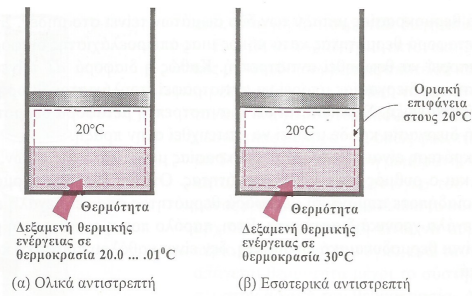


ΔΙΑΛΕΞΗ 10  
15/12/2020

**Β' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ**



Σχήμα 5-42 Ολικά και εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες μεταφοράς θερμότητας.

υπόκεινται σε μια διεργασία αλλαγής φάσης σε σταθερή πίεση, επομένως και σε σταθερή θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο σχήμα 5-42. Και οι δύο διεργασίες είναι εσωτερικά αντιστρεπτές, εφόσον και οι δύο διεξάγονται ισοθερμοκρασιακά και διέρχονται από τις ίδιες καταστάσεις ισορροπίας. Η πρώτη διεργασία είναι και εξωτερικά αντιστρεπτή, γιατί η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται κατά μήκος μιας απειροελάχιστης διαφοράς θερμοκρασίας  $dT$ . Η δεύτερη όμως διεργασία είναι εξωτερικά μη-αντιστρεπτή, γιατί πραγματοποιείται κατά μήκος μιας πεπερασμένης διαφοράς θερμοκρασίας  $\Delta T$ .

### 5-8 Ο ΚΥΚΛΟΣ CARNOT

Προηγουμένως αναφέρθηκε ότι οι θερμικές μηχανές είναι κυκλικές διατάξεις στις οποίες στο τέλος κάθε κύκλου το ρευστό λειτουργίας επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Σ'ένα τμήμα ενός κύκλου το ρευστό λειτουργίας παράγει έργο, ενώ σ'ένα άλλο μέρος του κύκλου παρέχεται έργο προς το ρευστό λειτουργίας. Η διαφορά των δύο αυτών έργων είναι το καθαρό έργο που παράγεται από τη θερμική μηχανή. Η απόδοση μιας θερμικής μηχανής εξαρτάται από τον τρόπο εκτέλεσης των επιμέρους διεργασιών που αποτελούν τον κύκλο. Το έργο και κατά συνέπεια η απόδοση του κύκλου είναι δυνατό να μεγιστοποιηθούν, εάν οι διεργασίες που αποτελούν τον κύκλο απαιτούν λιγότερο και παράγουν περισσότερο έργο, δηλαδή εάν είναι *αντιστρεπτές*. Επομένως, είναι φυσικό οι αντιστρεπτοί κύκλοι, δηλαδή οι κύκλοι που αποτελούνται εξ ολοκλήρου από αντιστρεπτές διεργασίες, να έχουν και τις μεγαλύτερες αποδόσεις.

Όμως στην πράξη, δεν είναι δυνατό να εκμηδενισθούν οι διάφορες αιτίες αναντιστρεπτότητας, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατό να επιτευχθούν αντιστρεπτοί κύκλοι. Παρόλα αυτά, οι αντιστρεπτοί κύκλοι παρέχουν το ανώτατο όριο απόδοσης των πραγματικών κύκλων. Οι θερμικές μηχανές και τα ψυγεία, που λειτουργούν σε αντιστρεπτούς κύκλους, χρησιμοποιούνται σαν πρότυπα σύγκρισης για τις πραγματικές μηχανές και ψυγεία. Επίσης, οι αντιστρεπτοί κύκλοι χρησιμοποιούνται σαν το πρώτο στάδιο για την ανάπτυξη των πραγματικών κύκλων, οι οποίοι στη συνέχεια τροποποιού-

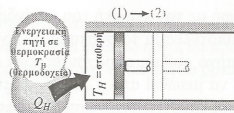
νται κατάλληλα ανάλογα με τις απαιτήσεις.

Πιθανώς, ο πιο γνωστός αντιστρεπτός κύκλος είναι ο **κύκλος Carnot**, ο οποίος προτάθηκε για πρώτη φορά το 1824 από τον γάλλο μηχανικό Sadi Carnot. Η θεωρητική θερμική μηχανή, η οποία λειτουργεί πάνω σ' ένα κύκλο Carnot, ονομάζεται **θερμική μηχανή του Carnot**. Ο κύκλος Carnot αποτελείται από τέσσερις αντιστρεπτές διεργασίες, δύο ισόθερμες και δύο αδιαβατικές και μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο από ένα κλειστό σύστημα όσο και από ένα σύστημα μόνιμης ροής (ανοικτό).

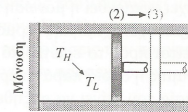
Θεωρείται ένα κλειστό σύστημα, που αποτελείται από ένα αέριο, το οποίο περιέχεται σε μια διάταξη εμβόλου-κυλίνδρου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5-43. Η μόνωση της κεφαλής του κυλίνδρου μπορεί να αφαιρεθεί, με αποτέλεσμα ο κύλινδρος να έρχεται σε επαφή με δεξαμενές ενέργειας, ώστε να μπορεί να λάβει χώρα μεταφορά θερμότητας. Οι τέσσερις αντιστρεπτές διεργασίες που αποτελούν τον κύκλο Carnot είναι οι ακόλουθες:

□ **Αντιστρεπτή ισόθερμη εκτόνωση (διαστολή)** (διεργασία 1-2,  $T_H = \text{σταθερή}$ ). Αρχικά (κατάσταση 1), η θερμοκρασία του αερίου είναι  $T_H$  και η κεφαλή του κυλίνδρου βρίσκεται σε επαφή με μια πηγή ενέργειας σε θερμοκρασία  $T_H$ . Το αέριο αφήνεται να εκτονωθεί με αργό ρυθμό, παράγοντας έτσι έργο προς το περιβάλλον. Καθώς το αέριο εκτονώνεται, η θερμοκρασία του τείνει να ελαττωθεί. Όμως, μόλις η θερμοκρασία μειωθεί κατά μια απειροελάχιστη ποσότητα  $dT$ , ένα ποσό θερμότητας ρέει από την δεξαμενή προς το αέριο αυξάνοντας τη θερμοκρασία σε  $T_H$ . Έτσι, η θερμοκρασία του αερίου παραμένει συνέχεια σταθερή και ίση με  $T_H$ . Επίσης, εφόσον η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της δεξαμενής και του αερίου δεν υπερβαίνει ποτέ τη διαφορική ποσότητα  $dT$ , αυτή θα είναι μια αντιστρεπτή διεργασία μεταφοράς θερμότητας. Αυτό συνεχίζεται μέχρι το έμβολο να φτάσει στη θέση 2. Το συνολικό ποσό θερμότητας που μεταφέρθηκε στο αέριο κατά τη διάρκεια της διαστολής ισούται με  $Q_H$ .

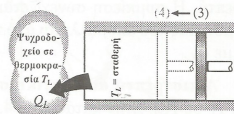
□ **Αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση (διαστολή)** (διεργασία 2-3, η θερμοκρασία μειώνεται από  $T_H$  σε  $T_L$ ). Στην κατάσταση 2, η δεξαμενή θερμότητας που βρισκόταν σε



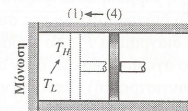
(α) Διεργασία 1-2



(β) Διεργασία 2-3



(γ) Διεργασία 3-4



(δ) Διεργασία 4-1

Σχήμα 5-43 Διεξαγωγή του κύκλου Carnot σ' ένα κλειστό σύστημα.

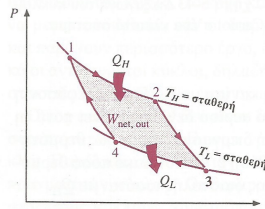
επαφή με την κεφαλή του κυλίνδρου απομακρύνεται και αντικαθίσταται από μόνωση, με αποτέλεσμα το σύστημα να γίνεται αδιαβατικό. Το αέριο συνεχίζει να εκτονώνεται με αργό ρυθμό, παράγοντας έτσι έργο προς το περιβάλλον μέχρι που η θερμοκρασία του να μειωθεί από  $T_H$  σε  $T_L$  (κατάσταση 3). Το έμβολο θεωρείται ότι κινείται χωρίς τριβές και ότι η εκτόνωση διεξάγεται σε συνθήκες ψευδοίσορροπίας, οπότε η διεργασία είναι αντιστρεπτή και αδιαβατική.

□ **Αντιστρεπτή ισόθερμη συμπίεση** (διεργασία 3-4,  $T_L = \text{σταθερή}$ ). Στην κατάσταση 3, έχει αφαιρεθεί η μόνωση του κυλίνδρου και ο τελευταίος βρίσκεται σε επαφή μ' ένα ψυχοδοχείο χαμηλής θερμοκρασίας  $T_L$ . Από την κατάσταση αυτή και μετά, το έμβολο κινείται προς το εσωτερικό του κυλίνδρου κάτω από την επίδραση μιας εξωτερικής δύναμης η οποία παράγει έργο πάνω στο αέριο. Καθώς το αέριο συμπιέζεται, η θερμοκρασία του τείνει να αυξηθεί. Μόλις όμως αυξηθεί κατά μια διαφορική ποσότητα  $dT$ , θερμότητα αρχίζει να "ρέει" από το αέριο προς το ψυχοδοχείο, ώστε το αέριο να επιστρέψει στη θερμοκρασία  $T_L$ . Έτσι, εφόσον η θερμοκρασία του αερίου και του ψυχοδοχείου δεν υπερβαίνουν το διαφορικό ποσό  $dT$ , η μεταφορά θερμότητας είναι αντιστρεπτή. Η συμπίεση συνεχίζεται μέχρι το έμβολο να φθάσει στη θέση 4. Το ποσό θερμότητας που αποβάλλεται από το αέριο κατά τη διάρκεια της διεργασίας αυτής ισούται με  $Q_L$ .

□ **Αντιστρεπτή αδιαβατική συμπίεση** (διεργασία 4-1, η θερμοκρασία αυξάνεται από  $T_L$  σε  $T_H$ ). Στην κατάσταση 4, το ψυχοδοχείο απομακρύνεται και αντικαθίσταται από μόνωση. Το αέριο συνεχίζει να συμπιέζεται αντιστρεπτά, με σκοπό να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση (κατάσταση 1). Κατά τη διάρκεια της αδιαβατικής συμπίεσης, η θερμοκρασία αυξάνεται από  $T_L$  σε  $T_H$  και ο κύκλος ολοκληρώνεται.

Το διάγραμμα  $P$ - $v$  της συνολικής διεργασίας παριστάνεται στο σχήμα 5-44. Όμως, στο διάγραμμα  $P$ - $v$  το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη μιας διεργασίας ισούται με το έργο ογκομεταβολής, όταν αυτή διεξάγεται σε κατάσταση ψευδοίσορροπίας (εσωτερικά αντιστρεπτή). Έτσι, το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη 1-2-3 είναι το έργο που παράγεται από το αέριο κατά τη διάρκεια της διεργασίας εκτόνωσης και το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη 3-4-1 είναι το έργο που απορρίπτεται στον αέρα κατά τη διάρκεια της διεργασίας συμπίεσης. Το εμβαδόν που περικλείεται από τη συνολική διαδρομή του κύκλου (εμβαδόν 1-2-3-4-1) παριστάνει τη διαφορά μεταξύ των δύο παραπάνω ποσοτήτων έργου και ισούται με το καθαρό έργο που παράγεται από τον κύκλο.

Σημειώνεται ότι, εάν στην κατάσταση 3 το αέριο συμπιεζόταν αδιαβατικά και όχι ισόθερμα προκειμένου να εξοικονομηθεί η θερμότητα  $Q_L$ , το σύστημα θα επέστρεφε στην κατάσταση 2 διατρέχοντας τη διαδρομή 3-2. Με αυτόν τον τρόπο, θα ήταν δυνατό να εξοικονομηθεί θερμότητα  $Q_L$ , αλλά δε θα ήταν δυνατόν



Σχήμα 5-44 Διάγραμμα  $P$ - $v$  του κύκλου Carnot.

να παραχθεί από απόδειξη του ότι να εναλλάξει θερμότητα σε δύο δια

Ο κύκλος Carnot Η περίπτωση αυτή γής ισχύος.

Σαν αντιστρεπτική μέγιστη απόδοση Carnot δεν είναι άλλων κύκλων από

### Ο Αντίστροφος

Η θερμική μηχανή αντιστρεπτό κύκλου. Η απόδοσή του, με αποτέλεσμα ψύξης Carnot. Ο κύκλος παραμένει ότι αντιστρέφοντων και τον ποσοστά σπονται. Δηλαδή απορροφάται από θερμοκρασίας και πλεεται προς τη διεύθυνση, ενώ προκειμένου για αυτή τη διεύθυνση το έργο  $W_{net}$ .

