεται	Σταθερή
4 - 5	Τριχοειδής σωλήνας	Εκτόνωση	Υγρό	Μειώνεται	Μειώνεται	Σταθερή
5 →	Τριχοειδής σωλήνας	Εκτόνωση – Αρχή εξάτμισης	Υγρό	Μειώνεται	Μειώνεται	Σταθερή
5 - 6	Τριχοειδής σωλήνας	Εκτόνωση – Εξάτμιση	Υγρό + Αέριο	Μειώνεται	Μειώνεται	Σταθερή
6 →	Αρχή εξατμιστή	Εξάτμιση	Υγρό + Αέριο	Σταθερή	Σταθερή	Αυξάνεται
6 - 7	Εξατμιστής	Εξάτμιση	Υγρό + Αέριο	Σταθερή	Σταθερή	Αυξάνεται
7 →	Εξατμιστής	Τέλος εξάτμισης	Κορεσμένο Αέριο	Σταθερή	Σταθερή ↑	Αυξάνεται
7 - 8	Εξατμιστής	Υπερθέρμανση	Αέριο	Σταθερή	Αυξάνεται	Αυξάνεται
8 - 9	Αναρρόφηση	Υπερθέρμανση*	Αέριο	Σταθερή	Αυξάνεται	Αυξάνεται
Συμπιεστής	Συμπιεστής	Συμπίεση	Αέριο	Αυξάνεται	Αυξάνεται	Αυξάνεται

→ : Το βέλος υπονοεί ότι οι επεξηγήσεις που αντιστοιχούν στο σημείο που αναφέρεται το βέλος αφορούν το σημείο και λίγο μετά από αυτό.

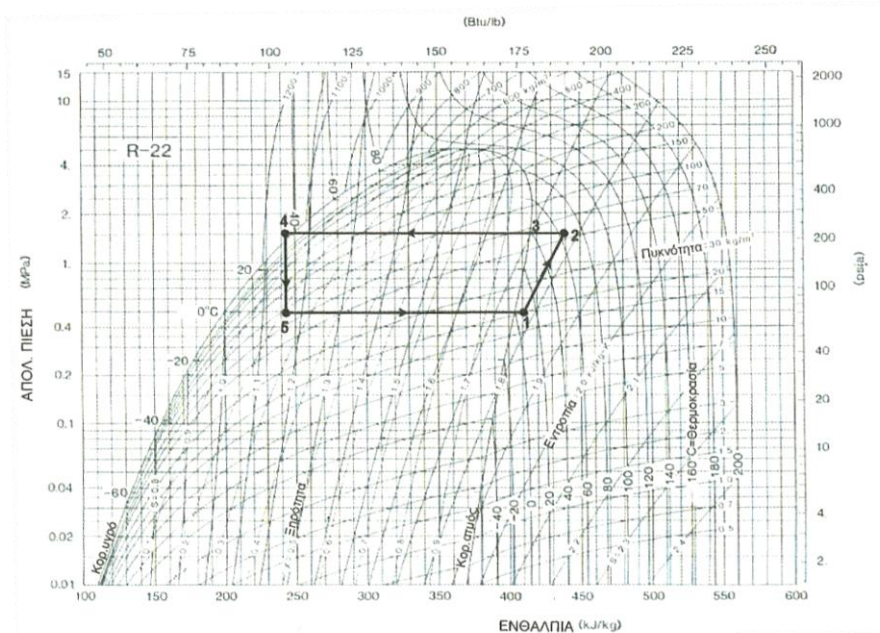
↑ ή ↓ : Η θερμοκρασία ήταν σταθερή αλλά από τώρα και στο εξής θα αυξάνεται ή θα μειώνεται.

Υπερθέρμανση* : Η υπερθέρμανση εδώ είναι της αναρρόφησης και όχι του εξατμιστή, όπως αυτή ορίζεται.

Κεφάλαιο 3. Διάγραμμα Πίεσης-Ενθαλπίας των Ψυκτικών Μέσων

3.1. Τρόπος κατασκευής διαγράμματος P-h

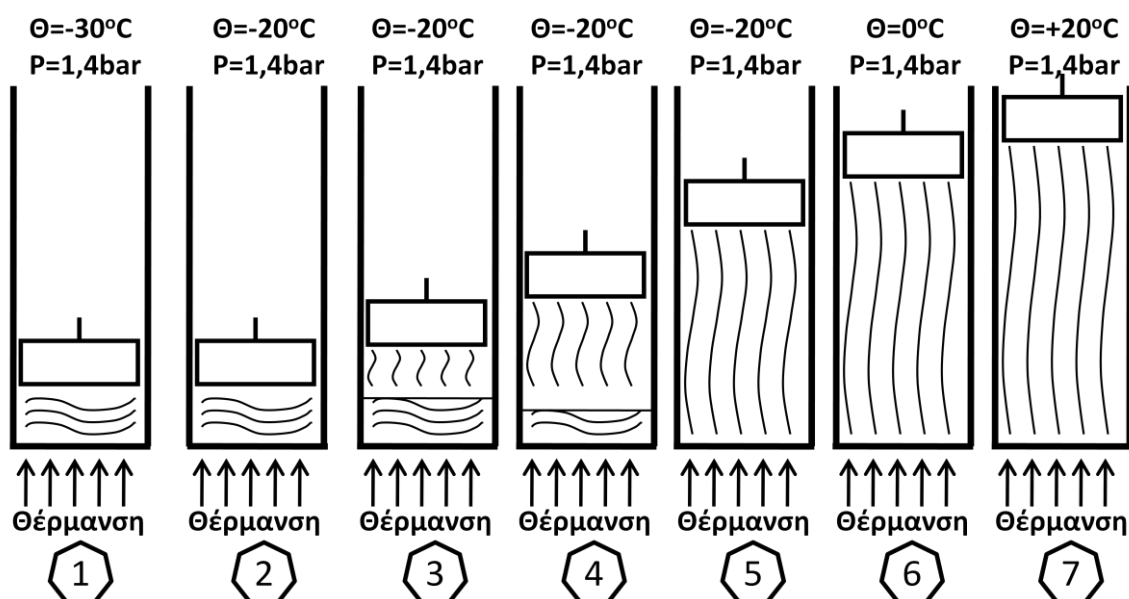
Θα προχωρήσουμε τώρα στην απεικόνιση σε ένα διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας (για συντομία το συμβολίζουμε: P-h) των διεργασιών που έχουμε περιγράψει. Για να γίνει, πρέπει να έχουμε ένα τυπωμένο διάγραμμα P-h για το συγκεκριμένο ψυκτικό που μας ενδιαφέρει. Προφανώς, κάθε ψυκτικό μέσο έχει διαφορετικές τιμές για τα χαρακτηριστικά του (πίεση, θερμοκρασία κλπ.), άρα θα έχει και άλλο διάγραμμα. Στις ασκήσεις που γίνονται, θα έχουμε το διάγραμμα του ψυκτικού για το οποίο γίνεται η κάθε άσκηση και πάνω σε αυτό θα απεικονίζονται οι μεταβολές του ψυκτικού κύκλου. Ένα τέτοιο διάγραμμα φαίνεται στην επόμενη εικόνα που το έχουμε πάρει από το σχολικό βιβλίο. Μια άλλη ονομασία του είναι: διάγραμμα Mollier.



Το διάγραμμα της εικόνας αφορά το ψυκτικό μέσο R22 και έχει γίνει σε αυτό και ένας ψυκτικός κύκλος. Το διάγραμμα έχει δύο κατακόρυφους άξονες (δεξιά και αριστερά) και δύο οριζόντιους (πάνω και κάτω), για να μπορέσει να δίνει τις τιμές της πίεσης και της ενθαλπίας σε δύο διαφορετικές μονάδες. Την πίεση ο αριστερός κατακόρυφος άξονας τη δίνει σε MPa (Μεγαπασκάλ) και ο δεξιός σε psia. Η μονάδα της πίεσης psia είναι ουσιαστικά το γνωστό psi αλλά το a υποδεικνύει ότι στο διάγραμμα η πίεση είναι η απόλυτη, ενώ αν ήταν η μανομετρική θα έγραφε psig. Στους οριζόντιους άξονες είναι η ενθαλπία (συγκεκριμένα η ειδική ενθαλπία) και η μονάδες της στον κάτω είναι το γνωστό kJ/kg του μετρικού συστήματος ενώ στον επάνω άξονα είναι οι μονάδες του αγγλοσαξονικού συστήματος Btu/lb.

Στο διάγραμμα που βλέπετε υπάρχουν πολλές γραμμές και συνήθως μπερδεύονται οι μαθητές, ενώ άλλοι τις αντιμετωπίζουν με απέχθεια γιατί δεν πιστεύουν ότι μπορούν να καταλάβουν το ρόλο κάθε μιας. Επειδή οι περισσότερες από αυτές χρειάζονται στις ασκήσεις, θα εξηγήσουμε εκείνες που σας χρειάζονται. Και για καλύτερη κατανόηση θα εξηγήσουμε, όσο πιο απλά μπορούμε, πως κατασκευάζονται αυτές οι γραμμές. Παίρνουμε ως δεδομένο ότι γνωρίζετε τι σημαίνουν τα μεγέθη στους δύο άξονες. Εν συντομία πάντως θα πούμε ότι μια συγκεκριμένη τιμή για το μέγεθος του κατακόρυφου άξονα (εδώ είναι η πίεση) είναι ίδια σε όλο το μήκος μιας οριζόντιας γραμμής του διαγράμματος που ξεκινά από την τιμή αυτή στον άξονα. Δηλαδή την τιμή 1 MPa έχουν όλα τα σημεία της οριζόντιας γραμμής που ξεκινά από την τιμή 1 MPa. Αντιστοίχως, η τιμή της ενθαλπίας σε ένα σημείο του οριζόντιου άξονα είναι ίδια σε όλο το μήκος μιας κατακόρυφης γραμμής που ξεκινά από το σημείο του άξονα με αυτή την τιμή. Σημειώνουμε, ότι οι λέξεις «οριζόντιος» και «κατακόρυφος» (ή κάθετος) άξονας χρησιμοποιούνται συχνότερα από τους μαθηματικούς όρους: άξονας τετμημένων (οριζόντιος) και άξονας τεταγμένων (κατακόρυφος). Αυτά τα ονόματα θα χρησιμοποιούμε κι εμείς.

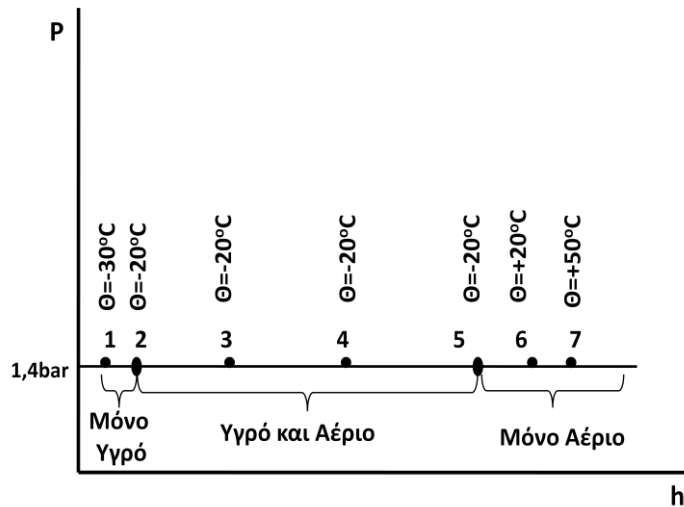
Θα ξεκινήσουμε κατασκευάζοντας διάφορες ισόθλιπτες μεταβολές (ονομάζονται ισόθλιπτες οι μεταβολές κατά τις οποίες η πίεση διατηρείται σταθερή) σε ένα διάγραμμα P-h. Οι τιμές που θα αναφέρονται στα μεγέθη των μεταβολών, αφορούν στο ψυκτικό R-134a και προσεγγίζουν αρκετά τις πραγματικές για το ψυκτικό αυτό. Για να καταλάβουμε την ισόθλιπτη μεταβολή πρέπει να φανταστούμε ένα κύλινδρο στον οποίο έχουμε βάλει μια ουσία (ένα ρευστό), τις οποίες τις μεταβολές θέλουμε να μελετήσουμε. Πάνω από την ουσία στον κύλινδρο τοποθετούμε ένα έμβολο που έχει τα εξής χαρακτηριστικά: α) πιέζει την ουσία στον κύλινδρο με στεγανό τρόπο, ώστε να μη διαφεύγει καθόλου από την ουσία, β) υποθέτουμε ότι δεν έχει τριβές με τα τοιχώματα του κυλίνδρου και έτσι η πίεση που ασκεί στην ουσία είναι σταθερή. Η δεύτερη περίπτωση σημαίνει ότι αν η ουσία είναι ή μετατραπεί σε αέριο κι εμείς τη θερμαίνουμε, το αέριο πάει να αυξήσει την πίεση στον κύλινδρο, αλλά το έμβολο μετακινείται προς τα επάνω και μεγαλώνει ο όγκος τόσο, όσο απαιτείται για να διατηρείται η πίεση σταθερή. Αντιθέτως, αν ψύξουμε την ουσία στον κύλινδρο η πίεση δεν θα ελαττωθεί, αλλά θα μειωθεί ο όγκος του αερίου, ώστε πάλι η πίεση να μην αλλάξει.



Η ισόθλιπτη μεταβολή που θα εκτελέσουμε στο ψυκτικό R-134a γίνεται σε διάφορες φάσεις και στο προηγούμενο σχήμα έχουμε απεικονίσει επτά από αυτές. Η απόλυτη πίεση του ψυκτικού που θα γίνει το πείραμα είναι 1,4 bar. Αυτή την πίεση θα ασκεί σταθερά το έμβολο όταν τοποθετηθεί πάνω από το ψυκτικό. Φανταζόμαστε ότι έχουμε τον κύλινδρο σε θερμοκρασία -30 °C μέσα σε ένα μεγάλο ψυγείο και στην πίεση των 1,4 bar. Σε αυτή τη θερμοκρασία και πίεση το R-134a είναι σε υγρή μορφή. Αυτό το βλέπουμε από τα θερμιδομετρικά του χαρακτηριστικά ή από ένα διάγραμμα P-h του συγκεκριμένου ψυκτικού. Υποθέτουμε ότι έχουμε στον κύλινδρο μια ποσότητα ψυκτικού υγρού και προσαρμοσμένο το έμβολο από πάνω. Έχουμε την εικόνα 1 του πιο πάνω σχήματος. Το έμβολο κάθεται ακριβώς από πάνω από το υγρό και η πίεση και θερμοκρασία είναι εκείνες με τις οποίες αρχίζει το πείραμα: πίεση σταθερά 1,4 bar, θερμοκρασία -30 °C. Ας δούμε τώρα ένα-ένα τα επτά σημεία από την ισόθλιπτη μεταβολή. Προσέχουμε τις μεταβολές στις εικόνες του προηγούμενου σχήματος αλλά και στο διάγραμμα P-h που ακολουθεί. Όλες οι μεταβολές που θα γίνουν στο ψυκτικό ρευστό του κυλίνδρου, επειδή η πίεση θα είναι σταθερή, στο διάγραμμα P-h θα απεικονίζονται πάνω σε μια οριζόντια γραμμή. Είναι η γραμμή σταθερής πίεσης 1,4 bar.

1. Αρχικά στον κύλινδρο έχει μόνο υγρό. Στο διάγραμμα P-h αντιστοιχεί στην πίεση και θερμοκρασία του ψυκτικού το σημείο 1. Αρχίζουμε να θερμαίνουμε σταθερά τον κύλινδρο και το περιεχόμενό του. Η θερμοκρασία αυξάνεται.
2. Όταν η θερμοκρασία φτάσει τους -20 °C, το περιεχόμενο του κυλίνδρου εξακολουθεί να είναι μόνο υγρό και το έμβολο έχει μετακινηθεί ελάχιστα, αφού τα υγρά δεν αυξάνουν σχεδόν καθόλου τον όγκο τους με την αύξηση της θερμοκρασίας τους. Το

σημείο 2 στο διάγραμμα P-h έχει μετακινηθεί λίγο δεξιά από το σημείο 1 αφού με τη θέρμανση η ενθαλπία του ψυκτικού αυξήθηκε.



1-2	Υπόψυκτο Υγρό
2	Κορεσμένο Υγρό
2-3-4-5	Εξάτμιση Υγρό + Αέριο
5	Κορεσμένος Ατμός
5-6-7-...	Υπέρθερμος Ατμός

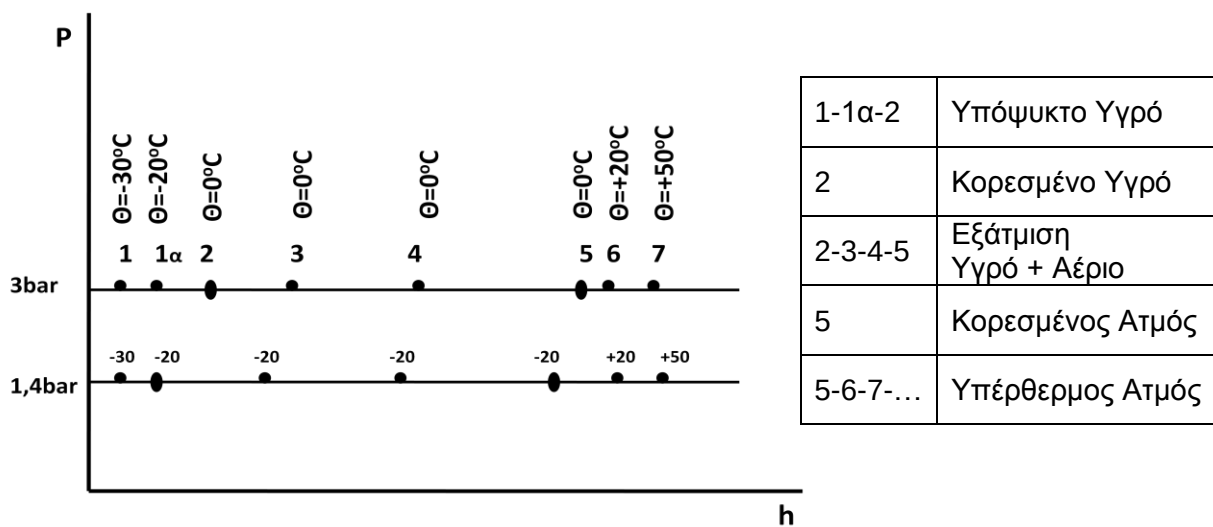
3. Στην κατάσταση του σημείου 2 μόλις προσδώσουμε λίγη θερμότητα παρατηρούμε ότι αρχίζει το υγρό να εξατμίζεται και να παράγεται ατμός του ψυκτικού. Αρχίζει δηλαδή ο βρασμός, διότι η θερμοκρασία βρασμού του R-134a στην πίεση 1,4 bar είναι -20°C . Επειδή ο βρασμός γίνεται υπό τη σταθερή πίεση των 1,4 bar, η θερμοκρασία θα παραμένει σταθερή, ενώ θα παράγονται ατμοί όσο εμείς θερμαίνουμε. Άρα λίγο μετά στο σημείο 3, η θερμοκρασία και η πίεση θα μένουν ίδιες με του σημείου 2. Όμως η θερμότητα, που μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των μορίων του αερίου, θα αυξάνει την ενθαλπία, οπότε το σημείο 3 θα βρίσκεται λίγο πιο δεξιά από το σημείο 2. Από το σημείο 2 και μετά θα έχουμε στον κύλινδρο συνύπαρξη υγρού και αερίου. Το έμβολο λόγω της εμφάνισης του αερίου θα ανυψώνεται (για να διατηρείται η πίεση σταθερή) και ταυτόχρονα η ποσότητα του υγρού θα μειώνεται.
4. Στο σημείο 4 ακόμα περισσότερο υγρό έχει εξατμιστεί, εφόσον θερμαίνουμε, και ο ατμός που παράγεται αυξάνει τον όγκο μετατοπίζοντας προς τα επάνω το έμβολο. Η ενθαλπία αυξάνεται και το 4 θα είναι πιο δεξιά από το 3.
5. Στο σημείο 5, φαίνεται από το σχήμα με τον κύλινδρο ότι, έχει εξατμιστεί όλο το υγρό, έχει τελειώσει ο βρασμός και το έμβολο έχει υπερυψωθεί κι άλλο, ενώ η ενθαλπία έχει αυξηθεί και γι αυτό το 5 είναι πιο δεξιά από το 4. Η εξάτμιση τελείωσε ακριβώς στο σημείο 5, όχι νωρίτερα. Επομένως, από το σημείο 2 μέχρι το 5 υπήρχε στον κύλινδρο υγρό (που όλο και μειωνόταν) μαζί με αέριο. Από το σημείο 5 και μετά θα υπάρχει μόνο ατμός. Στο σημείο 5 έχουμε κορεσμένο ατμό.
6. Στο σημείο 6 φαίνεται ότι η θέρμανση αυξάνει τη θερμοκρασία του ατμού καθώς και την ενθαλπία του. Το έμβολο μετακινείται προς τα επάνω διότι αυξάνεται ο όγκος του ατμού στον κύλινδρο ενώ η πίεση πρέπει να μείνει σταθερή. Ο ατμός του ψυκτικού είναι υπέρθερμος.
7. Στο σημείο 7 συνεχίζεται η θέρμανση και το φαινόμενο εξελίσσεται όπως και στο σημείο 6.

Ας δούμε τώρα τι βλέπουμε στο διάγραμμα P-h που κατασκευάσαμε, έχοντας υπόψη τη συνολική εικόνα των μεταβολών. Με δεδομένη τη γραμμή σταθερής πίεσης, είναι σημαντικό να δούμε και να καταλάβουμε ότι αριστερά από το σημείο 2 το ψυκτικό βρίσκεται σε υγρή μορφή. Στο σημείο 2 ακριβώς αρχίζει η εξάτμισή του, άρα εκεί το υγρό είναι κορεσμένο. Από το 2 μέχρι το 5 γίνεται βρασμός (εξάτμιση) και έχουμε στον κύλινδρο και υγρό και αέριο. Ακριβώς στο σημείο 5 έχουμε κορεσμένο ατμό, αφού εκεί τελειώνει η εξάτμιση του υγρού. Μετά το 5 έχουμε υπέρθερμο ατμό. Τα σημεία στα οποία αντιστοιχεί η έναρξη της εξάτμισης, το σημείο 2 του διαγράμματος, καθώς και τα σημεία της λήξης της, το σημείο 5 του διαγράμματος, έχουν σημειωθεί με οβάλ σχήμα και όχι κυκλικό όπως τα υπόλοιπα. Στο

σχήμα εκτός από το διάγραμμα έχει τοποθετηθεί και ένας μικρός πίνακας με τα σημεία και την κατάσταση του ψυκτικού.

Συνεχίζουμε το πείραμα με τον κύλινδρο, το ψυκτικό R-134a και τις ισόθλιπτες πιέσεις. Τώρα εκτελούμε την ίδια διαδικασία αλλά με μεγαλύτερη πίεση. Πάμε στα 3 bar. Ξεκινάμε πάλι από τους $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ όπου το ψυκτικό είναι προφανώς σε υγρή μορφή (αφού είναι ακόμα μεγαλύτερη από πριν η πίεση). Θερμαίνουμε τον κύλινδρο και τα φαινόμενα που παρατηρούμε είναι τα ίδια όπως πριν με τη μικρότερη πίεση. Εκείνο που διαφέρει είναι οι τιμές της θερμοκρασίας που συμβαίνει κάθε γεγονός. Ας τα δούμε.

Στην πίεση 1,4 bar η υγροποίηση ξεκινούσε από τους $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τώρα όμως που η πίεση είναι μεγαλύτερη, η θερμοκρασία υγροποίησης (ή και εξάτμισης) θα είναι μεγαλύτερη και βλέπουμε ότι στα 3 bar η υγροποίηση του ψυκτικού θα ξεκινήσει στους $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Είναι το σημείο 2 του επόμενου σχήματος. Στο σχήμα αυτό έχουμε διατηρήσει την μεταβολή με τα 1,4 bar και έχουμε προσθέσει την νέα μεταβολή των 3 bar. Στην ισόθλιπτη γραμμή προστέθηκε το σημείο 1α το οποίο αντιστοιχεί στη θερμοκρασία των $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ που πριν είχαμε την έναρξη της εξάτμισης. Στο σχήμα επίσης φαίνονται οι θερμοκρασίες όλων των σημείων.



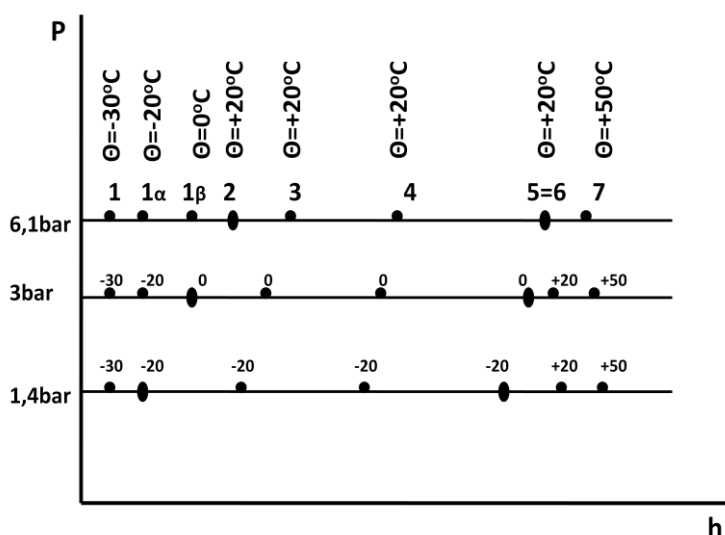
Το σημείο 2 στο οποίο ξεκινά η εξάτμιση θα έχει μεγαλύτερη ενθαλπία από το σημείο 2 στην πίεση 1,4 bar στο οποίο ξεκινούσε πριν η εξάτμιση. Θα συμβαίνει γιατί για να φτάσουμε σε αυτό το σημείο θα απαιτηθεί μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας, την οποία θα πάρει το ψυκτικό. Το σημείο 1 στα 3 bar θα είναι πάνω από το αντίστοιχο σημείο 1 των 1,4 bar. Δεν θα επεκταθούμε στο εάν θα είναι λίγο πιο δεξιά ή πιο αριστερά. Ας θεωρούμε ότι είναι ακριβώς προς τα επάνω, αν και στα διαγράμματα θα δείτε ότι λόγω μικρής μεταβολής της ενθαλπίας, μπορεί να είναι αριστερότερα ή και δεξιότερα, ανάλογα με τη θερμοκρασία. Ουσιαστικά δεν μας ενδιαφέρει εδώ ο λόγος που το κάθε σημείο που σημειώνουμε είναι εκεί ή λίγο παραδίπλα. Σύμφωνα με τις μετρήσεις που έχουν γίνει σε επίσημα εργαστήρια, είναι εκεί που τα σημειώνουμε στο διάγραμμα.

Κατά τη θέρμανση τώρα του κυλίνδρου σημειώνουμε τα σημεία 2 ως 7 ξανά, που αντιστοιχούν στις μεταβολές που είδαμε και πριν, στην πίεση των 1,4 bar. Δεν χρειάζεται να πούμε διεξοδικά πως τοποθετείται στο διάγραμμα κάθε σημείο του. Ορισμένες πάντως θέσεις θα τις εξηγούμε, αφού δεν είναι δύσκολο να τις κατανοήσετε. Ας πούμε, το σημείο 5 θα είναι και αυτό, όπως και το 2, λίγο δεξιότερα από το 5 της μικρότερης πίεσης, για τον ίδιο λόγο. Στο 5 τελειώνει η εξάτμιση του ψυκτικού και ο ατμός είναι κορεσμένος. Εφόσον συνεχίζεται η θέρμανση τα σημεία 6 και 7 αντιστοιχούν σε υπέρθερμο ατμό.

Είδαμε πως μετακινήθηκαν λίγο τα σημεία ίδιων θερμοκρασιών με τη μεταβολή της πίεσης στη μεταβολή. Να δούμε πως θα μετακινηθούν ξανά, όταν αυξηθεί και πάλι η πίεση και γίνει 6,1 bar. Πάλι το σημείο που ξεκινά η εξάτμιση του ψυκτικού R-134a, σημείο 2 των ισόθλιπτων που κατασκευάζουμε, θα είναι λίγο δεξιότερα από πριν, αφού η ενθαλπία θα είναι μεγαλύτερη. Ο λόγος είναι ότι δίνουμε ακόμη μεγαλύτερη θερμότητα για να φτάσουμε στην έναρξη του βρασμού. Ο βρασμός θα αρχίσει σε ακόμα μεγαλύτερη θερμοκρασία από

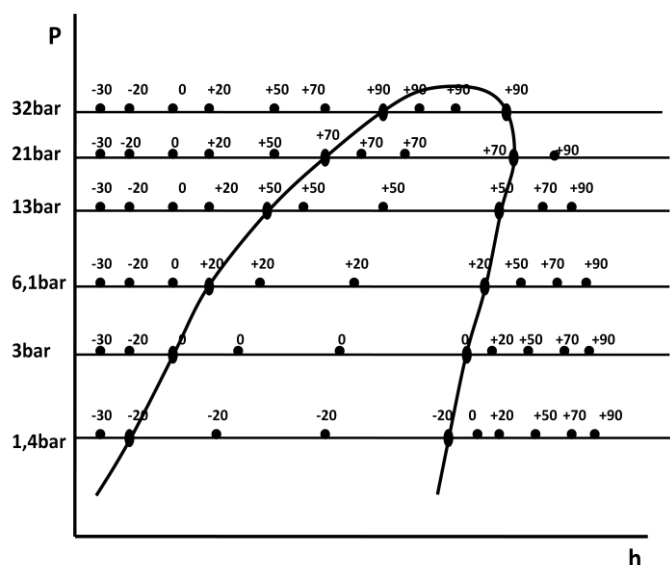
πριν αφού η πίεση αυξήθηκε. Η θερμοκρασία εξάτμισης τώρα είναι $+20^{\circ}\text{C}$ και είναι η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην πίεση των 6,1 bar.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η νέα ισόθλιπτη μεταβολή για την πίεση 6,1 bar με τα σημεία και τις θερμοκρασίες σημειωμένα όπως είδαμε πριν και κατ' αντιστοιχία με τα προηγούμενα. Εδώ προσέχουμε ότι η εξάτμιση του υγρού τελειώνει στους $+20^{\circ}\text{C}$ και το σημείο αυτό ταυτίζεται με το σημείο 6 των δύο προηγούμενων μεταβολών. Αυτό συμβαίνει γιατί τώρα η πίεση είναι μεγαλύτερη και ο βρασμός γίνεται σε σαφώς μεγαλύτερη θερμοκρασία. Θερμοκρασία που σε χαμηλότερες πιέσεις το ψυκτικό ήταν αέριο. Μετά από το σημείο 6 το ψυκτικό θα είναι υπέρθερμος ατμός.



1-1α-1β-2	Υπόψυκτο Υγρό
2	Κορεσμένο Υγρό
2-3-4-5	Εξάτμιση Υγρό + Αέριο
5=6	Κορεσμένος Ατμός
6-7-...	Υπέρθερμος Ατμός

Συνεχίζουμε το πείραμα, αυξάνοντας κι άλλο την πίεση και θερμαίνοντας το ψυκτικό στον κύλινδρο. Επειδή οι εξηγήσεις είναι παρόμοιες με εκείνες που ήδη δόθηκαν για τις τρεις μικρότερες πιέσεις, θα δώσουμε αμέσως το διάγραμμα που θα προκύψει εάν κάνουμε τις ισόθλιπτες με διαδοχικές πιέσεις: 13 bar, 21 bar και 32 bar. Στο διάγραμμα του επόμενου σχήματος φαίνονται και οι έξι ισόθλιπτες μαζί. Πάνω τους είναι σημειωμένες οι θερμοκρασίες των σημείων που επιλέχτηκαν αρχικά: -30°C , -20°C , 0°C , $+20^{\circ}\text{C}$ και $+50^{\circ}\text{C}$. Σε αυτές προσθέσαμε και τις ακόμα μεγαλύτερες $+70^{\circ}\text{C}$ και $+90^{\circ}\text{C}$.



