

ΔΙΑΛΕΞΗ 9
11/12/2020

Β' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

5

Μέχρι το σημείο αυτό δόθηκε έμφαση στον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής, σύμφωνα με τον οποίο κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας η ενέργεια πρέπει να διατηρείται. Στο κεφάλαιο αυτό εισάγεται ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής, ο οποίος υποστηρίζει ότι μια διεργασία μπορεί να λάβει χώρα μόνο προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και ότι η ενέργεια, εκτός από ποσότητα, έχει και ποιότητα. Μια διεργασία μπορεί να πραγματοποιείται, μόνο όταν ικανοποιεί και τους δύο νόμους της θερμοδυναμικής. Στο κεφάλαιο 5, αρχικά, εισάγονται οι έννοιες των δεξαμενών θερμικής ενέργειας, των αντιστρεπτών και των μη-αντιστρεπτών μηχανών, των θερμικών μηχανών, των ψυγείων και των αντλιών θερμότητας. Τις διάφορες διατυπώσεις του δεύτερου νόμου ακολουθεί η ανάλυση των αεικίνητων μηχανών και της απόλυτης κλίμακας θερμοκρασιών. Στη συνέχεια, εξετάζεται ο κύκλος και τα αξιώματα του Carnot. Τέλος, παρουσιάζονται οι ιδανικές θερμικές μηχανές Carnot, τα ψυγεία και οι αντλίες θερμότητας.

5-1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΝΟΜΟ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

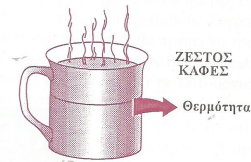
Στα δύο προηγούμενα κεφάλαια εφαρμόστηκε ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής ή η αρχή διατήρησης της ενέργειας για κλειστά και για ανοιχτά συστήματα και τονίστηκε επανειλημμένα, η ενέργεια είναι μια ιδιότητα που διατηρείται.

Δεν έχει ποτέ αναφερθεί καμιά διεργασία η οποία να παραβιάζει τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής. Ετσι, είναι λογικό να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι, για να λάβει χώρα μια διεργασία, πρέπει να ικανοποιεί τον πρώτο νόμο. Βέβαια, εάν μια διεργασία ικανοποιεί τον πρώτο νόμο, δεν είναι και απαραίτητα πραγματοποιήσιμη.

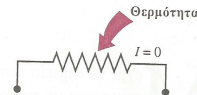
Από την καθημερινή εμπειρία είναι γνωστό ότι ένα φλυτζάνι με ζεστό καφέ που τοποθετείται μέσα σ' ένα δροσερό δωμάτιο τελικά θα κρυώσει (Σχήμα 5-1). Η διεργασία αυτή ικανοποιεί τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής, γιατί το ποσό της ενέργειας που χάνεται από τον καφέ ισούται με το ποσό της ενέργειας που κερδίζει το περιβάλλον. Θεωρείται τώρα ακριβώς η αντίστροφη διεργασία. Εστω, δηλαδή, ότι ο καφές καταφέρνει να ζεσταθεί με μεταφορά θερμότητας από τον αέρα ενός πιο κρύου δωματίου. Είναι γνωστό ότι αυτή η διεργασία δε είναι δυνατή να συμβεί στην πράξη παρόλο που, ακόμη και εάν συνέβαινε, δε θα παραβίαζε τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής, γιατί το ποσό θερμότητας που θα χανόταν από το περιβάλλον θα ήταν ίσο με το ποσό της θερμότητας που θα αποκτούσε ο καφές.

Ενα δεύτερο οικείο παράδειγμα είναι η θέρμανση ενός δωματίου με ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο διαρρέει μια θερμαντική αντίσταση (Σχήμα 5-2). Και στην περίπτωση αυτή, ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής υποστηρίζει ότι το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται στον αέρα του δωματίου είναι ίσο με το ποσό της ενέργειας που παρέχεται στην αντίσταση. Να θεωρηθεί τώρα η αντίστροφη διεργασία. Είναι γνωστό ότι η μεταφορά θερμότητας προς την αντίσταση δεν προκαλεί την παραγωγή ενός ίσου ποσού ηλεκτρικής ενέργειας, παρόλο που και κάτι τέτοιο δε θα παραβίαζε τον πρώτο νόμο.

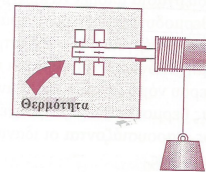
Τέλος, θεωρείται ένας άξονας με πτερύγια (έλικας), ο οποίος λειτουργεί με την πτώση μιας μάζας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5-3. Καθώς η μάζα πέφτει, τα πτερύγια περιστρέφονται και αναδεύουν ένα ρευστό, το οποίο περιέχεται σ' ένα μονωμένο δοχείο. Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της



Σχήμα 5-1 Ένα ζεστό φλυτζάνι καφέ δε μπορεί να θερμανθεί επιπλέον σ' ένα πιο ψυχρό περιβάλλον.



Σχήμα 5-2 Η μεταφορά θερμότητας προς ένα σύρμα δεν παράγει ηλεκτρισμό.



Σχήμα 5-3 Η μεταφορά θερμότητας προς μια φτερωτή δεν προκαλεί την περιστροφή της.

ενέργειας, η ελάττωση της δυναμικής ενέργειας της μάζας είναι ίση με την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του ρευστού. Παρόλα αυτά, η αντίστροφη διεργασία, δηλαδή η ανύψωση του βάρους με τη μεταφορά θερμότητας από το ρευστό στα πτερύγια, δεν πραγματοποιείται ποτέ στη φύση, αν και κάτι τέτοιο πάλι δε θα παραβίαζε τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής.

Από τα παραπάνω παραδείγματα γίνεται φανερό ότι όλες οι διεργασίες μπορούν να λάβουν χώρα προς μια και μόνο συγκεκριμένη κατεύθυνση και ουδέποτε κατά την αντίθετη (Σχήμα 5-4). Ο πρώτος νόμος δε βάζει κανένα περιορισμό ως προς την κατεύθυνση μιας διεργασίας. Η ικανοποίηση όμως του πρώτου νόμου δε συνεπάγεται κατ'ανάγκη τη δυνατότητα πραγματοποίησης της διεργασίας. Την αδυναμία αυτή του πρώτου νόμου να καθορίζει τη δυνατότητα πραγματοποίησης μιας διεργασίας έρχεται να καλύψει ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα φανεί ότι οι αντίστροφες των διεργασιών, που παρουσιάστηκαν παραπάνω, παραβιάζουν το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Η παραβίαση του δεύτερου νόμου μπορεί να αναγνωριστεί με τη βοήθεια μιας ιδιότητας που ονομάζεται *εντροπία* και θα οριστεί στο επόμενο κεφάλαιο. Μια διεργασία δε μπορεί να λάβει χώρα εκτός και εάν ικανοποιεί και τον πρώτο και το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής (Σχήμα 5-5).