Το διάγραμμα Carnot και διαφανεστραμμένες

### 5-9 ΤΑ ΑΞΙΩΜΑΤΑ

Ο δεύτερος νόμος του Plank και από τις διατάξεις. Μια μηχανή που παράγει με μια μόνο διεύθυνση έργο από μια

Από τις διατάξεις συμπεράσματα των μη-αντιστρεπτικών αντιστρεπτικών αξιώματα

1 Η απόδοση μ

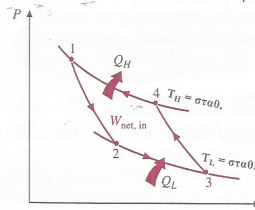
να παραχθεί από τη μηχανή καθαρό έργο εξόδου. Το γεγονός αυτό αποτελεί ακόμα μια απόδειξη του ότι μια θερμική μηχανή, προκειμένου να παράγει καθαρό έργο, θα πρέπει να εναλλάξει θερμότητα το λιγότερο με δύο δεξαμενές θερμότητας οι οποίες θα βρίσκονται σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες.

Ο κύκλος Carnot μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί σ' ένα σύστημα μόνιμης ροής. Η περίπτωση αυτή παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 8 μαζί με δύο ακόμα κύκλους παραγωγής ισχύος.

Σαν αντιστρεπτός κύκλος, ο κύκλος Carnot είναι ένας κύκλος που λειτουργεί με τη μέγιστη απόδοση μεταξύ δύο συγκεκριμένων θερμοκρασιών. Παρόλο που ο κύκλος Carnot δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί στην πράξη, οι αποδόσεις των πραγματικών κύκλων αυξάνονται καθώς οι μηχανικοί προσπαθούν να τον προσεγγίσουν.

### Ο Αντίστροφος Κύκλος Carnot

Η θερμική μηχανή που παρουσιάστηκε παραπάνω αποτελεί έναν εξ ολοκλήρου αντιστρεπτό κύκλο. Έτσι, όλες οι διεργασίες που την αποτελούν είναι δυνατό να αντιστραφούν, με αποτέλεσμα να προκύπτει ο κύκλος ψύξης Carnot. Στην περίπτωση αυτή, ο κύκλος παραμένει ο ίδιος με τη μόνη διαφορά ότι αντιστρέφονται οι κατευθύνσεις των έργων και των ποσοτήτων θερμότητας που εναλλάσσονται. Δηλαδή, ποσό θερμότητας  $Q_L$  απορροφάται από τη δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας και ποσό θερμότητας  $Q_H$  αποβάλλεται προς τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας, ενώ προκειμένου να επιτευχθεί η μεταφορά αυτής της θερμότητας απαιτείται ποσότητα έργου  $W_{\text{net.in}}$ .



Σχήμα 5-45 Διάγραμμα  $P$ - $v$  του αντίστροφου κύκλου Carnot.

Το διάγραμμα  $P$ - $v$  του αντίστροφου κύκλου Carnot είναι το ίδιο μ' αυτό του κύκλου Carnot και διαφέρει μόνο ως προς τις κατευθύνσεις των διεργασιών, οι οποίες είναι αντεστραμμένες, όπως φαίνεται στο σχήμα 5-45.

### 5-9 ΤΑ ΑΞΙΩΜΑΤΑ ΤΟΥ CARNOT

Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής, όπως αυτός διατυπώθηκε από τους Kelvin-Planck και από τον Clausius, θέτει κάποιο όριο ως προς τη λειτουργία των κυκλικών διατάξεων. Μια θερμική μηχανή δε μπορεί να λειτουργεί εναλλάσσοντας θερμότητα με μια μόνο δεξαμενή θερμότητας και ένα ψυγείο δεν μπορεί να λειτουργεί χωρίς παροχή έργου από μια εξωτερική πηγή.

Από τις διατυπώσεις αυτές μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Δύο από τα συμπεράσματα αυτά έχουν σχέση με τη θερμική απόδοση των αντιστρεπτών και των μη-αντιστρεπτών (δηλαδή των πραγματικών) θερμικών μηχανών και είναι γνωστά σαν αξιώματα του Carnot (Σχήμα 5-46). Τα αξιώματα αυτά διατυπώνονται ως εξής:

1 Η απόδοση μιας μη-αντιστρεπτής θερμικής μηχανής είναι πάντα μικρότερη από την



Παραβιάζοντας το πρώτο αξίωμα του Carnot, υποτίθεται ότι η μη-αντιστρεπτή θερμική μηχανή έχει μεγαλύτερη απόδοση από την αντιστρεπτή (δηλαδή  $\eta_{th,irrev} > \eta_{th,rev}$ ), αποδίδοντας έτσι περισσότερο έργο. Να θεωρηθεί τώρα ότι η αντιστρεπτή θερμική μηχανή αντιστρέφεται και λειτουργεί σαν ψυγείο. Το ψυγείο αυτό θα δέχεται έργο εισόδου  $W_{rev}$  και θα αποβάλλει θερμότητα προς τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας. Εφόσον το ψυγείο αποβάλλει ποσό θερμότητας ίσο με  $Q_H$  προς τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας και το ίδιο ποσό θερμότητας μεταφέρεται από τη δεξαμενή προς τη μη-αντιστρεπτή θερμική μηχανή, το συνολικό καθαρό ποσό θερμότητας που εναλλάσσει η δεξαμενή θα ισούται με μηδέν. Οπότε, η δεξαμενή μπορεί να παραληφθεί (απομακρυνθεί) και το ψυγείο να αποβάλλει απευθείας τη θερμότητα  $Q_H$  προς τη μη-αντιστρεπτή θερμική μηχανή.

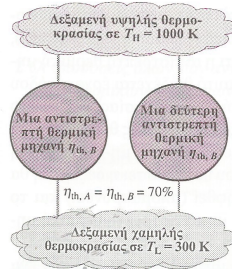
Στη συνέχεια, το ψυγείο και η μη-αντιστρεπτή θερμική μηχανή θεωρούνται σαν ένα σύστημα. Κατά τον τρόπο αυτό προκύπτει μια νέα θερμική μηχανή, η οποία παράγει ένα καθαρό ποσό έργου ίσο με  $W_{irrev} - W_{rev}$ , ενώ ταυτόχρονα εναλλάσσει θερμότητα με μια μόνο δεξαμενή. Το γεγονός αυτό αποτελεί παραβίαση της διατύπωσης των Kelvin και Plank, για το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Κατά συνέπεια, η αρχική υπόθεση ότι  $\eta_{th,irrev} > \eta_{th,rev}$  δεν είναι σωστή. Προκύπτει έτσι το συμπέρασμα ότι καμιά θερμική μηχανή δε μπορεί να έχει μεγαλύτερη απόδοση από την αντίστοιχη αντιστρεπτή θερμική μηχανή που λειτουργεί μεταξύ των ιδίων θερμικών δεξαμενών.

Με ανάλογο τρόπο αποδεικνύεται με το δεύτερο αξίωμα του Carnot. Στην περίπτωση αυτή, η μη-αντιστρεπτή μηχανή αντικαθίσταται από μια επίσης αντιστρεπτή μηχανή, η οποία υποτίθεται ότι έχει μεγαλύτερη απόδοση από την πρώτη και παράγει περισσότερο έργο. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως προηγουμένως, προκύπτει μια θερμική μηχανή η οποία εναλλάσσει θερμότητα με μια μόνο δεξαμενή και παραβιάζει το δεύτερο νόμο. Άρα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι δε μπορεί να υπάρχει μια αντιστρεπτή θερμική μηχανή, η οποία να έχει υψηλότερο συντελεστή απόδοσης από μια άλλη αντιστρεπτή θερμική μηχανή που λειτουργεί μεταξύ των ιδίων δεξαμενών θερμότητας, ανεξάρτητα από τον κύκλο που ακολουθεί η κάθε μηχανή και από ρευστό λειτουργίας που χρησιμοποιεί.

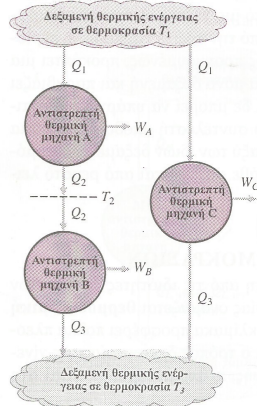
### 5-10 Η ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ

Μια κλίμακα θερμοκρασιών η οποία είναι ανεξάρτητη από τις ιδιότητες των ουσιών που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας ονομάζεται **θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών**. Μια τέτοια θερμοκρασιακή κλίμακα προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στους θερμοδυναμικούς υπολογισμούς και ο τρόπος δημιουργίας της γίνεται με τη βοήθεια μιας αντιστρεπτής θερμικής μηχανής, η οποία παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Το δεύτερο αξίωμα του Carnot, που εξετάστηκε στην παράγραφο 5-9, δηλώνει ότι όλες οι αντιστρεπτές θερμικές μηχανές έχουν την ίδια απόδοση, όταν λειτουργούν μεταξύ των ιδίων δεξαμενών θερμότητας (Σχήμα 5-48). Αυτό σημαίνει ότι η απόδοση μιας αντιστρεπτής μηχανής είναι ανεξάρτητη: (α) από το ρευστό λειτουργίας που χρησιμοποιείται και τις ιδιότητές του και (β) τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται ο



**Σχήμα 5-48** Όλες οι αντιστρεπτές θερμικές μηχανές που λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμικών δεξαμενών έχουν την ίδια απόδοση (το δεύτερο αξίωμα του Carnot).



**Σχήμα 5-49** Η διάταξη θερμικών μηχανών που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της θερμοδυναμικής κλίμακας θερμοκρασιών.

κύκλος ή τον τύπο της αντιστρεπτής μηχανής που χρησιμοποιείται. Επίσης, εφόσον μια δεξαμενή θερμότητας χαρακτηρίζεται από τη θερμοκρασία της, η θερμική απόδοση των αντιστρεπτών θερμικών μηχανών είναι συνάρτηση και μόνον της θερμοκρασίας. Δηλαδή:

$$\eta_{th, rev} = g(T_H, T_L)$$

ή

$$\frac{Q_H}{Q_L} = f(T_H, T_L) \quad (5-15)$$

αφού  $\eta_{th} = 1 - Q_L/Q_H$ . Στις παραπάνω εξισώσεις με  $T_H$  και με  $T_L$  παριστάνονται αντίστοιχα οι θερμοκρασίες του θερμοδοχείου και του ψυχοδοχείου.

Η συνάρτηση  $f(T_H, T_L)$  μπορεί να εξαχθεί με τη βοήθεια των τριών αντιστρεπτών θερμικών μηχανών του σχήματος 5-49. Οι μηχανές A και Γ τροφοδοτούνται με το ίδιο ποσό θερμότητας  $Q_1$  από τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας  $T_1$ . Η μηχανή Γ αποβάλλει θερμότητα  $Q_3$  προς τη δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας  $T_3$ . Η μηχανή B απορροφά τη θερμότητα  $Q_2$  που αποβάλλεται από τη θερμική μηχανή A σε θερμοκρασία  $T_2$  και αποβάλλει θερμότητα  $Q_3$  προς τη δεξαμενή θερμοκρασίας  $T_3$ .

Τα ποσά θερμότητας που αποβάλλονται από τις μηχανές B και Γ πρέπει να είναι ίσα μεταξύ τους, γιατί οι μηχανές A και B είναι δυνατό να συνδυαστούν σε μια αντιστρεπτή θερμική μηχανή, η οποία θα λειτουργεί μεταξύ των ίδιων δεξαμενών με τη μηχανή Γ και η μηχανή αυτή θα πρέπει να έχει την ίδια απόδοση με τη Γ. Εφόσον η θερμότητα που προσδίδεται στη μηχανή Γ είναι ίση με τη θερμότητα που προσδίδεται στον συνδυασμό των μηχανών A και B, τα δύο συστήματα θα πρέπει να αποβάλλουν την ίδια ποσότητα θερμότητας.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση 5-15, σε κάθε μια από τις παραπάνω μηχανές ξεχωριστά, προκύπτει:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_2)$$

Στη συνέχεια

η οποία αντιστοιχεί

Μια προσεκτική εξέταση είναι συνάρτηση επίσης να είναι ανεξάρτητο από τη συνάρτηση  $f$  έχει

οπότε η  $\phi(T_2)$  θα

Η παραπάνω εξίσωση είναι η συνάρτηση που ονομάζεται  $\phi(T)$ . Για μια αντιστρεπτή μηχανή που βρίσκεται σε θερμοκρασία  $T$  ως εξής:

Αυτός είναι ο μόνος τρόπος να κατασκευαστεί μια αντιστρεπτή μηχανή που να έχει πολλές συναρτήσεις  $\phi(T)$  (πρότεινε τη συνάρτηση 5-50):

Η θερμοδυναμική κλίμακας Kelvin των θερμοκρασιών  $T$  και της θερμικής μηχανής



$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_2) \quad \frac{Q_2}{Q_3} = f(T_2, T_3) \quad \text{και} \quad \frac{Q_1}{Q_3} = f(T_1, T_3)$$

Στη συνέχεια θεωρείται η ταυτότητα:

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{Q_1}{Q_2} \frac{Q_2}{Q_3}$$

η οποία αντιστοιχεί στη σχέση:

$$f(T_1, T_3) = f(T_1, T_2) \cdot f(T_2, T_3)$$

Μια προσεκτική ματιά στην παραπάνω εξίσωση φανερώνει ότι το αριστερό σκέλος είναι συνάρτηση των θερμοκρασιών  $T_1$  και  $T_3$ , οπότε και το δεξιό σκέλος θα πρέπει επίσης να είναι συνάρτηση μόνο των  $T_1$  και  $T_3$  και όχι της θερμοκρασίας  $T_2$ . Αυτό σημαίνει ότι η τιμή του γινομένου του δεξιού σκέλους της παραπάνω εξίσωσης είναι ανεξάρτητο από την τιμή της θερμοκρασίας  $T_2$ . Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο, όταν η συνάρτηση  $f$  έχει την ακόλουθη μορφή:

$$f(T_1, T_2) = \frac{\phi(T_1)}{\phi(T_2)} \quad \text{και} \quad f(T_2, T_3) = \frac{\phi(T_2)}{\phi(T_3)}$$

οπότε η  $\phi(T_2)$  θα απαλείφεται από το γινόμενο  $f(T_1, T_2)$  και  $f(T_2, T_3)$ , άρα θα προέκυπτε:

$$\frac{Q_1}{Q_3} = f(T_1, T_3) = \frac{\phi(T_1)}{\phi(T_3)} \quad (5-16)$$

Η παραπάνω εξίσωση έχει πολύ πιο συγκεκριμένη μορφή από την εξίσωση 5-15, για την συνάρτηση που εκφράζει το λόγο  $Q_1/Q_2$  ως προς τις θερμοκρασίες  $T_1$  και  $T_3$ .