Στο σχήμα έχουμε ενώσει όλα τα σημεία που αντιστοιχούν στο κορεσμένο υγρό (όλα τα σημεία 2) και είναι στο αριστερό μέρος του σχήματος. Το ίδιο κάναμε για τα σημεία 5 που αντιστοιχούν στον κορεσμένο ατμό και βρίσκονται στη δεξιά πλευρά του σχήματος.

Δημιουργούνται δύο καμπύλες που τις ενώσαμε στο επάνω μέρος με ομαλό τρόπο. Έτσι δημιουργείται συνολικά μια καμπύλη σαν ανάποδο ποτήρι, που συνήθως ονομάζουμε «καμπάνα».

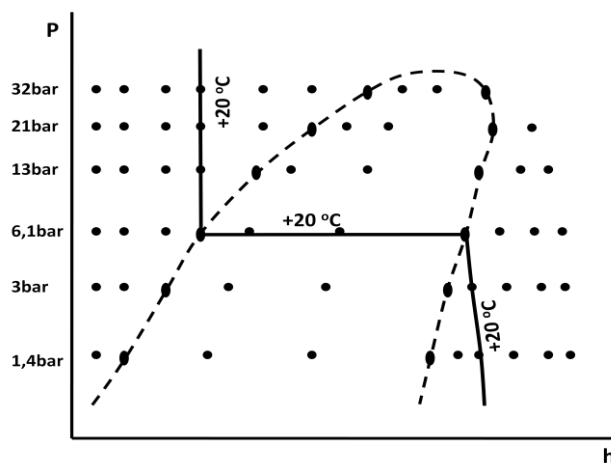
Έχουμε να κάνουμε πολλές παρατηρήσεις στο διάγραμμα που κατασκευάσαμε. Ας τα δούμε αναλυτικά.

Το αριστερό τμήμα της καμπύλης διαχωρίζει το υγρό που βρίσκεται αριστερά και το μίγμα υγρού-αερίου που είναι δεξιά της. Το ότι αριστερά από την καμπύλη έχουμε μόνο υγρό αποδεικνύεται από το ότι τα οβάλ σημεία που την φτιάχνουν προσδιορίζουν την έναρξη της εξάτμισης του υγρού. Άρα σε κάθε ισόθλιπτη ευθεία, αριστερά από το οβάλ σημείο είναι υγρό και δεξιά αέριο, πράγμα που είπαμε όταν κατασκευάζαμε τις ισόθλιπτες. Κάτι αντίστοιχο ισχύει και για το δεξί τμήμα της καμπάνας. Μετά την καμπύλη, δεξιά δηλαδή, υπάρχει μόνο αέριο και αριστερά μίγμα αερίου και υγρού. Και αυτό εξηγήθηκε όταν κάναμε τις ισόθλιπτες.

Επομένως, ανάμεσα στις δύο καμπύλες της καμπάνας υπάρχει μίγμα υγρού-αερίου, δεξιά από την καμπάνα αέριο και αριστερά της υπάρχει υγρό. Η αριστερή καμπύλη της καμπάνας είναι η καμπύλη κορεσμένου υγρού και η δεξιά καμπύλη είναι κορεσμένου ατμού. Το σημείο που βρίσκεται στην κορυφή της καμπάνας είναι το κρίσιμο σημείο και έχει κάποιες ιδιομορφίες που όμως δε μας αφορούν. Ας αρκεστούμε στο ότι γνωρίζουμε πως αν έχουμε ένα ρευστό σε πίεση ίση με την κρίσιμη πίεση ή μεγαλύτερη, τότε δεν μπορούμε να του αλλάξουμε φάση με ισόθλιπτη μεταβολή, όπως κάναμε ως τώρα. Αυτό ισχύει προφανώς γιατί η ισόθλιπτη (οριζόντια γραμμή) σε αυτή την περιοχή τιμών θερμοκρασίας και πίεσης δεν μπορεί να περάσει μέσα από την καμπάνα.

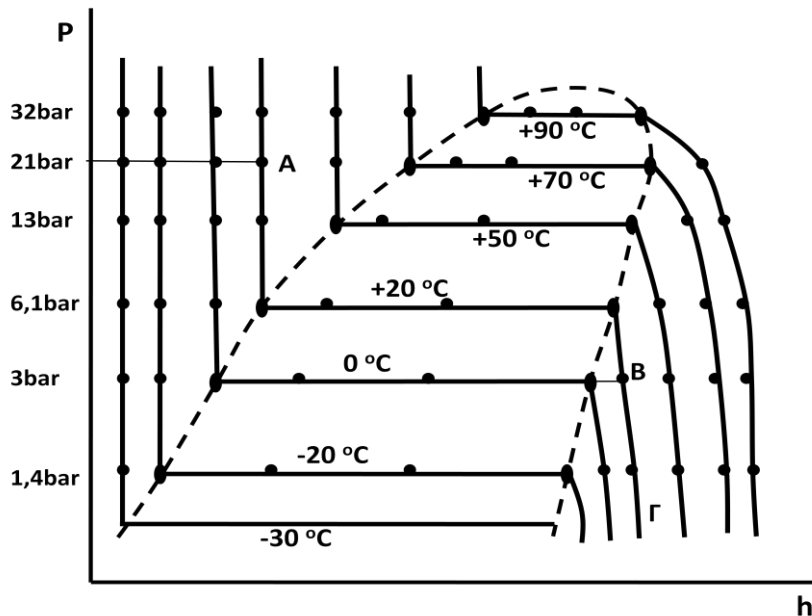
3.2. Καμπύλες και μεγέθη στο διάγραμμα P-h

Ας δούμε τώρα το επόμενο σχήμα. Μας δείχνει το προηγούμενο διάγραμμα, αλλά έχουμε αφαιρέσει τις ισόθλιπτες ευθείες και τις τιμές των θερμοκρασιών, για να μη μας μπερδεύουν. Την καμπάνα την κάναμε με διακεκομμένη γραμμή και (εδώ είναι το σημαντικό) ενώσαμε όλες τις κουκίδες που έδειχναν τη θερμοκρασία των $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η ένωση των σημείων μας έδωσε τρεις χωριστές γραμμές: στην περιοχή του υγρού (στα αριστερά) μια σχεδόν κατακόρυφη ευθεία πάνω από το σημείο κορεσμένου υγρού των $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, μια οριζόντια ευθεία μέσα στην καμπάνα και μια καμπύλη που κατεβαίνει από το σημείο του κορεσμένου ατμού των $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ προς τα κάτω και λίγο δεξιά. Το σύνολο αυτών των τριών γραμμών ονομάζεται ισοθερμοκρασιακή καμπύλη των $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τι μας δείχνει αυτή η καμπύλη; Μας δείχνει όλα τα σημεία στο διάγραμμα που το ψυκτικό R-134a έχει τη θερμοκρασία των $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Δεν υπάρχουν άλλα σημεία με αυτή τη θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει ότι αν έχουμε οποιαδήποτε ποσότητα και σε οποιοσδήποτε συνθήκες από το ψυκτικό R-134a και η θερμοκρασία του είναι $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, τότε στο διάγραμμα η κατάσταση του ψυκτικού θα παριστάνεται σίγουρα σε κάποιο από τα σημεία της ισοθερμοκρασιακής των $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ που φαίνεται στο διάγραμμα.



Ό,τι κάναμε με τη θερμοκρασία των $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ θα κάνουμε και με τις υπόλοιπες θερμοκρασίες που έχουμε στη διάθεσή μας. Έτσι θα προκύψουν οι ισοθερμοκρασιακές για τους : $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Μερικές από αυτές τις

καμπύλες δεν είναι πλήρεις, λόγω έλλειψης στοιχείων στο διάγραμμά μας. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται όλες αυτές οι ισοθερμοκρασιακές. Καταλαβαίνετε ότι κάθε μια από αυτές είναι μια γραμμή που αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία. Προφανώς για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες που δεν απεικονίζονται εδώ θα υπάρχουν άλλες καμπύλες. Θα είναι ενδιάμεσες σε αυτές που έχουμε φτιάξει και η μορφή τους θα είναι κάπως σαν παράλληλη σε εκείνες που φαίνονται στο σχήμα μας.



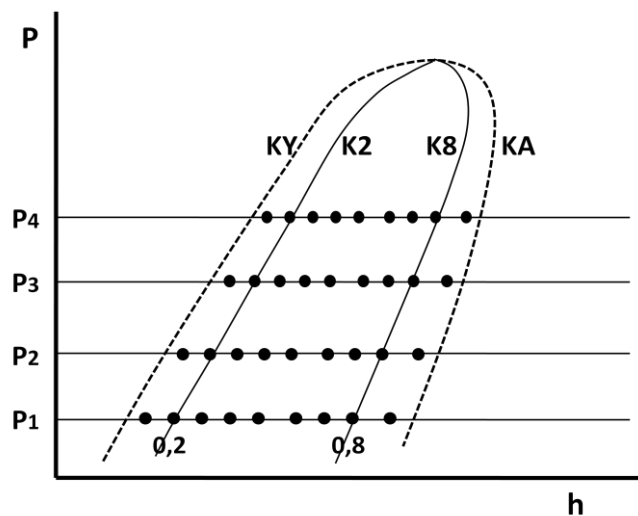
Θέλουμε να καταλάβετε το νόημα των ισοθερμοκρασιακών, εδώ αλλά και γενικότερα. Κατ' αρχήν, υπάρχουν οι λεγόμενες ισοθερμοκρασιακές μεταβολές, ίσως τις γνωρίζετε από άλλα μαθήματα. Είναι κάτι αντίστοιχο με τις ισόθλιπτες που κατασκευάσαμε νωρίτερα. Ισοθερμοκρασιακή είναι μια μεταβολή κατά την οποία η θερμοκρασία μένει σταθερή. Στην πράξη τέτοιες μεταβολές είναι δύσκολο να πραγματοποιηθούν αν δεν αλλάζει φάση η ουσία υπό σταθερή πίεση. Αν, για παράδειγμα, θέλουμε σε ένα αέριο να κάνουμε μια αύξηση της πίεσης, αυτό θα έχει σαν συνέπεια να αυξηθεί η θερμοκρασία του. Για να μείνει σταθερή πρέπει ταυτόχρονα να το ψύχουμε τόσο όσο να μένει σταθερή. Στο μάθημά μας όμως έχουμε πολύ συχνά ισοθερμοκρασιακές μεταβολές οι οποίες όμως γίνονται με αλλαγή φάσης, άρα βρίσκονται μέσα στην «καμπάνα».

Αν μας πουν ότι το ψυκτικό R-134a έχει θερμοκρασία +20 °C και πίεση 21 bar τότε στο διάγραμμα P-h το σημείο που αντιστοιχεί σε αυτή την κατάσταση είναι εκείνο που βρίσκεται στην οριζόντια ευθεία των 21 bar και στην ισοθερμοκρασιακή των +20 °C. Είναι δηλαδή το σημείο A στο επόμενο σχήμα. Αν θέλουμε το σημείο με θερμοκρασία +20 °C και πίεση 3 bar το σημείο θα είναι το B. Αν είμαστε στο B και μας πουν να κάνουμε μια ισοθερμοκρασιακή μέχρι το 1 bar, θα ακολουθήσουμε την καμπύλη (BΓ) του σχήματος. Αν είμαστε πάλι στο B και θέλουμε να πάμε το ψυκτικό σε πίεση 21 bar θα πάμε την ισοθερμοκρασιακή μέχρι το A. Θα περάσουμε δηλαδή μέσα από την καμπάνα και θα ανέβουμε στο A.

Θα δώσουμε άλλο ένα παράδειγμα, που απεικονίζεται στο σχήμα που έχουμε πιο πάνω και θα μας φανεί χρήσιμο στη λύση ασκήσεων με τον ψυκτικό κύκλο. Μας δίνουν ότι η υπερθέρμανση σε ένα εξατμιστή είναι 20 °C και η θερμοκρασία εξάτμισης είναι 0 °C και ζητάνε να βρούμε στο διάγραμμα P-h το σημείο που αντιστοιχεί στο τέλος του εξατμιστή. Η απάντηση έχει ως εξής: η εξάτμιση θα περιγράφεται από την ισοθερμοκρασιακή μέσα στην καμπάνα των 0 °C, που ταυτίζεται με την ισόθλιπτη των 3 bar. Όταν ο ατμός φτάσει στην καμπύλη κορεσμένου ατμού και επειδή η πίεση στον εξατμιστή θεωρείται συνεχώς σταθερή, η μεταβολή θα συνεχίσει στην ίδια οριζόντια ευθεία μέχρι να φτάσει στους 20 °C, αφού 20 °C είναι η υπερθέρμανση. Για να βρω το σημείο θα ακολουθήσω την ισοθερμοκρασιακή των +20 °C και θα βρω που τέμνεται από την ισόθλιπτη των 3 bar. Όπως φαίνεται στο σχήμα είναι το σημείο B.

Έχοντας δει και καταλάβει τις ισοθερμοκρασιακές καμπύλες, έχουμε καταλάβει την ύπαρξη των περισσότερων γραμμών των διαγραμμάτων P-h των ψυκτικών. Υπενθυμίζουμε ότι εκτός από τις ισοθερμοκρασιακές, έχουμε και τις γραμμές των μεγεθών που είναι στους άξονες και είναι οι ισόθλιπτες που είναι οριζόντιες, καθώς και οι ισηνθαλπικές (ευθείες σταθερής ενθαλπίας) που είναι κατακόρυφες.

Τα διαγράμματα P-h έχουν και άλλες ομάδες γραμμών, που χρησιμοποιούνται, όχι όμως τόσο συχνά όσο οι προαναφερθείσες. Εκείνες που θα συναντήσετε περισσότερο είναι οι γραμμές σταθερής ξηρότητας. Είναι καμπύλες μέσα στην καμπάνα, που ξεκινούν από το κρίσιμο σημείο στην κορυφή και καταλήγουν στον οριζόντιο άξονα. Συνήθως τα διαγράμματα έχουν εννέα τέτοιες καμπύλες και πηγαίνουν σε περίπου ίσες αποστάσεις μεταξύ τους ανοίγοντας σαν βεντάλια προς τα κάτω. Σε αυτές να προσθέσουμε και τις καμπύλες κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού. Κάθε τέτοια γραμμή δείχνει ένα συγκεκριμένο ποσοστό του ατμού που περιέχεται στο μίγμα υγρού-ατμού. Ο αριθμός αυτός ονομάζεται βαθμός ξηρότητας και αν είναι π.χ. ο 0,4 σημαίνει ότι η γραμμή δείχνει ότι το μίγμα που βρίσκεται σε αυτήν έχει 40% ατμό και 60% υγρό.



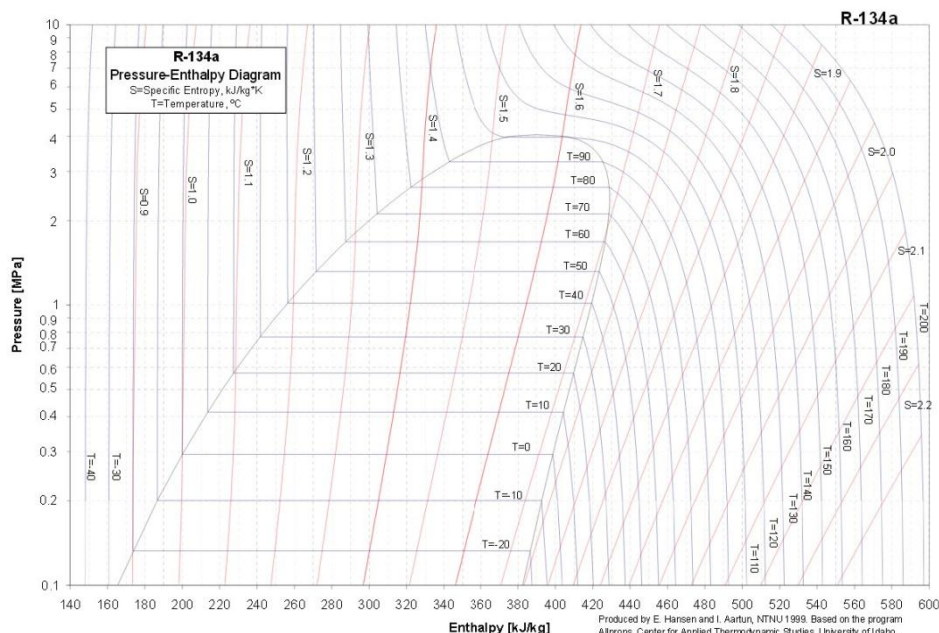
Για να το καταλάβουμε καλύτερα, ας φανταστούμε ότι κάνουμε τέσσερις ισόθλιπτες μεταβολές με πιέσεις P1, P2, P3 και P4. Στο παραπάνω σχήμα έχουμε σχεδιάσει τις 4 ισόθλιπτες, αλλά έχουμε βάλει σημεία των μεταβολών μόνο μέσα στην καμπάνα, από εννέα σημεία σε κάθε μία. Ας πάρουμε την μεταβολή με την πίεση P1. Ξεκινώντας από χαμηλές ενθαλπίες (αριστερά στο διάγραμμα) και θερμαίνοντας, φτάνουμε στην καμπύλη κορεσμένου υγρού, που εδώ ονομάσαμε KY. Υποθέτουμε ότι μπορούμε και μετράμε την ποσότητα του υγρού κάθε στιγμή, καθώς και την ενθαλπία του υγρού και του ατμού μαζί (του συστήματος όπως ονομάζεται). Πάνω στην καμπύλη KY όλο το ψυκτικό είναι σε υγρή μορφή, άρα το υγρό είναι 100% και το αέριο 0% (καθόλου αέριο). Θερμαίνουμε, μέχρι να δούμε ότι εξατμίστηκε το 10% του υγρού και τότε ακριβώς σημειώνουμε πόση είναι η ενθαλπία του συστήματος. Βάζουμε την αντίστοιχη κουκίδα στο διάγραμμα, που είναι η πρώτη κουκίδα πάνω στην ισόθλιπτη. Προχωρώντας η θέρμανση, εξατμίζεται κι άλλο υγρό. Όταν έχει εξατμιστεί το 20% βάζουμε τη δεύτερη κουκίδα που αντιστοιχεί στην ενθαλπία του συστήματος που μετράμε. Τότε έχει εξατμιστεί το 20% του υγρού άρα έχουμε 20% ατμό και 80% υγρό. Για το ποσοστό 20% σημειώνουμε στην κουκίδα 0,2. Με τον ίδιο τρόπο προχωράμε μέχρι να τελειώσει η εξάτμιση, οπότε έχουμε φτάσει στην καμπύλη κορεσμένου ατμού (που συμβολίσαμε με KA). Εκεί το ποσοστό του ατμού στο σύστημα είναι 100% και κανονικά θα βάζαμε στην καμπύλη KA τον αριθμό 1.

Με τον τρόπο που περιγράφηκε πριν, σημειώσαμε τα εννέα σημεία με τους βαθμούς ξηρότητας 10%, 20%,..., και 90%. Το ίδιο κάνουμε και για τις ισόθλιπτες με πιέσεις P2, P3 και P4. Σημειώνουμε τα σημεία πάνω σε αυτές με τον ίδιο τρόπο και φαίνονται στο σχήμα. Αν ενώσουμε τα τέσσερα σημεία με τον ίδιο βαθμό ξηρότητας θα πάρουμε εννέα καμπύλες, που αν τις προεκτείνουμε θα έχουμε τις εννέα πλήρεις γραμμές ξηρότητας. Στο σχήμα μας έχουμε

κατασκευάσει μόνο τις καμπύλες με ξηρότητες 0,2 και 0,8 που τις ονομάσαμε K2 και K8 αντιστοίχως. Εννοείται ότι στα διαγράμματα των ψυκτικών μέσων, για τον σχεδιασμό τους έχουν πάρει πολύ περισσότερες ισόθλιπτες, ώστε υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στο σχεδιασμό τους.

Πρακτικά, αν έχουμε ένα σημείο στην καμπάνα μέσα και ζητάμε τον βαθμό ξηρότητας, θα δούμε πάνω σε ποια καμπύλη βρίσκεται και θα απαντήσουμε αναλόγως. Αν το σημείο δεν βρίσκεται ακριβώς επάνω σε καμία αλλά ανάμεσα σε δύο καμπύλες, θα απαντήσουμε προσεγγιστικά (κάτι σαν γραμμική παρεμβολή με το μάτι).

Στα διαγράμματα που σας δίνονται για τα ψυκτικά μέσα, υπάρχουν και οι ισεντροπικές καμπύλες ή καμπύλες σταθερής εντροπίας. Θα δούμε ότι οι καμπύλες αυτές χρησιμοποιούνται στην χάραξη του ψυκτικού κύκλου για την συμπίεση. Η εντροπία είναι ένα μέγεθος που έχει σχέση με τις μεταβολές στην κινητικότητα των μορίων των σωμάτων. Δεν θα ασχοληθούμε περισσότερο με την έννοια, γιατί δεν είναι στο αντικείμενο του ψυκτικού κύκλου. Στο επόμενο σχήμα, ενός κατασκευαστή, μπορείτε να δείτε τις ισεντροπικές καμπύλες που στα αριστερά του σχήματος είναι σχεδόν κατακόρυφες και όσο προχωράμε στα δεξιά παίρνουν μία κλίση προς τα δεξιά. Είναι οι καμπύλες με τις τιμές $S=1,7$, $S=1,8$ κλπ. Οι μονάδες της εντροπίας εδώ είναι $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$, ουσιαστικά δηλαδή είναι η ειδική εντροπία. Στο διάγραμμα του σχήματος μπορείτε να δείτε και τις ισοθερμοκρασιακές.

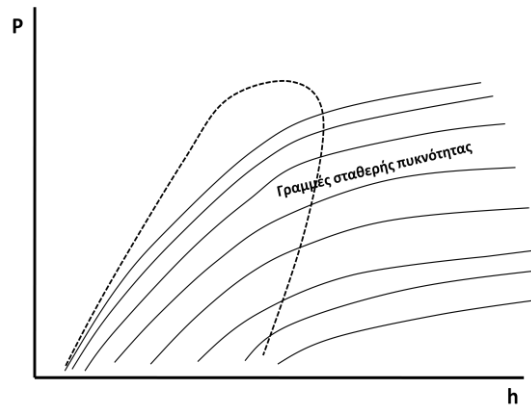


Τέλος, στα διαγράμματα δίνεται και άλλη μια ομάδα από καμπύλες. Είναι οι γραμμές σταθερής πυκνότητας. Τα σημεία αυτών των γραμμών δίνουν την πυκνότητα του ψυκτικού μέσου σε διάφορες συνθήκες. Οι μονάδες της πυκνότητας είναι στα διαγράμματα το kg/m^3 . Ένα άλλο μέγεθος που χρησιμοποιείται συχνά στη θερμοδυναμική είναι ο ειδικός όγκος, που είναι το αντίστροφο της πυκνότητας. Δηλαδή, ενώ η πυκνότητα δείχνει τη μάζα μιας ουσίας σε κάθε κυβικό μέτρο, ο ειδικός όγκος μας δείχνει το ένα κυβικό μέτρο από μια ουσία πόση μάζα έχει. Άρα ο ειδικός όγκος έχει μονάδες τα m^3/kg .

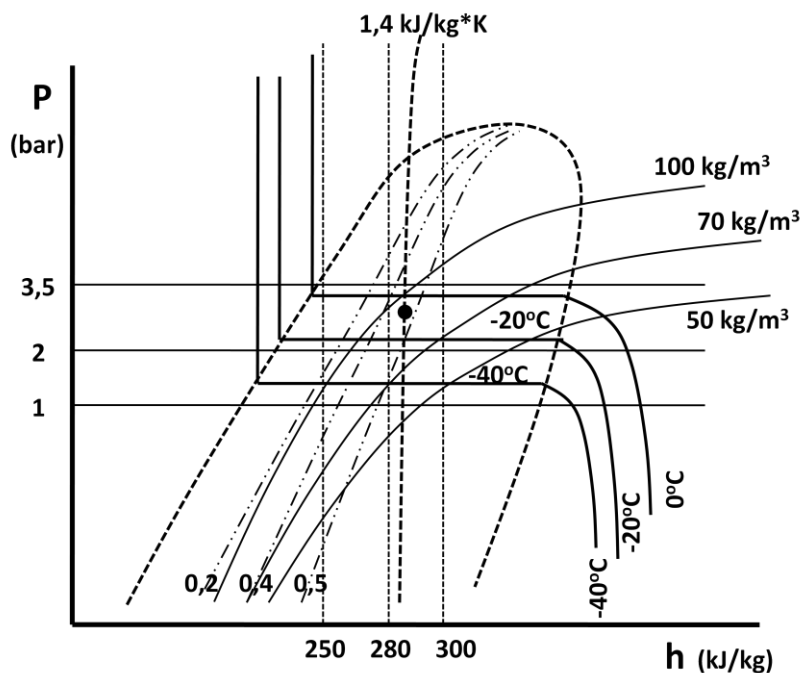
Υπάρχουν για διάφορα ψυκτικά μέσα έτοιμα διαγράμματα P-h, που έχουν καμπύλες με τις τιμές της σταθερής πυκνότητας και άλλα που αντί γι αυτές τις τιμές, έχουν τις τιμές ειδικού όγκου. Δηλαδή μιλάμε για τις ίδιες καμπύλες με διαφορετικές τιμές να αναγράφονται πάνω σε αυτές ανάλογα με το μέγεθος που δίνουν, πυκνότητα ή όγκο. Μια καμπύλη σε ένα διάγραμμα που αναγράφει πυκνότητα 100 kg/m^3 , σε άλλο διάγραμμα που έχει τον ειδικό όγκο θα αναγράφει στην ίδια καμπύλη $0,02 \text{ m}^3/\text{kg}$. Ο λόγος είναι ότι, όπως είπαμε, το ένα μέγεθος είναι το αντίστροφο του άλλου.

Στο επόμενο σχήμα κάναμε πρόχειρα κάποιες γραμμές σταθερής πυκνότητας, για να δείτε πως εμφανίζονται στα διαγράμματα P-h, διότι σε μερικά έντυπα δεν είναι ευδιάκριτες.

Θέλουμε να προσέξετε, σε ένα αναλυτικό διάγραμμα με τις τιμές της πυκνότητας, ότι ένα ψυκτικό αέριο με πίεση περίπου μια ατμόσφαιρα και θερμοκρασία περιβάλλοντος (20 °C ως 30 °C) έχει πυκνότητα περίπου 4 kg/m³ (η τιμή αφορά το ψυκτικό R-134a). Όταν η πίεση γίνει 20 ατμόσφαιρες, τότε ένα κυβικό μέτρο από το ίδιο ψυκτικό (σε αέρια πάλι μορφή) στους 80 °C, θα ζυγίζει περίπου 100 κιλά. Το λέμε αυτό για να καταλάβετε πόσο πυκνά (βαριά) μπορεί να γίνουν τα αέρια σε μεγάλες πιέσεις. Με την ευκαιρία θυμίζουμε ότι ένα κυβικό μέτρο αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση και στους 20 °C ζυγίζει 1,2 κιλά. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι το R-134a είναι 3-4 φορές πιο βαρύ από τον αέρα.



Ολοκληρώσαμε με τις καμπύλες που παρουσιάζονται στα διαγράμματα των ψυκτικών μέσων. Συγκεντρωτικά, όλα τα ονόματα των καμπυλών αυτών (που μπορεί να είναι και ευθείες) είναι: **πίεση, ενθαλπία, θερμοκρασία, ξηρότητα, εντροπία και πυκνότητα (ή ειδικός όγκος)**. Οποιαδήποτε δύο από αυτά τα μεγέθη αν μας δώσουν, τότε μπορούμε να προσδιορίσουμε όχι μόνο το σημείο πάνω στο διάγραμμα P-h, αλλά και τις τιμές όλων των υπολοίπων μεγεθών. Το επιτυγχάνουμε βρίσκοντας τις τιμές των γραμμών που περνάνε από αυτό το σημείο ή από κοντά του. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένα παράδειγμα.



Στο παράδειγμα του σχήματος έχουν σχεδιαστεί λίγες μόνο από τις γραμμές που συναντούμε στα διαγράμματα P-h, για να είναι πιο σαφής η κατανόηση της λύσης. Στο μέσον περίπου του σχήματος βλέπετε μια έντονη κουκίδα, που είναι το σημείο του διαγράμματος για το οποίο θέλουμε να προσδιορίσουμε τα θερμοδυναμικά μεγέθη. Θα τα δούμε ένα-ένα:

1. Πίεση: το σημείο βρίσκεται μεταξύ των τιμών 2 και 3,5 bar (οριζόντιες γραμμές που ξεκινούν από τον κατακόρυφο άξονα της πίεσης) και πιο κοντά στο 3,5 από το 2, άρα θα εκτιμήσουμε την τιμή 3 bar.
2. Ενθαλπία: βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 280 και 300 kJ/kg, όπως αυτές φαίνονται από τις κατακόρυφες γραμμές που ξεκινούν από τον οριζόντιο άξονα της ενθαλπίας. Θα είναι περίπου 285 kJ/kg.
3. Θερμοκρασία: βλέπουμε τρεις ισοθερμοκρασιακές γραμμές, που αποτελούνται από τρία τμήματα η κάθε μία. Το σημείο είναι μεταξύ -20 και 0 °C και εκτιμούμε ότι θα είναι σε θερμοκρασία -5 °C.
4. Βαθμός ξηρότητας: στο διάγραμμα σχεδιάσαμε τρεις γραμμές ξηρότητας με τιμές 0,2, 0,4 και 0,5 (θα μπορούσαμε να πούμε και 20%, 40% και 50%). Το σημείο είναι μεταξύ των δύο τελευταίων και εκτιμούμε την τιμή 0,47. Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι το σημείο μας είναι μέσα στην καμπάνα, επομένως αφορά **μίγμα υγρού-ατμού**. Αυτό σημαίνει ότι αν βρισκόμαστε σε ένα εξατμιστή, η εξατμισή έχει προχωρήσει και το 47% του υγρού έχει μετατραπεί σε ατμό.
5. Εντροπία: έχει σχεδιαστεί μόνο μία καμπύλη εντροπίας, για να μην μπλεχτεί πολύ το σχήμα, και το σημείο βρίσκεται ακριβώς πάνω σε αυτήν. Η τιμή της εντροπίας είναι 1,4 kJ/kg*K.
6. Πυκνότητα: η πυκνότητα είναι περίπου 90 kg/m³, αφού το σημείο βρίσκεται ανάμεσα στις καμπύλες με τιμές 70 και 100 kg/m³. Ο ειδικός όγκος θα είναι το αντίστροφο του 90 kg/m³, δηλαδή 0,011 m³/kg.

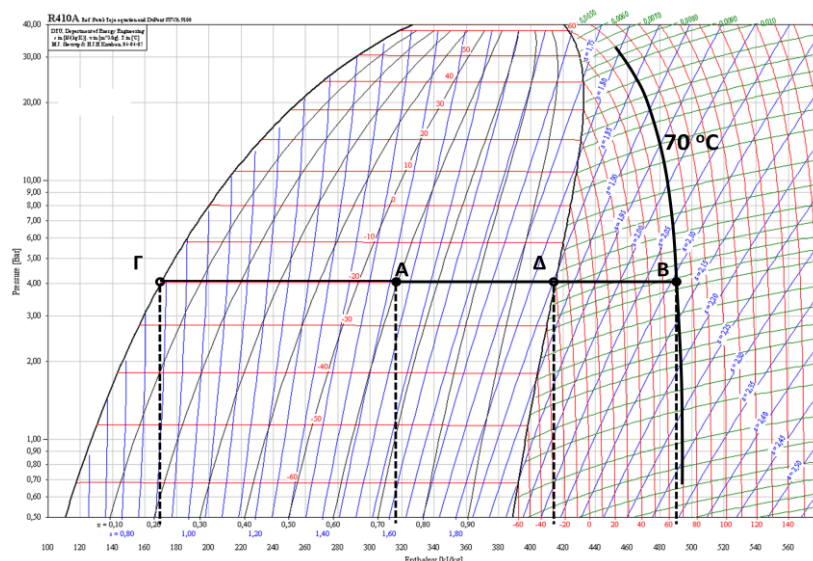
Κατ' αυτόν τον τρόπο βρίσκουμε τις τιμές ενός σημείου στο διάγραμμα.