Υπάρχουν πολλές διατυπώσεις του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής. Δύο από τις διατυπώσεις αυτές εξετάζονται στη συνέχεια του κεφαλαίου σε συνδυασμό με κάποιες μηχανικές διατάξεις που λειτουργούν σύμφωνα με κυκλικές διεργασίες.

Η χρήση όμως του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου δεν περιορίζεται στον προσδιορισμό της κατεύθυνσης μιας διεργασίας. Ο νόμος αυτός υποστηρίζει ότι η ενέργεια εκτός από ποσότητα έχει και *ποιότητα*. Ο πρώτος νόμος ασχολείται μόνο με την ποσότητα ενέργειας και τους μετασχηματισμούς της από τη μια μορφή στην άλλη χωρίς να κάνει καμιά αναφορά στην ποιότητα της ενέργειας. Η διατήρηση της ποιότητας της ενέργειας είναι επίσης ένα πρόβλημα των μηχανικών και ο δεύτερος νόμος παρέχει τα απαραίτητα εργαλεία για τον υπολογισμό της ποιότητας και της υποβάθμισης της κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας. Όπως θα φανεί στη συνέχεια του κεφαλαίου, μια ποσότητα ενέργειας που βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία έχει τη δυνατότητα να παράγει περισσότερο έργο από την ίδια ποσότητα ενέργειας σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

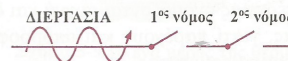
Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής χρησιμοποιείται επίσης και για τον υπολογισμό των *θεωρητικών ορίων* της απόδοσης πολλών μηχανικών διατάξεων, όπως οι θερμικές μηχανές και τα ψυγεία, καθώς και για την πρόβλεψη του *βαθμού μετατροπής* των χημικών αντιδράσεων.

5-2 ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΘΕΡΜΟΔΟΧΕΙΑ)

Για την ανάπτυξη του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής πρέπει να θεωρηθεί ένα υποθετι-



Σχήμα 5-4 Οι μονόδρομες διεργασίες λαμβάνουν χώρα μόνο προς μια κατεύθυνση και ποτέ στην αντίθετη.



Σχήμα 5-5 Για να είναι δυνατή μια διεργασία, πρέπει να ικανοποιεί τόσο τον πρώτο νόμο όσο και το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής.

κό σώμα με σχετικά μεγάλη *θερμική χωρητικότητα* (μάζα \times ειδική θερμότητα), το οποίο θα μπορεί να απορρίπτει ή να απορροφά πεπερασμένα ποσά θερμότητας χωρίς να μεταβάλλεται η θερμοκρασία του. Ένα τέτοιο σώμα ονομάζεται *δεξαμενή θερμικής ενέργειας* ή απλά *δεξαμενή*. Σαν τέτοια σώματα στην πράξη μπορούν να θεωρηθούν οι μεγάλες μάζες νερού, όπως οι θάλασσες, οι λίμνες και τα ποτάμια, καθώς και ο ατμοσφαιρικός αέρας εξαιτίας της μεγάλης δυνατότητας που έχουν να αποθηκεύουν ενέργεια ή με άλλα λόγια εξαιτίας της μεγάλης θερμικής τους μάζας (Σχήμα 5-6). Η *ατμόσφαιρα*, για παράδειγμα,

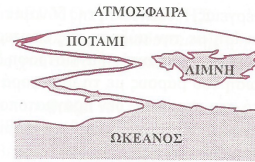
δε θερμαίνεται το χειμώνα από τις απώλειες θερμότητας των κτιρίων σε μια πόλη. Το ίδιο συμβαίνει και με τις μεγάλες ποσότητες ενέργειας που αποβάλλονται στα ποτάμια από τα εργοστάσια παραγωγής ισχύος και τα οποία δεν προκαλούν καμιά σημαντική αύξηση στη θερμοκρασία των νερών αυτών των ποταμών

Σα δεξαμενές θερμικής ενέργειας είναι δυνατό να θεωρηθούν και τα *συστήματα δύο φάσεων*, γιατί μπορούν να απορροφήσουν ή να αποβάλλουν μεγάλες ποσότητες θερμότητας διατηρώντας τη θερμοκρασία τους σταθερή. Ένα άλλο συνηθισμένο παράδειγμα θερμικής δεξαμενής είναι ο *βιομηχανικός φούρνος*. Η θερμοκρασία αυτών των φούρνων ρυθμίζεται και ελέγχεται σε μια τιμή, με αποτέλεσμα να παρέχουν μεγάλα ποσά θερμότητας σε σταθερή θερμοκρασία.

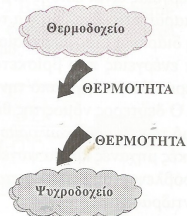
Ένα σώμα δεν είναι ανάγκη να έχει μεγάλο μέγεθος προκειμένου να λειτουργεί σα δεξαμενή θερμότητας. Οποιοδήποτε σώμα, του οποίου η θερμική χωρητικότητα είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με τα ποσά θερμότητας που παρέχει ή απορροφά, μπορεί να θεωρηθεί σα δεξαμενή θερμότητας. Για παράδειγμα, ο αέρας που περιέχεται σ' ένα δωμάτιο μπορεί να θεωρηθεί σα δεξαμενή θερμότητας σε σχέση με τη θερμότητα που εκλύεται από μια τηλεόραση, γιατί τα ποσά θερμότητας που μεταφέρονται από την τηλεόραση στον αέρα του δωματίου δεν είναι αρκετά μεγάλα, ώστε να προκαλέσουν αισθητή μεταβολή στην θερμοκρασία του.

Μια δεξαμενή που παρέχει ενέργεια με τη μορφή θερμότητας ονομάζεται *θερμοδοχείο*, ενώ μια δεξαμενή που απορροφά ενέργεια με τη μορφή θερμότητας ονομάζεται *ψυχοδοχείο* (Σχήμα 5-7). Οι δεξαμενές θερμικής ενέργειας ονομάζονται συχνά και *δεξαμενές θερμότητας*, γιατί παρέχουν και απορροφούν ενέργεια με τη μορφή θερμότητας.

Η μεταφορά θερμότητας από τις μεγάλες βιομηχανικές πηγές προς το περιβάλλον αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα, τόσο για τους περιβατολόγους όσο και για τους μηχανικούς. Η ανεξέλεγκτη απόρριψη θερμότητας



Σχήμα 5-6 Τα σώματα με μεγάλη θερμική μάζα μπορούν να θεωρηθούν σα συσσωρευτές θερμικής ενέργειας.



Σχήμα 5-7 Μια πηγή (θερμοδοχείο) παρέχει ενέργεια με τη μορφή θερμότητας και ένα ψυχοδοχείο (χοάνη) απορροφά την ενέργεια αυτή.