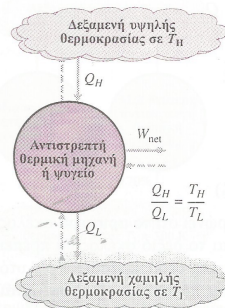
Για μια αντιστρεπτή θερμική μηχανή, η οποία λειτουργεί μεταξύ των δύο δεξαμενών που βρίσκονται αντίστοιχα σε θερμοκρασίες  $T_H$  και  $T_L$ , η εξίσωση 5-16 μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{\phi(T_H)}{\phi(T_L)} \quad (5-17)$$

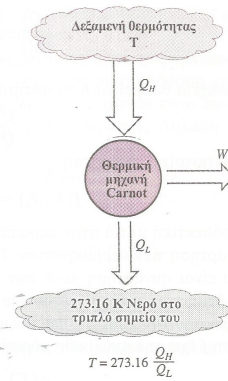
Αυτός είναι ο μόνος περιορισμός που θέτει ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής για μια αντιστρεπτή θερμική μηχανή. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να ικανοποιηθεί από πολλές συναρτήσεις  $\phi(T)$  και η επιλογή είναι τελείως τυχαία. Πρώτος, ο λόρδος Kelvin πρότεινε τη συνάρτηση  $\phi(T) = T$  και όρισε τη θερμοδυναμική κλίμακα ως εξής (Σχήμα 5-50):

$$\left(\frac{Q_H}{Q_L}\right)_{\text{rev}} = \frac{T_H}{T_L} \quad (5-18)$$

Η θερμοδυναμική αυτή κλίμακα ονομάζεται **κλίμακα Kelvin** και οι θερμοκρασίες της κλίμακας Kelvin ονομάζονται **απόλυτες θερμοκρασίες**. Στην κλίμακα Kelvin, ο λόγος των θερμοκρασιών εξαρτάται από το λόγο των ρυθμών μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της θερμικής μηχανής και των δεξαμενών και είναι ανεξάρτητος από τις φυσικές ιδιότη-



**Σχήμα 5-50** Στους θερμοδυναμικούς κύκλους, ο λόγος των ρυθμών μεταφοράς θερμότητας  $Q_H/Q_L$  μπορεί να αντικατασταθεί από το λόγο των απόλυτων θερμοκρασιών  $T_H/T_L$ .



**Σχήμα 5-51** Ένα θεωρητικό πείραμα για τον καθορισμό των θερμοδυναμικών θερμοκρασιών της κλίμακας Kelvin μετρώντας τις θερμότητες που μεταφέρονται,  $Q_H$  και  $Q_L$ .

τες οποιασδήποτε ουσίας που χρησιμοποιείται. Στην κλίμακα αυτή, οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από το μηδέν έως το άπειρο.

Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών δεν ορίζεται πλήρως από την εξίσωση 5-18 η οποία δίνει μόνο το λόγο των απόλυτων θερμοκρασιών. Εκτός από το λόγο, πρέπει να ορισθεί και το μέγεθος της μονάδας Kelvin. Στη Διεθνή Συνδιάσκεψη Μέτρων και Σταθμών του 1954 δόθηκε στο τριπλό σημείο του νερού (η κατάσταση στην οποία οι τρεις φάσεις του νερού συνυπάρχουν σε ισορροπία) η τιμή 273.16 K (Σχήμα 5-51). Το μέγεθος ενός Kelvin ορίζεται ως το  $1/273.16$  του θερμοκρασιακού διαστήματος μεταξύ του απόλυτου μηδενός και του τριπλού σημείου του νερού. Οι μονάδες στις κλίμακες Kelvin και Celsius είναι μεταξύ τους ίσες ( $1 \text{ K} \equiv 1^\circ\text{C}$ ). Οι θερμοκρασίες στις κλίμακες αυτές διαφέρουν μεταξύ τους κατά μια σταθερή ποσότητα ίση με 273.15:

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15 \quad (5-19)$$

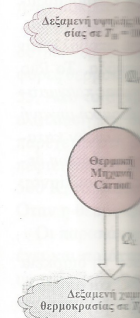
Παρόλο που για τον ορισμό της θερμοδυναμικής κλίμακας θερμοκρασιών χρησιμοποιήθηκε η αντιστρεπτή θερμική μηχανή, δεν είναι δυνατό να λειτουργήσει στην πράξη μια τέτοια μηχανή, προκειμένου να υπολογισθούν οι αριθμητικές τιμές της απόλυτης κλίμακας θερμοκρασιών. Οι απόλυτες θερμοκρασίες είναι δυνατό να μετρηθούν με ακρίβεια με άλλες συσκευές, όπως το θερμόμετρο σταθερού όγκου ιδανικού αερίου, που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 1. Η ισχύς της εξίσωσης 5-18 μπορεί να αποδειχθεί με τη βοήθεια φυσικών υπολογισμών σε αντιστρεπτό κύκλο χρησιμοποιώντας σα ρευστό λειτουργίας ένα ιδανικό αέριο.

**5-11 Η ΘΕΡΜΟ...**

Η θεωρητική... ονομάζεται... είναι αντιστρεπ...

όπου με  $Q_H$ ... δεξαμενή... δεξαμενή... θερμοτήτων... το λόγο των... στη 5-18. Επι... μικής μηχαν...

Η παραπάνω... Carnot είναι η... μηχανής, η... (Σχήμα 5-52).... οποίες λειτου...



**Σχήμα 5-52** Η... Carnot έχει τη... από όλες τις θερμ... τουργούν μεταξύ... υψηλής και χαμη...

## 5-11 Η ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ ΤΟΥ CARNOT

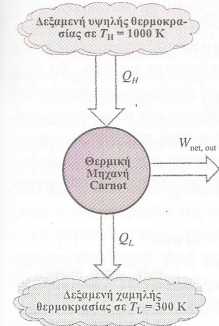
Η θεωρητική θερμική μηχανή που λειτουργεί σύμφωνα με τον αντιστρεπτό κύκλο Carnot ονομάζεται **θερμική μηχανή του Carnot**. Η απόδοση μιας θερμικής μηχανής, είτε αυτή είναι αντιστρεπτή είτε όχι, δίνεται από την εξίσωση 5-5:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

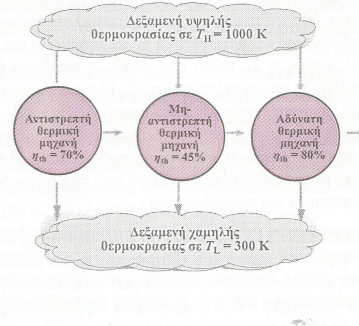
όπου με  $Q_H$  παριστάνεται η θερμότητα που μεταφέρεται στη θερμική μηχανή από τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας  $T_H$  και με  $Q_L$  η θερμότητα που αποβάλλεται προς τη δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας  $T_L$ . Στις αντιστρεπτές θερμικές μηχανές, ο λόγος των θερμιοτήτων, που εμφανίζονται στην παραπάνω σχέση, μπορεί να αντικατασταθεί από το λόγο των απολύτων θερμοκρασιών των δύο δεξαμενών, όπως δίνεται από την εξίσωση 5-18. Επομένως, η απόδοση της θερμικής μηχανής του Carnot ή οποιασδήποτε θερμικής μηχανής γίνεται:

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (5-20)$$

Η παραπάνω απόδοση ονομάζεται και **απόδοση Carnot**, γιατί η θερμική μηχανή του Carnot είναι η πλέον σνηθισμένη. Αυτή είναι και η μέγιστη απόδοση μιας θερμικής μηχανής, η οποία λειτουργεί μεταξύ δύο θερμικών δεξαμενών με θερμοκρασίες  $T_H$  και  $T_L$  (Σχήμα 5-52). Όλες οι μη-αντιστρεπτές (δηλαδή οι πραγματικές) θερμικές μηχανές, οι οποίες λειτουργούν μεταξύ των ιδίων θερμοκρασιών ( $T_L$  και  $T_H$ ), έχουν μικρότερες απο-



**Σχήμα 5-52** Η θερμική μηχανή του Carnot έχει τη μεγαλύτερη απόδοση από όλες τις θερμικές μηχανές που λειτουργούν μεταξύ των ιδίων δεξαμενών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας.



**Σχήμα 5-53** Καμία θερμική μηχανή δε μπορεί να έχει μεγαλύτερη απόδοση από μια αντιστρεπτή θερμική μηχανή που λειτουργεί μεταξύ των ιδίων δεξαμενών χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας.

δόσεις. Μια πραγματική θερμική μηχανή δε μπορεί να φθάσει τη μέγιστη θεωρητική απόδοση, γιατί είναι αδύνατο να απαλειφθούν τελείως όλοι οι παράγοντες αναντιστρεπτότητας που εμφανίζονται σ' ένα πραγματικό κύκλο.

Σημειώνεται ότι οι  $T_L$  και  $T_H$  στην εξίσωση 5-20 είναι *απόλυτες θερμοκρασίες*. Η χρήση θερμοκρασιών Celsius, Fahrenheit οδηγεί σε πολύ μεγάλα σφάλματα.

Οι θερμικές αποδόσεις των πραγματικών και των αντιστρεπτόν θερμικών μηχανών, οι οποίες λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμικών δεξαμενών (Σχήμα 5-53), συνδέονται με τη σχέση:

$$\eta_{th} \begin{cases} < \eta_{th,rev} & \text{μη-αντιστρεπτή θερμική μηχανή} \\ = \eta_{th,rev} & \text{αντιστρεπτή θερμική μηχανή} \\ > \eta_{th,rev} & \text{αδύνατη θερμική μηχανή} \end{cases} \quad (5-21)$$

Οι περισσότερες διατάξεις παραγωγής έργου (θερμικές μηχανές) που χρησιμοποιούνται στην πράξη έχουν απόδοση κάτω από 40%, η οποία φαίνεται μικρή σε σχέση με το 100%. Οι αποδόσεις όμως των πραγματικών θερμικών μηχανών δεν πρέπει να συγκρίνονται με το 100%, αλλά με απόδοση της αντιστρεπτής μηχανής, που λειτουργεί μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων, γιατί αυτό είναι το πραγματικό ανώτατο όριο απόδοσης τους και όχι το 100%.

Σύμφωνα με την εξίσωση 5-20, η μέγιστη απόδοση μιας μονάδας παραγωγής ισχύος με υδρατμό, η οποία λειτουργεί μεταξύ των θερμοκρασιών  $T_H = 750 \text{ K}$  και  $T_L = 300 \text{ K}$ , είναι 60%. Εάν αυτή η τιμή συγκριθεί με την πραγματική απόδοση, που είναι 40%, παρατηρεί κανείς ότι τα πράγματα δεν είναι και τόσο άσχημα, αν και υπάρχει βέβαια πάντα μεγάλο περιθώριο για βελτίωση.

Από την εξίσωση 5-20 φαίνεται ότι η απόδοση μιας θερμικής μηχανής Carnot αυξάνεται, όσο αυξάνεται η  $T_H$  ή/και όσο ελαττώνεται η  $T_L$ . Αυτό θα έπρεπε να αναμένεται, εφόσον, όταν ελαττώνεται η  $T_L$ , ελαττώνεται και το ποσό θερμότητας που αποβάλλεται και, καθώς η  $T_L$  τείνει στο μηδέν, η απόδοση Carnot θα τείνει στη μονάδα. Το ίδιο συμβαίνει και με τις πραγματικές θερμικές μηχανές. Η θερμική απόδοση μιας πραγματικής θερμικής μηχανής μεγιστοποιείται, όταν η θερμότητα παρέχεται στη θερμική μηχανή στην υψηλότερη δυνατή θερμοκρασία (περιορίζεται από την αντοχή των υλικών κατασκευής) και όταν η θερμότητα αποβάλλεται από τη θερμική μηχανή στη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία (περιορίζεται από τη θερμοκρασία των μέσων ψύξης, λ.χ. οι λίμνες, οι ποταμοί και η ατμόσφαιρα).

#### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5-6 Ανάλυση μιας θερμικής μηχανής του Carnot

Η θερμική μηχανή του Carnot, που παριστάνεται στο σχήμα 5-54, κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λαμβάνει θερμότητα 500 kJ από πηγή με θερμοκρασία 652°C και αποβάλλει θερμότητα σ' ένα ψυχοδοχείο θερμοκρασίας 30°C. Να υπολογιστούν: (α) η θερμική απόδοση της μηχανής του Carnot και (β) το ποσό θερμότητας που αποβάλλεται προς το ψυχοδοχείο κατά τη διάρκεια ενός κύκλου.

**Λύση** Η θερμότητα που παρέχεται στη θερμική μηχανή του Carnot δίνεται στην εκφώνηση. Η θερμική απόδοση της μηχανής και η θερμότητα που απορρίπτονται υπολογίζονται στη συνέχεια.

**Ανάλυση** (α) Η θερμότητα και η απόδοση:

$$\eta_{th,C} = \eta_{th,rev}$$

Αυτό σημαίνει ότι πρέπει σε έργο π...  
(β) Το ποσό τη...  
τη θερμική μηχανή

$$Q_{L,rev} = \frac{T_L}{T_H} Q_H$$

**Σχόλια:** Δηλαδή, η απόδοση, που αποβάλλεται στο...

#### Η Ποιότητα της

Η θερμική μηχανή πηγή που βρίσκεται υπόλογο (Σχ. 5-54) χει, θα εξισωθεί η θερμοκρασία...

Η θερμική αποδοχείο θερμοκρασίας 55. Από το σχήμα ελάττωση της παρέχεται στη πέρφεται από το 500 K, το οποίο Όταν η θερμοκρασία...

Οι παραπάνω έχει και ποιότητα υψηλότερη από την ενέργεια Carnot. Για παραπάνω σώματα με τη ίδια μηχανή αποδο...

**Ανάλυση (α)** Η θερμική μηχανή του Carnot είναι αντιστρέψιμη και η απόδοσή της υπολογίζεται από την εξίσωση 5-20:

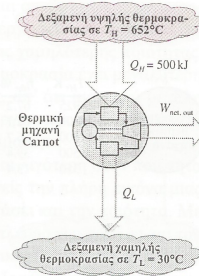
$$\eta_{th,C} = \eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{(30 + 273) \text{ K}}{(652 + 273) \text{ K}} = 0.672$$

Αυτό σημαίνει ότι η θερμική μηχανή του Carnot μετατρέπει σε έργο το 67.2% της θερμότητας που λαμβάνει.

(β) Το ποσό της θερμότητας  $Q_L$  που αποβάλλεται από τη θερμική μηχανή υπολογίζεται από την εξίσωση 5-18:

$$Q_{L,rev} = \frac{T_L}{T_H} Q_{H,rev} = \frac{(30 + 273) \text{ K}}{(652 + 273) \text{ K}} (500 \text{ kJ}) = 163.8 \text{ kJ}$$

**Σχόλια:** Δηλαδή, η μηχανή του Carnot από τα 500 kJ θερμότητας, που απορροφά κατά τη διάρκεια ενός κύκλου, αποβάλλει στο ψυχοδοχείο τα 163.8 kJ.



Σχήμα 5-54 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 5-6.

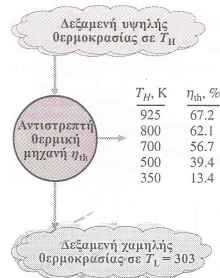
### Η Ποιότητα της Ενέργειας

Η θερμική μηχανή Carnot του παραδείγματος 5-6 προσλαμβάνει θερμότητα από μια πηγή που βρίσκεται σε θερμοκρασία 925 K και μετατρέπει το 67.2% σε έργο, ενώ το υπόλοιπο (32.8%) το αποβάλλει σ' ένα ψυχοδοχείο θερμοκρασίας 303 K. Στη συνέχεια, θα εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η απόδοση, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία της πηγής, ενώ η θερμοκρασία του ψυχοδοχείου παραμένει σταθερή.

Η θερμική απόδοση της μηχανής Carnot, η οποία αποβάλλει θερμότητα στο ψυχοδοχείο θερμοκρασίας 303 K, υπολογίστηκε με τη βοήθεια της εξίσωσης 5-20 για διάφορες θερμοκρασίες θερμοδοχείου και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 5-55. Από το σχήμα αυτό φαίνεται καθαρά ότι η θερμική απόδοση ελαττώνεται με την ελάττωση της θερμοκρασίας της θερμής πηγής. Για παράδειγμα, όταν η θερμότητα παρέχεται στη μηχανή σε θερμοκρασία των 500, αντί των 925 K, η θερμική απόδοση πέφτει από το 67.2 στο 39.4%. Δηλαδή, όταν η θερμοκρασία της πηγής μειωθεί στους 500 K, το κλάσμα της θερμότητας που μετατρέπεται σε έργο ελαττώνεται στο 39.4%. Όταν η θερμοκρασία της πηγής είναι 350 K, το κλάσμα αυτό γίνεται 13.4%.

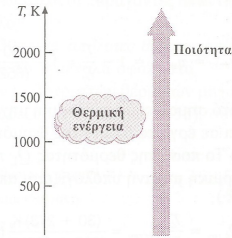
Οι παραπάνω τιμές της απόδοσης αποδεικνύουν ότι η ενέργεια εκτός από ποσότητα έχει και **ποιότητα**. Από τις τιμές του σχήματος 5-55 φαίνεται ότι η θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να μετατραπεί σε έργο σε μεγαλύτερο ποσοστό. Οπότε, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του θερμοδοχείου τόσο υψηλότερη είναι και η ποιότητα της ενέργειας (Σχήμα 5-56).

Για παράδειγμα, μεγάλα ποσά ηλιακής ενέργειας είναι δυνατό να αποθηκευτούν σε σώματα μεγάλων διαστάσεων που ονομάζονται **ηλιακές λίμνες**, σε θερμοκρασίες γύρω στους 350 K. Η ενέργεια αυτή μπορεί στη συνέχεια να διοχετευτεί σε μια θερμική μηχανή και να παράγει έργο (λ.χ. ηλεκτρισμό). Όμως, η θερμική απόδοση των μονά-



**Σχήμα 5-55** Το κλάσμα της θερμότητας που μπορεί να μετατραπεί σε έργο σε συνάρτηση της θερμοκρασίας της πηγής (για  $T_L = 303$  K).

**Σχήμα 5-56** Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται ένα ποσό θερμικής ενέργειας τόσο υψηλότερη είναι η απόδοσή του.



δων παραγωγής ισχύος με ηλιακές λίμνες είναι πολύ χαμηλή (κάτω από 5%) εξαιτίας της χαμηλής ποιότητας της ενέργειας που αποθηκεύεται στις πηγές, ενώ η κατασκευή και η συντήρηση των μονάδων αυτών στοιχίζει σημαντικά. Το γεγονός αυτό τις καθιστά μη-ανταγωνιστικές, παρόλο που η ενέργεια που παρέχεται από τις μονάδες αυτές είναι “δωρεάν”. Η θερμοκρασία (και κατά συνέπεια η ποιότητα) της ηλιακής ενέργειας, που αποθηκεύεται στις πηγές αυτές, μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση ειδικών συλλεκτών, αλλά το κόστος εξοπλισμού στην περίπτωση αυτή αυξάνεται πολύ.

Το έργο είναι μια μορφή ενέργειας με περισσότερη αξία από τη θερμότητα, εφόσον αυτό μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα σε ποσοστό 100%. Αντίθετα, μόνον ένα ποσοστό της θερμότητας μπορεί να μετατραπεί σε έργο. Η θερμότητα υποβαθμίζεται, όταν μεταφέρεται από ένα σώμα με υψηλή θερμοκρασία σ'ένα άλλο με χαμηλότερη θερμοκρασία, γιατί ένα μικρότερο κλάσμα της θερμότητας αυτής μπορεί να μετατραπεί σε έργο. Για παράδειγμα, εάν 100 kJ θερμότητας μεταφερθούν από ένα σώμα θερμοκρασίας 1000 K σ'ένα άλλο θερμοκρασίας 300 K, τότε δε θα έχουν καμιά σχεδόν πρακτική αξία. Εάν όμως η μεταφορά αυτή πραγματοποιούταν με τη βοήθεια μιας θερμικής μηχανής, τότε στην καλύτερη περίπτωση το  $1 - 300/1000 = 70\%$  της θερμότητας αυτής θα μπορούσε να μετατραπεί σε έργο, που είναι μορφή ενέργειας με μεγαλύτερη αξία. Δηλαδή, η παραπάνω μεταφορά και κατ'έκταση υποβάθμιση της θερμότητας έχει σαν αποτέλεσμα να χαθεί η δυνατότητα παραγωγής 70 kJ έργου. Η υποβάθμιση της ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας εξετάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 7.

### Σχέση Ποιότητας και Ποσότητας στην Καθημερινή Ζωή

Σε περιόδους ενεργειακής κρίσης βομβαρδίζεται κανείς με ομιλίες και άρθρα πάνω στην εξοικονόμηση ενέργειας. Ωστόσο όλοι γνωρίζουν ότι η ποσότητα της ενέργειας διατηρείται. Αυτό που δε μπορεί να διατηρηθεί είναι η ποιότητα της ενέργειας, ή το

δυναμικό έργου τής σε μια λι μπορεί να έχει με Π.χ. μια συγκεκρι αξία για τους μη ποσότητα θερμότη μέρη στα ανώτερα

Συνήθως δίνε των πραγμάτων. Η κατάσταση από τ άλλα λόγια, θα πρ δεύτερου νόμου τ χεια θα παρατεθο δεύτερο νόμο.

Κάποιος που έ νων θα ξέρει ότι υψηλής ποιότητας συνηθισμένης πο καλύτερο.

Ένα άλλο παρ Ανδρέας και η Μι του και διασκεδά όλοι είναι απασχ βοηθήσουν και με περισσότερους φη ποσότητα, ο Ανδρ τερου νόμου που

Ένα άλλο παρ δίατες που κυκλο γεγονός ότι το 90% καταλήγουμε στο πλήρους εικόνας τ τες μελέτες, συμμ μεγαλύτερη πιθαν νται από υδατάνθ ξαν ότι το βάρος τ νται, ενώ τα αποσ ανάμεσα στις θερμ αποτελέσματα με τις επαρχίες της Η από τους αμερικαν ρυθμοί μεταβολα σημαντικά μετά π

δυναμικό έργου της ενέργειας. Η απώλεια της ενέργειας είναι συνώνυμη της μετατροπής της σε μια λιγότερο χρήσιμη μορφή. Μία μονάδα ενέργειας υψηλής ποιότητας μπορεί να έχει μεγαλύτερη αξία από τρεις μονάδες ενέργειας χαμηλότερης ποιότητας. Π.χ. μια συγκεκριμένη ποσότητα θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία έχει μεγαλύτερη αξία για τους μηχανικούς μιας μονάδας παραγωγής ισχύος, απ' ό,τι μια πολύ μεγάλη ποσότητα θερμότητας σε χαμηλή θερμοκρασία (όπως η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στα ανώτερα στρώματα των ωκεανών στα τροπικά κλίματα).

Συνήθως δίνεται περισσότερη προσοχή στην ποσότητα και λιγότερη στην ποιότητα των πραγμάτων. Όμως δεν είναι δυνατό να σχηματίσει κανείς την πλήρη εικόνα μιας κατάστασης από-την ποσότητα και μόνο. Θα πρέπει να εξετάσει και την ποιότητα. Με άλλα λόγια, θα πρέπει να μελετήσει μια κατάσταση από την πλευρά του πρώτου και του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής, ακόμα και σε μη τεχνικές εφαρμογές. Στη συνέχεια θα παρατεθούν ορισμένα συνηθισμένα γεγονότα και θα δειχθεί η σχέση τους με το δεύτερο νόμο.

Κάποιος που έχει ψάξει στην αγορά για να βρει ένα διαμαντένιο δαχτυλίδι αρραβώνων θα ξέρει ότι δεν είναι ίδια όλα τα διαμάντια. Π.χ. ένα δαχτυλίδι μισού καρατιού υψηλής ποιότητας είναι πιο πολύτιμο (και πιο ακριβό) από ένα δαχτυλίδι ενός καρατιού συνηθισμένης ποιότητας. Δηλαδή το μεγαλύτερο διαμάντι δεν είναι κατ' ανάγκη και το καλύτερο.

Ένα άλλο παράδειγμα είναι οι σχέσεις μεταξύ των ανθρώπων. Έστω δύο φοιτητές ο Ανδρέας και η Μαρία. Ο Ανδρέας έχει 10 φίλους οι οποίοι πηγαίνουν πάντα στα πάρτυ του και διασκεδάζουν πάντα μαζί. Όταν όμως ο Ανδρέας χρειάζεται τη βοήθειά τους, όλοι είναι απασχολημένοι. Η Μαρία έχει 5 φίλους, οι οποίοι έχουν πάντα χρόνο να τη βοηθήσουν και μπορεί να βασιστεί σε αυτούς σε ώρα ανάγκης. Ποιός από τους δύο έχει περισσότερους φίλους; Από την πλευρά του πρώτου νόμου, ο οποίος εξετάζει μόνο την ποσότητα, ο Ανδρέας έχει τους περισσότερους φίλους. Όμως από την πλευρά του δεύτερου νόμου που εξετάζει και την ποιότητα, η Μαρία έχει τους περισσότερους φίλους.