3.3. Απεικόνιση μεταβολών στο διάγραμμα P-h

Θα δούμε τώρα με παραδείγματα πως απεικονίζουμε τις μεταβολές πάνω σε ένα διάγραμμα P-h. Οι μεταβολές που θα δείτε παρακάτω αφορούν παραδείγματα που θα συναντήσουμε στις ασκήσεις του κεφαλαίου του ψυκτικού κύκλου.

Παράδειγμα 1. Να πραγματοποιήσετε στο διάγραμμα P-h την **ισόθλιπτη** μεταβολή του ρευστού R410A από την κατάσταση A με πίεση 4 bar και βαθμό ξηρότητας 0,60 μέχρι την κατάσταση B όπου θα έχει θερμοκρασία 70 °C. Να δώσετε και τα άλλα θερμοδυναμικά μεγέθη των δύο καταστάσεων A και B.

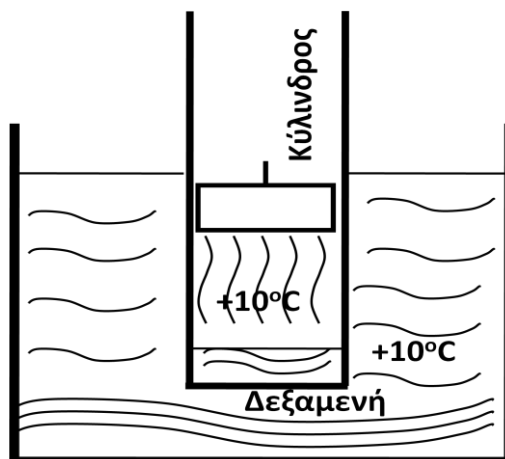
Απάντηση: Το σημείο A φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα και το έχουμε βρει από την τομή δύο γραμμών: α) της οριζόντιας γραμμής από τον κατακόρυφο άξονα στην πίεση 4 bar και β) της καμπύλης ξηρότητας με τιμή 0,6 (60%). Η κατάσταση του ρευστού σε αυτό το σημείο A είναι μίγμα υγρού και ατμού, αφού βρίσκεται μέσα στην καμπάνα. Η γραμμή της πίεσης, όπως φαίνεται, είναι στη θερμοκρασία των -20 °C. Η ενθαλπία του A είναι περίπου 318 kJ/kg και η εντροπία 1,47 kJ/kg*K. Ο ειδικός όγκος δεν δίνεται μέσα στην καμπάνα.



Για να κατασκευάσουμε στο διάγραμμα τη μεταβολή ξεκινάμε κάνοντας τις δύο οριζόντιες ισόθλιπτες διακεκομμένες γραμμές στα 10 bar και στα 2 bar. Εδώ το διάγραμμα έχει τις πιέσεις σε μονάδες MPa (Mega Pascal = 1.000.000 Pascal) και θυμίζουμε ότι επειδή 1 bar είναι ίσο με 100.000 Pascal θα είναι 1 MPa ίσο με 10 bar, επομένως τα 2 bar θα είναι στην τιμή 0,2 MPa. Μπορούμε επίσης να χαράξουμε την γραμμή ΓΔ, που είναι η ισοθερμοκρασιακή των +10 °C μέσα στην καμπάνα και τα σημεία Γ και Δ είναι εκεί που αυτή συναντά τις καμπύλες κορεσμένου υγρού και ατμού. Η ισοθερμοκρασιακή στην περιοχή του υπόψυκτου υγρού έχουμε δει ότι είναι σχεδόν κατακόρυφη. Στο δεδομένο διάγραμμα τη βρίσκουμε αν από το σημείο Γ χαράξουμε την σχεδόν κατακόρυφη γραμμή που παριστάνει την ισοθερμοκρασιακή που ψάχνουμε. Το σημείο Α του διαγράμματος το βρίσκουμε από την τομή της κατακόρυφης αυτής ισοθερμοκρασιακής των +10 °C με την ισόθλιπτη των 10 bar που ήδη σημειώσαμε.

Συνοψίζοντας τη μεταβολή που μας ζητάνε έχουμε: από το Α ακολουθούμε την ισοθερμοκρασιακή προς τα κάτω και τέμνει την καμπύλη κορεσμένου υγρού στο Γ. Από το Γ η ισοθερμοκρασιακή είναι οριζόντια (μέσα στην καμπάνα) προς τα δεξιά και τέμνει την καμπύλη κορεσμένου ατμού (δεξί μέρος της καμπάνας) στο σημείο Δ. Από το Δ η ισοθερμοκρασιακή συνεχίζεται με κλίση προς τα κάτω (χαμηλές πιέσεις) και την ακολουθούμε μέχρι να φτάσει στην ισόθλιπτη των 2 bar. Αυτό είναι το σημείο Β. Οι μεταβολές που περιγράψαμε φαίνονται πάνω στο σχήμα και είναι η γραμμή ΑΓΔΒ.

Να δούμε όμως λίγο πιο πρακτικά πως κάνουμε μια τέτοια μεταβολή και τι γίνεται στο ρευστό κατά την διάρκειά της.



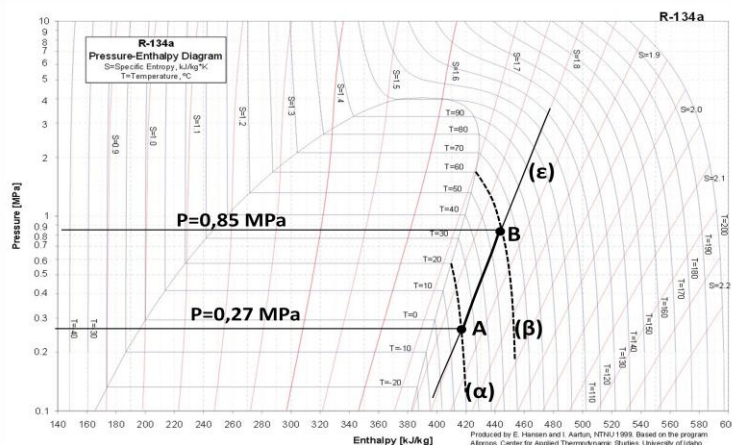
Φανταζόμαστε τον κύλινδρο, που έχουμε ξαναδεί, με το ρευστό μέσα και το έμβολο από επάνω, να μπορεί να αυξομειώνει την πίεση σε αυτόν. Αρχικά, σύμφωνα με την άσκηση, το ψυκτικό είναι σε πίεση 10 bar και θερμοκρασία +10 °C και είδαμε ότι υπό αυτές τις συνθήκες το ρευστό είναι σε υγρή κατάσταση. Άρα στον κύλινδρο υπάρχει υγρό υπό πίεση και ας φανταστούμε ότι βάζουμε όλο αυτό το σύστημα σε μια δεξαμενή με νερό σταθερής θερμοκρασίας +10 °C ώστε να είναι σταθερή και η θερμοκρασία του ψυκτικού στον κύλινδρο. Ας υποθέσουμε επίσης ότι οι μεταβολές γίνονται αργά-αργά ώστε πράγματι η θερμοκρασία του κυλίνδρου να μένει στους +10 °C. Όταν η μεταβολή γίνεται αργά, προλαβαίνει ο κύλινδρος να συναλλάσσει θερμότητα με τον κύλινδρο και η θερμοκρασία του να μένει σταθερή. Αρχίζουμε λοιπόν να ανασηκώνουμε το έμβολο ώστε η πίεση στον κύλινδρο να μειώνεται. Μόλις η πίεση φτάσει τα 4,2 bar (είναι η στιγμή που φτάνει το ψυκτικό στην καμπύλη κορεσμένου υγρού, όπως βλέπουμε στο διάγραμμα του ψυκτικού) θα παρατηρήσουμε την έναρξη της εξάτμισης (βρασμός) του ψυκτικού. Κατά τη μεταβολή ΓΔ το υγρό βράζει και απορροφά θερμότητα από το νερό της δεξαμενής. Άρα θα πρέπει η δεξαμενή να θερμαίνεται ώστε να έχει σταθερή θερμοκρασία. Στη μεταβολή ΓΔ η πίεση, σύμφωνα με το διάγραμμα, μένει σταθερή. Αυτό δε σημαίνει ότι σταματήσαμε να ανυψώνουμε το έμβολο. Αντιθέτως, συνεχίζουμε την ανύψωση και η πίεση μένει σταθερή. Αυτό οφείλεται στην παρουσία του ατμού που αυξάνεται συνέχεια με την εξάτμιση. Αν δεν αυξανόταν ο όγκος του κυλίνδρου (με την άνοδο του εμβόλου) θα μεγάλωνε η πίεση. Όταν

τώρα φτάσουμε στο σημείο Δ θα έχει εξατμιστεί όλο το υγρό ψυκτικό. Στη συνέχεια στον κύλινδρο θα έχουμε υπέρθερμο ατμό. Επομένως με την άνοδο του εμβόλου η πίεση θα ελαττώνεται με μικρή απορρόφηση θερμότητας από τη δεξαμενή. Γι' αυτό άλλωστε η ισοθερμοκρασιακή πηγαίνει λίγο δεξιά, που σημαίνει ότι αυξάνεται η ενθαλπία.

Θα μπορούσαμε με αντίστοιχο τρόπο να κάνουμε την ακριβώς αντίστροφη μεταβολή: ισοθερμοκρασιακή συμπίεση του ψυκτικού R-134a από την πίεση των 2 bar στην πίεση των 10 bar. Θα είχαμε δηλαδή το αέριο στον κύλινδρο σε θερμοκρασία $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ και θα το συμπιέζαμε ισοθερμοκρασιακά. Η πίεση θα μειωνόταν. Όταν η πίεση θα έφτανε στα 4,2 bar (σημείο Δ) θα άρχιζε η συμπύκνωση των ατμών του αερίου. Ενώ θα πιέζαμε, η πίεση θα έμενε σταθερή γιατί θα μετατρεπόταν ο ατμός σε υγρό που έχει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα. Κατά την αλλαγή φάσης (μεταβολή ΔΓ) το ψυκτικό δίνει θερμότητα στο περιβάλλον του, δηλαδή στο νερό της δεξαμενής. Ουσιαστικά το ψυκτικό κατά την συμπίεση εδώ ψύχεται από τη δεξαμενή. Αυτό θα συνεχιζόταν μέχρι όλος ο ατμός στον κύλινδρο να γίνει υγρό (σημείο Γ). Μετά από αυτό η πίεση θα αυξανόταν εύκολα στα 10 bar και θα φτάναμε στο σημείο Α.

Παράδειγμα 4. Έχουμε υπέρθερμο ατμό από το ψυκτικό R-134a με θερμοκρασία $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ και ειδική εντροπία ίση με $1,8\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$. Εάν το αέριο συμπιεστεί ισεντροπικά (μεταβολή με σταθερή την εντροπία) μέχρι την θερμοκρασία των $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, να βρείτε τη μεταβολή στην πίεσή του.

Απάντηση: Θα σχεδιάσουμε τη μεταβολή στο διάγραμμα του ψυκτικού μέσου R-134a και θα δούμε ποιες πιέσεις αντιστοιχούν στα σημεία της έναρξης και του τέλους της συμπίεσης.



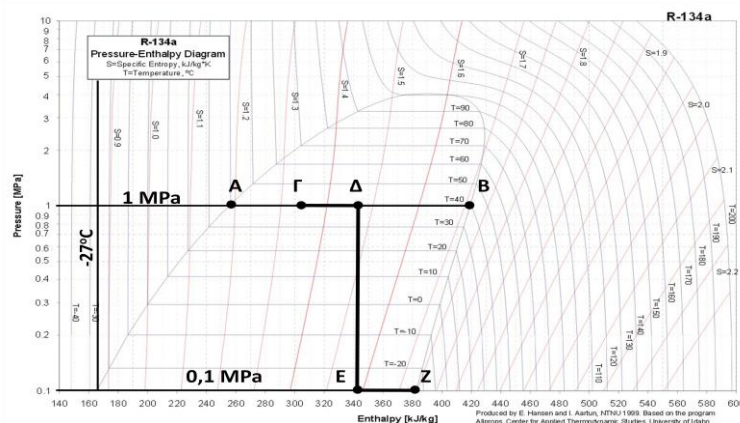
Κατ' αρχάς σχεδιάζουμε την καμπύλη (ε) που ακολουθεί την ισεντροπική των $1,8\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$. Σχεδιάζουμε και τις καμπύλες (α) και (β) που είναι αντίστοιχα οι ισοθερμοκρασιακές των $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, στις οποίες αρχίζει και τελειώνει η συμπίεση. Παρατηρούμε ότι η ισεντροπική (ε) είναι στο χώρο του αερίου, επομένως χαράζουμε μόνο το μέρος των ισοθερμοκρασιακών που μας ενδιαφέρουν και όχι ολόκληρες. Αυτές οι τρεις καμπύλες τέμνονται στα σημεία Α και Β. Στο Α ξεκινά η συμπίεση και στο Β τελειώνει. Από τα σημεία Α και Β φέρνουμε τις οριζόντιες γραμμές που αντιστοιχούν στις πιέσεις των σημείων αυτών και βρίσκουμε ότι έχουμε τις τιμές $0,85\text{ MPa}$ ($=8,5\text{ bar}$) και $0,27\text{ MPa}$ ($=2,7\text{ bar}$). Άρα η συμπίεση ήταν $8,5 - 2,7 = 5,8\text{ bar}$.

Παράδειγμα 5. Έχουμε ένα ερμητικά κλειστό δοχείο με ψυκτικό R-134a σε θερμοκρασία $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Διαπιστώνουμε (ανακινώντας το δοχείο) ότι μέσα υπάρχει ρευστό σε υγρή μορφή. Πρεσάρουμε στο δοχείο από το στόμιο του μια μικρή ποσότητα από το ίδιο ψυκτικό και αφήνουμε το δοχείο να έχει θερμοκρασιακή ισορροπία στους $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Διαπιστώνουμε και πάλι ότι στο δοχείο υπάρχει και υγρό και αέριο ψυκτικό. Κατόπιν ανοίγουμε το στόμιο του δοχείου στην ατμοσφαιρική πίεση, ώστε το ψυκτικό να μπορεί να διαφύγει στο περιβάλλον. Να περιγράψετε τις μεταβολές που γίνονται στο ψυκτικό και να τις απεικονίσετε σε ένα διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας.

Απάντηση: Αρχικά, αφού το ψυκτικό είναι μίγμα υγρού και αερίου στο δοχείο, μπορούμε να πούμε ότι η κατάστασή του θα απεικονίζεται με ένα σημείο μέσα στην καμπάνα του R-134a. Αφού η θερμοκρασία είναι $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ τότε το σημείο αυτό θα είναι μεταξύ των σημείων Α

και Β που αντιστοιχούν στη θερμοκρασία των $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Επειδή δεν γνωρίζουμε την ακριβή ποσότητα υγρού και αερίου ψυκτικού, δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε ακριβώς το σημείο αυτό. Ας υποθέσουμε ότι είναι το Γ, όπως φαίνεται στο σχήμα. Προφανώς κάνοντας αυτές τις σκέψεις καταλαβαίνουμε ότι έχουμε βρει και την πίεση στο δοχείο, η οποία φαίνεται από το διάγραμμα ότι είναι 1 MPa .

Σύμφωνα με τη άσκηση αφού προσθέσουμε λίγη ποσότητα ψυκτικού, πάλι στο δοχείο θα έχουμε μίγμα υγρού και αερίου, άρα πάλι το σημείο που αντιστοιχεί στη νέα κατάσταση θα βρίσκεται μέσα στην καμπάνα. Μάλιστα, επειδή η θερμοκρασία έμεινε ή ίδια, πάλι το σημείο θα είναι μεταξύ Α και Β. Επειδή προστέθηκε ψυκτικό και δεν έχει αλλάξει η πίεση και η θερμοκρασία, ασφαλώς στο δοχείο αυξήθηκε η ποσότητα του υγρού σε σχέση με την ποσότητα του αερίου. Μειώθηκε δηλαδή ο βαθμός ξηρότητας, άρα το νέο σημείο που δείχνει στο διάγραμμα την κατάσταση του ψυκτικού θα είναι δεξιότερα από το Γ. Ας είναι το σημείο Δ, του οποίου τη θέση δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε με ακρίβεια ελλείψει στοιχείων.



Ερχόμαστε τώρα στη νέα μεταβολή που έχουμε ανοίγοντας το στόμιο του δοχείου. Η πίεση στο δοχείο ακαριαία θα πέσει στην μία ατμόσφαιρα, δηλαδή στο $0,1\text{ MPa}$. Η μεταβολή θεωρείται ότι γίνεται τόσο γρήγορα που δεν προλαβαίνει να γίνει συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον. Δηλαδή το ψυκτικό δεν αλλάζει την ενθαλπία του και στο διάγραμμα P-h θα είναι κατακόρυφα προς τα κάτω (σταθερή ενθαλπία) μέχρι την πίεση $0,1\text{ MPa}$. Στο διάγραμμα η μεταβολή είναι η κατακόρυφη γραμμή ΔΕ. Αμέσως μετά βέβαια θα αρχίσει η εξατμίσση του ψυκτικού στο δοχείο μέχρι να εξατμιστεί όλο. Έτσι η μεταβολή θα παριστάνεται από την ευθεία γραμμή ΕΖ, όπου το Ζ είναι το σημείο με βαθμό ξηρότητας 100% (γραμμή κορεσμένου ατμού στην καμπάνα), δηλαδή έχει εξατμιστεί όλο το υγρό.

Τα σημεία Ε και Ζ δείχνουν ότι η θερμοκρασία του ψυκτικού από τους $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ έπεσε απότομα στους $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$, σύμφωνα με το διάγραμμα. Αυτό ακριβώς περιγράφει την πραγματικότητα. Το ψυκτικό μόλις βρεθεί σε χαμηλή πίεση αρχίζει και απορροφά θερμότητα αρχικά από τον εαυτό του και μετά από το περιβάλλον του και εξατμίζεται. Η θερμοκρασία του πέφτει στη θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία βρασμού του, για την πίεση που βρίσκεται, εδώ δηλαδή για την πίεση της μιας ατμόσφαιρας. Αυτές οι λεπτομέρειες έχουν περιγραφεί στο δεύτερο κεφάλαιο.

Η συνολική μεταβολή στο ψυκτικό του δοχείου περιγράφεται από την γραμμή ΓΔΕΖ.

Κεφάλαιο 4. Απεικόνιση Ψυκτικού Κύκλου στο διάγραμμα P-h

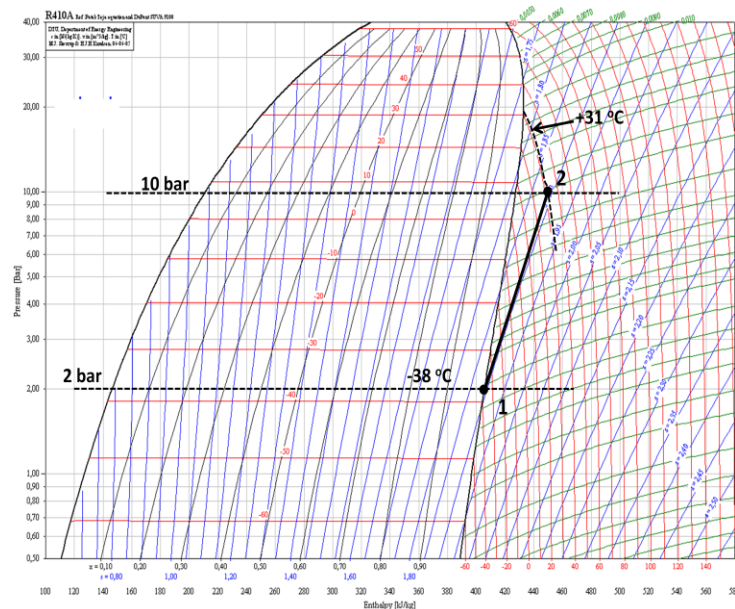
4.1. Ψυκτικός Κύκλος χωρίς υπερθέρμανση και χωρίς υπόψυξη

Να δούμε τώρα πως παριστάνεται στο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας ενός ψυκτικού μέσου μια πιο σύνθετη μεταβολή. Είναι ένας πλήρης ψυκτικός κύκλος στη διάταξη, όπως περιγράφηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Θα θεωρήσουμε ότι έχουμε τη διάταξη για παραγωγή ψύξης σε ένα κύκλωμα στο οποίο δεν έχουμε ούτε υπόψυξη του υγρού ούτε υπερθέρμανση του αερίου. Αυτό σημαίνει ότι από τον συμπυκνωτή στο εκτονωτικό μέσο (τριχοειδή σωλήνα, θερμοεκτονωτική βαλβίδα, κλπ) το υγρό πηγαίνει σε κορεσμένη μορφή. Επίσης, θεωρείται ότι μόλις τελειώνει η εξάτμιση το κορεσμένο αέριο αναρροφάται από τον συμπιεστή (μηδενική υπερθέρμανση).

Θα κάνουμε τον ψυκτικό κύκλο αναλύοντάς τον σε τέσσερις μικρότερες μεταβολές, τις οποίες θα μελετήσουμε διαδοχικά και μετά θα τις δούμε συνολικά. Η χάραξη του κύκλου θα γίνει με ένα συγκεκριμένο παράδειγμα. Οι 4 μεταβολές που θα περιγράψουμε είναι οι εξής:

1. **Κορεσμένος** ατμός του ψυκτικού R410A συμπιέζεται ισεντροπικά από πίεση 2 bar μέχρι την πίεση 10 bar σε ένα συμπιεστή. Να παραστήσετε στο διάγραμμα P-h του ψυκτικού R410A την μεταβολή και να υπολογίσετε τις θερμοκρασίες του ψυκτικού στην αρχή και στο τέλος της συμπίεσης.

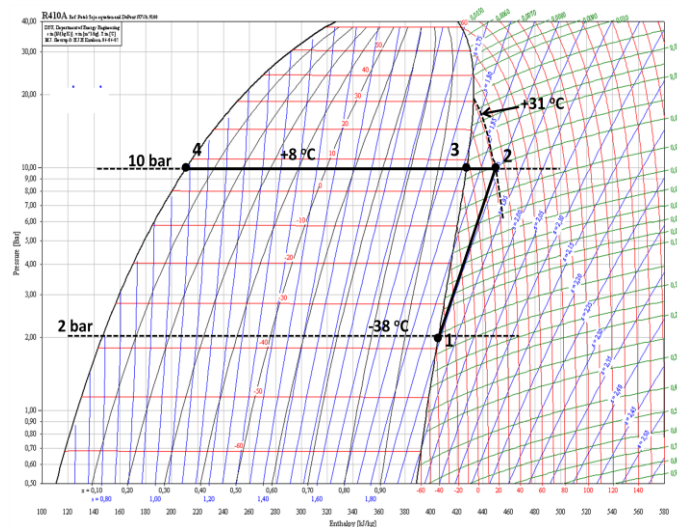
Απάντηση: Στο προηγούμενο κεφάλαιο δόθηκε ένα παράδειγμα ισεντροπικής συμπίεσης, αλλά εδώ έχουμε λίγο διαφορετική εκφώνηση, με διαφορετικά δεδομένα. Κατ' αρχάς φέρνουμε τις δύο (οριζόντιες) ισόθλιπτες των 2 και 10 bar, όπως φαίνονται στο σχήμα παρακάτω. Η ευθεία των 2 bar τέμνει την καμπύλη **κορεσμένου** ατμού στο σημείο 1, από το οποίο αρχίζει και η ισεντροπική συμπίεση, που μας λέει η εκφώνηση. Η συμπίεση θα σταματήσει όταν θα συναντήσει την ισόθλιπτη των 10 bar, και αυτό γίνεται στο σημείο 2 του διαγράμματος. Την ισεντροπική καμπύλη την χαράσσουμε σύμφωνα (σαν παράλληλη) με την γειτονική ισεντροπική καμπύλη των 1,90 kJ/kg·K, που έχει το διάγραμμα. Η γραμμή (12) παριστάνει τη ζητούμενη μεταβολή.



Θα βρούμε τώρα τις θερμοκρασίες στην αρχή και στο τέλος της συμπίεσης. Είναι οι θερμοκρασίες των ισοθερμοκρασιακών που περνούν από τα σημεία 1 και 2. Από το σημείο 1 περνά η ισοθερμοκρασιακή των $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$, που είναι και η θερμοκρασία εξάτμισης του ψυκτικού που αντιστοιχεί στην πίεση των 2 bar. Από το σημείο 2 περνά η ισοθερμοκρασιακή των $+31\text{ }^{\circ}\text{C}$, της οποίας ένα μέρος έχει σχεδιαστεί για διευκόλυνση. Αυτές είναι οι δύο θερμοκρασίες στην αρχή και στο τέλος της συμπίεσης.

- Υπέρθερμος ατμός του ψυκτικού R410A θερμοκρασίας $+31\text{ }^{\circ}\text{C}$ και πίεσης 10 bar ψύχεται ισόθλιπτα σε ένα στοιχείο (συμπυκνωτή) μέχρι να μετατραπεί όλος σε κορεσμένο υγρό. Να σχεδιάσετε τη μεταβολή στο διάγραμμα P-h και να βρείτε τη θερμοκρασία του υγρού στο τέλος της μεταβολής.

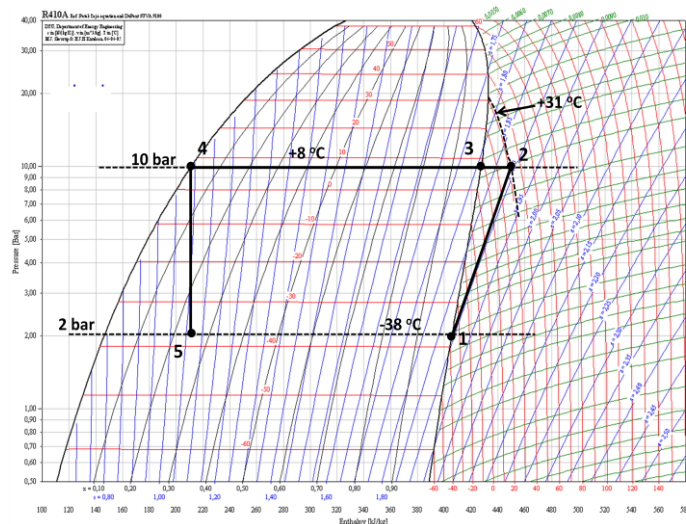
Απάντηση: Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η ζητούμενη μεταβολή μαζί με τη μεταβολή του προηγούμενου ερωτήματος. Ξεκινά από το σημείο 2 που τέλειωσε η συμπίεση του πρώτου ερωτήματος, και πηγαίνει οριζόντια ακολουθώντας την πίεση των 10 bar. Αν δεν είχαμε κάνει το πρώτο ερώτημα, θα βρίσκαμε το σημείο 2 σαν την τομή της ισοθερμοκρασιακής των $+31\text{ }^{\circ}\text{C}$ και τις ισόθλιπτης των 10 bar. Για τη μεταβολή που μας ζητάει τώρα, σκεφτόμαστε ότι αρχικά υπάρχει υπέρθερμος ατμός (κατάσταση 2) και ξεκινάμε να τον ψύχουμε. Η ψύξη θεωρείται ότι γίνεται ισόθλιπτα γιατί ο συμπιεστής εργάζεται συνεχώς συμπιέζοντας ολοένα καινούριο αέριο, διατηρώντας την πίεση στον συμπυκνωτή σταθερή. Για τον ίδιο λόγο και η εξάτμιση γίνεται ισόθλιπτα, αφού ο συμπιεστής αναρροφά συνεχώς ατμό από τον εξατμιστή. Κατά την ψύξη στο συμπυκνωτή, ο ατμός ψύχεται μέχρι να γίνει κορεσμένος και να φτάσει στο σημείο 3 του διαγράμματος που αρχίζει η συμπύκνωση (υγροποίηση). Όσο ψύχουμε τον συμπυκνωτή, τόσο το ψυκτικό υγροποιείται και αυξάνεται η ποσότητα του υγρού σε αυτόν. Άρα η μεταβολή προχωρά προς τα αριστερά μέχρι να συμπυκνωθεί όλο το υγρό και φτάνουμε στο σημείο 4 που έχουμε κορεσμένο υγρό (το σημείο 4 είναι η τομή της καμπύλης κορεσμένου υγρού του διαγράμματος με την ισόθλιπτη των 10 bar). Η θερμοκρασία του υγρού στο σημείο 4 είναι εκείνη που αντιστοιχεί στην πίεση των 10 bar της συμπύκνωσης (άρα μέσα στην καμπάνα) και στο διάγραμμα βρίσκουμε ότι είναι $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$.



- Κορεσμένο** υγρό του ψυκτικού R410A θερμοκρασίας $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ εκτονώνεται απότομα μέχρι την πίεση των 2 bar. Να παραστήσετε τη μεταβολή στο διάγραμμα P-h και να βρείτε τη θερμοκρασία και το βαθμό ξηρότητας του ρευστού στο τέλος της μεταβολής.

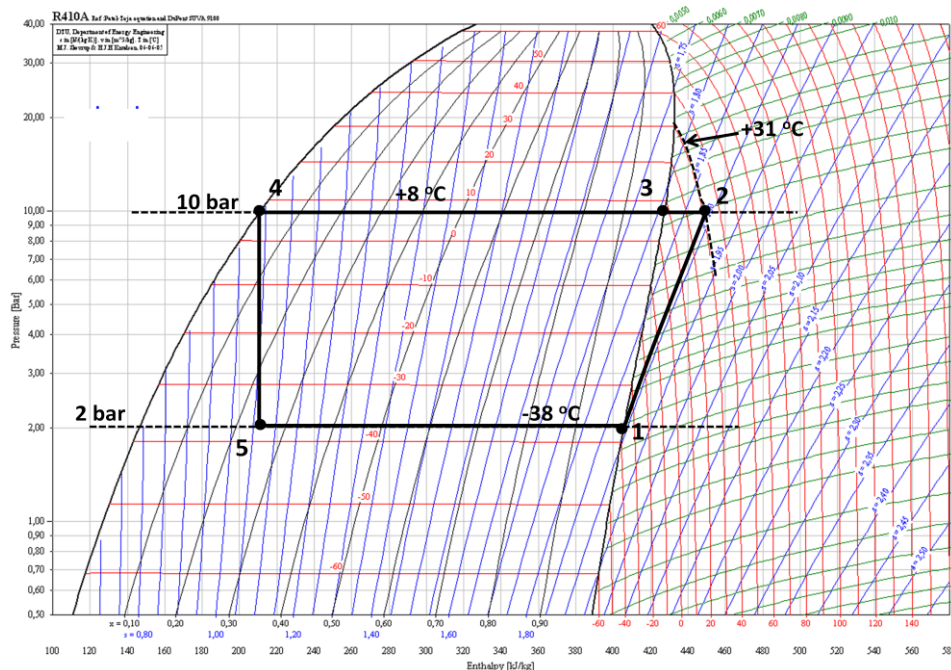
Απάντηση: Έχουμε πει ότι η εκτόνωση στα διαγράμματα θα παριστάνεται με κατακόρυφη ευθεία, ως ισενθαλπική μεταβολή. Τα στοιχεία που μας δίνονται δείχνουν ότι το κορεσμένο υγρό βρίσκεται στο σημείο 4 του προηγούμενου ερωτήματος. Επομένως φέρνουμε την ισενθαλπική μέχρι την πίεση των 2 bar, οπότε ορίζουμε το σημείο 5. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε τη μεταβολή της εκτόνωσης, που είναι η (45), μαζί με τις προηγούμενες μεταβολές.

Επειδή το σημείο 5 είναι μέσα στην καμπάνα, θα έχουμε μίγμα υγρού και αερίου στο τέλος της εκτόνωσης. Η θερμοκρασία του μίγματος που βρίσκουμε από το διάγραμμα είναι $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ και ο βαθμός ξηρότητας 0,25 (ή 25%).