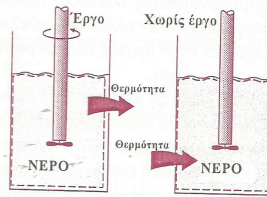
στο περιβάλλον μπορεί να προκαλέσει σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας προκαλώντας αυτό που ονομάζεται *θερμική μόλυνση*. Αν δεν ελεγχθεί η θερμική μόλυνση, μπορεί να προκαλέσει επικίνδυνες διαταραχές στην υδρόβια ζωή των λιμνών και των ποταμών. Αντίθετα, με προσεκτικό σχεδιασμό και διαχείριση της θερμότητας που απορρίπτεται προς τις μεγάλες υδάτινες μάζες είναι δυνατή η χρησιμοποίησή της για τη βελτίωση της υδρόβιας ζωής, διατηρώντας τη θερμοκρασία του φορέα αυξημένη και σταθερή μέσα σε επιθυμητά όρια.

5-3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

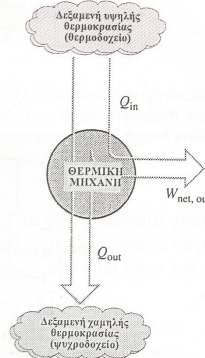
Όπως φάνηκε στην παράγραφο 5-1, το έργο μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας. Όμως, η μετατροπή των άλλων μορφών ενέργειας σε έργο δεν είναι πάντοτε το ίδιο εύκολη. Για παράδειγμα, το μηχανικό έργο, που παράγεται από τον αναδευτήρα του σχήματος 5-8, μετατρέπεται αρχικά σε εσωτερική ενέργεια του νερού. Η ενέργεια αυτή στη συνέχεια εγκαταλείπει το δοχείο με τη μορφή θερμότητας. Είναι γνωστό ότι κάθε προσπάθεια να αντιστραφεί η παραπάνω πορεία θα αποτύχει. Δηλαδή, η μεταφορά θερμότητας προς το νερό δεν προκαλεί περιστροφή του αναδευτήρα. Από την παρατήρηση αυτή, καθώς και από άλλα παρόμοια παραδείγματα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το έργο μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε θερμότητα. Αντίθετα, η μετατροπή της θερμότητας σε έργο απαιτεί ειδικές διατάξεις. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται **θερμικές μηχανές**.

Οι θερμικές μηχανές μπορεί να διαφέρουν σημαντικά η μία από την άλλη, όλες όμως έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (Σχήμα 5-9):

- 1 Απορροφούν θερμότητα από μια πηγή υψηλής θερμοκρασίας (ηλιακή ενέργεια, καυστήρας καύσιμου, πυρηνικός αντιδραστήρας κ.λ.π.).
- 2 Το ένα μέρος αυτής της θερμότητας το μετατρέπουν σε έργο (συνήθως σε έργο περιστρεφόμενης ατράκτου).
- 3 Αποβάλλουν το υπόλοιπο της θερμότητας σ' ένα ψυχροδοχείο χαμηλής θερμοκρασίας (ψυχή δεξαμενή) (ή στην ατμόσφαιρα, στα ποτάμια, στον αέρα, στη θάλασσα κ.λ.π.).
- 4 Λειτουργούν σε κύκλο.



Σχήμα 5-8 Το έργο μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε θερμότητα και σε ποσοστό 100%, το αντίθετο όμως δε μπορεί να συμβεί.



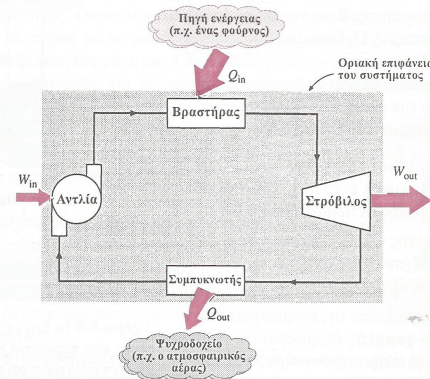
Σχήμα 5-9 Το ένα μέρος της θερμότητας που παρέχεται σε μια θερμική μηχανή μετατρέπεται σε έργο, ενώ το υπόλοιπο αποβάλλεται σ' ένα ψυχροδοχείο (χαμηλή θερμοκρασία).

Οι θερμικές μηχανές, καθώς και οι άλλες διατάξεις που λειτουργούν σε κύκλο, περιέχουν συνήθως ένα ρευστό προς και από το οποίο μεταφέρεται η θερμότητα κατά τη διάρκεια του κύκλου. Το ρευστό αυτό ονομάζεται **λειτουργούν ρευστό** ή **ρευστό λειτουργίας** ή **λειτουργούν μέσο**.

Ο όρος *θερμική μηχανή* χρησιμοποιείται ευρύτερα για να περιγράψει όλες τις διατάξεις παραγωγής έργου, ακόμα και αυτές που δε λειτουργούν σε κύκλο. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μηχανές που περιλαμβάνουν εσωτερική καύση, όπως οι στρόβιλοι και οι κινητήρες αυτοκινήτων. Οι διατάξεις αυτές λειτουργούν σε μηχανικούς και όχι σε θερμοδυναμικούς κύκλους, επειδή το ρευστό λειτουργίας (τα αέρια της καύσης) δε διαγράφουν έναν ολόκληρο κύκλο. Στο τέλος του κύκλου, τα καυσαέρια αυτά, αντί να ψύχονται στην αρχική θερμοκρασία, αποβάλλονται και αντικαθίστανται από νέο μίγμα καύσιμου-αέρα.

Μια διάταξη παραγωγής έργου που ικανοποιεί τον ορισμό της θερμικής μηχανής είναι η *μονάδα παραγωγής ισχύος με υδρατμό*, η οποία αποτελεί μια μηχανή εξωτερικής καύσης. Αυτό σημαίνει ότι η διεργασία της καύσης πραγματοποιείται έξω από τη μηχανή και η θερμική ενέργεια που απελευθερώνεται μεταφέρεται στον υδρατμό με τη μορφή θερμότητας. Η αρχή λειτουργίας μιας μονάδας παραγωγής ισχύος παριστάνεται στο σχήμα 5-10. Πρόκειται για ένα απλοποιημένο διάγραμμα, ενώ η μελέτη των πραγματικών μονάδων παραγωγής ισχύος γίνεται στο κεφάλαιο 9 του δεύτερου τόμου. Οι διάφορες ποσότητες που παριστάνονται στο διάγραμμα είναι οι ακόλουθες:

Q_{in} = το ποσό της θερμότητας που προσδίδεται στον υδρατμό μέσα στο βραστήρα από μια πηγή σε υψηλή θερμοκρασία (φούρνος).



Σχήμα 5-10 Σχηματική παράσταση μιας μονάδας παραγωγής ισχύος με υδρατμό.

Q_{out} = το ποσό της θερμότητας που απορρίπτεται από τον υδρατμό στο συμπυκνωτή προς ένα ψυχοδοχείο χαμηλής θερμοκρασίας (ο ατμοσφαιρικός αέρας, ένα ποτάμι κ.λ.π.).

W_{out} = το ποσό του έργου που παράγεται από τον υδρατμό κατά την εκτόνωσή του στον στρόβιλο.