Ένα άλλο παράδειγμα -με το οποίο έχουν εξοικειωθεί πολλοί άνθρωποι- είναι οι δίαιτες που κυκλοφορούν, οι οποίες βασίζονται κυρίως στον πρώτο νόμο. Με βάση το γεγονός ότι το 90% των ανθρώπων που χάνουν βάρος το ξανακερδίζουν πολύ γρήγορα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο πρώτος νόμος δεν αρκεί για τη διαμόρφωση της πλήρους εικόνας της κατάστασης. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από πρόσφατες μελέτες, σύμφωνα με τις οποίες οι θερμίδες που προέρχονται από το λίπος έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να συσσωρευθούν ως λίπος απ' ό,τι οι θερμίδες που προέρχονται από υδατάνθρακες ή πρωτεΐνες. Τα αποτελέσματα μιας μελέτης του Stanford έδειξαν ότι το βάρος του σώματος συνδέεται με τις θερμίδες του λίπους που καταναλώνονται, ενώ τα αποτελέσματα μιας μελέτης του Harvard έδειξαν ότι δεν υπάρχει σχέση ανάμεσα στις θερμίδες που παίρνει κανείς και στο βαθμό παχυσαρκίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μιας μελέτης του Cornell University σε 6500 ανθρώπους σε όλες σχεδόν τις επαρχίες της Κίνας, οι κινέζοι τρώνε περισσότερο (σε γραμμάρια και σε θερμίδες) από τους αμερικανούς, όμως ζυγίζουν λιγότερο και έχουν λιγότερο σωματικό λίπος. Οι ρυθμοί μεταβολισμού και τα επίπεδα των ορμονών στο ανθρώπινο σώμα αλλάζουν σημαντικά μετά τα 35. Μερικοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι οι παρατεταμένες χρονικά

δίαιτες “μαθαίνουν” στο σώμα να συντηρείται με λιγότερες θερμίδες. Έτσι εξηγείται το γεγονός ότι οι άνθρωποι που κάνουν δίαιτα παίρνουν περισσότερο βάρος απ’ όσο έχασαν, όταν επιστρέψουν στις παλιές διατροφικές τους συνήθειες.

Οι άνθρωποι που τρώνε ότι θέλουν και όποτε θέλουν είναι ζωντανή απόδειξη ότι η τεχνική μέτρησης των θερμίδων (πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής) αφήνει αναπάντητα πολλά ερωτήματα. Χρειάζονται περισσότερες μελέτες πάνω στην επίδραση του δεύτερου νόμου στη δίαιτα για την κατανόηση της διεργασίας με την οποία χάνει ή κερδίζει κανείς βάρος.

Όσοι κατέχουν ακαδημαϊκές θέσεις γνωρίζουν καλά ότι η “ποσότητα” χρησιμοποιείται ακόμα ως βάση των ετήσιων αναφορών προόδου. Με άλλα λόγια, τα μέλη της ακαδημαϊκής κοινότητας κρίνονται με βάση τον αριθμό των εργασιών τους και το χρηματικό ποσό των επιδοτήσεων που παίρνουν για την έρευνά τους. Ορισμένα μέλη, μοιράζουν την εργασία τους σε δύο ή τρεις δημοσιεύσεις, αντί να την παρουσιάσουν σε ένα άρθρο, με αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των δημοσιεύσεων χωρίς την ανάλογη αύξηση της γνώσης. Η έμφαση που δίνεται στους αριθμούς (η ποσότητα) ενθαρρύνει τους εκπαιδευτικούς να δημοσιεύουν πολλές εργασίες αμφισβητούμενης ποιότητας (αντί να δημοσιεύουν λίγες εργασίες υψηλής ποιότητας) και τους αποτρέπει από το να αναλαμβάνουν μακρόχρονες και επικίνδυνες μελέτες. Το θέμα της μείωσης της ποιότητας των δημοσιεύσεων ανακύπτει πολύ συχνά, όμως δε γίνονται προσπάθειες να βρεθεί κάποια λύση. Ίσως να πρέπει να αξιολογηθούν οι εργασίες και οι δημοσιεύσεις με βάση το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής.

Είναι πολύ δελεαστικό να κρίνει κανείς τα πράγματα με βάση την ποσότητα και όχι την ποιότητά τους, αφού η αξιολόγηση των πραγμάτων με βάση την ποιότητα είναι πολύ πιο δύσκολη. Ωστόσο οι αξιολογήσεις που βασίζονται μόνο στην ποσότητα (πρώτος νόμος) είναι ανεπαρκείς και οδηγούν σε λανθασμένα συμπεράσματα. Η παραπάνω συζήτηση πάνω στην ποιότητα της ενέργειας καθώς και τα παραδείγματα που αναφέρθηκαν είναι ενδεικτικά της αναγκαιότητας μιας βαθύτερης μελέτης του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής. Μια τέτοια μελέτη θα ακολουθήσει στα επόμενα δύο κεφάλαια.

### 5-12 Η ΑΝΤΛΙΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΟ ΨΥΓΕΙΟ CARNOT

Ενα ψυγείο ή μια αντλία θερμότητας που λειτουργεί σύμφωνα με τον αντίστροφο κύκλο Carnot ονομάζεται **ψυγείο Carnot** ή **αντλία θερμότητας Carnot**. Ο συντελεστής λειτουργίας κάθε ψυγείου ή αντλίας θερμότητας, είτε είναι αντιστρεπτή είτε όχι, ορίζεται από τις εξισώσεις 5-11 και 5-13:

$$\text{COP}_R = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1} \quad \text{και} \quad \text{COP}_{HP} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$

όπου με  $Q_L$  παριστάνεται το ποσό θερμότητας που αντλείται από το μέσο χαμηλής θερμοκρασίας και με  $Q_H$  το ποσό θερμότητας όλων των αντιστρεπτών (όπως του Carnot) ψυγείων ή αντλιών θερμότητας. Τα ποσά αυτά μπορούν να υπολογιστούν αντικαθιστώντας τους λόγους των θερμοτήτων στις παραπάνω σχέσεις από τους λόγους των θερμο-

Σχήμα 5-11  
αντίστροφο

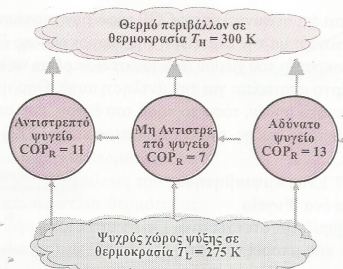
κρασιών των δύο  
φαίνεται από τη  
γείων και των

και

Αυτοί είναι και οι  
που λειτουργούν  
και οι πραγματι-  
κών ορίων (COP)  
Η σχέση μεταξύ  
πτόν (όπως του  
ορίων, είναι η

Μια ανάλογη  
COP<sub>R</sub> στην εξίσ-  
Ο συντελεστής  
μότητας έχει τη  
πραγματικά ψυγ-  
βελτίωση του





**Σχήμα 5-57** Κανένα ψυγείο δε μπορεί να έχει μεγαλύτερο COP από ένα αντιστρεπτό ψυγείο που λειτουργεί μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων.

κρασιών των δύο μέσων που βρίσκονται σε υψηλή και σε χαμηλή θερμοκρασία, όπως φαίνεται από την εξίσωση 5-18. Οπότε, οι συντελεστές COP των αντιστρεπτών ψυγείων και των αντλιών θερμότητας δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\text{COP}_{R,\text{rev}} = \frac{1}{T_H/T_L - 1} \quad (5-22)$$

και

$$\text{COP}_{\text{HP,rev}} = \frac{1}{1 - T_L/T_H} \quad (5-23)$$

Αυτοί είναι και οι μέγιστοι συντελεστές λειτουργίας ενός ψυγείου ή μιας αντλίας θερμότητας που λειτουργούν μεταξύ των θερμοκρασιακών ορίων  $T_L$  και  $T_H$ . Όλα τα πραγματικά ψυγεία και οι πραγματικές αντλίες θερμότητας, που λειτουργούν μεταξύ των παραπάνω θερμοκρασιών ορίων ( $T_L$  και  $T_H$ ), έχουν χαμηλότερους συντελεστές λειτουργίας (Σχήμα 5-57).

Η σχέση μεταξύ των συντελεστών λειτουργίας των πραγματικών και των αντιστρεπτών (όπως του Carnot) ψυγείων, που λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων, είναι η ακόλουθη:

$$\text{COP}_R \begin{cases} < \text{COP}_{R,\text{rev}} \text{ μη αντιστρεπτό ψυγείο} \\ = \text{COP}_{R,\text{rev}} \text{ αντιστρεπτό ψυγείο} \\ > \text{COP}_{R,\text{rev}} \text{ αδύνατο ψυγείο} \end{cases} \quad (5-24)$$

Μια ανάλογη σχέση μπορεί να εξαχθεί και για τις αντλίες αντικαθιστώντας τις τιμές  $\text{COP}_R$  στην εξίσωση 5-24, από τις τιμές  $\text{COP}_{\text{HR}}$ .

Ο συντελεστής COP ενός αντιστρεπτού ψυγείου ή μιας αντιστρεπτής αντλίας θερμότητας έχει τη μέγιστη θεωρητική τιμή για τα συγκεκριμένα θερμοκρασιακά όρια. Τα πραγματικά ψυγεία ή αντλίες θερμότητας μπορούν να προσεγγίσουν τις τιμές αυτές με βελτίωση του σχεδιασμού τους χωρίς όμως να τις φθάσουν.

Τέλος, σημειώνεται ότι οι συντελεστές COP τόσο των ψυγείων όσο και των αντλιών θερμότητας ελαττώνονται με την ελάττωση της θερμοκρασίας  $T_L$ . Δηλαδή, όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία του χώρου από τον οποίο πρέπει να αντληθεί η θερμότητα, τόσο περισσότερο έργο απαιτείται για την άντληση αυτή. Όσο η θερμοκρασία του χώρου ψύξης πλησιάζει στο μηδέν, τόσο το ποσό του έργου, που απαιτείται για να παράγει ένα πεπερασμένο ποσό ψύξης, τείνει στο άπειρο και ο  $COP_R$  τείνει στο μηδέν.

#### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5-7 Ένας Αμφισβητήσιμος Ισχυρισμός για ένα Ψυγείο

Ένας εφευρέτης ισχυρίζεται ότι έχει ανακαλύψει ένα ψυγείο που μπορεί να διατηρεί το χώρο ψύξης στους  $35^\circ\text{F}$ , ενώ ο εξωτερικός χώρος έχει θερμοκρασία  $75^\circ\text{F}$ . Το ψυγείο αυτό έχει συντελεστή COP ίσο με 13.5. Είναι δυνατό να συμβαίνει κάτι τέτοιο;

**Λύση** Πρόκειται να εξεταστεί μια ασυνήθιστη πρόταση που αναφέρεται στη λειτουργία ενός ψυγείου.

**Παραδοχές** Οι συνθήκες λειτουργίας είναι σταθερές.

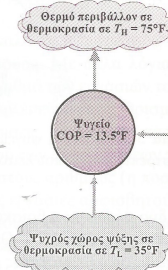
**Ανάλυση** Η απόδοση του συγκεκριμένου ψυγείου (που παριστάνεται στο σχήμα 5-58) συγκρίνεται με το συντελεστή λειτουργίας του ψυγείου Carnot ή οποιουδήποτε άλλου αντιστρεπτού ψυκτικού κύκλου που λειτουργεί μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιακών ορίων:

$$\begin{aligned} COP_{R,\max} &= COP_{R,\text{rev}} = \frac{1}{T_H/T_L - 1} \\ &= \frac{1}{(75 + 460\text{ R})/(35 + 460\text{ R}) - 1} = 12.4 \end{aligned}$$

Αυτός είναι και ο μεγαλύτερος συντελεστής COP που μπορεί να έχει ένα ψυγείο, όταν μεταφέρει θερμότητα από ένα ψυχρό χώρο θερμοκρασίας  $35^\circ\text{F}$  σ' ένα θερμό χώρο στους  $75^\circ\text{F}$ . Εφόσον ο εφευρέτης ισχυρίζεται ότι κατασκεύασε ένα ψυγείο με συντελεστή COP πάνω από αυτή την τιμή, λέει ψέματα.

#### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5-8 Θέρμανση ενός Σπιτιού με μια Αντλία Θερμότητας Carnot

Μια αντλία θερμότητας πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση ενός σπιτιού το χειμώνα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5-59. Οι απώλειες θερμότητας από το σπίτι εκτιμήθηκαν να είναι περίπου  $135000\text{ kJ/h}$ , όταν η θερμοκρασία στο εξωτερικό του σπιτιού



Σχήμα 5-58 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 5-7.

είναι  $-5^\circ\text{C}$ . Η θερμοκρασία σπιτιού πρέπει να υπολογιστεί η ελάττωση ώστε να λειτουργεί.

**Λύση** Για να διατηρηθεί η εσωτερική θερμοκρασία, η αντλία θερμότητας πρέπει να παρέχει θερμότητα στο σπίτι. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να τροφοδοτηθεί με έργο. Ο ρυθμός παροχής θερμότητας είναι  $135000\text{ kJ/h} = 37500\text{ W}$ .