4. Το ψυκτικό R410A με βαθμό ξηρότητας 0,25 εισέρχεται σε ένα στοιχείο εξατμιστή που επικρατεί πίεση 2 bar. Δηλαδή η κατάσταση αυτή επικρατεί στην είσοδο του εξατμιστή. Το ψυκτικό εξατμίζεται παίρνοντας τη θερμότητα του περιβάλλοντος και εξέρχεται από τον εξατμιστή σε κατάσταση **κορεσμένου** ατμού, μόλις δηλαδή τελειώνει η εξάτμισή του. Να παραστήσετε στο διάγραμμα P-h τη μεταβολή.

Απάντηση: Στην ουσία στον εξατμιστή έχουμε θέρμανση του ρευστού, από την οποία προκύπτει και η εξάτμισή του. Το ψυκτικό φθάνει στον εξατμιστή σε θερμοκρασία $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$, την οποία απέκτησε περνώντας από το εκτονωτικό μέσο όταν μειώθηκε η πίεσή του από τα 10 bar στα 2 bar. Το ότι η θερμοκρασία του είναι $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ το βρίσκουμε από το διάγραμμα (βλέπε επόμενο σχήμα) με την τομή της ισόθλιπτης των 2 bar, που λέει η εκφώνηση, και της καμπύλης με βαθμό ξηρότητας 0,25. Στο εκτονωτικό μέσο έχει αρχίσει ήδη η εξάτμιση, γι αυτό και στο σημείο 5 έχουμε και μια ποσότητα αερίου. Η εξάτμιση στον εξατμιστή γίνεται με σταθερή πίεση 2 bar, επομένως θα παριστάνεται με την ισόθλιπτη που ξεκινά από το σημείο 5 και θα σταματά στην καμπύλη **κορεσμένου** ατμού, σύμφωνα με την εκφώνηση. Αυτό το σημείο είναι το σημείο 1 από το οποίο ξεκίνησε η συμπίεση του πρώτου ερωτήματος, αφού έχουμε πίεση 2 bar και ο ατμός είναι κορεσμένος. Επομένως φτάσαμε στο σημείο έναρξης των μεταβολών. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η μεταβολή της εξάτμισης, αλλά και όλες οι προηγούμενες μεταβολές.



Η μεταβολή (123451) παριστάνει τον λεγόμενο ψυκτικό κύκλο, χωρίς υπερθέρμανση και υπόψυξη. Σύμφωνα με όσα είπαμε ο κύκλος έχει αριστερόστροφη φορά, αντίθετα δηλαδή από την φορά των δειχτών του ρολογιού. Αυτή είναι μία από τις διαφορές που έχει ο ψυκτικός από τους θερμικούς κύκλους, οι οποίοι είναι δεξιόστροφοι. Στους θερμικούς κύκλους (μηχανές εσωτερικής καύσης) η φορά προς τα δεξιά σημαίνει ότι παράγουν έργο, ενώ στον ψυκτικό κύκλο καταναλώνεται ενέργεια.

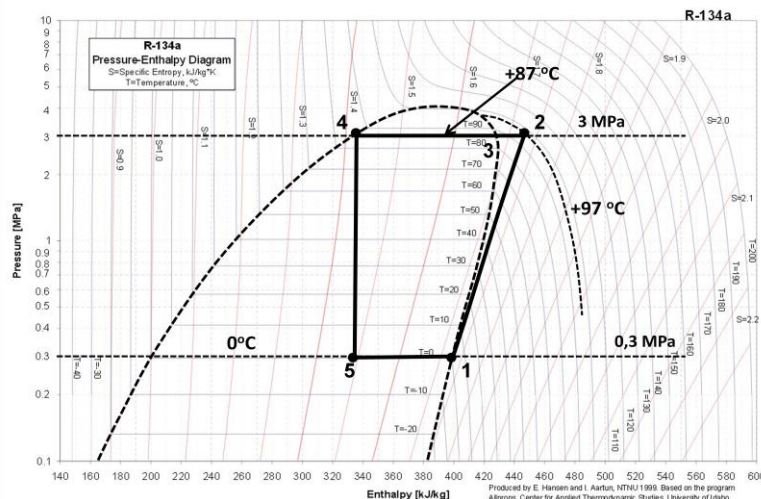
Στο σχολικό βιβλίο έχουν τοποθετηθεί βελάκια που δείχνουν τη φορά του ψυκτικού κύκλου, πράγμα που εμείς εδώ δεν κάναμε αφού εννοείται. Είδαμε πως χαράσσεται ένας απλός ψυκτικός κύκλος. Περιλαμβάνει τέσσερις επί μέρους μεταβολές, οι οποίες συνοπτικά είναι οι εξής:

1. **Ισεντροπική συμπίεση.** Γίνεται στον συμπιεστή και παίρνει από την αναρρόφηση ΑΕΡΙΟ χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας και στην κατάθλιψη δίνει ΑΕΡΙΟ υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Στο προηγούμενο διάγραμμα παριστάνεται με την γραμμή (12).
2. **Ισόθλιπτη ψύξη.** Γίνεται στον συμπυκνωτή. Στην είσοδο έχουμε ΑΕΡΙΟ υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης και στην έξοδο έχουμε ΥΓΡΟ με ίδια πίεση και λίγο χαμηλότερη θερμοκρασία. Στο προηγούμενο διάγραμμα παριστάνεται με την γραμμή (234).
3. **Ισενθαλπική εκτόνωση.** Γίνεται στο εκτονωτικό μέσο. Σε αυτό μπαίνει ΥΓΡΟ με μεγάλη πίεση και μεγάλη σχετικά θερμοκρασία και στην έξοδο έχουμε ΜΙΓΜΑ ΥΓΡΟΥ-ΑΕΡΙΟΥ χαμηλής πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας. Στο προηγούμενο διάγραμμα παριστάνεται με την γραμμή (45).
4. **Ισόθλιπτη θέρμανση.** Γίνεται στον εξατμιστή και στην είσοδο εισέρχεται ΜΙΓΜΑ ΥΓΡΟΥ-ΑΕΡΙΟΥ και εξέρχεται ΑΕΡΙΟ που πηγαίνει στην αναρρόφηση του συμπιεστή. Στο προηγούμενο διάγραμμα παριστάνεται με την γραμμή (51).

Για την χάραξη του διαγράμματος φαίνεται ότι χρειάζονται πολλά στοιχεία από την κατάσταση του ψυκτικού σε διάφορα στάδια. Όμως δεν είναι έτσι. Για τη χάραξη ενός ψυκτικού κύκλου που δεν έχει υπόψυξη και υπερθέρμανση, χρειάζονται μόνο δύο στοιχεία, τα οποία όμως να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Για παράδειγμα μπορούμε να χαράξουμε τον ψυκτικό κύκλο γνωρίζοντας μόνο την χαμηλή και την υψηλή πίεση. Επίσης, γίνεται με το να γνωρίζουμε τη θερμοκρασία εξάτμισης στον εξατμιστή και την θερμοκρασία συμπύκνωσης αλλά και διάφορα άλλα ζεύγη μεγεθών.

Θα δώσουμε μερικά παραδείγματα χάραξης απλών ψυκτικών κύκλων.

Παράδειγμα 6. Να χαράξετε ψυκτικό κύκλο (χωρίς υπόψυξη και υπερθέρμανση) στο ψυκτικό μέσο R-134a όταν η χαμηλή πίεση είναι 3 bar (0,3 MPa) και η υψηλή 30 bar (3 MPa). Δόθηκαν ακραίες τιμές στις πιέσεις για να είναι πιο ευκρινής η χάραξη του ψυκτικού κύκλου στο διάγραμμα του R-134a.



Απάντηση: Στο διάγραμμα P-h του ψυκτικού R-134a ξεκινάμε φέρνοντας τις δύο οριζόντιες ισόθλιπτες στα 0,3 και 3 MPa. Φαίνονται στο προηγούμενο σχήμα. Από τις θερμοκρασίες που αντιστοιχούν σε αυτές τις πιέσεις μέσα στην καμπάνα, καταλαβαίνουμε ότι η εξάτμιση γίνεται στους 0 °C ενώ η συμπύκνωση στους 87 °C. Η ευθεία των 0,3 MPa τέμνει την καμπύλη κορεσμένου ατμού στο σημείο 1, από το οποίο θα ξεκινήσει η συμπίεση. Αυτό θα γίνει έτσι διότι δεν έχουμε υπερθέρμανση στον εξατμιστή ούτε και μετά από αυτόν, οπότε το αέριο θα μπει κορεσμένο στο συμπιεστή.

Θα δούμε τώρα μία-μία τις τέσσερις μεταβολές για τη χάραξη του Ψυκτικού κύκλου:

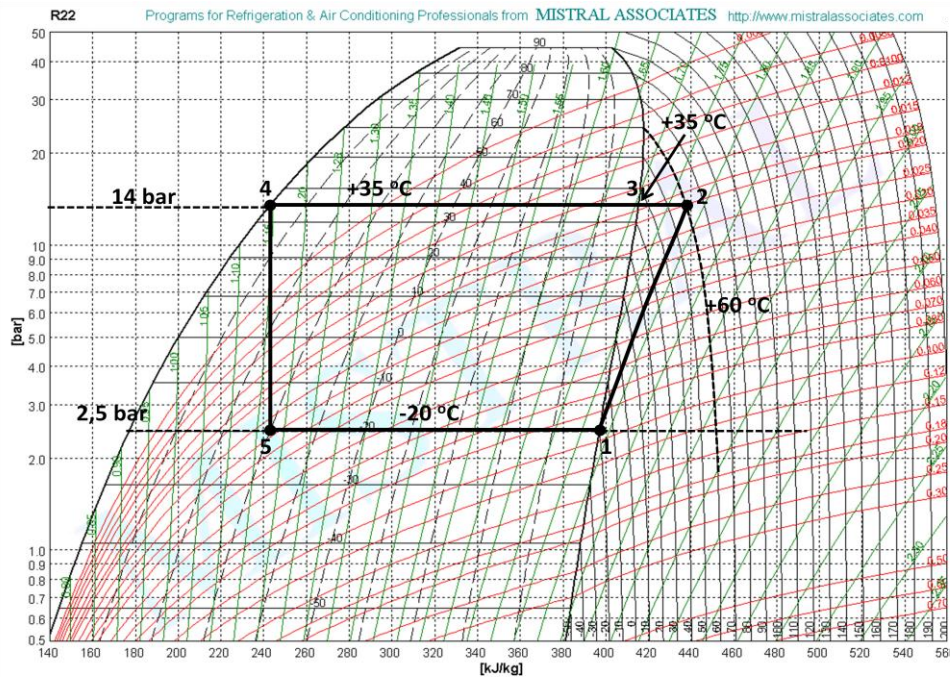
1. Η ισεντροπική συμπίεση θα ακολουθήσει, σαν να είναι παράλληλη, την πλησιέστερη ισεντροπική, που εδώ είναι η $S=1,75 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$. Την βλέπουμε στο διάγραμμα και είναι η καμπύλη (12). Τελειώνει στο 2 όπου αυτή τέμνει την ισόθλιπτη των 3 MPa. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι από το 2 περνά η ισοθερμοκρασιακή των +97 °C.
2. Η μεταβολή που ακολουθεί είναι η (234). Γίνεται στον συμπυκνωτή και είναι ισόθλιπτη. Από το 2 ως το 3 ψύχεται ο ατμός και από υπέρθερμος γίνεται κορεσμένος στο 3. Στο 3 αρχίζει η συμπύκνωση με ταυτόχρονη ψύξη, μέχρι το ψυκτικό να γίνει κορεσμένο υγρό, αφού σύμφωνα με την εκφώνηση δεν έχουμε υπόψυξη. Η κατάσταση του κορεσμένου υγρού είναι στο 4.
3. Από το σημείο 4 ως το 5 έχουμε την εκτόνωση (στον τριχοειδή σωλήνα ή στην εκτονωτική βαλβίδα) του ψυκτικού και τη μετατροπή του σε μίγμα υγρού - αερίου με πτώση της πίεσης στα 0,3 MPa. Η χάραξη γίνεται με μια κατακόρυφη προς τα κάτω ευθεία από το σημείο 4 μέχρι να συναντήσει την ισόθλιπτη των 0,3 MPa στο σημείο 5.
4. Το σημείο 5 δείχνει την κατάσταση του ψυκτικού κατά την είσοδό του στον εξατμιστή. Είναι μίγμα υγρού και αερίου και εκεί αρχίζει η θέρμανσή του από τον χώρο που ψύχει ο εξατμιστής. Γι αυτό συνεχίζεται η εξάτμιση που άρχισε στο εκτονωτικό μέσο και η μεταβολή είναι η ισόθλιπτη ευθεία προς μεγαλύτερες ενθαλπίες μέχρι να συναντήσει το σημείο 1. Εκεί είναι η κατάσταση κορεσμένου ατμού όπου τελειώνει η εξάτμιση και το αέριο μπαίνει στον συμπιεστή.

Παράδειγμα 7. Να χαράξετε ψυκτικό κύκλο (χωρίς υπόψυξη και υπερθέρμανση) στο ψυκτικό μέσο R22 όταν η θερμοκρασία στην έξοδο του εξατμιστή είναι -20 °C και η θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή είναι +60 °C.

Απάντηση: Το διάγραμμα που σας δίνουμε για να γίνει η χάραξη του ψυκτικού κύκλου σε αυτό το παράδειγμα, είναι διαφορετικό από εκείνο που έχει το σχολικό βιβλίο, αλλά έγινε διότι είναι πιο καθαρό και ευκρινές.

Για τη χάραξη ξεκινάμε από τα δύο δεδομένα του προβλήματος: τις δύο θερμοκρασίες. Για τη θερμοκρασία των -20 °C έχουμε να πούμε ότι αφού δεν έχουμε υπερθέρμανση θα είναι η θερμοκρασία που γίνεται η εξάτμιση και θα επικρατεί σε όλο τον εξατμιστή. Θα είναι επίσης και η θερμοκρασία που αρχίζει η συμπίεση, η οποία είναι, ως γνωστόν, ισεντροπική. Επομένως ξεκινάμε με τη χάραξη της ισόθλιπτης που περιέχει τη θερμοκρασία μέσα στην καμπάνα των -20 °C. Βλέπουμε ότι αντιστοιχεί σε πίεση 2,5 bar. Στο διάγραμμα του R22 είναι η πρώτη που χαράσσουμε. Σημειώνουμε με 1 το σημείο της τομής της με την καμπύλη κορεσμένου ατμού, από όπου θα ξεκινήσει η ισεντροπική συμπίεση, την οποία και χαράσσουμε κατά τα γνωστά, όσο γίνεται δηλαδή πιο κοντά στην πλησιέστερη ισεντροπική του διαγράμματος που έχουμε. Αφού η συμπίεση θα τελειώσει στη θερμοκρασία +60 °C θα βρούμε που η ισεντροπική που χαράξαμε θα συναντήσει την ισοθερμοκρασιακή των +60 °C. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται αυτές οι δύο καμπύλες. Το σημείο τομής τους είναι το 2.

Από το σημείο 2 θα ξεκινήσει η ισόθλιπτη ψύξη του ψυκτικού στο συμπυκνωτή. Στο σημείο 2 έχουμε προφανώς υπέρθερμο ατμό, ο οποίος ψύχεται. Επειδή η συμπύκνωση είναι ισόθλιπτη, από το σημείο 2 θα φέρουμε την οριζόντια ευθεία γραμμή και διαπιστώνουμε ότι αντιστοιχεί στην πίεση των 14 bar. Η ίδια γραμμή είναι που μας δείχνει ότι η συμπύκνωση θα αρχίσει στους +35 °C, αφού εκεί τέμνει την καμπύλη κορεσμένου ατμού. Η γραμμή θα συνεχιστεί μέχρι να συναντήσει την καμπύλη κορεσμένου υγρού, αφού γνωρίζουμε ότι στο εκτονωτικό μέσο το υγρό πηγαίνει χωρίς υπόψυξη, άρα κορεσμένο. Η συνάντηση γίνεται στο σημείο 4.



Στο σημείο 4 αρχίζει η ισενθαλπική εκτόνωση, άρα ο κύκλος προχωρά κατακόρυφα προς τα κάτω, μέχρι να συναντήσει την προαναφερθείσα πίεση των 2,5 bar. Τα 2,5 bar είναι η πίεση που εισέρχεται το ψυκτικό στο συμπιεστή, αλλά αφού δεν έχουμε υπερθέρμανση και είναι γνωστό ότι η εξάτμιση στον εξατμιστή γίνεται υπό σταθερή πίεση, θα είναι και η πίεση στον εξατμιστή. Γι αυτό το λόγο η εκτόνωση φτάνει μέχρι την πίεση 2,5 bar, όπου σημειώνουμε το σημείο 5 και είναι η έξοδος του εκτονωτικού μέσου και η είσοδος του εξατμιστή.

Μετά το εκτονωτικό μέσο το ψυκτικό εισέρχεται στον εξατμιστή και στην πίεση των 2,5 bar εξατμίζεται και ο ψυκτικός κύκλος προχωρά από το σημείο 5 στο σημείο 1, που είναι ταυτόχρονα έξοδος του εξατμιστή και είσοδος του συμπιεστή.

Έτσι ολοκληρώνεται ο ζητούμενος ψυκτικός κύκλος και έχει χαραχτεί στο παραπάνω διάγραμμα του μέσου R22.

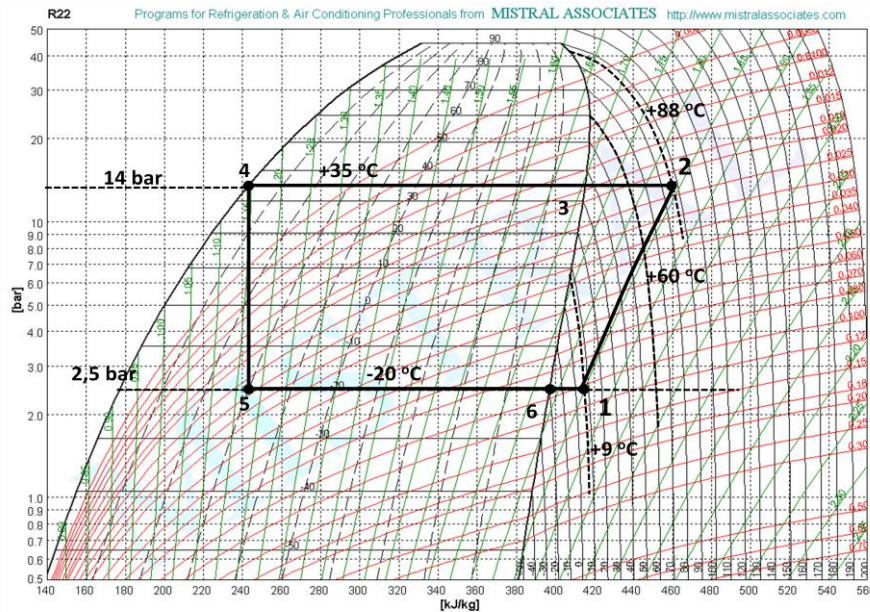
4.2. Ψυκτικός Κύκλος με υπερθέρμανση και υπόψυξη

Θα προχωρήσουμε τώρα στη χάραξη ενός ψυκτικού κύκλου που ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα, αφού θα περιλαμβάνει και υπερθέρμανση και υπόψυξη. Μετά την εξάτμιση όλου του υγρού ψυκτικού μέσου στον εξατμιστή, πάντα η θερμοκρασία του αερίου από εκεί και μετά αυξάνεται μέχρι να φθάσει στον συμπιεστή. Ή τουλάχιστον, έτσι πρέπει να γίνεται. Δηλαδή στο συμπιεστή φθάνει υπέρθερμος ατμός. Να προσέξουμε ότι στη χάραξη του ψυκτικού κύκλου δεν ξεχωρίζουμε την υπερθέρμανση σε εκείνη που γίνεται μέσα στον εξατμιστή και σε εκείνη που γίνεται στη γραμμή (σωλήνωση) της αναρρόφησης.

Όταν στη χάραξη του ψυκτικού κύκλου λέμε υπερθέρμανση, εννοούμε τη διαφορά θερμοκρασίας του ψυκτικού στην είσοδο του συμπιεστή από τη θερμοκρασία εξάτμισης, δηλαδή τη θερμοκρασία στην είσοδο του εξατμιστή.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το προηγούμενο παράδειγμα, αλλά έχει γίνει υπερθέρμανση του ψυκτικού κατά 29 °C. Όλα τα υπόλοιπα μεγέθη έμειναν τα ίδια. Επομένως, η εξάτμιση που έγινε στους -20 °C, συνεχίστηκε με θέρμανση του αερίου. Από τη στιγμή που τελείωσε η εξάτμιση, μέχρι το ψυκτικό να φτάσει στον συμπιεστή, η θερμοκρασία ανέβηκε κατά 29 °C, άρα έφτασε στους +9 °C. Σε αυτή τη θερμοκρασία ξεκίνησε η συμπίεση (σημείο 1 του κύκλου). Αφού όμως η συμπίεση ξεκίνησε σε διαφορετική θερμοκρασία, τότε σε μεγαλύτερη θερμοκρασία θα είναι το αέριο στην έξοδό του από το συμπιεστή. Πράγματι κάνοντας τον νέο ψυκτικό κύκλο βρίσκουμε ότι θα εξέλθει με θερμοκρασία +88 °C, αντί για +60 °C που ήταν στην προηγούμενη περίπτωση.

Στο διάγραμμα η υπερθέρμανση είναι το τμήμα (61).



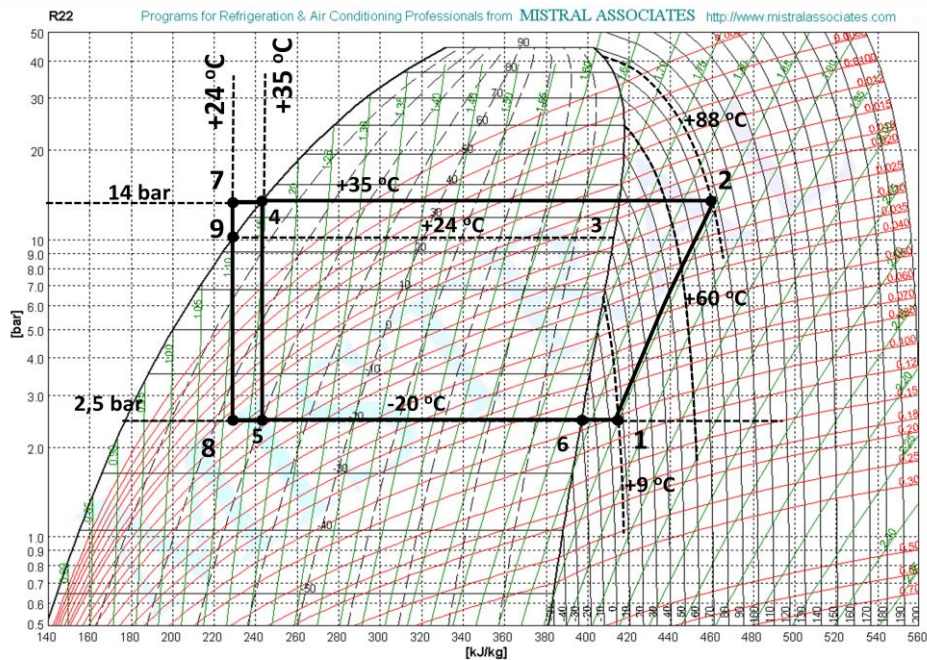
Να προσέξουμε ότι αν το αέριο μπει στο συμπιεστή με θερμοκρασία κατά 29°C υψηλότερη από πριν (ή οποιαδήποτε άλλη διαφορά), αυτό δε σημαίνει ότι θα εξέλθει με 29°C υψηλότερη θερμοκρασία. Αν αυτό συμβεί θα είναι σύμπτωση. Βέβαια περίπου τόση θα είναι η διαφορά, αλλά δεν μπορούμε να το ισχυριστούμε και να μην το βρούμε μέσω του διαγράμματος. Κατά τα άλλα, βλέπουμε ότι ο ψυκτικός κύκλος δεν αλλάζει όταν έχουμε υπερθέρμανση. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, όπως και στα άλλα που θα ακολουθήσουν στις χαράξεις ψυκτικών κύκλων, δεν γνωρίζουμε σε ποιο σημείο έχουμε την έξοδο του ψυκτικού από τον εξατμιστή. Όταν μας ζητήσουν να κάνουμε τον κύκλο με μια συγκεκριμένη υπερθέρμανση, προεκτείνουμε την ισόθλιπτη του εξατμιστή μέχρι να συναντήσει την ισοθερμοκρασιακή που αντιστοιχεί στη δεδομένη υπερθέρμανση. Δηλαδή προσθέτουμε στη θερμοκρασία εξατμίστη (σημείο 5 και 6 του διαγράμματος) την υπερθέρμανση και η θερμοκρασία που προκύπτει μας προσδιορίζει την ισοθερμοκρασιακή που θα πάμε να συναντήσουμε με την ισόθλιπτη. Έτσι βρίσκουμε το νέο σημείο 1 που αρχίζει η συμπίεση.

Ερχόμαστε τώρα στην υπόψυξη. Είπαμε ότι γίνεται με παραπάνω ψύξη του υγρού, από τη στιγμή της συμπύκνωσης μέχρι να φτάσει στην είσοδο του εκτονωτικού μέσου. Η υπόψυξη δεν είναι ποτέ αρκετά μεγάλη, όπως η υπερθέρμανση, γιατί είναι δυσκολότερο να ψυχθεί ένα υγρό σε σχέση με ένα αέριο. Έτσι η υπόψυξη είναι συνήθως $2-5^{\circ}\text{C}$. Επειδή γίνεται μετά την ολοκλήρωση της συμπύκνωσης (σημείο 4 του απλού ψυκτικού κύκλου), θα χαραχτεί μετά τη συνάντηση της ισόθλιπτης του συμπυκνωτή με την καμπύλη κορεσμένου υγρού. Θα πάει δηλαδή λίγο πιο αριστερά και μετά θα αρχίσει η εκτόνωση. Στο επόμενο διάγραμμα πήραμε ξανά το προηγούμενο παράδειγμα και χαραμάμε μια υπόψυξη, προσθέτοντάς την στον ψυκτικό κύκλο. Η υπόψυξη ήταν 11°C , σχετικά μεγάλη, για να είναι πιο ευδιάκριτη στο διάγραμμα. Αφού η συμπύκνωση έγινε στους $+35^{\circ}\text{C}$ και η υπόψυξη είναι 11°C , τότε το ψυκτικό θα εισέλθει στο εκτονωτικό μέσο με θερμοκρασία 24°C ($= 35 - 11$).

Η υπόψυξη σχεδιάζεται, όπως είπαμε, μετά την συμπύκνωση (34) και φαίνεται στο διάγραμμα ως το ευθύγραμμο τμήμα (47). Το σημείο 7 το βρίσκουμε από την ισοθερμοκρασιακή των $+24^{\circ}\text{C}$ που βρίσκεται αριστερά από την καμπάνα, στην περιοχή υγρού και πηγαίνει προς τα επάνω σχεδόν κατακόρυφα, όπως γνωρίζουμε. Στο διάγραμμα του σχήματος αυτή η ισοθερμοκρασιακή δεν υπάρχει, αλλά μπορούμε να τη βρούμε από την ισοθερμοκρασιακή των $+24^{\circ}\text{C}$ που βρίσκεται μέσα στην καμπάνα (έχει σχεδιαστεί στο παρακάτω διάγραμμα) και από το σημείο που τέμνει την καμπύλη κορεσμένου υγρού να υψώσουμε κατακόρυφη (σημείο 9 του σχήματος). Αφού το σημείο έναρξης της εκτόνωσης πήγε λίγο πιο αριστερά, το ίδιο θα μετατοπιστεί και όλη η ευθεία της εκτόνωσης. Η νέα γραμμή που την παριστάνει είναι η (78) του ανωτέρω σχήματος.

Το διάγραμμα του ψυκτικού κύκλου (1234798561) που έχει χαραχτεί στο παρακάτω διάγραμμα P-h για το ψυκτικό R22 είναι ένας πλήρης ψυκτικός κύκλος. Τα μόνα που δεν

εμφανίζονται σε αυτόν είναι τυχόν απώλειες πίεσης στις σωληνώσεις και στα εξαρτήματα. Όμως στο σχολικό βιβλίο δεν ζητείται κάτι περισσότερο.



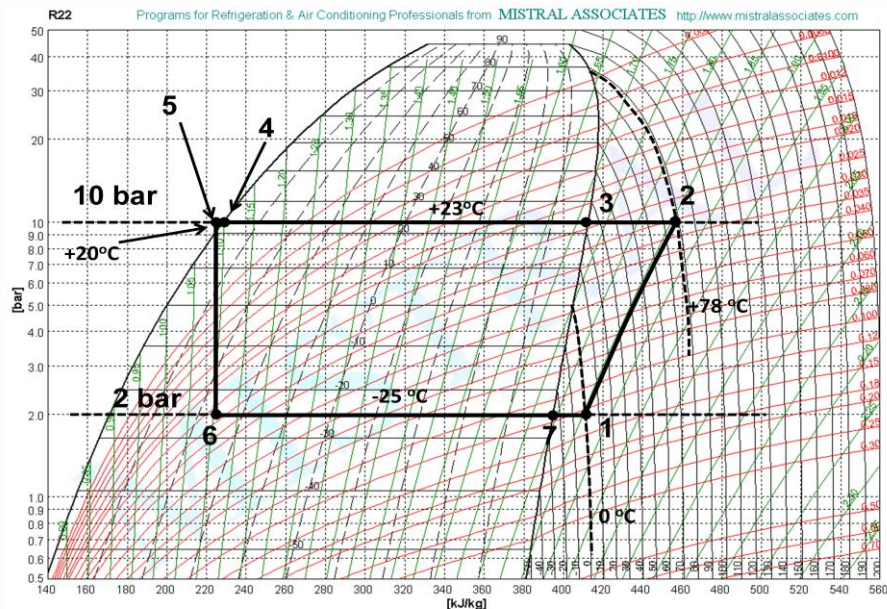
Είπαμε νωρίτερα ότι για να χαράξουμε ένα ψυκτικό κύκλο χωρίς υπερθέρμανση και χωρίς υπόψυξη χρειαζόμαστε δύο ανεξάρτητα μεγέθη. Για να χαράξουμε τον κύκλο με υπερθέρμανση (χωρίς υπόψυξη) χρειαζόμαστε ακόμα ένα μέγεθος, συνολικά τρία. Και αν έχει επί πλέον και υπόψυξη χρειαζόμαστε τέσσερα συνολικά μεγέθη. Προσέχουμε ότι τα μεγέθη που μας δίνουν πρέπει να είναι ανεξάρτητα, δηλαδή να μην μπορούμε να βρούμε το ένα μέσω του άλλου. Δηλαδή αν ξέρουμε π.χ. τη θερμοκρασία εξατμίσης του ψυκτικού R22 στον εξατμιστή (για παράδειγμα -20°C) και μας δώσουν και την πίεση πάλι στον εξατμιστή, δεν θεωρείται νέο δεδομένο, αφού στους -20°C ξέρουμε έτσι κι αλλιώς ότι η αντίστοιχη πίεση θα είναι 2,5 bar. Ούτε να μας δώσουν την πίεση στην είσοδο του συμπιεστή αφού πάλι είναι γνωστή, 2,5 bar. Ας μας δώσουν την πίεση στον συμπυκνωτή.

Θα δούμε τώρα μερικά παραδείγματα.

Παράδειγμα 8. Να κατασκευάσετε στο διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας του ψυκτικού μέσου R22 τον ψυκτικό κύκλο όταν γνωρίζετε τα εξής: πίεση στον εξατμιστή 2 bar, πίεση στον συμπυκνωτή 10 bar, θερμοκρασία ψυκτικού στην είσοδο του συμπιεστή 0°C και υπόψυξη 3°C . Να προσδιορίσετε επίσης τα εξής στοιχεία του ψυκτικού κύκλου: θερμοκρασία εξατμίσης, θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή, θερμοκρασία συμπύκνωσης, βαθμός ζηρότητας στην είσοδο του εξατμιστή.