W_{in} = το ποσό του έργου που απαιτείται για τη συμπίεση του νερού στην πίεση του βραστήρα.

Οι κατευθύνσεις της θερμότητας και του έργου σημειώνονται με τους δείκτες *in* και *out* και οι τιμές τους είναι αντίστοιχα πάντοτε θετικές.

Το καθαρό έργο, που παράγεται από τη μονάδα παραγωγής ισχύος, είναι η διαφορά μεταξύ του ολικού έργου που παράγεται από τη μονάδα μείον το ολικό έργο που καταναλώνεται κατά τη διεργασία (Σχήμα 5-11):

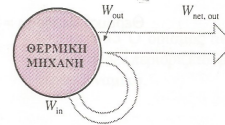
$$W_{\text{net,out}} = W_{\text{out}} - W_{\text{in}} \quad (\text{kJ}) \quad (5-1)$$

Το καθαρό έργο μπορεί επίσης να υπολογιστεί από τα δεδομένα μεταφοράς θερμότητας. Οι τέσσερις συσκευές της μονάδας παραγωγής ισχύος περιλαμβάνουν μεταφορά μάζας μέσα και έξω από αυτές και, εάν εξεταστούν μεμονωμένα, θα πρέπει να θεωρηθούν σαν ανοιχτά συστήματα. Όμως, οι συσκευές αυτές μαζί με τους αγωγούς που τις συνδέουν περιέχουν συνέχεια το ίδιο ρευστό (δε λαμβάνονται υπόψη τυχόν απώλειες ατμού) και καμιά ποσότητα μάζας δεν εισέρχεται ή δεν εξέρχεται από το συνολικό σύστημα, το οποίο παριστάνεται σκιασμένο στο σχήμα 5-11. Έτσι, το συνολικό σύστημα μπορεί να θεωρηθεί κλειστό. Υπενθυμίζεται ότι για κλειστά συστήματα, που πραγματοποιούν κυκλική διεργασία, η μεταβολή ΔU της εσωτερικής ενέργειας είναι ίση με μηδέν και το ολικό έργο που παράγεται από το σύστημα είναι ίσο με τη θερμότητα που μεταφέρεται προς το σύστημα:

$$W_{\text{net,out}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} \quad (\text{kJ}) \quad (5-2)$$

Θερμική Απόδοση

Στην εξίσωση 5-2, το Q_{out} συμβολίζει το ποσό της θερμότητας που αποβάλλεται προκειμένου να ολοκληρωθεί ο κύκλος. Το Q_{out} όμως δεν είναι ποτέ μηδέν και έτσι το καθαρό έργο, που παράγεται από μια θερμική μηχανή, είναι πάντοτε μικρότερο από τη



Σχήμα 5-11 Ένα μέρος του έργου, που παράγεται από μια θερμική μηχανή, καταναλώνεται από την ίδια τη μηχανή προκειμένου αυτή να λειτουργεί συνεχώς.

θερμότητα που εισάγεται σε αυτήν. Αυτό σημαίνει ότι ένα μέρος μόνο της θερμότητας που παρέχεται στη θερμική μηχανή μετατρέπεται σε έργο. Σε μια θερμική μηχανή το κλάσμα της θερμότητας που μετατρέπεται σε έργο αποτελεί το μέτρο της απόδοσης της θερμικής μηχανής και ονομάζεται **θερμική απόδοση** η_{th} (Σχήμα 5-12).

Γενικά, η απόδοση ή αλλιώς η επάρκεια εκφράζεται από την επιθυμητή έξοδο και την απαιτούμενη είσοδο ως εξής (Σχήμα 5-13):

$$\text{Απόδοση} = \frac{\text{Επιθυμητή Έξοδος}}{\text{Απαιτούμενη Είσοδος}} \quad (5-3)$$

Για τις θερμικές μηχανές, το καθαρό έργο εξόδου αποτελεί την επιθυμητή έξοδο, ενώ η απαιτούμενη είσοδος δίνεται από την ποσότητα της θερμότητας που προσδίδεται στο ρευστό λειτουργίας. Έτσι, η θερμική απόδοση για μια θερμική μηχανή μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\text{Θερμική απόδοση} = \frac{\text{καθαρό έργο που παράγεται}}{\text{ολική θερμότητα που παρέχεται}}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,out}}{Q_{in}} \quad (5-4)$$

ή

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (5-5)$$

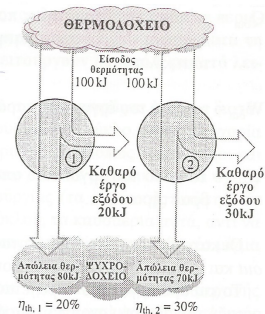
εφόσον $W_{net,out} = Q_{in} - Q_{out}$.

Οι κυκλικές διατάξεις με πρακτικό ενδιαφέρον, όπως είναι οι θερμικές μηχανές, τα ψυγεία και οι αντλίες θερμότητας, λειτουργούν μεταξύ του θερμοδοχείου που βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία T_H και του ψυχοδοχείου που βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία T_L . Προκειμένου να εξεταστούν οι θερμικές μηχανές, τα ψυγεία και οι αντλίες θερμότητας με ισοδύναμο τρόπο, πρέπει να ορισθούν οι ακόλουθες ποσότητες:

Q_H = το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται μεταξύ της κυκλικής διάταξης και του θερμοδοχείου που βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία T_H .

Q_L = το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται μεταξύ της κυκλικής διάταξης θερμικής μηχανής και του ψυχοδοχείου που βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία T_L .

Σημειώνεται ότι τα Q_H και Q_L ορίζονται ως ποσότητες και για το λόγο αυτό έχουν



Σχήμα 5-12 Μερικές θερμικές μηχανές αποδίδουν καλύτερα συγκριτικά με κάποιες άλλες (μετατρέπουν μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας σε έργο).

Η θερμική απόδοση είναι ποσοστό που ορίζεται ως ο λόγος της θερμότητας που μετατρέπεται σε έργο προς την ολική θερμότητα που παρέχεται. Η θερμική απόδοση μπορεί να γραφεί ως εξής:

Οι θερμικές μηχανές που λειτουργούν με αποδοτικότητα του 25% αποτελούν το 50% της ενέργειας που παράγεται στην Ελλάδα. Δηλαδή, ακόμα και η καλύτερη απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί με τη μισή ενέργεια που παράγεται, στις λίμνες που φημίζονται ως πηγή ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί (κακής ποιότητας).