**Παραδοχές** Οι συνθήκες λειτουργίας είναι σταθερές.

**Ανάλυση** Τις συνθήκες αυτές, η αντλία θερμότητας έχει μια αντιστρεπτή λειτουργία. Η αντλία θερμότητας Carnot (COP = 21) που λειτουργεί μεταξύ του θερμικού χώρου ( $T_H = 21^\circ\text{C}$ ) και του ψυχρού χώρου ( $T_L = -5^\circ\text{C}$ )

οπότε, η ισχύς που απαιτείται να υπολογιστεί είναι



**Σχόλια:** Αυτό το αποτέλεσμα είναι μικρότερο από το απαιτούμενο. Το σπίτι επρόκειτο να θερμανθεί με ενέργεια θα ήθελε να χρησιμοποιήσει ηλεκτρικά σώματα. Με μια αντλία θερμότητας που καταναλώνει 135000 kJ/h, η αντλία θερμότητας μπορεί να παράγει ενέργεια εξωτερικό περιβάλλον.

είναι  $-5^{\circ}\text{C}$ . Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του σπιτιού πρέπει να διατηρείται στους  $21^{\circ}\text{C}$ . Να υπολογιστεί η ελάχιστη ισχύς που απαιτείται, ώστε να λειτουργήσει η αντλία.

**Λύση** Για να διατηρηθεί το σπίτι σε μια σταθερή θερμοκρασία, πρέπει η αντλία θερμότητας να παρέχει θερμότητα ίση με τις απώλειες του σπιτιού. Αυτό σημαίνει ότι η αντλία θερμότητας πρέπει να τροφοδοτεί θερμότητα στο σπίτι (χώρος υψηλής θερμοκρασίας) με ρυθμό  $\dot{Q}_H = 135000 \text{ kJ/h} = 37.5 \text{ kW}$ .

**Παραδοχές** Οι συνθήκες λειτουργίας είναι σταθερές.

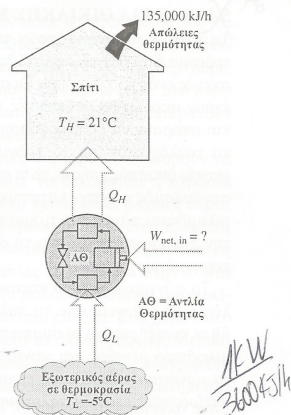
**Ανάλυση** Τις μικρότερες απαιτήσεις σε ισχύ θα τις έχει μια αντιστρεπτή αντλία. Σύμφωνα με την εξίσωση 5-23, ο συντελεστής COP μιας αντιστρεπτής αντλίας, η οποία λειτουργεί μεταξύ του σπιτιού ( $T_H = 21 + 273 = 294 \text{ K}$ ) και του εξωτερικού χώρου ( $T_L = -5 + 273 = 268 \text{ K}$ ), είναι:

$$\text{COP}_{\text{HP,rev}} = \frac{1}{1 - T_L/T_H} = \frac{1}{1 - (268 \text{ K}/294 \text{ K})} = 11.3$$

οπότε, η ισχύς που πρέπει να παρέχεται στην αντιστρεπτή αντλία θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί από τον ορισμό του συντελεστή COP (Εξίσωση 5-12):

$$\dot{W}_{\text{net,in}} = \frac{\dot{Q}_H}{\text{COP}_{\text{HP}}} = \frac{37.5 \text{ kW}}{11.3} = 3.32 \text{ kW}$$

**Σχόλια:** Αυτό σημαίνει ότι η παραπάνω αντλία θερμότητας μπορεί να καλύψει τις θερμικές απαιτήσεις του σπιτιού καταναλώνοντας ηλεκτρική ισχύ με ρυθμό  $3.32 \text{ kW}$ . Εάν το σπίτι επρόκειτο να θερμανθεί με ηλεκτρικά σώματα, τότε ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας θα ήταν  $37.5 \text{ kW}$ , δηλαδή  $11.3$  φορές μεγαλύτερος. Αυτό συμβαίνει γιατί στα ηλεκτρικά σώματα η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα με λόγο ένα προς ένα. Με μια αντλία θερμότητας η ενέργεια απορροφάται από το εξωτερικό περιβάλλον και μεταφέρεται στο εσωτερικό του σπιτιού χρησιμοποιώντας ένα ψυκτικό κύκλο που καταναλώνει μόνο  $3.32 \text{ kW}$ . Σημειώνεται ότι η αντλία θερμότητας δε δημιουργεί ενέργεια. Απλά μεταφέρει την ενέργεια από κάποιο μέσο (το ψυχρό εξωτερικό περιβάλλον) σε κάποιο άλλο (στο θερμό εσωτερικό χώρο).



Σχήμα 5-59 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 5-8.

84

### 5.13 ΨΥΓΕΙΑ ΟΙΚΙΑΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ

Τα ψυγεία που συντηρούν τα αλλοιώσιμα τρόφιμα ήταν πάντα από τις βασικότερες συσκευές ενός νοικοκυριού. Οι συσκευές αυτές έχουν αποδειχθεί ανθεκτικές και αξιόπιστες και μπορούν να λειτουργήσουν ικανοποιητικά τουλάχιστον για 15 χρόνια. Ένα τυπικό ψυγείο οικιακής χρήσης είναι στην ουσία ένας συνδυασμός ψύκτη - καταψύκτη εφόσον περιλαμβάνει πάντα ένα τμήμα κατάψυξης για την παραγωγή πάγου και τη συντήρηση κατεψυγμένων τροφών.

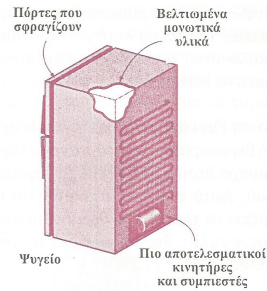
Τα σύγχρονα ψυγεία καταναλώνουν πολύ λιγότερη ενέργεια από τα παλαιότερα, επειδή οι κινητήρες και οι συμπιεστές τους έχουν μικρότερο μέγεθος και μεγαλύτερη απόδοση, τα μονωτικά υλικά τους είναι καλύτερα, οι σπείρες τους έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια και οι πόρτες τους σφραγίζουν καλύτερα (Σχήμα 5-60). Η λειτουργία ενός μέσου ψυγείου κοστίζει περίπου \$72 το χρόνο (αν ο ηλεκτρισμός κοστίζει 8.3 cents ανά kWh). Το κόστος αυτό είναι ίσο με το 50% του ετήσιου κόστους λειτουργίας ενός οικιακού ψυγείου πριν από 20 χρόνια. Αν ένα ψυγείο 20 ετών, χωρητικότητας 18 ft<sup>3</sup> αντικατασταθεί με ένα νέο μοντέλο, θα εξοικονομούνται 1000 kWh ηλεκτρισμού ανά έτος. Σε ό,τι αφορά τις επιπτώσεις στο περιβάλλον, αυτό σημαίνει ότι η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα (που αποτελεί την κύρια αιτία της μεταβολής των κλιματολογικών συνθηκών στον πλανήτη) θα μειωθεί κατά 1 ton, ενώ η ποσότητα του διοξειδίου του θείου (που αποτελεί την κύρια αιτία της όξινης βροχής) θα μειωθεί κατά 10kg.

Τα τελευταία 100 χρόνια έχουν γίνει πολλές και σημαντικές βελτιώσεις στα ψυγεία οικιακής χρήσης. Ωστόσο ο βασικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμών παρέμεινε ο ίδιος. Τα εναλλακτικά συστήματα ψύξης με απορρόφηση και θερμοηλεκτρικής ψύξης είναι ακριβότερα, έχουν μικρότερες αποδόσεις και χρησιμοποιούνται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις (πίνακας 5-3).

#### Πίνακας 5-3

Τυπικές αποδόσεις λειτουργίας μερικών συστημάτων ψύξης, όταν η θερμοκρασία του καταψύκτη είναι -18°C και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι 32°C.

Είδος συστήματος ψύξης	Συντελεστής λειτουργίας
Συμπίεση ατμών	1.3
Ψύξη με απορρόφηση	0.4
Θερμοηλεκτρική ψύξη	0.1



Σχήμα 5-60 Τα σύγχρονα ψυγεία είναι πολύ πιο αποδοτικά λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης και των βελτιώσεων στην κατασκευή τους.

Ένα ψυγείο διατηρείται στους χαμηλότερες θερμοκρασίες παράλληλα με τη ψύξη των τροφίμων διαφορετικά θα...

Σχεδόν όλα τα ψυγεία διαθέτουν λαμπτήρες και να είναι το κυκλοφορούν χώρο αποθήκευσης συντήρησή τους υπάρχει επίσημοι στην κατασκευή του βούτυρο αναβαθμισμένα θερμοκρασία, στη χαμηλότερη λαμβάνουν είναι το οποίο συνδυάζει και παραγόμενης έως 3 kg πάγου δοχείο αποθήκευσης.

Τα ψυγεία αποθηκεύονται σε περιβάλλοντα ενός τυπικού ψυγείου βάλλοντος 25°C.

Ένα ψυγείο διαθέτει τροφίμων, να και μικρότερο διαστάσεων ταία χρόνια, και ποιότητας λεπτού όγκου που καταναλώνει βάμβακα [ $k = 0.01$  τόνου [ $k = 0.01$  τόνου] μισό του αρχικού (η υγρασία υποψύξης). Η σταθερότητα ψυγείου. Ιδιαίτερα ψυγείου, ώστε να (η υγρασία υποψύξης).

Το μέγεθος των καθορίζονται βά...

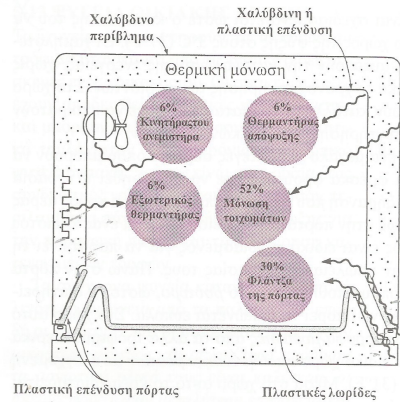
Ένα ψυγείο οικιακής χρήσης είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε ο καταψύκτης του να διατηρείται στους  $-18^{\circ}\text{C}$  ( $0^{\circ}\text{F}$ ) και ο χώρος της ψύξης στους  $3^{\circ}\text{C}$  ( $37^{\circ}\text{F}$ ). Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες στον καταψύκτη αυξάνουν την κατανάλωση της ενέργειας, χωρίς παράλληλα να παρατείνουν σημαντικά το χρόνο συντήρησης των προϊόντων. Στο χώρο της ψύξης μπορούν να δημιουργηθούν κατάλληλα τμήματα έτσι, ώστε να επικρατούν διαφορετικές θερμοκρασίες για τη συντήρηση διαφορετικών τροφίμων.

Σχεδόν όλα τα ψυγεία περιέχουν ένα μεγάλο αεροστεγές συρτάρι όπου μπορούν να φυλαχθούν λαχανικά με φύλλα και φρέσκα φρούτα, ώστε να διατηρηθεί η υγρασία τους και να προστατευθούν από την ξήρανση που μπορεί να προκαλέσει ο κρύος αέρας που κυκλοφορεί στο ψυγείο. Συνήθως στην πόρτα του ψυγείου υπάρχει ένας κλειστός χώρος αποθήκευσης αυγών, ο οποίος είναι ειδικά σχεδιασμένος για να παρατείνει τη συντήρησή τους επιβραδύνοντας την απώλεια της υγρασίας τους. Πάνω στην πόρτα υπάρχει επίσης ένας ειδικός χώρος όπου αποθηκεύεται το βούτυρο, ώστε να διατηρείται στην κατάλληλη θερμοκρασία για να μπορεί να απλώνεται εύκολα. Στο χώρο αυτό το βούτυρο απομονώνεται και δεν απορροφά μυρωδιές από τα άλλα τρόφιμα. Μερικά αναβαθμισμένα μοντέλα έχουν έναν ειδικό χώρο αποθήκευσης κρέατων με ελεγχόμενη θερμοκρασία, σταθερή στους  $-5^{\circ}\text{C}$  ( $31^{\circ}\text{F}$ ). Μέσα στο χώρο αυτό το κρέας διατηρείται στη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία χωρίς να παγώνει. Τα πιο ακριβά μοντέλα περιλαμβάνουν ένα αυτόματο σύστημα παραγωγής πάγου, τοποθετημένο στην κατάψυξη, το οποίο συνδέεται με τη γραμμή του νερού, καθώς και αυτόματους διανομείς πάγου και παγωμένου νερού. Ένα τυπικό σύστημα παραγωγής πάγου μπορεί να παράγει από 2 έως 3 kg πάγου την ημέρα και να αποθηκεύσει από 3 έως 5 kg πάγου σ' ένα φορητό δοχείο αποθήκευσης.

Τα ψυγεία οικιακής χρήσης καταναλώνουν από 90 έως 600 W ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι σχεδιασμένα έτσι, ώστε να λειτουργούν ικανοποιητικά σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος έως  $43^{\circ}\text{C}$  ( $110^{\circ}\text{F}$ ). Τα ψυγεία λειτουργούν με διακοπές. Η λειτουργία ενός τυπικού ψυγείου κάτω από τις συνηθισμένες συνθήκες και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $25^{\circ}\text{C}$  ( $77^{\circ}\text{F}$ ) διαρκεί το 30% του χρόνου που βρίσκεται στην πρίζα.