Απάντηση: Για τον κύκλο δεν μας δίνεται αν έχει υπερθέρμανση ή όχι. Αυτό θα το διαπιστώσουμε κατά τη χάραξη του κύκλου. Ξεκινάμε τραβώντας την οριζόντια ισόθλιπτη ευθεία στα 2 bar. Διαπιστώνουμε ότι η θερμοκρασία εξατμίσης που αντιστοιχεί στην πίεση αυτή είναι -25°C . Βλέπουμε στο επόμενο σχήμα ότι τέμνει την καμπύλη κορεσμένου ατμού στο 7. Αν δεν είχαμε υπερθέρμανση θα ξεκινούσε από το 7 η συμπίεση, αφού όμως ξεκινά από τους 0°C θα προεκτείνουμε την ισόθλιπτη των 2 bar μέχρι να συναντήσει την ισοθερμοκρασιακή των 0°C . Εκεί είναι το σημείο 1 απ' όπου ξεκινά η συμπίεση. Θα χαράξουμε τη συμπίεση ξεκινώντας από το 1 και ακολουθώντας ισεντροπική μεταβολή κατά τα γνωστά (παράλληλα σε μια υπάρχουσα ισεντροπική κοντινή καμπύλη). Η συμπίεση θα τελειώσει στην ισόθλιπτη των 10 bar (την οποία χαράσσουμε στο διάγραμμα), σύμφωνα με την εκφώνηση, αφού ως γνωστόν η πίεση του συμπυκνωτή είναι και η πίεση στην έξοδο του συμπιεστή. Σημειώνουμε το σημείο 2 και διαπιστώνουμε ότι από αυτό περνά η ισοθερμοκρασιακή των $+78^{\circ}\text{C}$, που προσδιορίζει τη θερμοκρασία εξόδου του αερίου από το συμπιεστή.

Η μεταβολή στο συμπυκνωτή παριστάνεται με την ευθεία (2345), που είναι η ισόθλιπτη στα 10 bar. Το σημείο 3 δείχνει την έναρξη της συμπύκνωσης και φαίνεται ότι γίνεται όταν η θερμοκρασία του ψυκτικού φθάσει στους $+23^{\circ}\text{C}$. Η συμπύκνωση (όχι το τέλος του συμπυκνωτή) ολοκληρώνεται στο σημείο 4 που η ισόθλιπτη συναντά την καμπύλη κορεσμένου υγρού. Όμως η ψύξη του υγρού συνεχίζεται για άλλους τρεις βαθμούς Κελσίου, και φθάνει στο εκτονωτικό μέσο με θερμοκρασία $+20^{\circ}\text{C}$. Στο διάγραμμα το σημείο 5 το βρίσκουμε προχωρώντας από το σημείο 4 κατά 3°C και συναντάμε την ισοθερμοκρασιακή των $+20^{\circ}\text{C}$, όπως εξηγήσαμε στην αμέσως προηγούμενη ανάλυση που κάναμε.



Από το σημείο 5 χαράσσουμε την κατακόρυφη ευθεία γραμμή μέχρι να συναντήσει την ισόθλιπτη των 2 bar. Εκεί σημειώνουμε το σημείο 6, από το οποίο περνά (υπολογίζουμε με το μάτι) η καμπύλη με το βαθμό ξηρότητας 76%. Από το σημείο 6 ως το 7 έχουμε την εξάτμιση του ψυκτικού. Στο σημείο 7 τελειώνει η εξάτμιση και αρχίζει η υπερθέρμανση του αερίου. Η οριζόντια ευθεία (67) που αντιπροσωπεύει την εξάτμιση, βλέπουμε ότι αντιστοιχεί στη θερμοκρασία των -25°C , που είναι η θερμοκρασία εξάτμισης του ψυκτικού για την συγκεκριμένη πίεση. Έτσι ολοκληρώνεται η χάραξη του ζητούμενου ψυκτικού κύκλου. Μπορούμε να συγκεντρώσουμε τις μεταβολές ως εξής:

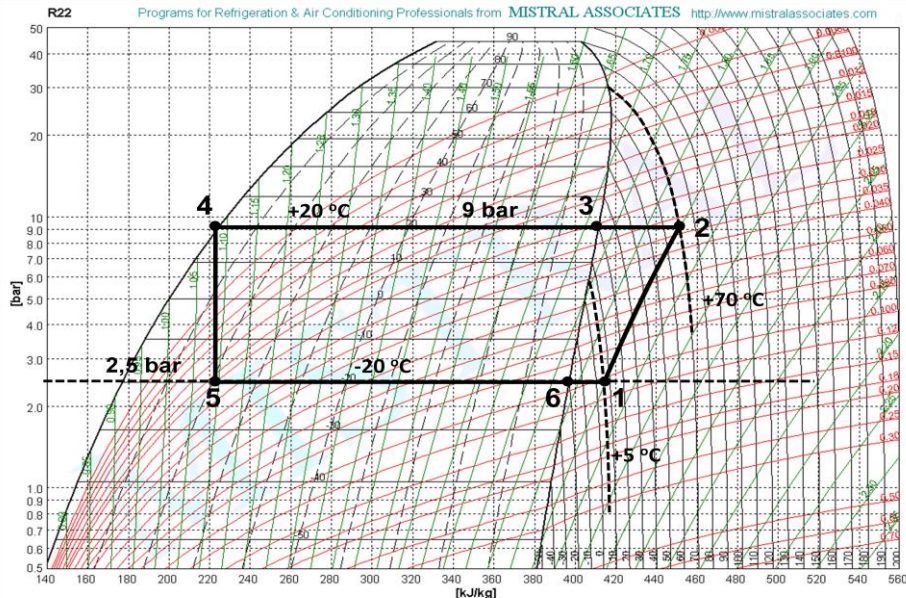
1. (12): Ισεντροπική συμπίεση αερίου. ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ
2. (23): Ισόθλιπτη ψύξη υπέρθερμου ατμού μέχρι να γίνει κορεσμένος. ΚΑΤΑΘΛΙΨΗ, ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ
- (34): Ισόθλιπτη συμπύκνωση αερίου σε υγρό. ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ
- (45): Ισόθλιπτη υπόψυξη υγρού. ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ
3. (56): Ισενθαλπική εκτόνωση. ΕΚΤΟΝΩΤΙΚΟ ΜΕΣΟ
4. (67): Ισόθλιπτη εξάτμιση υγρού μέχρι να γίνει κορεσμένος ατμός. ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΣ
- (71): Ισόθλιπτη υπερθέρμανση ατμού. ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΣ, ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗ

Σημείωση: Η υπόψυξη γίνεται μέσα στον συμπυκνωτή αλλά και στη σωλήνωση από το συμπυκνωτή μέχρι το εκτονωτικό μέσο.

Παράδειγμα 9. Να χαράξετε στο διάγραμμα P-h του ψυκτικού μέσου R22 τον ψυκτικό κύκλο χωρίς υπόψυξη, όταν γνωρίζετε ότι η θερμοκρασία στην είσοδο του συμπιεστή είναι $+5^{\circ}\text{C}$, η θερμοκρασία στην έξοδό του είναι $+70^{\circ}\text{C}$ και η θερμοκρασία εξάτμισης είναι -20°C .

Απάντηση: Για τη χάραξη του ψυκτικού κύκλου θα ακολουθήσουμε τη γνωστή διαδικασία: από τα δεδομένα στοιχεία του προβλήματος θα αξιοποιήσουμε αρχικά εκείνο ή εκείνα που μας δίνουν τη δυνατότητα να χαράξουμε συγκεκριμένες ευθείες. Εδώ είναι η θερμοκρασία εξάτμισης, που μας επιτρέπει να βρούμε μέσω του διαγράμματος την ευθεία που αντιστοιχεί στην πίεση υπό την οποία γίνεται η εξάτμιση. Όπως φαίνεται και στο επόμενο διάγραμμα είναι τα 2,5 bar. Επομένως αρχίζουμε χαράσσοντας την ισόθλιπτη στα 2,5 bar (ή θα

μπορούσαμε να πούμε: στη θερμοκρασία εξάτμισης -20°C). Από ένα σημείο αυτής της ευθείας ξεκινά η συμπίεση και πρέπει να το προσδιορίσουμε. Το βρίσκουμε εύκολα αν σκεφτούμε ότι η συμπίεση ξεκινά στους $+5^{\circ}\text{C}$, άρα το σημείο 1 που ξεκινά η συμπίεση είναι η τομή της ισόθλιπτης των 2,5 bar με την ισοθερμοκρασιακή των $+5^{\circ}\text{C}$. Χαράσσοντας και την ισοθερμοκρασιακή βρίσκουμε το σημείο 1. Από εκεί ακολουθούμε την ισεντροπική γραμμή που θα σταματήσει στη θερμοκρασία του αερίου στην έξοδο του συμπιεστή, τους $+70^{\circ}\text{C}$. Άρα το σημείο 2, που τελειώνει η συμπίεση, είναι η τομή της ισεντροπικής που περνά από το σημείο 1 και της ισοθερμοκρασιακής των $+70^{\circ}\text{C}$.



Επομένως προσδιορίσαμε και το σημείο 2. Αυτό όμως, ως το σημείο εξόδου του αερίου από το συμπιεστή και σημείο εισόδου στον συμπυκνωτή, έχει την πίεση του συμπυκνωτή. Άρα για τη συμπύκνωση θα φέρουμε την οριζόντια ευθεία από το 2 προς τα αριστερά. Είναι ισόθλιπτη (αφού ισόθλιπτη είναι η συμπύκνωση) και βρίσκουμε ότι η πίεση στην οποία αντιστοιχεί είναι τα 9 bar. Επίσης βρίσκουμε ότι η συμπύκνωση γίνεται σε θερμοκρασία $+20^{\circ}\text{C}$. Η συμπύκνωση αρχίζει στο σημείο 3 και τελειώνει στο σημείο 4, που είναι το σημείο στο οποίο τέμνει η ισόθλιπτη των 9 bar την καμπύλη κορεσμένου υγρού.

Από το σημείο 4 ξεκινά η εκτόνωση (στο τέλος του συμπυκνωτή) που χαράσσεται με μια κατακόρυφη προς τα κάτω ευθεία (ισενθαλπική). Η εκτόνωση θα τελειώσει όταν η πίεση φτάσει στην τιμή που έχει στον εξατμιστή, δηλαδή στα 2,5 bar. Επομένως η μεταβολή της εκτόνωσης τελειώνει στο σημείο 5, που είναι η τομή της ισενθαλπικής εκτόνωσης με την ισόθλιπτη εξάτμιση. Η εξάτμιση τελειώνει στο σημείο 6 που ο ατμός είναι κορεσμένος και είναι το σημείο τομής της ισόθλιπτης του εξατμιστή με την καμπύλη κορεσμένου ατμού. Από το σημείο 6 στο 1 είναι η υπερθέρμανση, που είναι $+25^{\circ}\text{C}$ [$5^{\circ}\text{C} - (-20^{\circ}\text{C}) = 25^{\circ}\text{C}$].

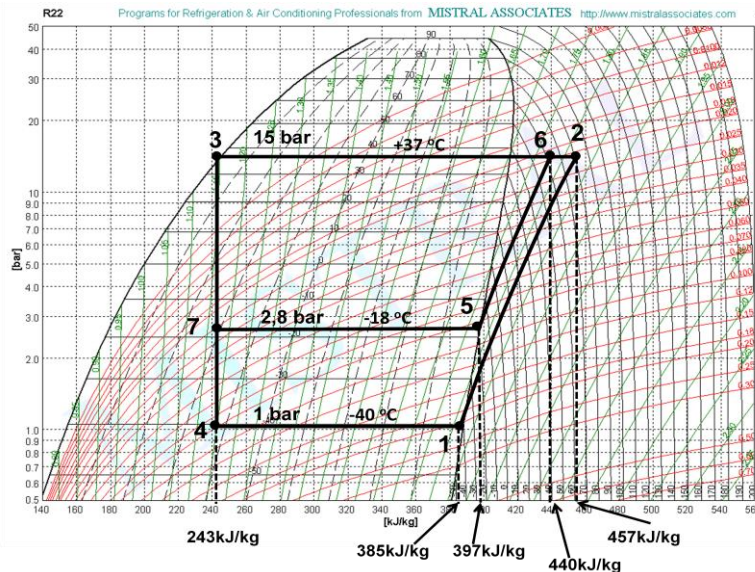
Ας συνοψίσουμε τις μεταβολές στο παράδειγμα που περιγράψαμε:

1. (12): Ισεντροπική συμπίεση αερίου. ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ
2. (23): Ισόθλιπτη ψύξη υπέρθερμου ατμού μέχρι να γίνει κορεσμένος. ΚΑΤΑΘΛΙΨΗ, ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ
- (34): Ισόθλιπτη συμπύκνωση αερίου σε υγρό. ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ
3. (45): Ισενθαλπική εκτόνωση. ΕΚΤΟΝΩΤΙΚΟ ΜΕΣΟ
4. (56): Ισόθλιπτη εξάτμιση υγρού μέχρι να γίνει κορεσμένος ατμός. ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΣ
- (61): Ισόθλιπτη υπερθέρμανση ατμού. ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΣ, ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗ

Θα προχωρήσουμε τώρα στη περαιτέρω μελέτη του ψυκτικού κύκλου, ασχολούμενοι με διάφορους υπολογισμούς που μπορούμε να εκτελέσουμε και θα μας βοηθήσουν να εκτιμήσουμε τις ενεργειακές καταστάσεις μιας εγκατάστασης.

Κεφάλαιο 5. Θερμιδομετρικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά του Ψυκτικού Κύκλου

Μέχρι τώρα είδαμε τον ψυκτικό κύκλο ως ένα σύνολο θερμοδυναμικών μεταβολών και ασχοληθήκαμε μόνο με τον τρόπο χάραξής του. Τα μόνα στοιχεία που παίρναμε από την κατασκευή του ήταν τα μεγέθη που αφορούσαν την κατάσταση του ψυκτικού σε αυτόν, δηλαδή την πίεση και τη θερμοκρασία. Γνωρίζουμε βέβαια ότι από το διάγραμμα P-h μπορούμε να αποκτήσουμε και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη του ψυκτικού που μας δίνουν οι άξονες και οι γραμμές του διαγράμματος. Είναι εκείνα που αναφέρθηκαν στο τέλος του κεφαλαίου 3.2. Από αυτά τα μεγέθη μπορούμε να πάρουμε διάφορες χρήσιμες πληροφορίες για τον ψυκτικό κύκλο και τα τμήματα του ψυκτικού κυκλώματος. Ας δούμε τους δύο ψυκτικούς κύκλους, οι οποίοι δεν έχουν υπερθέρμανση και υπόψυξη, και είναι χαραγμένοι για το ψυκτικό R22 στο επόμενο σχήμα.



Στο διάγραμμα φαίνονται ο κύκλος (12341), που θα ονομάζουμε A και ο κύκλος (56375), που θα ονομάζουμε B. Οι δύο ψυκτικοί κύκλοι μοιάζουν ως προς το ότι έχουν την ίδια θερμοκρασία συμπύκνωσης, δηλαδή το ψυκτικό μέσο συμπυκνώνεται και στις δύο περιπτώσεις στους $+37\text{ }^{\circ}\text{C}$ και υπό πίεση 15 bar. Η διαφορά στους δύο συμπυκνωτές είναι ότι στον κύκλο A η θερμοκρασία στην είσοδο είναι πιο μεγάλη από ότι στην είσοδο του συμπυκνωτή στον κύκλο B. Το που οφείλεται δε θα μας απασχολήσει προς το παρόν. Η μεγάλη διαφορά των δύο κύκλων είναι η θερμοκρασία εξάτμισης η οποία είναι αρκετά χαμηλή στον κύκλο A, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, και μέση στον κύκλο B, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ας δούμε πόσο μας κοστίζει ενεργειακά να έχουμε πολύ χαμηλή θερμοκρασία στον εξατμιστή. Αυτό θα γίνει εξετάζοντας τις ενθαλπίες σε κάθε περίπτωση. Οι ειδικές ενθαλπίες για κάθε σημείο των ψυκτικών κύκλων φαίνονται στο κάτω μέρος του διαγράμματος σημειωμένες. Για να βρούμε πόση ενθαλπία προστέθηκε ή αφαιρέθηκε από το ρευστό που πέρασε από ένα σημείο μέχρι να πάει σε ένα άλλο, κάνουμε το εξής απλό: αφαιρούμε την τιμή της ενθαλπίας του σημείου με τη μικρότερη (αυτού που είναι δηλαδή πιο αριστερά στο διάγραμμα) από την τιμή της ενθαλπίας του σημείου με τη μεγαλύτερη (εκείνου δηλαδή που είναι πιο δεξιά στο διάγραμμα). Για παράδειγμα, αν θέλουμε να δούμε την ποσότητα της ενθαλπίας που προστέθηκε στη συμπίεση (12), βρίσκουμε την ενθαλπία των δύο σημείων: $h_1 = 385\text{ kJ/kg}$, $h_2 = 457\text{ kJ/kg}$ και κάνουμε την αφαίρεση: $h_2 - h_1 = 457\text{ kJ/kg} - 385\text{ kJ/kg} = 72\text{ kJ/kg}$. Επομένως προστίθενται 72 kJ σε κάθε κιλό ψυκτικού που περνά.

Προφανώς, εάν στη συναλλαγή θερμότητας Q έλαβαν μέρος όχι 1 kg, αλλά m χιλιόγραμμα ψυκτικού (όπου m είναι ένας αριθμός που δείχνει πόσα kg ψυκτικού πήραν ή έδωσαν τη θερμότητα), τότε θα ισχύει η σχέση:

$$Q = m \cdot (h_j - h_i) \quad (1)$$

Όπου ($h_j - h_i$) είναι η διαφορά της ειδικής ενθαλπίας μεταξύ της εισόδου και εξόδου του ρευστού από το τμήμα της εγκατάστασης που εξετάζουμε και συναλλάχτηκε η θερμότητα Q . Στον τύπο (1) οι μονάδες της θερμότητας είναι τα kJ, της μάζας τα kg και των ειδικών ενθαλπιών τα kJ/kg.

Παρακάτω σημειώνουμε την ειδική ενθαλπία που αποκτά ή απορρίπτει το ψυκτικό μέσο R22 στις επί μέρους μεταβολές σε κάθε κύκλο ξεχωριστά. Φροντίζουμε να αφαιρούμε τη μικρή τιμή από τη μεγάλη, ώστε το αποτέλεσμα να προκύπτει θετικό.

Ψυκτικός Κύκλος Α

Συμπύεση (12):	$h_2 - h_1 = 457 - 385 = 72 \text{ kJ/kg}$
Συμπύκνωση (23):	$h_2 - h_3 = 457 - 243 = 214 \text{ kJ/kg}$
Εκτόνωση (34):	$h_4 - h_3 = 243 - 243 = 0 \text{ kJ/kg}$
Εξάτμιση (41):	$h_1 - h_4 = 385 - 243 = 142 \text{ kJ/kg}$

Ψυκτικός Κύκλος Β

Συμπύεση (56):	$h_6 - h_5 = 440 - 397 = 43 \text{ kJ/kg}$
Συμπύκνωση (63):	$h_6 - h_3 = 440 - 243 = 197 \text{ kJ/kg}$
Εκτόνωση (37):	$h_7 - h_3 = 243 - 243 = 0 \text{ kJ/kg}$
Εξάτμιση (75):	$h_5 - h_7 = 397 - 243 = 154 \text{ kJ/kg}$

Εξ αρχής μπορούμε να κάνουμε μερικές παρατηρήσεις για τους δύο ψυκτικούς κύκλους, τις οποίες στη συνέχεια θα αναλύσουμε εκτενέστερα:

- Στην εκτόνωση του κάθε κύκλου δεν συναλλάσσεται κανένα ποσό θερμότητας. Αυτό ήταν γνωστό αφού η μεταβολή γίνεται ισενθαλπικά.
- Και στους δύο κύκλους, όπως και σε κάθε άλλον, η θερμότητα που παίρνει το ψυκτικό (ενθαλπία) στον εξατμιστή συν τη θερμότητα που παίρνει από τη συμπύεση (είναι η ενέργεια που του δίνει ο συμπιεστής) είναι ίση με την θερμότητα που αποδίδει στο περιβάλλον το ψυκτικό μέσω του συμπυκνωτή. Δηλαδή για τον κύκλο Α ισχύει: $142 \text{ kJ/kg} + 72 \text{ kJ/kg} = 214 \text{ kJ/kg}$ και για τον κύκλο Β: $154 \text{ kJ/kg} + 43 \text{ kJ/kg} = 197 \text{ kJ/kg}$.
- Για να επιτύχουμε πολύ χαμηλή θερμοκρασία στον εξατμιστή, ο συμπιεστής καταναλώνει περισσότερη ενέργεια. Αυτό φαίνεται από το ότι στην συμπύεση του κύκλου Α ο συμπιεστής δίνει 72 kJ/kg ενώ στην αντίστοιχη συμπύεση του κύκλου Β δίνει μόνο 43 kJ/kg.
- Η θερμότητα που απορροφά ο εξατμιστής με την υψηλότερη θερμοκρασία (154 kJ/kg) είναι μεγαλύτερη από εκείνη που απορροφά ο εξατμιστής με τη χαμηλότερη θερμοκρασία (142 kJ/kg).

Τώρα θα δώσουμε ορισμένους ορισμούς και συμβολισμούς (που ακολουθεί και το σχολικό βιβλίο) των μεγεθών που αφορούν στους ψυκτικούς κύκλους και στις ψυκτικές εγκαταστάσεις. Οι ορισμοί αυτοί είναι απαραίτητοι για να έχουμε καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των ψυκτικών εγκαταστάσεων, αλλά και για τη λύση ασκήσεων.

Ο εξατμιστής απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον του (π.χ. το ψυγείο από το εσωτερικό του ή το κλιματιστικό από το δωμάτιο) και τη συμβολίζουμε με Q_ψ . Μερικές φορές κάνουμε το λάθος να λέμε το Q_ψ ότι είναι η ψύξη που δίνει ο εξατμιστής. Είναι λάθος έκφραση διότι η ψύξη δεν είναι κάτι που δίνεται. Η θερμότητα, ναι, δίνεται και παίρνεται, γι αυτό λέμε ότι ο εξατμιστής πήρε θερμότητα Q_ψ . Η θερμότητα που απορροφά ο εξατμιστής στον κύκλο Α θα είναι $h_4 - h_1$ και στον κύκλο Β θα είναι $h_7 - h_5$. Η ποσότητα της θερμότητας αυτής, όταν αναφερόμαστε σε ένα χιλιόγραμμο ψυκτικού, ονομάζεται **ψυκτικό αποτέλεσμα** και συμβολίζεται με q_ψ . Η διαφορά του Q_ψ από το q_ψ είναι ότι το q_ψ για να το βρούμε από τον ψυκτικό κύκλο, απλά αφαιρούμε τις ενθαλπίες, ενώ για το Q_ψ πρέπει να πολλαπλασιάσουμε και επί την ποσότητα της μάζας του ψυκτικού, για την οποία αναφερόμαστε, εκτός αν πούμε εξ αρχής ότι συζητάμε για ένα kg ψυκτικού. Το μέγεθος, πάντως, που μεταξύ των δύο χρησιμοποιείται πιο συχνά είναι το ψυκτικό αποτέλεσμα q_ψ .

Η θερμότητα Q_ψ , αν τη θεωρήσουμε στη μονάδα του χρόνου, ονομάζεται **ψυκτική ικανότητα** ή **ψυκτική ισχύς** του εξατμιστή και συμβολίζεται με $\dot{Q}_\psi$. Η θερμότητα Q_ψ έχει μονάδες θερμότητας δηλαδή ενέργειας, που είναι το Joule (J) ή το πολλαπλάσιο kJ. Η

ψυκτική ικανότητα όμως έχει μονάδες ισχύος, επομένως μετράται σε W ή σε kW. Γενικά πρέπει να γνωρίζουμε, ότι όταν έχουμε παραγωγή ή κατανάλωση ενέργειας για κάποιο χρονικό διάστημα και υπολογίζουμε ή ασχολούμαστε με την ποσότητα της ενέργειας που παράγεται ή καταναλώνεται σε ένα χρονικό διάστημα, τότε είναι που μιλάμε για ισχύ. Ισχύς δηλαδή είναι η ποσότητα της ενέργειας αν διαιρεθεί με το χρόνο στον οποίο παράχθηκε. Έτσι και στον εξατμιστή, αλλά και στα άλλα τμήματα της ψυκτικής εγκατάστασης θα ισχύει ότι ισχύς σε καθένα τμήμα θα είναι η ενέργεια ή η θερμότητα που συναλλάσσεται στο τμήμα αυτό σε κάθε δευτερόλεπτο (ή σε κάθε ώρα κλπ).

Ο συμπιεστής κατά τη συμπίεση δίνει στο ψυκτικό μέσο ενέργεια υπό τη μορφή θερμότητας. Είναι η ενθαλπία που μας δίνει το διάγραμμα του ψυκτικού κύκλου. Η θερμότητα αυτή ονομάζεται **θερμότητα συμπίεσης**, συμβολίζεται με h_c και ασφαλώς προκύπτει από τη διαφορά των ενθαλπιών έναρξης και λήξης της συμπίεσης. Στους ψυκτικούς κύκλους που περιγράφει το προηγούμενο σχήμα για τον κύκλο A η θερμότητα συμπίεσης θα είναι h_2-h_1 και στον κύκλο B θα είναι h_6-h_5 .

Στις ασκήσεις και στη χάραξη των διαγραμμάτων κάνουμε την παραδοχή ότι όλη η ενέργεια που καταναλώνει ο συμπιεστής (ηλεκτρική ενέργεια) μετατρέπεται σε θερμότητα που την απορροφά το ψυκτικό μέσο. Άρα η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει ο συμπιεστής και η θερμότητα που παίρνει κατά τη συμπίεση το ψυκτικό μέσο, θεωρούμε ότι είναι η ίδια ποσότητα και τη συμβολίζουμε με W και συνηθίζουμε να τη λέμε μηχανικό έργο του συμπιεστή. Αν αυτό το έργο το θεωρήσουμε στη μονάδα του χρόνου (σε ένα δευτερόλεπτο ή σε μία ώρα), το μετατρέπουμε σε ισχύ, το συμβολίζουμε W_c , και το ονομάζουμε **ισχύ του συμπιεστή**.

Ο συμπυκνωτής αποδίδει θερμότητα στο περιβάλλον, ψύχεται δηλαδή. Τη συνολική ποσότητα της θερμότητας που δίνει στο περιβάλλον τη συμβολίζουμε με Q_Σ και αν υπολογίσουμε αυτή την θερμότητα στη μονάδα του χρόνου έχουμε τη λεγόμενη **ισχύ ή ικανότητα του συμπυκνωτή**, που συμβολίζεται με $\dot{Q}_\Sigma$. Εάν θεωρήσουμε την θερμότητα που «απορρίπτει» στο περιβάλλον ο συμπυκνωτής ανά μονάδα μάζας του ψυκτικού μέσου (για κάθε kg δηλαδή) την ονομάζουμε **θερμότητα συμπίκνωσης** και συμβολίζεται με q_Σ . Επομένως, η θερμότητα συμπίκνωσης προκύπτει με αφαίρεση των ενθαλπιών εισόδου και εξόδου στο συμπυκνωτή.

Σύμφωνα με τους συμβολισμούς που ορίσαμε παραπάνω και για κάθε κιλό από το ψυκτικό, η θερμότητα που απορροφά ο εξατμιστής, η θερμότητα που παίρνει το ψυκτικό από το συμπιεστή και η θερμότητα που δίνει στο περιβάλλον ο συμπυκνωτής, θα συνδέονται με τη σχέση:

$$Q_\Sigma = Q_\psi + W \quad \text{ή} \quad q_\Sigma = q_\psi + h_c \quad (2)$$

Η εξίσωση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι το ψυκτικό μέσο αποδίδει προς το περιβάλλον (μέσω του συμπυκνωτή) όλη τη θερμότητα Q_Σ που απέκτησε κάνοντας τον κύκλο του στην ψυκτική εγκατάσταση. Και η θερμότητα αυτή προέρχεται από τη θέρμανση του ψυκτικού στον εξατμιστή Q_ψ , συν τη θέρμανσή του στον συμπιεστή W . Υποθέτουμε δηλαδή ότι δεν υπάρχουν άλλες απώλειες και ότι όλα τα ποσά θερμότητας συναλλάσσονται μόνο σε αυτά τα τρία τμήματα της εγκατάστασης.

Αν τώρα αντί για τη θερμότητα θεωρήσουμε την αντίστοιχη ισχύ κάθε τμήματος από τα προηγούμενα, θα προκύψει η σχέση για την ισχύ, και είναι η επόμενη:

$$\dot{Q}_\Sigma = \dot{Q}_\psi + W_c \quad (3)$$

Οι σχέσεις (2) και (3) ουσιαστικά εκφράζουν το ίδιο πράγμα: τον ισολογισμό ενέργειας ή ισχύος σε μια εγκατάσταση.

Εφαρμόζοντας, για ποσότητα **1 kg** από το ψυκτικό μέσο, τη σχέση (2) για τον ψυκτικό κύκλο A του προηγούμενου σχήματος θα ισχύει: $Q_\Sigma = 214kJ$, $Q_\psi = 142kJ$, $W = 72kJ$ και για τον κύκλο B: $Q_\Sigma = 197kJ$, $Q_\psi = 154kJ$, $W = 43kJ$ και προφανώς ισχύει η σχέση (2) και στις δύο περιπτώσεις, πράγμα που ήδη παρατηρήσαμε και νωρίτερα.

Στο κύκλωμα μιας ψυκτικής εγκατάστασης κατά τη λειτουργία της το ψυκτικό ρευστό έχει μια σταθερή παροχή σε κάθε διατομή (σημείο) του κυκλώματος. Αυτό σημαίνει ότι η

ποσότητα του ψυκτικού που περνά από κάθε σημείο των σωληνώσεων, ανεξάρτητα από τη διάμετρό τους, είναι η ίδια. Είναι η λεγόμενη αρχή της συνέχειας στη Φυσική. Υπενθυμίζουμε ότι παροχή είναι η μάζα του ψυκτικού που περνά στη μονάδα του χρόνου από την κάθε διατομή του κυκλώματος. Οι μονάδες της είναι χιλιόγραμμα ανά δευτερόλεπτο, $\frac{kg}{s}$ και το σύμβολό της $\dot{m}$. Δηλαδή ισχύει ο τύπος:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad (kg/s) \quad (4)$$

Ο ορισμός της παροχής μας επιτρέπει να χειριστούμε καλύτερα την έννοια της ισχύος στον ισολογισμό της ενέργειας που κάναμε λίγο πιο πάνω. Σκεπτόμαστε (με ένα αριθμητικό παράδειγμα) ως εξής: η ειδική ενθαλπία είναι η θερμότητα που περιέχει ένα κιλό από το ρευστό. Ας πούμε λοιπόν ότι η ειδική ενθαλπία που προστίθεται στο ψυκτικό όταν περνά από τον εξατμιστή ενός κυκλώματος είναι 200 kJ/kg. Αν από κάθε σημείο του ψυκτικού κυκλώματος περνούν 0,2 kg/s ψυκτικού (200 γραμμάρια κάθε δευτερόλεπτο), λέμε ότι η παροχή στο κύκλωμα είναι: $\dot{m}=0,2 \text{ kg/s}$. Η ενθαλπία του ψυκτικού (όχι η ειδική αλλά η ενθαλπία σύμφωνα με τον ορισμό της) που προστίθεται στον εξατμιστή θα είναι $200 \times 0,2 = 40 \text{ kJ}$ κάθε δευτερόλεπτο. Αλλά η μονάδα kJ ανά δευτερόλεπτο ή kJ/s είναι η γνωστή μας μονάδα του kW. Άρα η ισχύς του εξατμιστή θα είναι: $\dot{Q}_\psi = 40 \text{ kW}$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, αν θέλουμε να υπολογίσουμε την (θεωρητική) ισχύ ενός τμήματος μιας διάταξης, μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε την ενθαλπία που προστίθεται στο ψυκτικό αέριο κατά το πέρασμα του από αυτό το τμήμα (τη βρίσκουμε από τον ψυκτικό κύκλο) επί την παροχή μάζας. Επομένως θα ισχύει η σχέση:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_j - h_i) \quad (5)$$

Στη σχέση (5) έχουμε:

- $\dot{Q}$ είναι η ισχύς ενός τμήματος της εγκατάστασης στο οποίο συναλλάσσεται θερμότητα με το ψυκτικό ρευστό. Μονάδες: kW.
- $\dot{m}$ είναι η παροχή μάζας του ψυκτικού κυκλώματος. Μονάδες: kg/s.
- $h_j - h_i$ είναι η διαφορά της ειδικής ενθαλπίας μεταξύ των δύο σημείων που έγινε η συναλλαγή της θερμότητας. Μονάδες: kJ/kg.