πάντοτε θετικές τιμές. Η κατεύθυνση των Q_H και Q_L είναι φανερή για το κάθε πρόβλημα και δε χρειάζεται ιδιαίτερη ανησυχία για τα πρόσημά τους. Επομένως, το καθαρό έργο και η θερμική απόδοση για οποιαδήποτε θερμική μηχανή (η οποία παριστάνεται στο σχήμα 5-14) δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$W_{\text{net,out}} = Q_H - Q_L$$

και

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net,out}}}{Q_H}$$

ή

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (5-6)$$

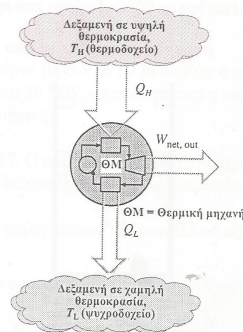
Η θερμική απόδοση μιας θερμικής μηχανής είναι πάντοτε μικρότερη από τη μονάδα, εφόσον οι ποσότητες Q_L και Q_H έχουν θετικές τιμές.

Η θερμική απόδοση είναι ένα μέτρο της δυνατότητας της θερμικής μηχανής να μετατρέπει σε έργο τη θερμότητα που προσλαμβάνει. Ο σκοπός των θερμικών μηχανών είναι να μετατρέπουν τη θερμότητα σε έργο. Οι μηχανικοί προσπαθούν συνεχώς να βελτιώσουν την απόδοση αυτή, γιατί αυτό σημαίνει μικρότερη κατανάλωση καυσίμου και κατά συνέπεια μικρότερο κόστος και λιγότερη μόλυνση του περιβάλλοντος.

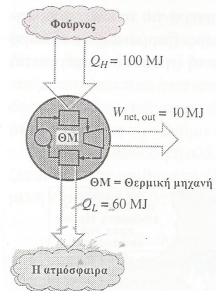
Οι θερμικές αποδόσεις των διατάξεων παραγωγής έργου είναι εντυπωσιακά χαμηλές. Ένας συνηθισμένος κινητήρας αυτοκινήτου που λειτουργεί με ανάφλεξη - σπινθήρα (βενζινοκινητήρας) έχει συντελεστή θερμικής απόδοσης περίπου 25%. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας του αυτοκινήτου μετατρέπει περίπου το 25% της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε έργο. Η απόδοση αυτή αυξάνεται περίπου στο 35% στους πετρελαιοκινητήρες και στους αεριοστρόβιλους και στο 50% στις μονάδες παραγωγής ισχύος με υδρατμό. Δηλαδή, ακόμα και οι θερμικές μηχανές με τη μεγαλύτερη απόδοση αποβάλλουν περισσότερη από τη μισή ενέργεια που τους παρέχεται, στα ποτάμια, στις λίμνες και στην ατμόσφαιρα, με τη μορφή ενέργειας που χάνεται ή δεν μπορεί να αξιοποιηθεί (κακής ποιότητας ενέργεια) (Σχήμα 5-15).



Σχήμα 5-13 Ο ορισμός αυτός της απόδοσης δεν περιορίζεται μόνο στη θερμοδυναμική.

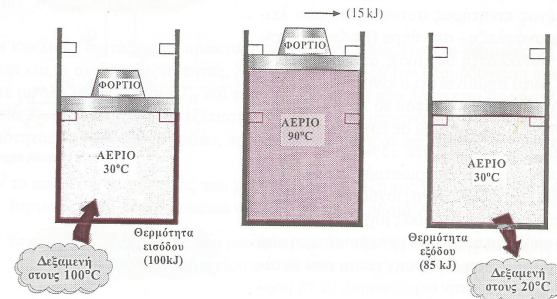


Σχήμα 5-14 Σχηματική αναπαράσταση μιας θερμικής μηχανής



Σχήμα 5-15 Ακόμα και οι θερμικές μηχανές με τη μεγαλύτερη απόδοση απορρίπτουν στο περιβάλλον το μεγαλύτερο ποσοστό της θερμότητας που λαμβάνουν.

σταματούν το έμβολο. Το ρευστό λειτουργίας είναι το αέριο που περιέχεται στον κύλινδρο. Αρχικά, το αέριο βρίσκεται στους 30°C και το έμβολο μαζί με το φορτίο είναι σταματημένα στις κάτω εσοχές. Στη συνέχεια, από μια πηγή που βρίσκεται στους 100°C μεταφέρονται προς το αέριο του κυλίνδρου 100 kJ θερμότητας προκαλώντας τη διαστολή του αερίου και την ανύψωση του εμβόλου μέχρι τις πάνω εσοχές, όπως φαίνεται στο σχήμα. Στο σημείο αυτό αφαιρείται το φορτίο και η θερμοκρασία του αερίου μετριέται ίση με 90°C . Το έργο που προσφέρεται στο φορτίο κατά τη διάρκεια της διαστο-



Σχήμα 5-16 Ο κύκλος μιας θερμικής μηχανής δε μπορεί να ολοκληρωθεί χωρίς την αποβολή ενός ποσού θερμότητας προς το ψυκτροδοχείο.

Μπορεί να εξοικονομηθεί η Q_{out} ;

Σε μια μονάδα παραγωγής ισχύος με υδρατμό, ο συμπυκνωτής είναι μια διάταξη με την οποία μεγάλες ποσότητες μη-χρήσιμης θερμότητας αποβάλλονται στα ποτάμια και στις λίμνες ή στην ατμόσφαιρα. Επομένως, ανακύπτει το ερώτημα, εάν η εν λόγω μονάδα μπορεί να λειτουργεί χωρίς συμπυκνωτή. Η απάντηση, δυστυχώς, είναι *όχι* για τον απλό λόγο ότι χωρίς τη διαδικασία ψύξης στο συμπυκνωτή δε μπορεί να ολοκληρωθεί η κυκλική διεργασία. (Οι κυκλικές διατάξεις, όπως αυτές των θερμοηλεκτρικών μονάδων, δε μπορούν να λειτουργούν συνεχώς, εάν δεν ολοκληρωθεί η κυκλική διεργασία). Το γεγονός αυτό παρουσιάζεται παρακάτω με τη βοήθεια μιας απλής θερμικής μηχανής:

Θεωρείται η απλή θερμική μηχανή που παριστάνεται στο σχήμα 5-16 και χρησιμοποιείται για την ανύψωση ενός φορτίου. Αυτή αποτελείται από μια διάταξη εμβόλου-κυλίνδρου με δύο ζευγάρια εσοχών που

λής ισούται με...
Ακόμα και κλίμα...
μικές απόδοσης...
χεται στο αέρα...
μότητας που πα...

Στη συνέχεια...
ναντών τα 85 kJ ...
δεξαμενή θερμότητας...
αργότερα; Εάν...
μια θερμική μη...
απάντηση στην...
τα ρέει πάντοτε...
βρίσκεται σε γ...
είναι δυνατό να...
δεξαμενή των 100°C ...
μια δεξαμενή π...
οπότε το αέριο...
τα 85 kJ της απ...
κυκλωθεί και γ...

Το συμπέρασμα...
διαγράφει ένα...
ταλήσει ένα πο...
σίας. Η απαιτή...
λάσσει θερμότη...
διατύπωσης των...
θα εξεταστεί στ...

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Μια θερμική μηχανή...
μός αποβολής...
ρή παραγωγή...

Λύση Η θερμότητα...
θερμότητας σε ψ...