Ένα ψυγείο θα πρέπει να διαθέτει το μέγιστο δυνατό χώρο για την αποθήκευση των τροφίμων, να καταναλώνει την ελάχιστη δυνατή ενέργεια και το κόστος του να είναι το μικρότερο δυνατό. Ο συνολικός διαθέσιμος όγκος των ψυγείων έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, χωρίς να αυξηθούν αντίστοιχα οι εξωτερικές διαστάσεις τους, χρησιμοποιώντας λεπτότερα και πιο αποτελεσματικά μονωτικά υλικά και ελαττώνοντας τον όγκο που καταλαμβάνει ο συμπίεστής και ο συμπυκνωτής. Η αντικατάσταση του υαλοβάμβακα [ $k = 0.032 - 0.040 \text{ W}/(\text{m } ^{\circ}\text{C})$ ] από αφρό ουρεθάνης που τοποθετείται επί τόπου [ $k = 0.019 \text{ W}/(\text{m } ^{\circ}\text{C})$ ] μείωσε το πάχος της απαιτούμενης μόνωσης περίπου στο μισό του αρχικού (από 90 σε 48 mm για την ψύξη και από 70 σε 40 mm στην κατάψυξη). Η σταθερότητα και η συνδετική δράση του αφρού παρέχει επιπλέον στήριξη στο ψυγείο. Διαιτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στο σωστό σφράγισμα του κελύφους του ψυγείου, ώστε να αποφευχθεί η διαρροή νερού ή η μεταφορά της υγρασίας στη μόνωση (η υγρασία υποβαθμίζει την αποτελεσματικότητα της μόνωσης).

Το μέγεθος του συμπίεστή και των υπόλοιπων εξαρτημάτων ενός συστήματος ψύξης καθορίζονται βάσει του φορτίου θέρμανσης (ή ψύξης), που είναι ο ρυθμός ροής θερμότητας.



**Σχήμα 5-61** Διατομή ενός ψυγείου όπου παρουσιάζονται τα σχετικά μεγέθη των επιδράσεων διαφόρων παραγόντων, που αποτελούν το προβλέψιμο θερμικό φορτίο (Πηγή: ASHRAE Handbook of Refrigeration, Chap. 48, Fig. 2).

τητας στο ψυγείο. Το φορτίο θερμότητας αποτελείται από το *προβλέψιμο* τμήμα, όπως η μεταφορά θερμότητας διαμέσου των τοιχωμάτων και της φλάντζας της πόρτας, των κινητήρων του ανεμιστήρα και των θερμαντήρων απόψυξης (Σχήμα 5-61) και από το *μη προβλέψιμο* τμήμα, το οποίο εξαρτάται από τις συνήθειες του χρήστη, όπως το άνοιγμα της πόρτας, η παραγωγή πάγου και η φόρτωση του ψυγείου. Η ενέργεια που καταναλώνει το ψυγείο μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, εάν εφαρμοστούν κάποια *πρακτικά μέτρα*, όπως είναι τα εξής:

1. Η πόρτα του ψυγείου θα πρέπει να ανοίγεται όσο το δυνατόν λιγότερες φορές και για μικρό χρονικό διάστημα. Κάθε φορά που ανοίγεται η πόρτα, ο κρύος αέρας που βρίσκεται στο εσωτερικό του ψυγείου αντικαθίσταται από τον ζεστό αέρα του περιβάλλοντος, ο οποίος θα πρέπει να ψυχθεί, με αποτέλεσμα να καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια. Όταν το ψυγείο ή ο καταψύκτης περιέχουν τρόφιμα, ο διαθέσιμος όγκος που καταλαμβάνεται από τον αέρα είναι μικρός, με αποτέλεσμα να χρειάζεται λιγότερη ενέργεια για τη ψύξη.

2. Τα ζεστά φαγητά θα πρέπει να ψύχονται στη θερμοκρασία δωματίου πριν εισαχθούν στο ψυγείο. Η τοποθέτηση μιας ζεστής κατσαρόλας στο ψυγείο έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας και την παρατεταμένη λειτουργία του ψυγείου, ενώ παράλληλα τα τρόφιμα που βρίσκονται δίπλα στο ζεστό σκεύος αλλοιώνονται (Σχήμα 5-62).

3. Οι σπείρες του συμπυκνωτή στο πίσω μέρος του ψυγείου θα πρέπει να διατηρούνται καθαρές. Η σκόνη και η βρωμιά που συσσωρεύονται πάνω στις σπείρες δρουν μονωτικά και εμποδίζουν την απομάκρυνση της θερμότητας. Οι σπείρες θα πρέπει να καθαρίζονται μία ή δύο φορές το χρόνο μ' ένα υγρό ύφασμα ή με μια ηλεκτρική σκούπα, ώστε

να βελτιωθεί η  
Μερικά μοντέλα  
ανεμιστήρα που  
την ισχυρή κίνη

4. Θα πρέπει να  
οι πιθανές διαρρ  
φακός μέσα στα  
μέσω της φλάντ  
μανσης. Οι ελατ

5. Ο διακόπ  
χωρίς λόγο. Οι π  
και  $-18^{\circ}\text{C}$  ( $0^{\circ}\text{F}$ )  
σία χαμηλότερη  
χωρίς όμως να π  
φών. Αν το ψυγ  
χαμηλότερες απ

6. Θα πρέπει  
εξαεμιστήρα. Το  
μεταφορά θερμ

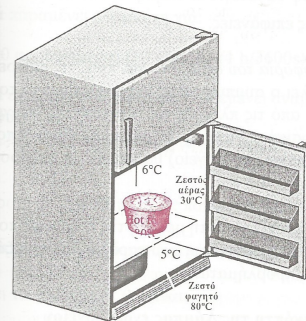
Σχήμα 5-62 Η τ  
τών μέσα στο ψ  
την απώλεια εν  
των τροφίμων  
ακτίνα από το ζ

να βελτιωθεί η ψυκτική ικανότητα του ψυγείου και να μειωθεί η κατανάλωση ισχύος. Μερικά μοντέλα (ιδιαίτερα τα μεγάλα ή τα εντοιχισμένα ψυγεία) περιλαμβάνουν έναν ανεμιστήρα που ψύχει τους συμπυκνωτές, ενώ παράλληλα διατηρεί τις σπείρες καθαρές με την ισχυρή κίνηση του αέρα.

4. Θα πρέπει να ελέγχεται συχνά η φλάντζα της πόρτας, ώστε να διαπιστωθούν έγκαιρα οι πιθανές διαρροές αέρα. Ένας εύκολος τρόπος να γίνει αυτό είναι να τοποθετηθεί ένας φακός μέσα στο ψυγείο και να σβήσουν τα φώτα της κουζίνας. Η μεταφορά θερμότητας μέσω της φλάντζας της πόρτας αντιπροσωπεύει το ένα τρίτο περίπου του φορτίου θέρμανσης. Οι ελαττωματικές φλάντζες θα πρέπει να αντικαθίστανται αμέσως.

5. Ο διακόπτης του ψυγείου δε θα πρέπει να τοποθετείται σε χαμηλές θερμοκρασίες χωρίς λόγο. Οι προτεινόμενες θερμοκρασίες για ψυγεία και καταψύκτες είναι  $3^{\circ}\text{C}$  ( $37^{\circ}\text{F}$ ) και  $-18^{\circ}\text{C}$  ( $0^{\circ}\text{F}$ ), αντίστοιχα. Αν ο διακόπτης της κατάψυξης τοποθετηθεί σε θερμοκρασία χαμηλότερη από την προτεινόμενη, καταναλώνεται ένα σημαντικό ποσό ενέργειας χωρίς όμως να παρατείνεται κατά πολύ ο χρόνος αποθήκευσης των κατεψυγμένων τροφών. Αν το ψυγείο ή ο καταψύκτης διατηρούνται σε θερμοκρασίες κατά  $6^{\circ}\text{C}$  (ή  $10^{\circ}\text{F}$ ) χαμηλότερες από τις προτεινόμενες, η κατανάλωση της ενέργειας θα αυξηθεί κατά 25%.

6. Θα πρέπει να αποφεύγεται η συσσώρευση πάγου στις εσωτερικές επιφάνειες του εξαμιστήρα. Το στρώμα του πάγου δρα μονωτικά στην επιφάνεια και επιβραδύνει τη μεταφορά θερμότητας από τον καταψύκτη στο ψυκτικό. Όταν το πάχος του στρώματος πάγου γίνει μεγαλύτερο από μερικά χιλιοστά, θα πρέπει να γίνει απόψυξη του ψυγείου κλείνοντας το διακόπτη ρύθμισης της θερμοκρασίας.



Σχήμα 5-62Η τοποθέτηση ζεστών φαγητών μέσα στο ψυγείο έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας και την αλλοίωση των τροφίμων που βρίσκονται σε μικρή ακτίνα από το ζεστό σκεύος.

Σε ορισμένα μοντέλα η απόψυξη γίνεται αυτόματα το σύστημα παρέχει θερμότητα στον εξαμιστήρα μέσω ενός θερμαντήρα αντιστάσεων 300-1000 W ή μέσω θερμού ψυκτικού αερίου, σε τακτά χρονικά διαστήματα. Στη συνέχεια το νερό συλλέγεται σ' ένα δοχείο στον εξωτερικό χώρο όπου εξατμίζεται χρησιμοποιώντας τη θερμότητα που αποβάλλει ο συμπυκνωτής. Οι ειδικοί αυτοί εξαμιστήρες είναι στην ουσία λεπτοί σωλήνες που υπόκεινται σε ροή αέρα ο οποίος κυκλοφορεί με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα. Όλη η υγρασία συσσωρεύεται στα πτερύγια, που είναι οι πιο κρύες επιφάνειες, απαλλάσσοντας τις εκτεθειμένες επιφάνειες του καταψύκτη και των κατεψυγμένων τροφών από τον πάγο.

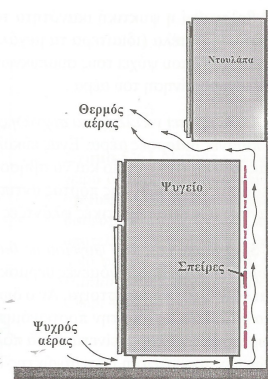
7. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται ο διακόπτης που εξοικονομεί ισχύ, ο οποίος ελέγχει τις θερμαντικές σπείρες και προλαμβάνει τη συμπύκνωση πάνω στις εξωτερικές επιφάνειες σε χώρους με υγρασία. Οι θερμαντήρες χαμηλής ισχύος (με λίγα watt) χρησιμοποιούνται για την αύξηση της θερμοκρασίας των εξωτερικών επιφανειών των ψυγείων σε κρίσιμα σημεία πάνω από το σημείο δρόσου, ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός σταγόνων νερού πάνω στις επιφάνειες και η μετακίνησή τους προς τα κάτω. Η συμπύκνωση αυτή συμβαίνει συνήθως το καλοκαίρι σε ζεστά και υγρά κλίματα και σε σπίτια χωρίς κλιματισμό. Η συσσώρευση υγρασίας στην επιφάνεια του ψυγείου είναι ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο: η υγρασία μπορεί να προκαλέσει την αλλοίωση του εξωτερικού στρώματος της μπογιάς του ψυγείου ή να γεμίσει το πάτωμα της κουζίνας με νερά. Το 10% περίπου της ενέργειας που καταναλώνει ένα ψυγείο μπορεί να εξοικονομηθεί κλείνοντας τον θερμαντήρα και διατηρώντας τον κλειστό μέχρι να διαπιστωθεί υγρασία στις εξωτερικές επιφάνειες.

8. Δε θα πρέπει να παρεμποδίζεται η κυκλοφορία του αέρα από και προς τις σπείρες του συμπυκνωτή. Η θερμότητα που αποβάλλει ο συμπυκνωτής μεταφέρεται από τον αέρα που εισέρχεται από το κάτω μέρος και από τις πλευρές του ψυγείου και φεύγει από την κορυφή. Αν παρεμποδιστεί αυτή η φυσική συναγωγή του αέρα με οποιονδήποτε τρόπο (π.χ. τοποθετώντας μεγάλα κουτιά πάνω στο ψυγείο) θα μειωθεί η απόδοση του συμπυκνωτή και του ψυγείου (Σχήμα 5-63).

Η εφαρμογή αυτών των μέτρων θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ενέργειας που καταναλώνει το ψυγείο και του κόστους της συντήρησής του, ενώ παράλληλα θα αυξήσει το χρόνο λειτουργίας της συσκευής χωρίς προβλήματα.

#### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5-9 Δυσλειτουργία του Διακόπτη της Λάμπας ενός Ψυγείου

Για τον εσωτερικό φωτισμό των ψυγείων χρησιμοποιούνται συνήθως λάμπες πυρακτώσεως, ο διακόπτης των οποίων ενεργοποιείται με το άνοιγμα της πόρτας του ψυγείου. Η λάμπα (40 W) ενός ψυγείου μένει αναμμένη συνεχώς εξαιτίας κάποιας βλάβης του διακόπτη (Σχήμα 5-64). Αν ο COP του ψυγείου είναι 1.3 και το κόστος του ηλεκτρισμού είναι 8 cents ανά kWh, να υπολογιστεί η αύξηση της ενέργειας που καταναλώνει το ψυγείο και το επίσημο κόστος της ενέργειας αυτής, αν ο διακόπτης παραμένει χαλασμένος.