Παρατηρούμε ότι η σχέση (5) είναι αντίστοιχη με την σχέση (1), με τη διαφορά ότι ισχύει για ισχύ και όχι για θερμότητα. Αν σε μια άσκηση δε μας δίνουν την $\dot{m}$ δε μπορούμε να την υπολογίσουμε παρά μόνο αν γνωρίζουμε την ισχύ του συμπιεστή, του εξατμιστή ή του συμπυκνωτή. Αυτός είναι ένας τρόπος για να υπολογίσουμε την παροχή σε ένα κύκλωμα. Να επιλύσουμε δηλαδή την εξίσωση (5) ως προς την $\dot{m}$, εφόσον βέβαια γνωρίζουμε τα υπόλοιπα. Ο υπολογισμός θα είναι προσεγγιστικός αφού η ισχύς των τμημάτων της διάταξης είναι θεωρητική.

Οι τιμές για την ισχύ του συμπιεστή, του εξατμιστή ή του συμπυκνωτή που προκύπτουν με την εφαρμογή της σχέσης (5) είναι προσεγγιστικές και ονομάζονται θεωρητικές τιμές. Οι πραγματικές προκύπτουν από πραγματικές μετρήσεις των εξαρτημάτων.

Θα εφαρμόσουμε τη σχέση (5) στα τρία τμήματα της ψυκτικής εγκατάστασης που συναλλάσσεται η θερμότητα. Για τους συμβολισμούς της ειδικής ενθαλπίας θα θεωρήσουμε ότι οι τύποι εφαρμόζονται για τον ψυκτικό κύκλο Α του αρχικού σχήματος του κεφαλαίου. Θα έχουμε:

$$\text{Συμπιεστής:} \quad W_c = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (6)$$

$$\text{Συμπυκνωτής:} \quad \dot{Q}_\Sigma = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) \quad (7)$$

$$\text{Εξατμιστής:} \quad \dot{Q}_\psi = \dot{m} \cdot (h_4 - h_1) \quad (8)$$

Συνοψίζοντας: W_c είναι η θεωρητική ισχύς του συμπιεστή, η ικανότητα του συμπυκνωτή είναι η $\dot{Q}_\Sigma$ και η ψυκτική ικανότητα (του εξατμιστή) είναι η $\dot{Q}_\psi$. Και τα τρία μεγέθη αυτά έχουν μονάδες kW ή W.

Σε αυτό το σημείο είναι καλό να κάνουμε ένα μικρό πίνακα με τα ενεργειακά μεγέθη και τα σύμβολά τους, γιατί συχνά γίνεται μπερδεύματα. Η σχέση από την οποία δίνεται κάθε μέγεθος και τα σύμβολά της, προέρχονται από το βασικό ψυκτικό κύκλο που περιγράψαμε, χωρίς ψύξη και υπερθέρμανση

ΘΕΣΗ	ΟΝΟΜΑ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΣΧΕΣΗ	ΜΟΝΑΔΕΣ
Συμπιεστής	Θερμότητα συμπίεσης	h_c	h_2-h_1	J/kg
	Συνολικό έργο συμπίεστη	W	$m \cdot (h_2-h_1)$	J
	Ισχύς συμπίεστη	W_c	$\dot{m} \cdot (h_2-h_1)$	W
Συμπυκνωτής	Θερμότητα συμπύκνωσης	q_s	h_2-h_3	J/kg
	Συνολική θερμότητα συμπύκνωσης	Q_s	$m \cdot (h_2-h_3)$	J
	Ισχύς συμπύκνωσης	$\dot{Q}_s$	$\dot{m} \cdot (h_2-h_3)$	W
Εξατμιστής	Ψυκτικό αποτέλεσμα	q_ψ	h_4-h_1	J/kg
	Συνολικό ψυκτικό αποτέλεσμα	Q_ψ	$m \cdot (h_4-h_1)$	J
	Ψυκτική ισχύς	$\dot{Q}_\psi$	$\dot{m} \cdot (h_4-h_1)$	W

Ένας άλλος χρήσιμος ορισμός, που αφορά κύρια τους συμπιεστές, είναι ο **λόγος συμπίεσης**. Ορίζουμε ως λόγο συμπίεσης το λόγο (πηλίκο) της απόλυτης πίεσης που επικρατεί στην έξοδο του συμπιεστή (κατάθλιψη) P_{KAT} προς την απόλυτη πίεση που επικρατεί στη είσοδό του (αναρρόφηση) P_{AN} . Συμβολίζεται με CR και είναι καθαρός αριθμός όσον αφορά στις μονάδες του. Επομένως ισχύει η σχέση:

$$CR = \frac{P_{KAT}}{P_{AN}} \quad (9)$$

Τις δύο πιέσεις τις βρίσκουμε από το διάγραμμα του ψυκτικού κύκλου ή μας τις δίνουν. Ένα πράγμα που προσέχουμε είναι να είναι και οι δύο τιμές στις ίδιες μονάδες. Δηλαδή ή και οι δύο πιέσεις σε MPa (ή Pa) ή και οι δύο σε bar. Ένα ακόμα σημαντικό είναι ότι οι πιέσεις πρέπει να είναι οι απόλυτες και όχι οι μανομετρικές.

Εξ ορισμού, οι δυο πιέσεις στον τύπο του λόγου συμπίεσης θα είναι η μία η πίεση που επικρατεί στον συμπυκνωτή και η άλλη θα είναι η πίεση που επικρατεί στον εξατμιστή. Εννοείται ότι, εφόσον δεν υπάρχουν απώλειες πίεσης στις σωληνώσεις, η πτώση πίεσης στα άκρα του εκτονωτικού μέσου είναι ίση με το λόγο συμπίεσης.

Ένα σημαντικό μέγεθος για όλες τις ψυκτικές εγκαταστάσεις είναι ο **συντελεστής συμπεριφοράς** που συμβολίζεται με COP. Λέγεται και **συντελεστής επίδοσης** ή **λειτουργίας**. Ο συντελεστής COP είναι σημαντικός γιατί δείχνει το πόσο αποτελεσματικά εργάζεται μια ψυκτική εγκατάσταση. Όχι όμως αν επιτυγχάνει την ποσότητα της ψύξης που επιθυμούμε ή τις θερμοκρασίες για τις οποίες υπολογίστηκε. Δείχνει απλά πόση θερμότητα απορροφά το ψυκτικό στον εξατμιστή, σε σχέση με τη θερμότητα που προσθέτει ο συμπιεστής στο ψυκτικό μέσο. Αν σκεφτούμε τώρα ότι η θερμότητα που παίρνει το ψυκτικό στον εξατμιστή είναι η ψυκτική ικανότητα της εγκατάστασης και ότι η θερμότητα που παίρνει στο συμπιεστή είναι η ισχύς του συμπιεστή, ο COP μας λέει ποια είναι η σχέση της ποσότητας της ψύξης που επιτυγχάνουμε σε σχέση με την ενέργεια που ξοδεύουμε γι αυτό. Άρα θα μπορούσαμε να ορίσουμε τον συντελεστή συμπεριφοράς ως:

$$COP = \frac{\text{Ψυκτική Ισχύς}}{\text{Ισχύς Συμπιεστή}} \quad (10)$$

Επομένως αν ο COP έχει την τιμή 3 (είναι καθαρός αριθμός) τότε σημαίνει ότι το ψυκτικό μέσο στον εξατμιστή παίρνει από το χώρο που ψύχει τριπλάσια θερμότητα στη μονάδα του χρόνου (kW) από την ισχύ του συμπιεστή. Είναι δηλαδή σαν να ξοδεύουμε τρεις φορές

λιγότερη ενέργεια από εκείνη που κερδίζουμε. Αυτό βέβαια δε σημαίνει ότι ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης είναι 3, διότι χρησιμοποιούμε το βαθμό απόδοσης όταν μετατρέπεται μια μορφή ενέργειας σε άλλη και πάντα είναι μικρότερος από τη μονάδα. Εδώ δεν έχουμε μετατροπή ενέργειας αλλά μεταφορά. Μεταφέρουμε τη θερμότητα από τα προϊόντα στο εξωτερικό περιβάλλον του συμπυκνωτή. Σε αυτή την περίπτωση ο συντελεστής COP επιτρέπεται να είναι μεγαλύτερος ή μικρότερος από τη μονάδα. Είναι σαν να δίνουμε σε κάποιον 50 ευρώ για να μαζέψει τα πορτοκάλια από το χωράφι, τα οποία κάνουν 500 ευρώ. Ξοδεύω μόνο 50 και κερδίζω 500. Το κέρδος μου είναι δέκα φορές μεγαλύτερο από το κόστος μου. Δηλαδή το κόστος του συμπιεστή είναι για τη μεταφορά της θερμότητας, όχι για τη μετατροπή της σε άλλη μορφή.

Έχουμε ήδη πει ότι συνήθως στους ψυκτικούς κύκλους προσεγγίζουμε την ισχύ του συμπιεστή με τη θερμότητα που δίνει στο ψυκτικό μέσο. Στην πραγματικότητα η καταναλισκόμενη ενέργεια από το συμπιεστή είναι μεγαλύτερη. Κάτι αντίστοιχο ισχύει και για τον εξατμιστή: η πραγματική του ισχύς είναι μικρότερη από τη θεωρητική, που είναι εκείνη που υπολογίζεται από τη σχέση (8). Γι αυτό έχουμε δύο ειδών συντελεστές συμπεριφοράς: το συντελεστή που υπολογίζουμε από τις τιμές των ενθαλπιών του ψυκτικού κύκλου και ονομάζεται **θεωρητικός** και τον **πραγματικό συντελεστή συμπεριφοράς**, που υπολογίζεται από τις πραγματικές τιμές της ισχύος του συμπιεστή και του εξατμιστή. Επομένως μπορούμε να πούμε ότι ισχύουν οι τύποι (11) και (12):

$$COP_{\Theta} = \frac{(\Psiυκτική\ Ισχύς)_{\Theta}}{(\Ισχύς\ Συμπιεστή)_{\Theta}} \quad (11)$$

$$COP_{\Pi} = \frac{(\Psiυκτική\ Ισχύς)_{\Pi}}{(\Ισχύς\ Συμπιεστή)_{\Pi}} \quad (12)$$

Στον τύπο (11) ο δείκτης «Θ» σημαίνει «θεωρητικός» και στον τύπο (12) ο δείκτης «Π» σημαίνει «πραγματικός». Όταν δεν υπάρχει στο σύμβολο του COP ο δείκτης «Θ» θα εννοείται ότι είναι ο θεωρητικός COP. Επομένως, αν επανέλθουμε στο πρώτο σχήμα του κεφαλαίου, μπορούμε να υπολογίσουμε τους θεωρητικούς COP των κύκλων Α και Β. Θα έχουμε:

$$COP_{\Theta A} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{385 - 243}{457 - 385} = \frac{142}{72} = 1,97$$

$$COP_{\Theta B} = \frac{h_5 - h_7}{h_6 - h_5} = \frac{397 - 243}{440 - 397} = \frac{154}{43} = 3,58$$

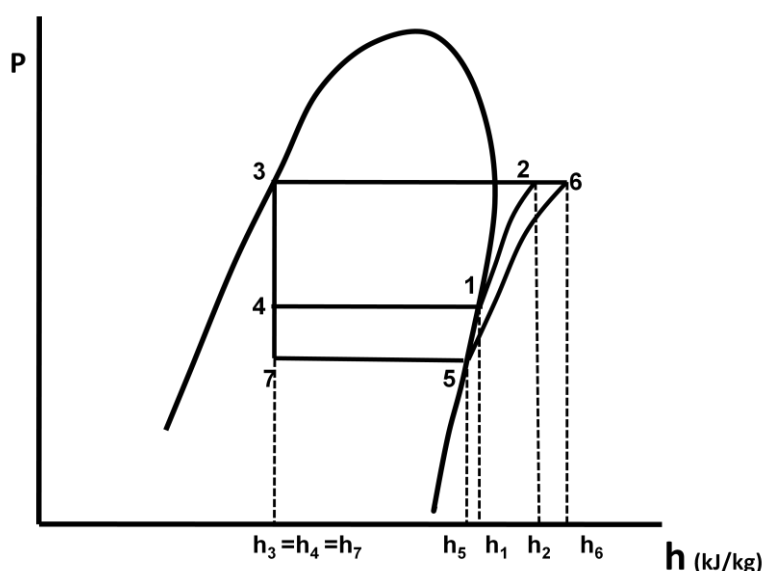
Στους παραπάνω τύπους έγινε αντικατάσταση των τιμών των ενθαλπιών χωρίς τις μονάδες, που είναι για όλες τις ενθαλπίες τα kJ/kg και ο COP είπαμε ότι είναι καθαρός αριθμός, χωρίς μονάδες. Επίσης θα έπρεπε κανονικά να βάλουμε στον τύπο με τις ενθαλπίες και την παροχή μάζας $\dot{m}$, δηλαδή να γράψουμε: $COP_{\Theta A} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_4)}{\dot{m}(h_2 - h_1)}$, αλλά επειδή η $\dot{m}$ απλοποιείται, δεν είναι απαραίτητο. Στις ασκήσεις αυτό αν θέλετε το κάνετε. Βλέπουμε ότι και το σχολικό βιβλίο στη σελίδα 70 δεν βάζει την παροχή μάζας.

Παρατηρούμε ότι ο κύκλος Α έχει αρκετά μικρότερο συντελεστή συμπεριφοράς από τον κύκλο Β. Ο λόγος είναι ότι παίρνουμε καλύτερη «ποιότητα ψύξης», υπό την έννοια ότι έχουμε χαμηλότερη θερμοκρασία εξατμίστη στον κύκλο Α. Αυτό το πληρώνουμε σε ενέργεια του συμπιεστή.

Όταν θέλουμε να υπολογίσουμε το συντελεστή συμπεριφοράς, μέσω ενός υπάρχοντος ψυκτικού κύκλου σε διάγραμμα, ο οποίος έχει υπερθέρμανση, πρέπει να γνωρίζουμε εάν η υπερθέρμανση γίνεται μέσα στον εξατμιστή, ώστε να την υπολογίσουμε (μέσω των ενθαλπιών) στην ψυκτική ισχύ. Αν η υπερθέρμανση γίνεται έξω από τον εξατμιστή, δεν προσφέρει στην ψύξη. Θα δούμε αργότερα παραδείγματα ψυκτικών κύκλων με τους υπολογισμούς των μεγεθών που ορίσαμε στο παρόν κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 6. Παράγοντες που επιδρούν στον Ψυκτικό Κύκλο

Είναι πολλά εκείνα που επηρεάζουν τα διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη στον ψυκτικό κύκλο. Το παραμικρό μπορεί να επιδράσει, όμως το σχολικό βιβλίο ασχολείται με τους δύο πιο σημαντικούς παράγοντες: τις θερμοκρασίες συμπύκνωσης και εξάτμισης. Ας ξεκινήσουμε από τη θερμοκρασία εξάτμισης, δηλαδή να μελετήσουμε δυο κύκλους με διαφορετικές θερμοκρασίες εξάτμισης, αλλά ίδια θερμοκρασία συμπύκνωσης. Θεωρούμε ότι έχουμε μια ψυκτική διάταξη και έχουμε τον κύκλο ψύξης της. Μπορούμε να μειώσουμε ή να αυξήσουμε την θερμοκρασία εξάτμισης κάνοντας κάποια μετατροπή. Για παράδειγμα, αν πρόκειται για οικιακό ψυγείο, μπορούμε να αλλάξουμε τον τριχοειδή σωλήνα που καταλήγει στον εξατμιστή. Αν αφήσουμε την ίδια διάμετρο και αυξήσουμε το μήκος του, θα μειωθεί η πίεση στον εξατμιστή και επομένως και η θερμοκρασία εξάτμισης του ψυκτικού. Αν τοποθετήσουμε και τον κατάλληλο συμπιεστή (με μεγαλύτερο λόγο συμπίεσης) θα μπορέσουμε να έχουμε την ίδια θερμοκρασία συμπύκνωσης. Αυτό δείχνουν οι δύο σχεδιασμένοι κύκλοι στο επόμενο σχήμα. Για απλούστευση των εξηγήσεων θα θεωρήσουμε τους δύο κύκλους χωρίς υπόψυξη και χωρίς υπερθέρμανση. Ο (12341) είναι ο αρχικός και τον ονομάζουμε κύκλο (1) και ο (56375) παριστάνει τον κύκλο με χαμηλότερη θερμοκρασία εξάτμισης και τον ονομάζουμε κύκλο (2).



Για τους θεωρητικούς συντελεστές συμπεριφοράς θα έχουμε:

$$COP_{\theta 1} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$COP_{\theta 2} = \frac{h_5 - h_7}{h_6 - h_5}$$

Προφανώς θα ισχύει (φαίνεται από το σχήμα): $h_1 - h_4 > h_5 - h_7$ και $h_2 - h_1 < h_6 - h_5$. Δηλαδή το κλάσμα από το οποίο προκύπτει ο $COP_{\theta 1}$ έχει μεγαλύτερο αριθμητή, αλλά και μικρότερο παρονομαστή, σε σχέση με τον $COP_{\theta 2}$. Επομένως ο συντελεστής συμπεριφοράς του κύκλου (1) είναι σαφώς μεγαλύτερος από εκείνον του κύκλου (2) με τη μικρότερη θερμοκρασία εξάτμισης. Επομένως είναι πιο συμφέρον για μια διάταξη, η θερμοκρασία εξάτμισης να είναι όσο γίνεται μεγαλύτερη. Αυτό βέβαια δεν μπορεί να εφαρμόζεται πάντα, αφού ενδέχεται να θέλουμε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες ψύξης. Αυτό σημαίνει ότι ένα κλιματιστικό μηχανήμα (που εργάζεται συνήθως σε υψηλές θερμοκρασίες) ή ένα ψυγείο συντήρησης τροφίμων (μέση θερμοκρασία) θα έχουν καλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς από μια κατάψυξη χαμηλών θερμοκρασιών. Στο ίδιο συμπέρασμα είχαμε καταλήξει για τους κύκλους στο τέλος του προηγούμενου κεφαλαίου, όπου είχαμε συγκεκριμένα αριθμητικά

δεδομένα. Άλλωστε, κι εκεί είχαμε δύο κύκλους με ίδια θερμοκρασία συμπύκνωσης και διαφορετικές θερμοκρασίες εξάτμισης.

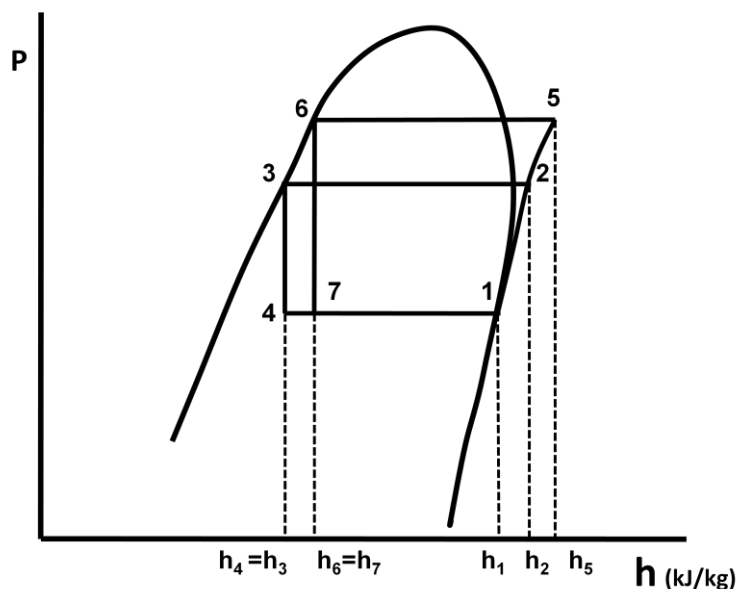
Στην περίπτωση που επιδιώκουμε χαμηλές θερμοκρασίες, επειδή είδαμε ότι τότε η ενθαλπία της συμπίεσης θα είναι μεγαλύτερη ($h_6 - h_5 > h_2 - h_1$), σημαίνει ότι θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ισχυρότερο συμπιεστή.

Είδαμε ακόμα ότι $h_1 - h_4 > h_5 - h_7$ που σημαίνει ότι για την ίδια θερμοκρασία συμπύκνωσης, το ψυκτικό αποτέλεσμα θα είναι μεγαλύτερο στον κύκλο με υψηλότερη θερμοκρασία εξάτμισης. Επί πλέον, στον κύκλο (2) θα απαιτείται μεγαλύτερος συμπυκνωτής, αφού $h_6 - h_3 > h_2 - h_3$.

Συνοπτικά, σε ένα κύκλο με μικρότερη θερμοκρασία εξάτμισης, από ότι σε ένα που έχει την ίδια θερμοκρασία συμπύκνωσης θα έχουμε:

- Μικρότερο συντελεστή συμπεριφοράς
- Μικρότερη ψυκτική ικανότητα
- Απαιτείται μεγαλύτερος συμπυκνωτής
- Απαιτείται μεγαλύτερος συμπιεστής

Ας δούμε τώρα τη σύγκριση δύο νέων ψυκτικών κύκλων με ίδια θερμοκρασία εξάτμισης αλλά διαφορετικές θερμοκρασίες συμπύκνωσης. Δύο τέτοιοι κύκλοι φαίνονται στο επόμενο σχήμα. Φαίνεται ότι οι μεταβολές της εξάτμισης (71) και (41) γίνονται υπό την ίδια πίεση και θερμοκρασία, αλλά η συμπύκνωση (56) γίνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία από την (23). Εξετάζουμε ένα ψυκτικό κύκλο και εδώ χωρίς υπερθέρμανση και υπόψυξη.



Ας ονομάσουμε τον κύκλο (12341) κύκλο (1) και τον (15671) κύκλο (2). Για τους δύο θεωρητικούς συντελεστές συμπεριφοράς θα έχουμε:

$$COP_{\theta 1} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$COP_{\theta 2} = \frac{h_1 - h_7}{h_5 - h_1}$$

Φαίνεται από το σχήμα ότι θα ισχύει: $h_1 - h_4 > h_1 - h_7$ και $h_2 - h_1 < h_5 - h_1$. Αυτό σημαίνει ότι ο $COP_{\theta 1}$ έχει μεγαλύτερο αριθμητή, αλλά και μικρότερο παρονομαστή, σε σχέση με τον $COP_{\theta 2}$. Επομένως ο συντελεστής συμπεριφοράς του κύκλου (1) είναι μεγαλύτερος από τον συντελεστή του κύκλου (2) με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία συμπύκνωσης. Άρα όταν η θερμοκρασία συμπύκνωσης είναι μεγάλη η απόδοση του κύκλου ελαττώνεται, με δεδομένο ότι η θερμοκρασία εξάτμισης παραμένει ίδια.

Για την θεωρητική ισχύ του συμπιεστή, στις δύο περιπτώσεις του τελευταίου σχήματος, την απάντηση δίνει η διαφορά των ενθαλπιών των δύο συμπίεσεων, και είναι προφανές ότι στον κύκλο με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία συμπύκνωσης η ισχύς είναι μεγαλύτερη.

Αλλά και το ψυκτικό αποτέλεσμα είναι μικρότερο όταν έχουμε μεγαλύτερη θερμοκρασία συμπύκνωσης, αφού $h_1 - h_7 < h_1 - h_4$.

Για το μέγεθος του συμπυκνωτή (θερμότητα συμπύκνωσης) το διάγραμμα του σχήματος δε μας βοηθά να βγάλουμε συμπέρασμα, αλλά αν κάναμε τους ψυκτικούς κύκλους σε πραγματικά διαγράμματα θα βλέπαμε ότι η κύκλος (2) έχει μικρότερη θερμότητα συμπύκνωσης, δηλαδή θα ισχύει: $h_5 - h_6 < h_2 - h_3$. Αυτό είναι θετικό για τη διάταξη (2) διότι θα είναι ευκολότερο να ψυχθεί ο συμπυκνωτής, όταν συμπυκνώνει σε υψηλότερη θερμοκρασία. Ως παράδειγμα σκεφτείτε ότι ένας συμπυκνωτής εργάζεται σε περιβάλλον με θερμοκρασία 40 °C. Αν το αέριο μπαίνει στον συμπυκνωτή με θερμοκρασία 60 °C και η συμπύκνωση γίνεται στους 50 °C, είναι δύσκολο οι 40 °C του περιβάλλοντος να μειώσουν τους 60 °C στους 50 °C. Αν όμως το αέριο μπαίνει στο συμπυκνωτή με 90 °C και συμπυκνώνεται στους 80 °C, τότε είναι πιο εύκολο ο αέρας με τους 40 °C να μειώσει τους 90 °C στους 80 °C, διότι η διαφορά θερμοκρασίας (από τους 40 °C στους 80 °C) είναι μεγαλύτερη.

Συνοπτικά, για τα τέσσερα μεγέθη που συγκρίναμε, μια διάταξη με μεγαλύτερη θερμοκρασία συμπύκνωσης από μια άλλη θα έχει:

- Μικρότερο συντελεστή συμπεριφοράς
- Μικρότερη ψυκτική ικανότητα
- Απαιτείται μικρότερος συμπυκνωτής
- Απαιτείται μεγαλύτερος συμπιεστής

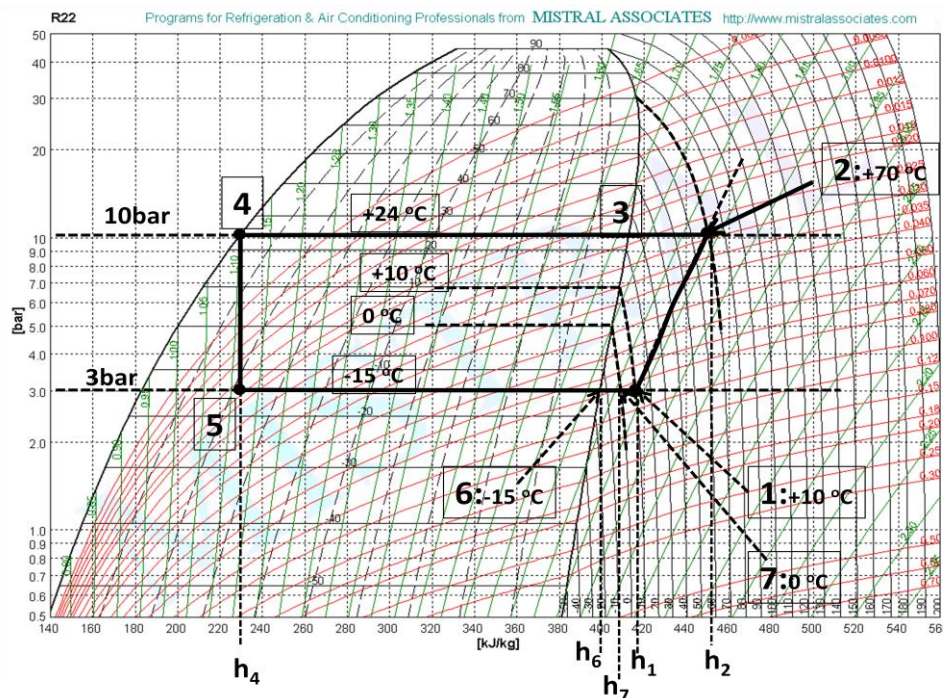
Κεφάλαιο 7. Λυμένα παραδείγματα επί του Ψυκτικού Κύκλου

Θα λύσουμε παρακάτω αρκετές ασκήσεις επί του ψυκτικού κύκλου. Εκείνο που θα προσέξετε είναι ότι στα διαγράμματα οι τιμές που μας δίνουν για τα μεγέθη που ενδιαφέρουν, δεν είναι πάντα δυνατόν να έχουν άριστη ακρίβεια. Αυτή είναι μια αδυναμία των διαγραμμάτων που δεν μπορείτε κι εσείς να αποφύγετε. Να ξέρετε όμως ότι όταν κάνετε μια εκτίμηση μιας τιμής από το διάγραμμα (πχ. θερμοκρασία ή πίεση κλπ.) δικαιολογείται μια μικρή απόκλιση από την ακριβή τιμή του μεγέθους. Δηλαδή μπορεί να λυθεί η ίδια άσκηση και να βρεθούν λίγο διαφορετικά αποτελέσματα. Αρκεί να μην διαφέρουν πολύ από τα σωστά. Αντιθέτως, όταν χρησιμοποιείτε μαθηματικούς τύπους, πρέπει να έχουν τη λεγόμενη μαθηματική ακρίβεια.

Παράδειγμα 10. Ένα ψυγείο που εργάζεται με το ψυκτικό μέσο R22 έχει θερμοκρασία εξατμίσης -15°C . Μέσα στον εξατμιστή η υπερθέρμανση είναι 15°C και μέχρι να φτάσει στον συμπιεστή το αέριο έχει θερμοκρασία $+10^{\circ}\text{C}$. Στην έξοδο του συμπιεστή η θερμοκρασία είναι 70°C . Το κύκλωμα δεν έχει υπόψυξη και γνωρίζουμε ότι η θεωρητικά απορροφούμενη ισχύς από το συμπιεστή είναι $4,08\text{ kW}$ (υπό τις συνθήκες που έχουμε τις πιο πάνω θερμοκρασίες). Αφού χαράξετε τον ψυκτικό κύκλο στο διάγραμμα P-h, να υπολογίσετε:

- Την παροχή μάζας στο κύκλωμα ψύξης του ψυγείου (θεωρητική).
- Τον θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς της εγκατάστασης.
- Την θεωρητική ψυκτική ικανότητα της εγκατάστασης.
- Την ικανότητα του συμπυκνωτή.
- Τον λόγο συμπίεσης της διάταξης.

Απάντηση: Αρχικά θα γίνει χάραξη του ψυκτικού κύκλου και γι αυτό θα ακολουθήσουμε τη διαδικασία χάραξης των ψυκτικών κύκλων όπως κάναμε στα προηγούμενα παραδείγματα.



Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας για το ψυκτικό μέσο R22, στο οποίο έχει χαραχθεί ο ψυκτικός κύκλος της άσκησης. Φαίνονται όλα τα στοιχεία του κύκλου και των μεγεθών, που προκύπτουν κατά την χάραξή του. Για τη χάραξη σκεφτόμαστε ως εξής: χαράσσουμε την ευθεία γραμμή των -15°C μέσα στην καμπάνα και την προεκτείνουμε και έξω από αυτήν και βλέπουμε ότι είναι η ισόθλιπτη των 3 bar . Το σημείο 6 στο οποίο τέμνει την καμπύλη κορεσμένου ατμού είναι εκεί που αρχίζει η υπερθέρμανση μέσα στον εξατμιστή. Η ευθεία των 3 bar τέμνει την ισοθερμοκρασιακή των 0°C στο σημείο 7. Εκεί είναι που το αέριο βγαίνει από τον εξατμιστή και μπαίνει στη γραμμή αναρρόφησης, αφού έχουμε 15°C υπερθέρμανση μέσα στον εξατμιστή. Η ίδια ευθεία (ισοθερμοκρασιακή

των 3 bar) τέμνει την ισοθερμοκρασιακή των +10 °C στο σημείο 1, από όπου αρχίζει η ισεντροπική συμπίεση (12), σύμφωνα με την εκφώνηση. Το σημείο 2, που τελειώνει η συμπίεση, το βρίσκουμε από την τομή της συμπίεσης με την ισοθερμοκρασιακή των +70 °C, που είναι η θερμοκρασία εξόδου από το συμπιεστή. Αμέσως μετά από το σημείο 2, το αέριο μπαίνει στον συμπυκνωτή και η μεταβολή σε αυτόν είναι ισόθλιπτη, άρα χαράσσουμε την οριζόντια ευθεία ξεκινώντας από το σημείο 2 προς τα αριστερά. Η συμπίεση τελειώνει στο σημείο που αυτή τέμνει την καμπύλη κορεσμένου υγρού (αφού δεν έχουμε υπόψυξη) και είναι το σημείο 4. Το 3 είναι εκεί που αρχίζει η συμπύκνωση του αερίου και η θερμοκρασία του είναι +24 °C, όπως φαίνεται από το διάγραμμα. Αυτή είναι η λεγόμενη θερμοκρασία συμπύκνωσης. Η μεταβολή (45) είναι η ισενθαλπική εκτόνωση, και είναι κατακόρυφη. Συναντά την ισόθλιπτη εξάτμιση των 3 bar στο σημείο 5, που είναι το σημείο που το ρευστό μπαίνει στον εξατμιστή. Η εξάτμιση γίνεται από το 5 ως το σημείο 6.