Παραδοχές Οι...
τημάτων είναι...

Ανάλυση Οι πο...

Η συνολική ισχύ...

λής ισούται με την αύξηση της δυναμικής ενέργειας του φορτίου και είναι έστω 15 kJ. Ακόμα και κάτω από ιδανικές συνθήκες (έμβολο χωρίς βάρος, χωρίς τριβές, χωρίς θερμικές απώλειες και σε συνθήκες ψευδοισορροπίας), το ποσό της θερμότητας που παρέχεται στο αέριο είναι μεγαλύτερο από το έργο που παράγεται, γιατί ένα μέρος της θερμότητας που παρέχεται χρησιμοποιείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του αερίου.

Στη συνέχεια, θα γίνει μια απόπειρα να απαντηθεί το ακόλουθο ερώτημα: *Είναι δυνατόν να 85 kJ της θερμότητας που περίσσευαν να μεταφερθούν από τους 90°C πίσω στη δεξαμενή θερμότητας η οποία βρίσκεται στους 100°C, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν αργότερα.* Εάν μπορούσε να γίνει κάτι τέτοιο, τότε θα ήταν δυνατό να κατασκευαστεί μια θερμική μηχανή η οποία κάτω από ιδανικές συνθήκες θα είχε απόδοση 100%. Η απάντηση στην παραπάνω ερώτηση είναι και πάλι όχι για τον απλό λόγο ότι η θερμότητα ρέει πάντοτε από το μέσο που βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία προς αυτό που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία και ουδέποτε αντίστροφα. Έτσι, το αέριο δεν είναι δυνατό να ψυχθεί από τους 90 στους 30°C, προσφέροντας τη θερμότητα του στη δεξαμενή των 100°C. Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει το σύστημά να έρθει σε επαφή με μια δεξαμενή που θα βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, για παράδειγμα 20°C, οπότε το αέριο θα μπορέσει να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση, αποβάλλοντας τα 85 kJ της επιπλέον ενέργειας προς τη δεξαμενή. Η ενέργεια αυτή δε μπορεί να ανακυκλωθεί και για το λόγο αυτό ονομάζεται *μη-χρήσιμη ενέργεια* (waste energy).

Το συμπέρασμα από τα παραπάνω είναι ότι μια θερμική μηχανή, προκειμένου να διαγράψει ένα ολόκληρο κύκλο ακόμα και κάτω από ιδανικές συνθήκες, πρέπει να παραγάγει ένα ποσό θερμότητας μεταφέροντας το σε μια δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας. Η απαίτηση ότι για να λειτουργεί συνεχώς μια θερμική μηχανή πρέπει να εναλλάσσει θερμότητα με τουλάχιστον δύο δεξαμενές θερμότητας αποτελεί τη βάση της διατύπωσης των Kelvin και Planck για το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, η οποία θα εξεταστεί στη συνέχεια.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5-1 Συνολική Παραγωγή Ισχύος από μια Θερμική Μηχανή

Μια θερμική μηχανή αντλεί θερμότητα από ένα φούρνο με ρυθμό 80 MW. Εάν ο ρυθμός αποβολής θερμότητας σ' ένα διπλανό ποτάμι είναι 50 MW, να υπολογιστεί η καθαρή παραγωγή ισχύος και η απόδοση της θερμικής μηχανής.

Λύση Η θερμική μηχανή παριστάνεται στο σχήμα 5-17. Ο φούρνος αποτελεί τη δεξαμενή θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία και ο ποταμός τη δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας.

Παραδοχές Οι απώλειες θερμότητας διαμέσου των σωληνώσεων και των άλλων εξαρτημάτων είναι αμελητέες.

Ανάλυση Οι ποσότητες που δίνονται μπορούν να εκφραστούν με τη μορφή ρυθμών

$$\dot{Q}_H = 80 \text{ MW} \quad \text{και} \quad \dot{Q}_L = 50 \text{ MW}$$

Η συνολική ισχύς που παράγει η μηχανή υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\dot{W}_{\text{net,out}} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = (80 - 50) \text{ MW} = 30 \text{ MW}$$

Η θερμική απόδοση υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{net,out}}}{\dot{Q}_H} = \frac{30 \text{ MW}}{80 \text{ MW}} = 0.375 \text{ (ή 37.5\%)}$$

Αυτό σημαίνει ότι η θερμική μηχανή μετατρέπει σε έργο το 37.5% από το ποσό της θερμότητας που λαμβάνει.

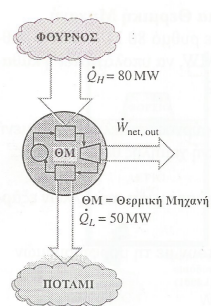
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5-2 Ρυθμός Κατανάλωσης Καυσίμων ενός Αυτοκινήτου

Ενας κινητήρας αυτοκινήτου, με ισχύ εξόδου 65 hp, έχει θερμική απόδοση 24%. Να υπολογιστεί ο ρυθμός κατανάλωσης του καυσίμου, εάν αυτό έχει θερμογόνο δύναμη 19000 Btu/lbm (αυτό σημαίνει ότι κατά την καύση ενός lbm καυσίμου παράγονται 19000 Btu ενέργειας).

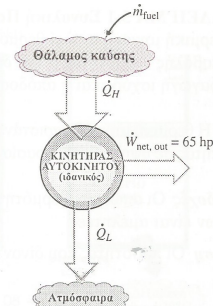
Λύση Ο κινητήρας του αυτοκινήτου παριστάνεται στο σχήμα 5-18. Ο κινητήρας παράγει ισχύ μετατρέποντας σε έργο το 24% της χημικής ενέργειας, που απελευθερώνεται κατά την καύση.

Παραδοχές Η ισχύς του αυτοκινήτου είναι σταθερή.

Ανάλυση Το ποσό της ενέργειας που πρέπει να δοθεί στον κινητήρα, ώστε αυτός να παράγει ισχύ 65 hp, υπολογίζεται από τον ορισμό της θερμικής απόδοσης:



Σχήμα 5-17 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 5-1.



Σχήμα 5-18 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 5-2.

Ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου υπολογίζεται ως εξής:

εφόσον από τον ορισμό της θερμικής απόδοσης:

Ο Δεύτερος Θερμοδυναμικός Νόμος (2^{ος} Νόμος) Οπως παρουσιάστηκε προκειμένου να καθοριστεί ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου, το έργο ολόκληρου του κύκλου θεωρείται θετικό, η θερμική απόδοση θετική, και ο ρυθμός καθαρού έργου θετικός. Ο δεύτερος νόμος της

(Μια διάταξη που λειτουργεί μόνο δεξιά)

Δηλαδή, μια θερμότητα τόσο υψηλής θερμοκρασίας όσο και πηγή υψηλής θερμοκρασίας επίσης να διασπαστεί

Καμιά θερμότητα δεν μπορεί να μεταβληθεί από μια κατάσταση σε μια άλλη χωρίς να συνοδεύεται από κάποια μεταβολή στην κατάσταση του περιβάλλοντος.