Σχήμα 5-63 Για να λειτουργεί ένα ψυγείο με τη μέγιστη δυνατή απόδοση θα πρέπει οι σπείρες του συμπυκνωτή ενός ψυγείου να καθαρίζονται περιοδικά και ο αέρας να κυκλοφορεί ελεύθερα.

Λύση Η λάμπα...

Παραδοχές Η...

Ανάλυση Ο COP...

Η συνολική επι...

όπου ο δείκτης...

Ένα έτος έχει...

Αν υποθεθεί ότι...

(20 φορές/ημέρα...

Οι επιπρόσθετες...

Επιπρόσθετα...

Αρα η επιπρόσθε...

Επιπρόσθετη ισχ...

και το κόστος τη...

Επιπρόσθετο κόσ...

Σχόλια: Αν δεν ε...



**Λύση** Η λάμπα καταναλώνει 40 W όταν είναι αναμμένη, άρα προσθέτει 40 W στο φορτίο θέρμανσης του ψυγείου.

**Παραδοχές** Η διάρκεια ζωής της λάμπας είναι ένας χρόνος.

**Ανάλυση** Ο COP του ψυγείου είναι 1.3. Επομένως, η ισχύς που καταναλώνει το ψυγείο για να απομακρύνει τη θερμότητα που παράγεται από τη λάμπα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\dot{W}_{\text{refrig}} = \frac{\dot{Q}_{\text{refrig}}}{\text{COP}_R} = \frac{40 \text{ W}}{1.3} = 30.8 \text{ W}$$

Η συνολική επιπρόσθετη ισχύς που καταναλώνει το ψυγείο είναι η εξής:

$$\dot{W}_{\text{total, additional}} = \dot{W}_{\text{light}} + \dot{W}_{\text{refrig}} = 40 + 30.8 = 70.8 \text{ W}$$

όπου ο δείκτης "light", δηλώνει μεγέθη που αναφέρονται στη λάμπα.

Ένα έτος έχει συνολικά  $365 \text{ ημέρες} \times 24 \text{ ώρες/ημέρα} = 8760 \text{ ώρες}$

Αν υποθεθεί ότι το ψυγείο ανοίγεται 20 φορές την ημέρα για 30 s κάθε φορά, η λάμπα θα παραμένει αναμμένη για:

(20 φορές/ημέρα) (30 s/φορά) (1 h/3600s)(365 ημέρες/έτος) = 61 ώρες/έτος

Οι επιπρόσθετες ώρες που παρεμένει αναμμένο το φως λόγω της βλάβης του διακόπτη είναι:

$$\begin{aligned} \text{Επιπρόσθετες ώρες} &= \text{ώρες/έτος} - \text{κανονικές ώρες λειτουργίας} \\ &= 8760 - 61 = 8699 \text{ ώρες/έτος} \end{aligned}$$

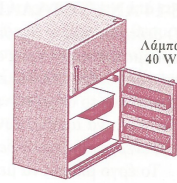
Άρα η επιπρόσθετη ισχύς που καταναλώνεται θα είναι:

$$\begin{aligned} \text{Επιπρόσθετη ισχύς που καταναλώνεται} &= \dot{W}_{\text{total, additional}} \times (\text{επιπρόσθετες ώρες λειτουργίας}) \\ &= (0.0708 \text{ kW})(8699 \text{ ώρες/έτος}) = \mathbf{616 \text{ kWh/έτος}} \end{aligned}$$

και το κόστος της θα είναι:

$$\begin{aligned} \text{Επιπρόσθετο κόστος ισχύος} &= (\text{επιπρόσθετη κατανάλωση ισχύος}) \times (\text{κόστος μονάδας}) \\ &= (616 \text{ kWh/έτος})(\$0.08/\text{kWh}) = \mathbf{\$49.3/\έτος} \end{aligned}$$

**Σχόλια:** Αν δεν επισκευαστεί ο διακόπτης, ο ιδιοκτήτης θα επιβαρυνθεί με \$50 το χρόνο. Το ποσό αυτό είναι αρκετά μεγάλο, αν συγκριθεί με το ετήσιο κόστος λειτουργίας του ψυγείου, που είναι περίπου \$70.



Σχήμα 5-64 Σχηματική παράσταση του Παραδείγματος 5-9.

## 5-14 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής δηλώνει ότι μια διεργασία δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, αλλά προς μια μόνο και συγκεκριμένη. Μια διεργασία δε μπορεί να πραγματοποιηθεί παρά μόνο, όταν ικανοποιεί και τον πρώτο και το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Τα σώματα που μπορούν να απορροφούν και να αποβάλλουν θερμότητα ισοθερμοκρασιακά ονομάζονται *δεξαμενές θερμικής ενέργειας* ή απλά *δεξαμενές θερμότητας*.

Το έργο μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε θερμότητα, ενώ η θερμότητα μπορεί να μετατραπεί σε έργο μόνο με τη βοήθεια ειδικών διατάξεων που ονομάζονται *θερμικές μηχανές*. Η *θερμική απόδοση* μιας θερμικής μηχανής ορίζεται από τη σχέση:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net, out}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

όπου με  $W_{net, out}$  παριστάνεται η καθαρή παραγωγή έργου της θερμικής μηχανής, με  $Q_H$  παριστάνεται το ποσό θερμότητας που παρέχεται σ' αυτή και με  $Q_L$  παριστάνεται το ποσό θερμότητας που αποβάλλεται από τη θερμική μηχανή.

Τα ψυγεία και οι αντλίες θερμότητας είναι διατάξεις που απορροφούν θερμότητα από φορείς που βρίσκονται σε χαμηλή θερμοκρασία και την αποβάλλουν σε μέσα που έχουν υψηλότερη θερμοκρασία. Η απόδοση ενός ψυγείου ή μιας ανλίας θερμότητας εκφράζεται από το *συντελεστή απόδοσης*, ο οποίος ορίζεται από τις σχέσεις:

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{net, in}} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}$$

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{net, in}} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$

Η *διατύπωση του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής των Kelvin και Planck* δηλώνει ότι καμιά θερμική μηχανή δε μπορεί να παράγει έργο, όταν ανταλλάσσει θερμότητα με μια μόνο δεξαμενή θερμότητας. Η *διατύπωση του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής από τον Clausius* δηλώνει ότι καμιά διάταξη δε μπορεί να μεταφέρει θερμότητα από ένα ψυχρό σώμα σ' ένα θερμόμετρο χωρίς να έχει καμιά άλλη επίδραση στο περιβάλλον.

Κάθε διάταξη που παραβιάζει είτε τον πρώτο είτε το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής ονομάζεται *αεικίνητη μηχανή*.

Μια διεργασία ονομάζεται *αντιστρεπτή*, εάν τόσο το σύστημα όσο και το περιβάλλον μπορούν να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση. Οποιαδήποτε άλλη διεργασία είναι *μη-αντιστρεπτή*. Παράγοντες, όπως η τριβή, η διαστολή και η συμπίεση σε συνθήκες μη - ψευδοισοροπίας και η μεταφορά θερμότητας κατά μήκος μιας πεπερασμένης διαφοράς θερμοκρασίας καθιστούν μια διεργασία μη-αντιστρεπτή και ονομάζονται *παράγοντες αναντιστρεπτότητας*.

Ο *κύκλος του Carnot* είναι ένας αντιστρεπτός κύκλος που αποτελείται από τέσσερις αντιστρεπτές διεργασίες, οι δύο από τις οποίες είναι ισόθερμες και οι άλλες δύο αδιαβατικές. Τα *αξιώματα του Carnot* δηλώνουν ότι η θερμική απόδοση όλων των αντιστρεπτών μηχανών, που λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμικών δεξαμενών, είναι μεταξύ

τους ίσες και ότι αντιστρεπτή θερμότητας. Τα δύο απ θερμοδυναμικής και συνδέεται με δεξαμενών υψηλ

Οπότε, στις απ από το λόγο  $T_H/T_L$  μενών υψηλής κ

Μια θερμική μηχανή ονομάζεται *θερμική* και ομοιοσθήσο

Αυτή είναι και ξύ δύο δεξαμενών

Οι συντελεστές παρόμοιο τρόπο

και

Και στην περίπτωση ψυγείου ή μια αντλίας  $T_H$  και  $T_L$ .

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 W. Z. Black, New York, 1985.
- 2 J. R. Howe, *Thermodynamics*
- 3 D. Stewart, *Smithsonian*, pp.
- 4 G. J. Van, *Thermodynamics*
- 5 K. Wark, *Th*

τους ίσες και ότι καμιά θερμική μηχανή δε μπορεί να έχει μεγαλύτερη απόδοση από την αντιστρεπτή θερμική μηχανή, η οποία λειτουργεί μεταξύ των ίδιων δεξαμενών θερμότητας. Τα δύο αυτά αξιώματα διαμορφώνουν τη θεωρητική βάση για την ανάπτυξη της *θερμοδυναμικής κλίμακας θερμοκρασιών*, η οποία επίσης ονομάζεται και *κλίμακα Kelvin* και συνδέεται με τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ μιας αντιστρεπτής διάταξης και δύο δεξαμενών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας μέσω της σχέσης:

$$\left(\frac{Q_H}{Q_L}\right)_{\text{rev}} = \frac{T_H}{T_L}$$

Οπότε, στις αντιστρεπτές θερμικές μηχανές ο λόγος  $Q_H/Q_L$  μπορεί να αντικατασταθεί από το λόγο  $T_H/T_L$  όπου  $T_H$  και  $T_L$  είναι αντίστοιχα οι απόλυτες θερμοκρασίες των δεξαμενών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας.

Μια θερμική μηχανή η οποία λειτουργεί σύμφωνα με τον αντιστρεπτό κύκλο Carnot ονομάζεται *θερμική μηχανή Carnot*. Η θερμική απόδοση της μηχανής του Carnot, όπως και οποιασδήποτε άλλης αντιστρεπτής θερμικής μηχανής, δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{\text{th,rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Αυτή είναι και η μέγιστη απόδοση μιας θερμικής μηχανής, η οποία λειτουργεί μεταξύ δύο δεξαμενών, με θερμοκρασίες  $T_H$  και  $T_L$ .

Οι συντελεστές COP των αντιστρεπτών ψυγείων ή αντλιών θερμότητας ορίζονται με παρόμοιο τρόπο από τις σχέσεις:

$$\text{COP}_{\text{R,rev}} = \frac{1}{T_H/T_L - 1}$$

και

$$\text{COP}_{\text{HP,rev}} = \frac{1}{1 - T_L/T_H}$$

Και στην περίπτωση αυτή, οι παραπάνω είναι οι υψηλότεροι συντελεστές COP για ένα ψυγείο ή μια αντλία θερμότητας, η οποία λειτουργεί μεταξύ των θερμοκρασιακών ορίων  $T_H$  και  $T_L$ .

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 W. Z. Black and J. G. Hartley, *Thermodynamics*, Harper & Row, New York, 1985.
- 2 J. R. Howell and R. O. Buckius, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, McGraw-Hill, New York, 1987.
- 3 D. Stewart, "Wheels go round and round, but always run down," *Smithsonian*, pp. 193–208, November 1986.
- 4 G. J. Van Wylan and R. E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, 3d ed., Wiley, New York, 1985.
- 5 K. Wark, *Thermodynamics*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, 1988.

**ΑΣΚΗΣΕΙΣ**

**Β' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ**

35487

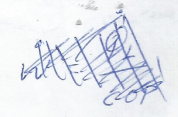
✓ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.52

ψυγείο

COP = 1.8

$\dot{Q}_L = 90 \frac{kJ}{min}$



a)  $\dot{W} = ?$

b)  $\dot{Q}_H = ?$  → η είσοδος αέρα στο κρύο

$COP = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} \Rightarrow \dot{W} = \frac{\dot{Q}_L}{COP} = \frac{90 \frac{kJ}{min}}{1.8} = 50 \frac{kJ}{min} = \frac{50}{60} \frac{kJ}{s} = 0.833 kW$

$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W} = 90 + 50 = 140 \frac{kJ}{min}$

5.53

$\dot{Q}_L = 750 \frac{kJ}{min}$

$\dot{W} = 6 kW$

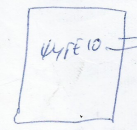
a) COP = ?

b)  $\dot{Q}_H = ?$

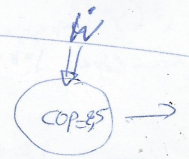
$COP = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} = \frac{750 \frac{kJ}{min}}{6 \frac{kJ}{s}} = \frac{750 \frac{kJ}{60s}}{6 \frac{kJ}{s}} = \frac{75}{36} = 2.08$

$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W} = 750 \frac{kJ}{min} + 6 \frac{kJ}{s} = 1110 \frac{kJ}{min}$

5.54



$1200 \frac{kJ}{h}$



$\dot{Q}_L = 1200 \frac{kJ}{h} * 4 = 4800 \frac{kJ}{h}$

$\dot{W} = \frac{\dot{Q}_L}{COP} = \frac{4800 \frac{kJ}{h}}{2.5} = 1920 \frac{kJ}{h} = 0.533 kW$