Πάνω στο διάγραμμα έχουν σημειωθεί οι πιέσεις και θερμοκρασίες των χαρακτηριστικών σημείων του κύκλου. Από τα σημεία αυτά έχουν χαραχθεί επίσης οι κάθετες ευθείες που τέμνουν τον οριζόντιο άξονα των ενθαλπιών, ώστε να δούμε την ενθαλπία κάθε σημείου και να την χρησιμοποιήσουμε στους υπολογισμούς που θα κάνουμε. Οι τιμές αυτές δεν φαίνονται στο διάγραμμα αλλά είναι οι εξής:

h_1		=	418	kJ/kg
h_2		=	452	kJ/kg
$h_4 = h_5$		=	231	kJ/kg
h_6		=	400	kJ/kg
h_7		=	408	kJ/kg

Τώρα προχωράμε στους ζητούμενους υπολογισμούς.

A) Για την παροχή μάζας $\dot{m}$ έχουμε πει ότι προσδιορίζεται αν γνωρίζουμε μια από τις ισχύς των τμημάτων της ψυκτικής διάταξης. Εδώ γνωρίζουμε την ισχύ του συμπιεστή και αυτήν θα χρησιμοποιήσουμε, σύμφωνα με τη σχέση (6), την οποία θα επιλύσουμε ως προς την $\dot{m}$.

$$W_c = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \Rightarrow \dot{m} = \frac{W_c}{h_2 - h_1} \Rightarrow \dot{m} = \frac{4,08}{452 - 418} \Rightarrow \dot{m} = 0,120 \text{ kg/s} = 120 \text{ gr/s}$$

Βρήκαμε λοιπόν την παροχή ίση με 120 gr/s. Στην προηγούμενη εξίσωση η ισχύς του συμπιεστή ήταν σε μονάδες kW και η ενθαλπία σε μονάδες kJ/kg και γι αυτό το αρχικό αποτέλεσμα βγήκε σε kg/s. Δεν βάλαμε μονάδες στον τύπο επίλυσης γιατί το ίδιο κάνει και το σχολικό βιβλίο. Όμως αν θέλουμε μπορούμε να δούμε πως θα ήταν η λύση με τις αντίστοιχες μονάδες. Αν δουλέψουμε στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) τότε τα 4,08 kW είναι ίσα με 4080 W, τα 452 kJ/kg = 452.000 J/kg και τα 418 kJ/kg = 418.000 J/kg. Σημειώνοντας αυτές τις αλλαγές στις τιμές των μεγεθών λέμε ότι δουλεύουμε στο SI και το αποτέλεσμα θα είναι και αυτό στο SI, άρα σε kg/s. Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να βάλουμε ή να μην βάλουμε τις μονάδες. Ας δούμε πως θα ήταν με τις μονάδες ο υπολογισμός:

$$W_c = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \Rightarrow \dot{m} = \frac{W_c}{h_2 - h_1} \Rightarrow \dot{m} = \frac{4080 \text{ W}}{452.000 \text{ J/kg} - 418.000 \text{ J/kg}} \Rightarrow \Rightarrow \dot{m} = 0,120 \text{ kg/s} = 120 \text{ gr/s}$$

Παρατηρούμε ότι ουσιαστικά δεν αλλάζει τίποτα.

B) Ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς θα προκύψει από την εξίσωση (11), αν σκεφτούμε ότι η θεωρητική ψυκτική ισχύς υπολογίζεται από τις ενθαλπίες του διαγράμματος. Να προσέξουμε ότι η ενθαλπία εξόδου από τον εξατμιστή που θα πάρουμε θα είναι εκείνη που αντιστοιχεί στο σημείο 7, σύμφωνα με την εκφώνηση της άσκησης. Επομένως θα έχουμε:

$$\text{COP}_\theta = \frac{(\text{Ψυκτική Ισχύς})_\theta}{(\text{Ισχύς Συμπιεστή})_\theta} \Rightarrow \text{COP}_\theta = \frac{h_7 - h_5}{h_2 - h_1} \Rightarrow \text{COP}_\theta = \frac{408 - 231}{452 - 418} \Rightarrow \text{COP}_\theta = 5,2$$

Επομένως βρήκαμε ότι $COP_0 = 5,2$.

Γ) Η Ψυκτική ισχύς δίνεται από τον τύπο (8), μόνο που εδώ τα σημεία των ενθαλπιών θα είναι διαφορετικά. Επίσης θα λάβουμε υπ' όψιν ότι η υπερθέρμανση των 15°C γίνεται μέσα στον εξατμιστή και στην αναρρόφηση η υπόλοιπη αύξηση των 10°C . Επομένως θα έχουμε:

$$\dot{Q}_\psi = \dot{m} \cdot (h_7 - h_5) \Rightarrow \dot{Q}_\psi = 0,120 \text{ kg/s} \cdot (408 \text{ kJ/kg} - 231 \text{ kJ/kg}) \Rightarrow \dot{Q}_\psi = 21,24 \text{ kW}$$

Βρήκαμε ότι η ικανότητα της διάταξης είναι 21,24 kW. Θα μπορούσαμε να το βρούμε πολλαπλασιάζοντας τον θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς με την θεωρητική ισχύ του συμπιεστή: $5,2 \cdot 4,08 \text{ kW} = 21,22 \text{ kW}$. Δεν βγαίνει ακριβώς 21,24 kW διότι έγιναν κάποιες προσεγγίσεις στον COP_0 πριν. Κανονικά ήταν $COP_0 = 5,2059$, οπότε θα είχαμε: $5,2059 \cdot 4,08 \text{ kW} = 21,24 \text{ kW}$. Όμως δεν χρειάζεται σε αυτή την περίπτωση τόσο ακρίβεια για τον θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς.

Δ) Ο συμπυκνωτής ξεκινά τη δράση του από το σημείο 2 του διαγράμματος, που το αέριο μπαίνει σε αυτόν και τελειώνει στο σημείο 4 που το ψυκτικό κορεσμένο υγρό μπαίνει στο εκτονωτικό μέσο. Άρα η ικανότητα του συμπυκνωτή υποδεικνύεται από τις ενθαλπίες των σημείων 2 και 4 και η ικανότητά του θα βρεθεί από τη σχέση (7):

$$\dot{Q}_\Sigma = \dot{m} \cdot (h_2 - h_4) \Rightarrow \dot{Q}_\Sigma = 0,12 \text{ kg/s} \cdot (452 - 231 \text{ kJ/kg}) \Rightarrow \dot{Q}_\Sigma = 26,52 \text{ kW}$$

Επομένως η ικανότητα του συμπυκνωτή είναι 26,52 kW. Μπορούμε τώρα να επιβεβαιώσουμε και τη γνωστή σχέση (3): $\dot{Q}_\Sigma = \dot{Q}_\psi + W_C$. Βρίσκουμε ότι $\dot{Q}_\psi + W_C = 21,24 + 4,08 = 25,32 \text{ kW}$. Η τιμή αυτή έχει μια μικρή διαφορά από την τιμή των 26,52 kW για την ισχύ του συμπυκνωτή. Η διαφορά είναι $26,52 - 25,32 = 1,2 \text{ kW}$ και οφείλεται στο ότι την υπερθέρμανση της αναρρόφησης δεν την εκμεταλλεύτηκε ο εξατμιστής. Δηλαδή η αύξηση της ενθαλπίας από h_7 σε h_1 χάθηκε στο περιβάλλον. Αν γινόταν στον εξατμιστή θα είχε επί πλέον ισχύ ίση με: $\dot{m} \cdot (h_1 - h_7) = 0,12 \cdot (418 - 408) = 1,2 \text{ kW}$. Είναι η διαφορά που μας έλειπε.

Βλέπουμε ότι έχει σημασία για την απόδοση της διάταξης να γνωρίζουμε που γίνεται η υπερθέρμανση. Αν όλη γινόταν μέσα στον εξατμιστή, τα 1,2 kW θα αποτελούσαν ψυκτική ισχύ και τότε η συνολική θα ήταν $1,2 \text{ kW} + 21,24 \text{ kW} = 22,44 \text{ kW}$, οπότε ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς θα ήταν: $COP_0 = \frac{(\text{Ψυκτική Ισχύς})_0}{(\text{Ισχύς Συμπιεστή})_0} = \frac{22,44}{4,08} = 5,5$, λίγο μεγαλύτερος δηλαδή.

Ε) Ο λόγος συμπίεσης θα βρεθεί από τις πιέσεις στον εξατμιστή (αναρρόφηση) και τον συμπυκνωτή (κατάθλιψη) που είναι σύμφωνα με το διάγραμμα αντιστοίχως: 3 bar και 10 bar. Έτσι, σύμφωνα με την εξίσωση ορισμού (9) θα έχουμε:

$$CR = \frac{P_{KAT}}{P_{AN}} \Rightarrow CR = \frac{10 \text{ bar}}{3 \text{ bar}} \Rightarrow CR = 3,33$$

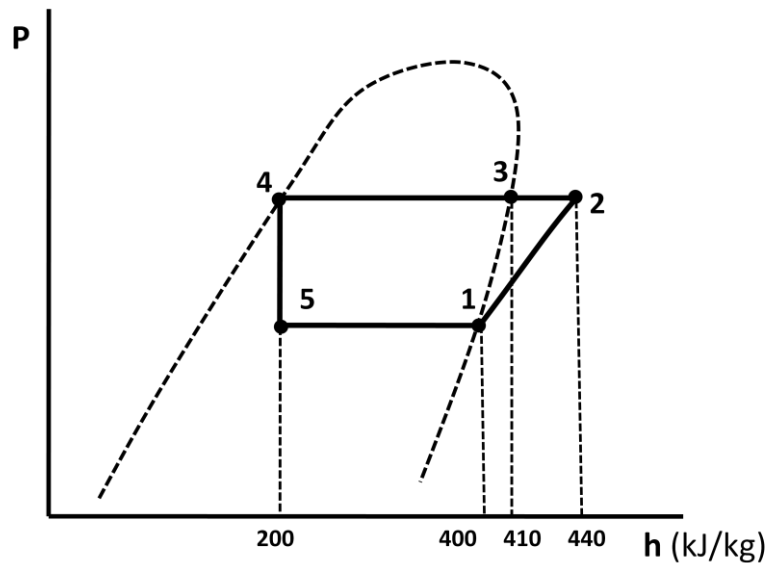
Άρα ο λόγος συμπίεσης είναι 3,33.

Σημείωση: Το παράδειγμα αυτό, όπως και όλα τα άλλα, το λύνουμε πολύ αναλυτικά για να γίνει κατανοητό από τους μαθητές, ακόμα και τους πιο αδύνατους. Οι μαθητές, σε μια εξέταση στο σχολείο ή σε Πανελλαδικές εξετάσεις, μπορούν να χαράξουν τον ψυκτικό κύκλο χωρίς εξηγήσεις και να λύσουν τις εξισώσεις όπως κι εμείς εδώ αλλά χωρίς (πολλά) λόγια.

Παράδειγμα 11. Έχουμε μια ψυκτική εγκατάσταση που εργάζεται χωρίς υπόψυξη και υπερθέρμανση. Να κάνετε τον ψυκτικό κύκλο πρόχειρα σε ένα διάγραμμα P-h. Στον οριζόντιο άξονα να τοποθετήσετε τις εξής ειδικές ενθαλπίες, αφού φέρετε τις κατακόρυφες ευθείες από τα χαρακτηριστικά σημεία του κύκλου, όπως νομίζετε ότι είναι η σωστή τους θέση: 200 kJ/kg, 440 kJ/kg, 400 kJ/kg, 410 kJ/kg. Κατόπιν να υπολογίσετε τα: Α) θερμότητα συμπύκνωσης, Β) θερμότητα συμπίεσης, Γ) ψυκτικό αποτέλεσμα και Δ) COP.

Απάντηση: Στο επόμενο σχήμα φαίνεται πρόχειρα χαραγμένος ένας ψυκτικός κύκλος. Έχουν τοποθετηθεί και οι τιμές των ειδικών ενθαλπιών που δίνονται, όπως πρέπει. Η εξήγηση για τις θέσεις είναι η εξής: Η μικρότερη τιμή της ενθαλπίας (220 kJ/kg) θα είναι προφανώς στην εκτόνωση (45) και η μεγαλύτερη (440 kJ/kg) στην έξοδο του αερίου από τον συμπιεστή (σημείο 2). Στα διαγράμματα πίεσης ενθαλπίας η καμπάνα έχει μια μορφή που η καμπύλη κορεσμένου ατμού έχει κλίση προς τα αριστερά, δηλαδή στις μεγαλύτερες πιέσεις

αντιστοιχούν μεγαλύτερες ενθαλπίες. Άρα στην έναρξη της συμπίεσης (σημείο 1) θα έχουμε μικρότερη ενθαλπία από ότι στην έναρξη της συμπύκνωσης (σημείο 3). Επομένως οι τιμές των ενθαλπιών είναι όπως φαίνονται στο σχήμα.



A) Η θερμότητα συμπύκνωσης θα δίνεται από τη διαφορά των ενθαλπιών ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του συμπυκνωτή, άρα θα είναι:

$$q_{\Sigma} = h_2 - h_4 \Rightarrow q_{\Sigma} = 440 \text{ kJ/kg} - 200 \text{ kJ/kg} = 240 \text{ kJ/kg}$$

Άρα η θερμότητα συμπύκνωσης για ένα χιλιόγραμμο ψυκτικού είναι 240 kJ.

B) Η θερμότητα συμπίεσης θα προκύψει από τη διαφορά των ειδικών ενθαλπιών μεταξύ εξόδου και εισόδου του ψυκτικού στο συμπιεστή. Επομένως θα έχουμε:

$$W = h_2 - h_1 \Rightarrow W = 440 \text{ kJ/kg} - 400 \text{ kJ/kg} = 40 \text{ kJ/kg}$$

Άρα η θερμότητα συμπίεσης για ένα χιλιόγραμμο ψυκτικού είναι 40 kJ.

Γ) Το ψυκτικό αποτέλεσμα είναι η θερμότητα που απορροφά ο εξατμιστής κατά την εξάτμιση, ανά kg ψυκτικού μέσου και προκύπτει από τη διαφορά των ειδικών ενθαλπιών στην έξοδο (σημείο 1) και στην είσοδο (σημείο 5) του εξατμιστή.

$$q_{\psi} = h_1 - h_5 \Rightarrow q_{\psi} = 400 \text{ kJ/kg} - 200 \text{ kJ/kg} = 200 \text{ kJ/kg}$$

Άρα το συνολικό ψυκτικό αποτέλεσμα για ένα χιλιόγραμμο ψυκτικού είναι 200 kJ.

Δ) Ο θερμοηλεκτρικός συντελεστής συμπεριφοράς θα προκύψει από τη σχέση (11). Εννοείται ότι θα θέσουμε στην ισχύ του συμπιεστή τη θερμότητα συμπίεσης πολλαπλασιασμένη με την παροχή μάζας του ψυκτικού. Μπορούμε πάντως να το κάνουμε όπως και το σχολικό βιβλίο θέτοντας μόνο τις ειδικές ενθαλπίες που αντιστοιχούν στα σημεία που μας ενδιαφέρουν.

$$\text{COP}_{\theta} = \frac{(\text{Ψυκτική Ισχύς})_{\theta}}{(\text{Ισχύς Συμπιεστή})_{\theta}} \Rightarrow \text{COP}_{\theta} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_5)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} \Rightarrow \text{COP}_{\theta} = \frac{400 - 200}{440 - 400} \Rightarrow \text{COP}_{\theta} = 5$$

Παράδειγμα 12. Δίνεται ένα διάγραμμα P-h του ψυκτικού μέσου R-134a. Στο διάγραμμα να κάνετε τον ψυκτικό κύκλο με τα χαρακτηριστικά: χαμηλή πίεση 0,2 MPa, υψηλή πίεση 1MPa, θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή 70 °C. Εάν η ισχύς του συμπιεστή είναι 10 kW να βρείτε την παροχή του ψυκτικού.

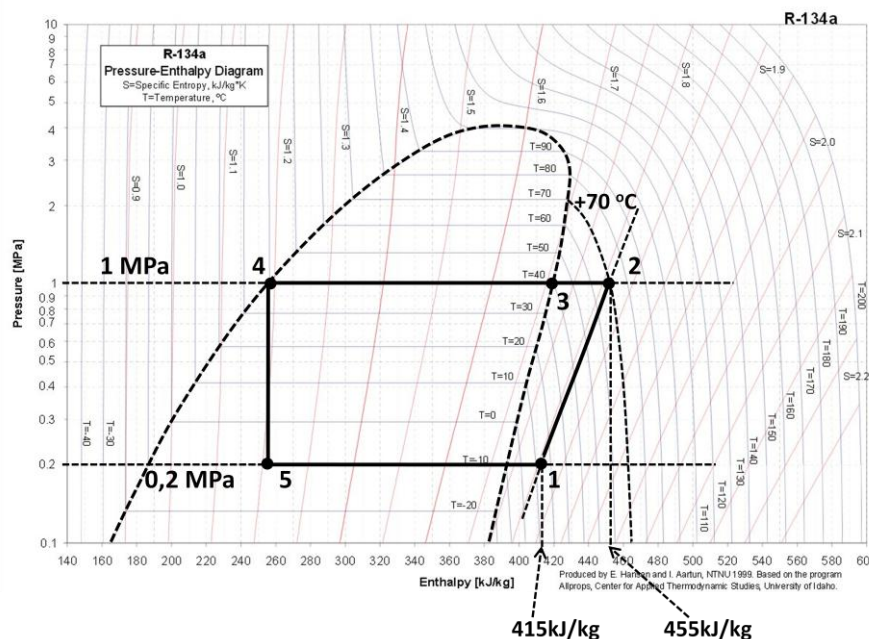
Απάντηση: Στο επόμενο σχήμα φαίνεται όλος ο ψυκτικός κύκλος που χαράσσεται με τα δεδομένα του προβλήματος για το R-134a. Η άσκηση δεν τον ζητά, και το μόνο που αρκούσε ήταν να κατασκευάζαμε την ισεντροπική συμπίεση (12). Εμείς εδώ το κάναμε για να δούμε και άλλα στοιχεία που παίρνουμε για τον ψυκτικό κύκλο.

Για να κατασκευάσουμε την συμπίεση κάνουμε πρώτα τις ισόθλιπτες των 0,2 MPa και 1 MPa και την ισοθερμοκρασιακή των 70 °C. Εκεί που η ισοθερμοκρασιακή των 70 °C τέμνει την ισόθλιπτη της υψηλής πίεσης, θα τελειώνει η συμπίεση και θα είναι το σημείο 2 του

ψυκτικού κύκλου. Άρα, αν από το 2 ακολουθήσουμε την ισεντροπική προς τα κάτω, εκεί που τέμνει την ισόθλιπτη της χαμηλής πίεσης θα είναι η αρχή της συμπίεσης, δηλαδή το σημείο 1. Επομένως προσδιορίσαμε τη συμπίεση (12) στο διάγραμμα του ψυκτικού R-134a και από το διάγραμμα βρίσκουμε τις ειδικές ενθαλπίες που αντιστοιχούν στην αρχή και στο τέλος της. Βλέπουμε ότι είναι: $h_1=415 \text{ kJ/kg}$ και $h_2=455 \text{ kJ/kg}$. Τώρα από τη σχέση (6) θα βρούμε τη ζητούμενη παροχή του ψυκτικού:

$$W_c = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \Rightarrow \dot{m} = \frac{W_c}{h_2 - h_1} \Rightarrow \dot{m} = \frac{10 \text{ kW}}{455 \text{ kJ/kg} - 415 \text{ kJ/kg}} \Rightarrow \Rightarrow \dot{m} = 0,25 \text{ kg/s} = 250 \text{ gr/s}$$

Υπολογίσαμε την παροχή, θεωρώντας ότι όλη η απορροφημένη ισχύς από το συμπιεστή μεταφέρεται ως θερμότητα στο ψυκτικό ρευστό.



Σημείωση: Με τον κύκλο που κατασκευάσαμε μπορούμε να υπολογίσουμε όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη που μας ενδιαφέρουν συνήθως, δηλαδή θερμοκρασίες διαφόρων σημείων και άλλα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά. Επίσης, ο κύκλος χαράχτηκε με τρία δεδομένα μεγέθη, τα οποία μας έδειξαν ότι ο κύκλος έχει και υπερθέρμανση. Δεν μας έδιναν στοιχεία για το αν έχει υπόψυξη ή όχι. Θα μπορούσε να έχει, οπότε η εκτόνωση (45) θα ήταν λίγο πιο αριστερά, σε χαμηλότερη ενθαλπία.

Παράδειγμα 13. Έχουμε μια ψυκτική εγκατάσταση που εργάζεται με υπόψυξη και υπερθέρμανση. Υποθέτουμε ότι έγιναν κάποιες αλλαγές και χωρίς να αλλάξουν οι πιέσεις ο κύκλος μεταβάλλεται και γίνεται χωρίς υπόψυξη και χωρίς υπερθέρμανση. Α) Να κάνετε στο ίδιο διάγραμμα και τους δύο ψυκτικούς κύκλους. Η σχεδίαση να γίνει πρόχειρα. Να δικαιολογήσετε τις αλλαγές που έγιναν στα παρακάτω μεγέθη: Β) ψυκτικό αποτέλεσμα Γ) θερμότητα συμπίκνωσης Δ) COP_{θ} . Να υποθέσετε ότι όλη η υπερθέρμανση γίνεται μέσα στον εξατμιστή.

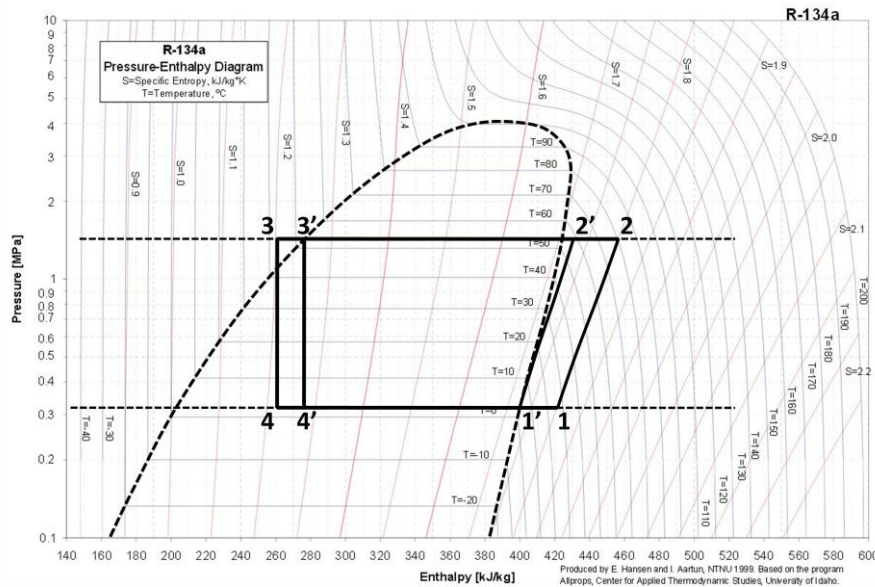
Απάντηση: Α) Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι δύο ψυκτικοί κύκλοι σε ένα διάγραμμα P-h του ψυκτικού μέσου R-134a. Οι δύο ισόθλιπτες ευθείες για την χαμηλή και υψηλή πίεση, χαράχτηκαν τυχαία και δεν μας ενδιαφέρουν οι τιμές των μεγεθών. Ο ψυκτικός κύκλος (12341) βλέπουμε ότι έχει και υπερθέρμανση και υπόψυξη ενώ ο κύκλος (1'2'3'4'1') δεν έχει. Στο σχήμα δεν έχουν σημειωθεί οι ενθαλπίες, αλλά καταλαβαίνουμε τους συμβολισμούς που θα ακολουθήσουν γι αυτές.

Β) Το ψυκτικό αποτέλεσμα προκύπτει από τη διαφορά των ενθαλπιών στον εξατμιστή και είναι:

Κύκλος (12341): $q_{\psi} = h_1 - h_4$

Κύκλος (1'2'3'4'1'): $q'_\psi = h'_1 - h'_4$

Προφανώς, επειδή η διαφορά των ενθαλπιών στον κύκλο (12341) είναι μεγαλύτερη από τη διαφορά στον (1'2'3'4'1'), το ψυκτικό αποτέλεσμα σε αυτόν θα είναι μεγαλύτερο. Η διαφορά προκύπτει από το ότι με την υπερθέρμανση στον εξατμιστή κερδίζουμε επί πλέον ψύξη αφού το ψυκτικό απορροφά περισσότερη θερμότητα. Επίσης, με την υπόψυξη (το βλέπουμε και από το διάγραμμα) το ψυκτικό μπαίνει στο εκτονωτικό μέσο πιο ψυχρό, άρα μπορεί να απορροφήσει περισσότερη θερμότητα στον εξατμιστή.



Γ) Η θερμότητα συμπίκνωσης προκύπτει από τη διαφορά των ενθαλπιών στον συμπυκνωτή και είναι:

Κύκλος (12341): $q_s = h_2 - h_3$

Κύκλος (1'2'3'4'1'): $q'_s = h'_2 - h'_3$

Βλέπουμε και εδώ ότι η θερμότητα συμπίκνωσης είναι μεγαλύτερη στον κύκλο με την υπερθέρμανση και την υπόψυξη. Αυτό δεν σημαίνει ότι είναι και καλό (όπως πριν στον εξατμιστή), διότι ο συμπυκνωτής πρέπει να αποβάλει περισσότερη θερμότητα στο περιβάλλον. Η θερμότητα συμπίκνωσης είναι μεγαλύτερη γιατί λόγω της υπερθέρμανσης, το ψυκτικό πηγαίνει με μεγαλύτερη θερμοκρασία στο συμπιεστή και επομένως θα βγει και με ακόμα μεγαλύτερη από αυτόν, άρα θα απαιτήσει περισσότερη αποβολή θερμότητας από το συμπυκνωτή. Επίσης, αν θέλουμε να γίνει και υπόψυξη, σημαίνει ότι στο συμπυκνωτή θα αποβληθεί ακόμα περισσότερη θερμότητα (της υπόψυξης) για να ψυχθεί το ψυκτικό.

Δ) Ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς για τους δύο κύκλους θα είναι:

Κύκλος (12341): $COP_\theta = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$

Κύκλος (1'2'3'4'1'): $COP'_\theta = \frac{h'_1 - h'_4}{h'_2 - h'_1}$

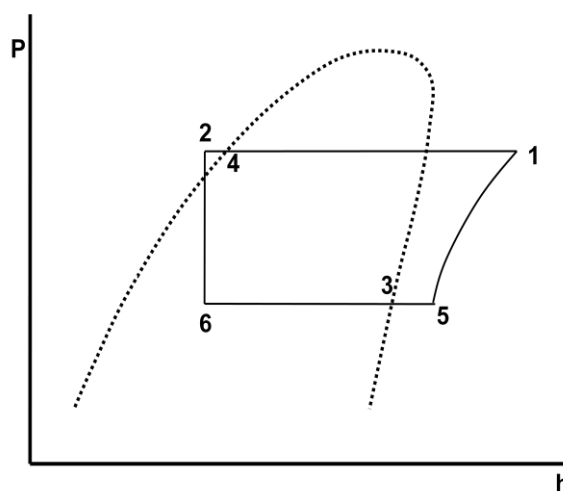
Στις δύο παραπάνω σχέσεις μπορεί οι παρονομαστές των δύο συντελεστών συμπεριφοράς να είναι διαφορετικοί, αλλά αν προσέξουμε στο διάγραμμα θα δούμε ότι είναι σχεδόν ίσοι. Αυτό σημαίνει ότι οι δύο συμπιεστές ξοδεύουν περίπου την ίδια ενέργεια για να επιτύχουν τον ίδιο λόγο συμπίεσης. Άρα, αφού οι παρονομαστές θεωρούνται ίσοι, μεγαλύτερος θα είναι ο συντελεστής με τον μεγαλύτερο αριθμητή. Και αυτός είναι ο COP_θ , του κύκλου με υπόψυξη και υπερθέρμανση. Και είναι λογικό, αφού σε αυτόν τον κύκλο, το ψυκτικό αποτέλεσμα είναι πιο μεγάλο και η κατανάλωση ενέργειας είναι ίση στις δύο περιπτώσεις.

Παράδειγμα 14. Έχουμε μια ψυκτική εγκατάσταση που δουλεύει με υπόψυξη και υπερθέρμανση. Παρακάτω δίνονται κάποια σημεία ψυκτικού κύκλου και οι τιμές ορισμένων

ειδικών ενθαλπιών. Να αντιστοιχίσετε τα σημεία με τις τιμές που ταιριάζουν σε αυτά τα σημεία του ψυκτικού κύκλου.

Τέλος συμπίεσης	1	A	230 kJ/kg
Είσοδος στο εκτονωτικό μέσο	2	B	395 kJ/kg
Τέλος εξάτμισης	3	Γ	410 kJ/kg
Τέλος συμπύκνωσης	4	Δ	210 kJ/kg
Αρχή συμπίεσης	5	E	210 kJ/kg
Αρχή εξατμιστή	6	Z	450 kJ/kg

Έχοντας στο νου μας το σχήμα του ψυκτικού κύκλου, σκεφτόμαστε ως εξής: Η ελάχιστη ειδική ενθαλπία είναι στο εκτονωτικό μέσο. Άρα, οι τιμές 210 kJ/kg (Δ και Ε) που είναι δύο φορές, θα είναι στην είσοδο του εκτονωτικού μέσου (2) και στην έξοδο του που είναι η αρχή του εξατμιστή (6). Για διευκόλυνση παραθέτουμε το επόμενο πρόχειρο διάγραμμα με τον ψυκτικό κύκλο και τα έξι σημεία που δίνει η άσκηση.



Η μεγαλύτερη τιμή της ενθαλπίας (Z) είναι εκεί που η πίεση και η θερμοκρασία γίνονται μέγιστες, άρα στο τέλος της συμπίεσης (1).

Η πιο κοντινή τιμή της ενθαλπίας προς την εκτόνωση (230 kJ/kg προς 210 kJ/kg) είναι η ενθαλπία τη στιγμή που αρχίζει η υπόψυξη, άρα στο τέλος της συμπύκνωσης (όχι του συμπυκνωτή). Άρα το σημείο 4 αντιστοιχεί στο Α.

Τα δύο σημεία που έμειναν είναι το τέλος της εξάτμισης και η αρχή της συμπίεσης και θα πρέπει να διαλέξουμε τιμές από τις: 395 kJ/kg και 410 kJ/kg. Το τέλος της εξάτμισης όμως είναι η αρχή της υπερθέρμανσης και η αρχή της συμπίεσης είναι το τέλος της υπερθέρμανσης. Επειδή η αρχή της υπερθέρμανσης θα έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από το τέλος της, θα αντιστοιχεί και μικρότερη ενθαλπία (αφού οι πιέσεις θα είναι ίσες). Άρα στο 3 θα αντιστοιχεί το Β και στο 5 το Γ.