Σημειώνεται ότι η θερμική μηχανή να έχει απώλειες ή άλλες απώλειες ισχύος τόσο στις μηχανές. Στην πράξη, η σχετική απόδοση της θερμικής μηχανής είναι πολύ μικρότερη από τη μέγιστη αυτή τιμή, λόγω των απωλειών θερμότητας και των θερμοκρασιών των

$$\dot{Q}_H = \frac{\dot{W}_{\text{net, out}}}{\eta_{\text{th}}} = \frac{65 \text{ hp}}{0.24} \left(\frac{2545 \text{ Btu/h}}{1 \text{ hp}} \right) = 689\,262 \text{ Btu/h}$$

Ο ρυθμός κατανάλωσης του καυσίμου, προκειμένου να παρέχεται στον κινητήρα ενέργεια με τον παραπάνω ρυθμό, δίνεται από τη ακόλουθη σχέση:

$$\dot{m} = \frac{689,262 \text{ Btu/h}}{19,000 \text{ Btu/lbm}} = 36.3 \text{ lbm/h}$$

εφόσον από κάθε lbm καυσίμου, που καίγεται, παράγονται 19000 Btu ενέργειας.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής: Η Διατύπωση των Kelvin και Planck

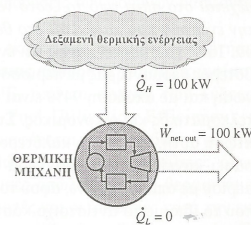
Όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, μια θερμική μηχανή (Σχήμα 5-16), προκειμένου να διαγράψει έναν ολόκληρο κύκλο, πρέπει να αποβάλλει ένα ποσό θερμότητας προς μια δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας, ακόμη και όταν λειτουργεί κάτω από ιδανικές συνθήκες. Δηλαδή, καμιά θερμική μηχανή δε μπορεί να μετατρέψει σε έργο ολόκληρο το ποσό θερμότητας που λαμβάνει. Ο περιορισμός αυτός ως προς τη θερμική απόδοση των θερμικών μηχανών αποτελεί τη βάση για τη διατύπωση του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής των Kelvin και Planck και η οποία έχει ως εξής:

(Μια διάταξη που λειτουργεί σε κύκλο είναι αδύνατο να παίρνει θερμότητα από μια μόνο δεξαμενή και να παράγει έργο.

Δηλαδή, μια θερμική μηχανή, προκειμένου να λειτουργήσει, πρέπει να εναλλάσσει θερμότητα τόσο με μια πηγή χαμηλής θερμοκρασίας (ψυχοδοχείο) όσο και με μια πηγή υψηλής θερμοκρασίας (θερμοδοχείο). Η διατύπωση των Kelvin και Planck μπορεί επίσης να διατυπωθεί ως εξής:

Καμιά θερμική μηχανή δε μπορεί να έχει απόδοση 100% (Σχήμα 5-19), ή προκειμένου να λειτουργήσει μια διάταξη παραγωγής ισχύος, το ρευστό λειτουργίας πρέπει να ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον και μ' ένα φούρνο.

Σημειώνεται ότι η αδυναμία μιας θερμικής μηχανής να έχει απόδοση 100% δεν οφείλεται σε τριβές ή άλλες απώλειες. Είναι ένας περιορισμός που ισχύει τόσο στις πραγματικές όσο και στις ιδανικές μηχανές. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, αναπτύσσεται η σχέση για τη μέγιστη απόδοση μιας θερμικής μηχανής. Επίσης, αποδεικνύεται ότι η μέγιστη αυτή τιμή εξαρτάται αποκλειστικά από τις θερμοκρασίες των δύο δεξαμενών.



Σχήμα 5-19 Μια θερμική μηχανή που παραβιάζει τη διατύπωση του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής των Kelvin και Planck.

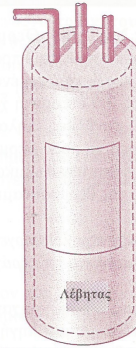
5-4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ο όρος “απόδοση” (ή συντελεστής απόδοσης) χρησιμοποιείται πολύ συχνά στη θερμοδυναμική και είναι ενδεικτικός του πόσο αποτελεσματικά πραγματοποιείται μια διεργασία μετατροπής ή μεταφοράς ενέργειας. Για παράδειγμα, η *θερμική απόδοση* μιας θερμικής μηχανής είναι το κλάσμα της θερμικής ενέργειας που αυτή μετατρέπει σε έργο. Η απόδοση είναι ένας όρος που πολλές φορές στη θερμοδυναμική χρησιμοποιείται λανθασμένα και αποτελεί αιτία πολλών παρεξηγήσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η απόδοση χρησιμοποιείται χωρίς προηγουμένως να δοθεί ο κατάλληλος ορισμός. Στις παραγράφους που ακολουθούν θα οριστούν οι συντελεστές απόδοσης που χρησιμοποιούνται συνήθως στην πράξη.

Πολλές φορές αναφέρεται ότι η απόδοση (ή συντελεστής απόδοσης) ενός συνηθισμένου ηλεκτρικού θερμαντήρα νερού είναι περίπου 90% (Σχήμα 5-20). Αυτό μπορεί να δημιουργήσει κάποια σύγχυση, αφού τα θερμαντικά στοιχεία των ηλεκτρικών θερμαντήρων νερού είναι αντιστάσεις και η απόδοση ενός θερμαντήρα με αντιστάσεις είναι 100% (όλη η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει μετατρέπεται σε θερμότητα). Η σύγχυση αυτή μπορεί να ξεκαθαριστεί, αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι απώλειες θερμότητας από τη θερμή δεξαμενή νερού στον αέρα του περιβάλλοντος φτάνουν το 10% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται.

Η απόδοση ενός θερμαντήρα νερού ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που παρέχεται στο σπίτι από το ζεστό νερό προς την ενέργεια που παρέχεται στο θερμαντήρα. Ίσως να σκεφτεί κανείς ότι ένας ακριβότερος θερμαντήρας με περισσότερη μόνωση και με απόδοση 94% είναι πιο αποτελεσματικός και οικονομικός. Στην περίπτωση αυτή, ίσως είναι καλύτερο να αγοράσει κανείς έναν θερμαντήρα φυσικού αερίου με απόδοση 55%, αφού το κόστος της αγοράς και εγκατάστασής του είναι περίπου το ίδιο με το αντίστοιχο κόστος του ηλεκτρικού θερμαντήρα, όμως το ετήσιο κόστος της ενέργειας του θερμαντήρα αερίου θα είναι λιγότερο από το μισό του κόστους του ηλεκτρικού θερμαντήρα, με βάση τις μέσες τιμές του ηλεκτρισμού και του αερίου.