Συνοπτικά η απάντηση είναι:

1	2	3	4	5	6
Z	Δ	B	A	Γ	E

Παράδειγμα 15. Έχουμε μια ψυκτική εγκατάσταση που δουλεύει χωρίς υπόψυξη και υπερθέρμανση. Να κάνετε τον ψυκτικό κύκλο πρόχειρα σε ένα διάγραμμα P-h. Έχουμε τα εξής δεδομένα για τις ειδικές ενθαλπίες: στην είσοδο του συμπιεστή 392 kJ/kg, στην έξοδο του συμπιεστή 428 kJ/kg και στην εκτονωτική βαλβίδα 228 kJ/kg. Να βρεθούν τα παρακάτω ζητούμενα: α) το ψυκτικό αποτέλεσμα, β) η θερμότητα συμπίεσης, γ) η θερμότητα συμπύκνωσης, δ) ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς. Αν η θεωρητική ισχύς του συμπιεστή είναι 10 kW να βρεθούν: ε) η παροχή του ψυκτικού, ζ) η ψυκτική ισχύς και η) η ισχύς του συμπυκνωτή.

Απάντηση: Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το πρόχειρο διάγραμμα (που αν χρειαστείτε θα κάνετε με χάρακα τις ευθείες και τις καμπύλες με το χέρι) με τον ζητούμενο ψυκτικό κύκλο και τις τιμές των ειδικών ενθαλπιών. Βλέπτετε ότι είναι πολύ πρόχειρο και δεν υπάρχει κάποια σωστή κλίμακα για τις τιμές. Και οι καμπύλες δεν απαιτείται να είναι τέλειες. Όμως πρέπει να είναι ξεκάθαρο το που βρίσκεται κάθε σημείο του ψυκτικού κύκλου και η κάθε τιμή της ενθαλπίας.

α) Το ψυκτικό αποτέλεσμα θα το βρούμε από τις ενθαλπίες της εξάτμισης.

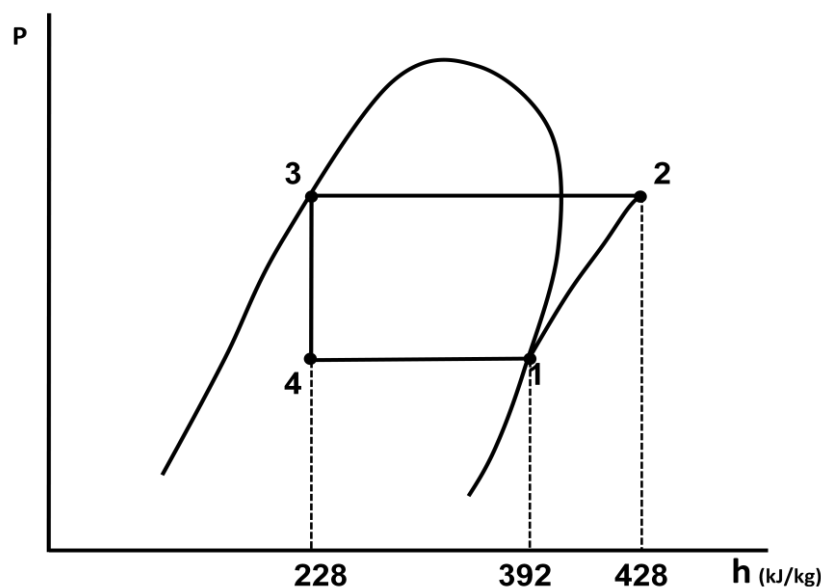
$$q_{\psi} = h_1 - h_4 \Rightarrow q_{\psi} = 392 \text{ kJ/kg} - 228 \text{ kJ/kg} \Rightarrow q_{\psi} = 164 \text{ kJ/kg}$$

β) Η θερμότητα συμπίεσης θα βρεθεί από τη διαφορά των ενθαλπιών στην αρχή και στο τέλος της συμπίεσης.

$$h_c = h_2 - h_1 \Rightarrow h_c = 428 \text{ kJ/kg} - 392 \text{ kJ/kg} \Rightarrow h_c = 36 \text{ kJ/kg}$$

γ) Παρομοίως θα βρεθεί και η θερμότητα συμπύκνωσης.

$$q_{\Sigma} = h_2 - h_3 \Rightarrow q_{\Sigma} = 428 \text{ kJ/kg} - 228 \text{ kJ/kg} \Rightarrow q_{\Sigma} = 200 \text{ kJ/kg}$$



δ) Θα ισχύει:

$$COP_{\theta} = \frac{q_{\psi}}{h_c} = \frac{164 \text{ kJ/kg}}{36 \text{ kJ/kg}} = 4,55$$

ε) Για την παροχή μάζας θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (6), την οποία θα επιλύσουμε ως προς την παροχή μάζας:

$$W_c = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \Rightarrow \dot{m} = \frac{W_c}{h_2 - h_1} \Rightarrow \dot{m} = \frac{10 \text{ kW}}{428 \text{ kJ/kg} - 392 \text{ kJ/kg}} \Rightarrow \Rightarrow \dot{m} = 0,278 \text{ kg/s} = 278 \text{ gr/s}$$

ζ) Η ψυκτική ισχύς θα υπολογιστεί από τη σχέση (8):

$$\dot{Q}_{\psi} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \Rightarrow \dot{Q}_{\psi} = 0,278 \text{ kg/s} \cdot (392 \text{ kJ/kg} - 228 \text{ kJ/kg}) \Rightarrow \dot{Q}_{\psi} = 45,6 \text{ kW}$$

η) Η ισχύς του συμπυκνωτή θα υπολογιστεί από τη σχέση (7):

$$\dot{Q}_{\Sigma} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) \Rightarrow \dot{Q}_{\Sigma} = 0,278 \text{ kg/s} \cdot (428 \text{ kJ/kg} - 228 \text{ kJ/kg}) \Rightarrow \dot{Q}_{\Sigma} = 55,6 \text{ kW}$$

Παρατηρούμε ότι επαληθεύεται και η σχέση (3): $\dot{Q}_{\Sigma} = \dot{Q}_{\psi} + W_c \Rightarrow 55,6 \text{ kW} = 45,6 \text{ kW} + 10 \text{ kW}$.

Κεφάλαιο 8. Προτεινόμενες ασκήσεις

- Έχουμε σε ένα ερμητικά κλειστό δοχείο μια ποσότητα από το ψυκτικό μέσο R22 σε θερμοκρασία 50 °C και πίεση 0,3 MPa. Το τοποθετούμε σε ένα χώρο με πολύ χαμηλή θερμοκρασία (π.χ. -100 °C). Τι θα συμβεί μετά από αρκετό χρόνο στο ψυκτικό μέσο, όταν το δοχείο θα έχει αποκτήσει την πολύ χαμηλή θερμοκρασία του χώρου; Να περιγράψετε τις μεταβολές του με την πάροδο του χρόνου σε σχέση με τη θερμοκρασία. Πώς θα μεταβάλλεται η πίεση στο δοχείο; Για να απαντήσετε να συμβουλευτείτε ένα διάγραμμα P-h για το R22. Σας δίνεται ότι κατά τη μεταβολή το ρευστό περνά από την κατάσταση κορεσμένου ατμού, στην οποία έχει πίεση 0,2 MPa και θερμοκρασία -25 °C.
- Υποθέτουμε ότι έχουμε μια ψυκτική εγκατάσταση που δουλεύει χωρίς υπόψυξη και υπερθέρμανση. Να κάνετε τον ψυκτικό κύκλο πρόχειρα σε ένα διάγραμμα P-h. Υποθέτουμε ότι για κάποιο λόγο ανοίγει η εκτονωτική βαλβίδα (για παράδειγμα μπορούμε να περιστρέψουμε το ρυθμιστικό κοχλία) και μπορεί να περνά περισσότερο ψυκτικό από αυτήν. Να κάνετε στο προηγούμενο διάγραμμα τον νέο ψυκτικό κύκλο που νομίζετε ότι θα προκύψει. Να θεωρήσετε ότι δεν έχετε ούτε και στη δεύτερη περίπτωση υπόψυξη και υπερθέρμανση.
- Υποθέτουμε ότι έχουμε μια ψυκτική εγκατάσταση που δουλεύει χωρίς υπόψυξη και υπερθέρμανση. Παρακάτω δίνονται στην πρώτη στήλη κάποια χαρακτηριστικά σημεία του ψυκτικού κύκλου και παρακάτω μερικές θερμοκρασίες και πιέσεις. Να αντιστοιχίσετε τις τιμές των θερμοκρασιών με τα αντίστοιχα σημεία και να συμπληρώσετε την τελευταία στήλη με τις πιέσεις. (Διευκρίνιση: στο Α η θερμοκρασία είναι -20 °C και η πίεση 0,2 MPa. Στο Β η θερμοκρασία είναι +50 °C και η πίεση 1 MPa. Στο Γ η θερμοκρασία είναι +25 °C και την πίεση πρέπει να την βρείτε εσείς.)

Αρχή συμπύκνωσης	1	A	-20 °C 0,2 MPa
Αρχή συμπίεσης	2	B	+50 °C 1 MPa
Αρχή εξάτμισης	3	Γ	+25 °C
Τέλος εξάτμισης	4	Δ	+25 °C
Εκτονωτική βαλβίδα	5	E	-20 °C
Τέλος συμπίεσης	6	Z	-20 °C

- Έχουμε μια ψυκτική συσκευή που δουλεύει με υπόψυξη και υπερθέρμανση. Υποθέτουμε ότι αυξάνεται η θερμοκρασία συμπύκνωσης, ενώ τα μεγέθη της εκτόνωσης και της εξάτμισης του κύκλου μένουν ίδια. Να δικαιολογήσετε τις αλλαγές που θα γίνουν στα εξής μεγέθη: α) ψυκτική ισχύς β) ισχύς συμπίεστη γ) ισχύς συμπύκνωσης δ) COP.
- Έχουμε μια ψυκτική εγκατάσταση που εργάζεται χωρίς υπόψυξη και υπερθέρμανση. Υποθέτουμε ότι έγιναν κάποιες αλλαγές και χωρίς να αλλάξουν οι πιέσεις ο κύκλος γίνεται με υπόψυξη και υπερθέρμανση. Α) να κάνετε στο ίδιο διάγραμμα και τους δύο ψυκτικούς κύκλους. Να δικαιολογήσετε τις αλλαγές που έγιναν στα παρακάτω μεγέθη: Β) ψυκτικό αποτέλεσμα Γ) θερμότητα συμπύκνωσης Δ) COP₀.
- Δίνεται διάγραμμα P-h για το ψυκτικό μέσο R22. Στο διάγραμμα αυτό να κάνετε τον ψυκτικό κύκλο που έχει τα δεδομένα: υπόψυξη 5 °C, θερμοκρασία εισόδου στον συμπίεστη 0°C, θερμοκρασία ατμοποίησης -25°C και θερμοκρασία εξόδου από τον συμπίεστη 80°C.
Κατόπιν να βρείτε:
Α) Την θερμότητα συμπίεσης
Β) Την θερμότητα συμπύκνωσης
Γ) Το ψυκτικό αποτέλεσμα
Δ) Τον COP
Ε) Τον λόγο συμπίεσης

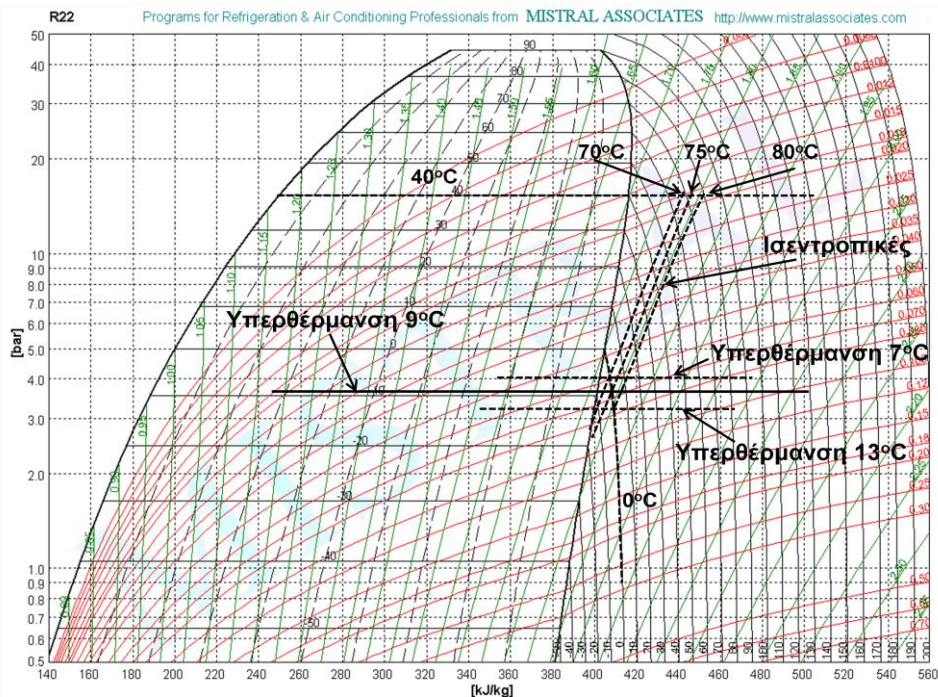
- Ζ) Την υπερθέρμανση
7. Για το ψυκτικό μέσο R-134a να κατασκευάσετε ένα ψυκτικό κύκλο στο διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας, ο οποίος να έχει υπερθέρμανση (όλη μέσα στον εξατμιστή) αλλά να μην έχει υπόψυξη. Η θερμοκρασία στην έξοδο του συμπιεστή είναι 60 °C, η θερμοκρασία συμπύκνωσης είναι 40 °C και η θερμοκρασία εξάτμισης είναι 0 °C. Να υπολογίσετε:
1. Τη χαμηλή πίεση
 2. Τη υψηλή πίεση
 3. Την υπερθέρμανση
 4. Το βαθμό ξηρότητας στην είσοδο του εξατμιστή
 5. Το ψυκτικό αποτέλεσμα
 6. Τη θερμότητα συμπίεσης
 7. Τη θερμότητα συμπύκνωσης
 8. Το θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς
8. Να κατασκευάσετε τον ψυκτικό κύκλο για το ψυκτικό μέσο R-134a ο οποίος έχει τα εξής χαρακτηριστικά: δεν έχει υπόψυξη, η χαμηλή πίεση είναι 0,3 MPa, η υψηλή πίεση είναι 15 MPa, υπερθέρμανση 10 °C μέσα στον εξατμιστή και 10 °C στη γραμμή αναρρόφησης. Να υπολογίσετε:
1. Τη θερμοκρασία εξάτμισης
 2. Τη θερμοκρασία συμπύκνωσης
 3. Τη θερμοκρασία που μπαίνει το ψυκτικό στο συμπυκνωτή
 4. Τη θερμοκρασία που μπαίνει το ψυκτικό στο συμπιεστή
 5. Το βαθμό ξηρότητας στην είσοδο του εξατμιστή
 6. Το ψυκτικό αποτέλεσμα
 7. Τη θερμότητα συμπίεσης
 8. Τη θερμότητα συμπύκνωσης
 9. Το θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς
 10. Πόσος θα ήταν ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς αν όλη η υπερθέρμανση γινόταν μέσα στον εξατμιστή;
9. Ένας ψυκτικός κύκλος δεν έχει υπόψυξη και υπερθέρμανση. Να αντιστοιχήσετε τις καταστάσεις στην αριστερή στήλη με τα δεδομένα της τελευταίας.

Ειδική ενθαλπία στην αρχή της συμπίεσης	1	A	400 kJ/kg
Πίεση στον εξατμιστή	2	B	80 %
Ειδική ενθαλπία στο τέλος της συμπίεσης	3	Γ	12 kW
Ειδική ενθαλπία στην είσοδο στο εκτονωτικό μέσο	4	Δ	3 bar
Πίεση στο συμπυκνωτή	5	E	-10 °C
Βαθμός ξηρότητας	6	Z	12 bar
Θερμοκρασία εξάτμισης	7	H	+40 °C
Θερμοκρασία συμπύκνωσης	8	Θ	180 kJ/kg
COP	9	K	350 kJ/kg
Ισχύς συμπύκνωσης	10	Λ	4,2

10. Να χαράξετε τον ψυκτικό κύκλο για το ψυκτικό μέσο R22 με τα εξής χαρακτηριστικά: θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου στο συμπιεστή -10 °C και +60 °C αντίστοιχα, χαμηλή πίεση 2 bar και υπόψυξη 5 °C. Να υπολογίσετε:
1. Τη θερμοκρασία εξάτμισης
 2. Τη υψηλή πίεση
 3. Την υπερθέρμανση
 4. Τη θερμοκρασία συμπύκνωσης
 5. Τη θερμοκρασία που μπαίνει το ψυκτικό στο συμπυκνωτή
 6. Το βαθμό ξηρότητας στην είσοδο του εξατμιστή
 7. Το ψυκτικό αποτέλεσμα (όλη η υπερθέρμανση μέσα στον εξατμιστή)
 8. Τη θερμότητα συμπίεσης

9. Τη θερμότητα συμπύκνωσης και
10. Το θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς
11. Να κατασκευάσετε τον ψυκτικό κύκλο για το ψυκτικό μέσο R22 στον οποίο δεν έχουμε υπόψυξη. Είναι γνωστό ότι η υπερθέρμανση είναι 9°C . Επίσης γνωρίζουμε ότι η θερμοκρασία του αερίου στην είσοδο του συμπιεστή είναι 0°C και η θερμοκρασία συμπύκνωσης 40°C .

Υπόδειξη: Η άσκηση αυτή λύνεται μέσω του διαγράμματος μόνο προσεγγιστικά και με δοκιμές ως εξής: στο διάγραμμα P-h του R22 φέρνουμε την ισοθερμοκρασιακή των 0°C και την οριζόντια γραμμή μέσα στην καμπάνα των 40°C , την οποία προεκτείνουμε και έξω από τη καμπάνα. Τώρα θα κάνουμε δοκιμές: παίρνουμε ένα σημείο στην ισόθλιπτη των 40°C , ας πάρουμε εκείνο που έχει θερμοκρασία 80°C . Από εκεί ακολουθούμε την ισεντροπική προς τα κάτω και τέμνει την ισοθερμοκρασιακή των 0°C σε ένα σημείο του οποίου βρίσκουμε την υπερθέρμανση, υποθέτοντας ότι από αυτό αρχίζει η συμπίεση του κύκλου. Βλέπουμε ότι η υπερθέρμανση είναι περίπου 13°C . Εμείς θέλουμε μικρότερη. Άρα αντί για την ισεντροπική των 80°C παίρνουμε την ισεντροπική των 70°C . Αυτή τέμνει την ισοθερμοκρασιακή των 0°C σε σημείο που δίνει υπερθέρμανση 7°C , που είναι μικρότερη από τους 9°C που θέλουμε. Αν πάρουμε την ισεντροπική των 75°C βλέπουμε ότι έχουμε την επιθυμητή υπερθέρμανση. Κατόπιν μπορούμε εύκολα να κάνουμε το ζητούμενο ψυκτικό κύκλο. Επισημαίνουμε ότι η άσκηση αυτή είναι δύσκολη και δεν είναι εύκολο να έχουμε πολύ μεγάλη ακρίβεια στις τιμές των μεγεθών του διαγράμματος.



12. Αν θέλετε μια παρόμοια με την προηγούμενη άσκηση, μπορείτε να κάνετε την εξής: να χαράξετε τον ψυκτικό κύκλο με δεδομένη την υπερθέρμανση 12°C και θερμοκρασία εισόδου στο συμπιεστή -5°C και εξόδου 50°C .
13. Να κατασκευάσετε τον ψυκτικό κύκλο του ψυκτικού μέσου R22 με υπερθέρμανση 15°C , χαμηλή πίεση 3 bar και υψηλή 14 bar. Θεωρούμε ότι όλη η υπερθέρμανση γίνεται μέσα στον εξατμιστή. Αν γνωρίζετε ότι η παροχή του ρευστού στη διάταξη είναι $0,4\text{ kg/s}$ να υπολογίσετε με τη βοήθεια του διαγράμματος Mollier:
 - Την θεωρητική ψυκτική ικανότητα της διάταξης
 - Την θεωρητική ισχύ του συμπιεστή
 - Την ισχύ της συμπύκνωσης
 - Τον θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς

- Αν ο πραγματικός συντελεστής συμπεριφοράς είναι 3 και η πραγματική ισχύς του συμπιεστή 12 kW να υπολογίσετε την πραγματική ψυκτική ικανότητα της διάταξης.

Σημείωση: Στο σχολικό βιβλίο δεν γίνεται κανένα σχόλιο για τον πραγματικό συντελεστή συμπεριφοράς, πέρα από τον ορισμό του. Γι αυτό κι εμείς δεν θα επεκταθούμε. Απλά, κάνετε την άσκηση αυτή και σίγουρα θα σας δημιουργηθούν αξιόλογες απορίες για το μέγεθος της πραγματικής και θεωρητικής ισχύος του συμπιεστή.

14. Για το ψυκτικό μέσο R22 να κατασκευάσετε τον ψυκτικό κύκλο με χαμηλή πίεση 0,3 MPa και υψηλή 12 MPa. Ο κύκλος δεν έχει υπερθέρμανση και υπόψυξη. Αν γνωρίζουμε ότι ο συμπιεστής έχει θεωρητική ισχύ 800 W, να υπολογίσετε:
 1. Τη θερμοκρασία εξάτμισης
 2. Τη θερμοκρασία συμπύκνωσης
 3. Τη θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού από τον συμπιεστή
 4. Το ψυκτικό αποτέλεσμα
 5. Την ψυκτική ισχύ
 6. Τη θερμότητα συμπίεσης
 7. Τη θερμότητα συμπύκνωσης
 8. Την ισχύ συμπύκνωσης
 9. Το θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς
 10. Το βαθμό ξηρότητας στην είσοδο του εξατμιστή
15. Να κατασκευάσετε τον ψυκτικό κύκλο του μέσου R22 με γνωστό ότι η ειδική ενθαλπία στην είσοδο του συμπιεστή είναι 400 kJ/kg και στην έξοδο 440 kJ/kg. Ο κύκλος δεν έχει υπερθέρμανση και υπόψυξη. Κατόπιν να υπολογιστούν:
 1. Η θερμοκρασία εξάτμισης
 2. Η θερμοκρασία συμπύκνωσης
 3. Η θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού από τον συμπιεστή
 4. Το ψυκτικό αποτέλεσμα
 5. Η θερμότητα συμπίεσης
 6. Η θερμότητα συμπύκνωσης
 7. Ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς
 8. Ο βαθμός ξηρότητας στην είσοδο του εξατμιστή
16. Ένας ψυκτικός κύκλος έχει υπόψυξη και υπερθέρμανση. Να αντιστοιχήσετε τις καταστάσεις στην αριστερή στήλη με τα δεδομένα της τελευταίας.

Πίεση στον εξατμιστή	1	A	6 kW
Θερμοκρασία εξάτμισης	2	B	4
COP	3	Γ	400 kJ/kg
Ειδική ενθαλπία στην είσοδο στο εκτονωτικό μέσο	4	Δ	12 bar
Πίεση στο συμπυκνωτή	5	E	38 °C
Θερμοκρασία συμπύκνωσης	6	Z	90 %
Ειδική ενθαλπία στην αρχή της συμπίεσης	7	H	250 kJ/kg
Ισχύς συμπύκνωσης	8	Θ	-25 °C
Ειδική ενθαλπία στο τέλος της συμπίεσης	9	K	420 kJ/kg
Βαθμός ξηρότητας	10	Λ	4 bar
Ψυκτική ισχύς	11	M	460 kJ/kg
Ειδική ενθαλπία στο τέλος της εξάτμισης	12	N	8 kW

17. Ένας ψυκτικός κύκλος δεν έχει υπόψυξη και υπερθέρμανση. Να αντιστοιχήσετε τις καταστάσεις στην αριστερή στήλη με τα δεδομένα της τελευταίας, αφού προσθέσετε τις μονάδες: W (όχι kW), kJ/kg, bar, °C. Την αντιστοίχιση των μονάδων θα κάνετε σκεπτόμενοι τον ψυκτικό κύκλο σε ένα διάγραμμα P-h και τις τιμές που είναι δυνατόν να πάρουν τα μεγέθη. Για παράδειγμα δεν είναι

δυνατόν ο αριθμός -16 να αντιστοιχεί στη θερμοκρασία συμπύκνωσης. Επίσης η συμπλήρωση θα γίνει με τελικό σκοπό να χρησιμοποιηθούν όλοι οι αριθμοί και οι μονάδες.

Πίεση στο συμπυκνωτή	1	A	-16
Θερμοκρασία εξατμίσης	2	B	4
Πίεση στον εξατμιστή	3	Γ	400
Ειδική ενθαλπία στην είσοδο στο εκτονωτικό μέσο	4	Δ	12
Ισχύς συμπιεστή	5	E	32
Θερμοκρασία συμπύκνωσης	6	Z	9000

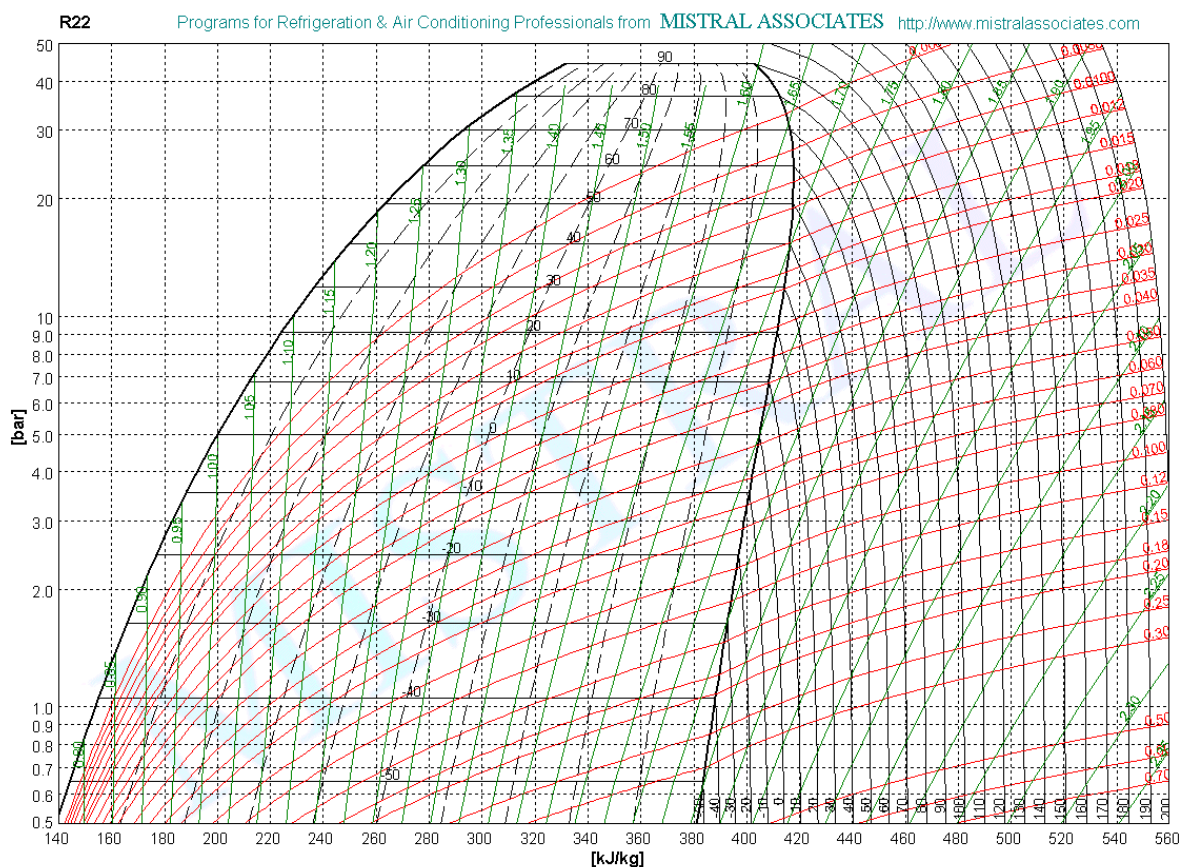
Κεφάλαιο 9. Ερωτήσεις θεωρίας

Παρακάτω δίνονται μερικές ερωτήσεις από το τμήμα της θεωρίας που αφορά στον ψυκτικό κύκλο. Δίπλα σε κάθε ερώτηση υπάρχει και η σελίδα ή οι σελίδες του σχολικού βιβλίου, που θα βρείτε την απάντησή.

1. Να κάνετε ένα γενικό διάγραμμα P-h και να χωρίσετε τις περιοχές του αναφέροντας τη φάση στην οποία βρίσκετε το ψυκτικό στην κάθε μία. (56-58)
2. Να κάνετε το γενικό διάγραμμα P-h και να κάνετε μια ισοθερμοκρασιακή γραμμή που να καλύπτει όλες τις περιοχές. Γιατί μέσα στην καμπάνα είναι οριζόντια; (60)
3. Στο διάγραμμα P-h τι παριστάνουν τα σημεία της γραμμής πάνω στην καμπάνα; (56)
4. Ποια θερμοδυναμικά μεγέθη μας δείχνει το διάγραμμα P-h; (58-61)
5. Που βρίσκονται οι γραμμές σταθερής ξηρότητας και τι παριστάνουν; (58)
6. Να κάνετε το γενικό διάγραμμα P-h και να σχεδιάσετε ένα απλό ψυκτικό κύκλο (χωρίς υπόψυξη – υπερθέρμανση) εξηγώντας κάθε ένα από τα τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία και τα τέσσερα τμήματά του. (62-63-64)
7. Ποιο είναι το ψυκτικό αποτέλεσμα και ποια η ψυκτική ικανότητα; Ποια σχέση συνδέει αυτά τα δύο μεγέθη; (66)
8. Να κάνετε το γενικό διάγραμμα P-h και να σημειώσετε σ' αυτό τα διάφορα χαρακτηριστικά σημεία. Κατόπιν να εκφράσετε με ενθαλπίες τα παρακάτω μεγέθη: θερμότητα συμπύκνωσης - θερμότητα συμπίεσης - ψυκτικό αποτέλεσμα. (66-67-68)
9. Ποια σχέση συνδέει την ισχύ του συμπυκνωτή, την ισχύ του συμπιεστή και την ψυκτική ισχύ μιας διάταξης. (69) Μπορείτε με βάση ένα διάγραμμα ψυκτικού κύκλου να εξηγήσετε τη σχέση αυτή;
10. Να δώσετε τον ορισμό του θεωρητικού συντελεστή συμπεριφοράς. Να γράψετε την σχέση του με τις ενθαλπίες. Ποιες τιμές παίρνει συνήθως; (69-70)
11. Να δώσετε τον ορισμό του πραγματικού συντελεστή συμπεριφοράς μιας διάταξης. (70-71)
12. Να κάνετε το γενικό διάγραμμα P-h και να σχεδιάσετε ένα ψυκτικό κύκλο με υπόψυξη και υπερθέρμανση, εξηγώντας κάθε χαρακτηριστικό σημείο και τμήμα του. Ιδιαίτερα να δείξετε τις περιοχές υπόψυξης και υπερθέρμανσης διευκρινίζοντας σε ποια όργανα μιας ψυκτικής διάταξης γίνονται. (71-72)
13. Τι είναι η υπερθέρμανση, γιατί επιδιώκεται αλλά και ποιο το μειονέκτημά της; (71-74)
14. Να κάνετε το γενικό διάγραμμα P-h και να σχεδιάσετε ένα απλό ψυκτικό κύκλο (χωρίς υπόψυξη – υπερθέρμανση). Υποθέστε ότι η χαμηλή πίεση είναι 0,5Mpa και η υψηλή 2,4Mpa. Στο ίδιο διάγραμμα να θεωρήσετε ότι έχουμε αύξηση της υψηλής πίεσης στα 3Mpa. Ποιες άλλες μεταβολές θα έχουμε στα διάφορα μεγέθη του κύκλου; (76-77-78-79)
15. Ποια επίδραση έχει η αλλαγή της θερμοκρασίας εξάτμισης σε μια ψυκτική διάταξη; (80)

Παράρτημα

Εδώ θα δώσουμε τα διαγράμματα Mollier (ή P-h ή πίεσης – ενθαλπίας) για τα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιήθηκαν στις σημειώσεις που έχετε στα χέρια σας (ή μπροστά στα μάτια σας μόνο). Τα διαγράμματα αυτά τα βρήκαμε στο διαδίκτυο και είναι συγκεκριμένων κατασκευαστών ή επιχειρήσεων.



ΨΥΚΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