Στο σημείο αυτό ίσως να αναρωτηθεί κανείς πώς ορίζεται η απόδοση ενός θερμαντήρα αερίου και για ποιο λόγο είναι αρκετά μικρότερη από την απόδοση ενός ηλεκτρικού



Τύπος	Απόδοση
Αερίου, συμβατικός	55%
Αερίου, υψηλής απόδοσης	62%
Ηλεκτρικός, συμβατικός	90%
Ηλεκτρικός, υψηλής απόδοσης	94%

Σχήμα 5-20 Τυπικές αποδόσεις ηλεκτρικών θερμαντήρων και θερμαντήρων φυσικού αερίου, συμβατικών και υψηλής απόδοσης.

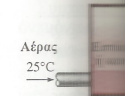
θερμαντήρα. Το
τουργου...
μου (ή 55%)...
που απ...
νάδα μ...
της κα...
των κα...

$\eta_{\text{απόδοσης}} =$

Όταν η απόδο...
αέρια εξ...
που απ...

Τα περι...
νερό. Σ...
(υγρό ή...
τερη θερ...
όταν το...
από τα...
είναι π...
σα σε...
νερού και...
δειγμα, η...
44000...
τις δύο...
και τον...
νερό εξ...
να ανακ...
στις αν...

Η απόδο...



Σχήμα 5-21 Η αξία της θερμότητας...

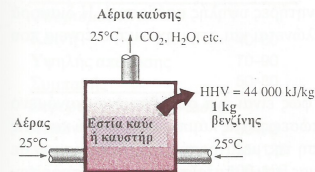
θερμαντήρα. Σύμφωνα μ' έναν γενικό κανόνα, η απόδοση των μηχανημάτων που λειτουργούν με την καύση κάποιου καυσίμου βασίζεται στη **θερμογόνο δύναμη του καυσίμου** (ή HV, από τα αρχικά των λέξεων Heating Value) η οποία ορίζεται ως η **θερμότητα που απελευθερώνεται, όταν μια συγκεκριμένη ποσότητα του καυσίμου (συνήθως μία μονάδα μάζας) που βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου καίγεται πλήρως και τα προϊόντα της καύσης ψύχονται στη θερμοκρασία δωματίου** (Σχήμα 5-21). Η λειτουργία των μηχανημάτων καύσης χαρακτηρίζεται από την **απόδοση της καύσης** που ορίζεται από τη σχέση:

$$\eta_{\text{καύσης}} = \frac{Q}{HV} = \frac{\text{Θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την καύση}}{\text{Θερμογόνος δύναμη του καυσίμου που καίγεται}} \quad (5-7)$$

Όταν η απόδοση της καύσης έχει την τιμή 100%, το καύσιμο καίγεται πλήρως και τα αέρια εξέρχονται από τον θάλαμο καύσης σε θερμοκρασία δωματίου. Άρα η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την καύση είναι ίση με τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου.

Τα περισσότερα καύσιμα περιέχουν υδρογόνο, το οποίο κατά την καύση σχηματίζει νερό. Στην περίπτωση αυτή η θερμογόνο δύναμη του καυσίμου εξαρτάται από τη φάση (υγρό ή ατμός) στην οποία βρίσκεται το νερό. Η θερμογόνο δύναμη ονομάζεται **κατώτερη θερμογόνος δύναμη** (ή LHV, από τα αρχικά των λέξεων Lower Heating Value) όταν το νερό εξέρχεται με τη μορφή ατμού και **ανώτερη θερμογόνος δύναμη** (ή HHV, από τα αρχικά των λέξεων Higher Heating Value), όταν το νερό στα αέρια της καύσης είναι πλήρως συμπυκνωμένο και ανακτάται η θερμότητα εξάτμισης. Η διαφορά ανάμεσα σε αυτές τις δύο θερμαντικές αξίες είναι ίση με το γινόμενο της ποσότητας του νερού και της ενθαλπίας εξάτμισης του νερού σε θερμοκρασία δωματίου. Για παράδειγμα, η κατώτερη και η ανώτερη θερμογόνος δύναμη της βενζίνης είναι αντίστοιχα 44000 και 47300 kJ/kg. Ο ορισμός της απόδοσης θα πρέπει να διευκρινίζει σε ποια από τις δύο θερμογόνες δυνάμεις του καυσίμου βασίζεται. Οι αποδόσεις των αυτοκινήτων και των μηχανών τζετ βασίζονται συνήθως στις **κατώτερες θερμαντικές αξίες**, επειδή το νερό εξέρχεται με τα αέρια της καύσης με τη μορφή ατμού και πρακτικά είναι δύσκολο να ανακτηθεί η θερμότητα εξάτμισης. Αντίθετα, οι αποδόσεις των φούρνων βασίζονται στις **ανώτερες θερμογόνες δυνάμεις**.

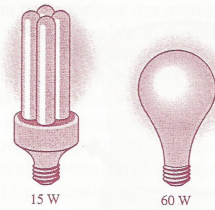
Η απόδοση των συστημάτων θέρμανσης κτιρίων εκφράζεται συνήθως συναρτήσει της **ετήσιας απόδοσης χρήσης καυσίμου** (ή AFUE, από τα αρχικά των λέξεων Annual Fuel Utilization Efficiency), η οποία αναφέρεται στην απόδοση της καύσης καθώς και στις άλλες απώλειες, όπως οι θερμικές απώλειες σε μη θερμαινόμενες περιοχές και οι απώλειες κατά την εκκίνηση και το "κρύωμα" των μηχανών. Τα περισσότερα συστήματα θέρμανσης έχουν AFUE περίπου ίση με 85%, ενώ κάποια παλαιότερα τέτοια συστήματα έχουν AFUE μικρότερη από 60%. Η AFUE ορι-



Σχήμα 5-21 Ο ορισμός της θερμαντικής αξίας της βενζίνης.

φος, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια που καταναλώνεται αποβάλλεται με τη μορφή θερμότητας, η οποία προστίθεται στο ψυκτικό φορτίο του κλιματιστικού το καλοκαίρι. Συνήθως, όμως, η αποτελεσματικότητα της μετατροπής αυτής περιγράφεται από την **απόδοση φωτισμού**, η οποία ορίζεται ως η ποσότητα του φωτός που παράγεται σε lumens ανά W ηλεκτρισμού που καταναλώνεται.

Η απόδοση διαφόρων συστημάτων φωτισμού παρουσιάζεται στον πίνακα 5-1. Αξίζει να σημειωθεί ότι μια συμπαγής λάμπα φθορισμού παράγει περίπου τέσσερις φορές περισσότερο φως ανά W από μια λάμπα πυρακτώσεως, άρα μια συμπαγής λάμπα φθορισμού 15 W μπορεί να αντικαταστήσει μια λάμπα πυρακτώσεως 60 W (Σχήμα 5-22). Επίσης, μια συμπαγής λάμπα φθορισμού διαρκεί περίπου 10000 ώρες, δηλαδή δέκα φορές περισσότερο από όσο μια λάμπα πυρακτώσεως



Σχήμα 5-22 Μια συμπαγής λάμπα φθορισμού 15 W παράγει το ίδιο φως με μια λάμπα πυρακτώσεως 60 W.

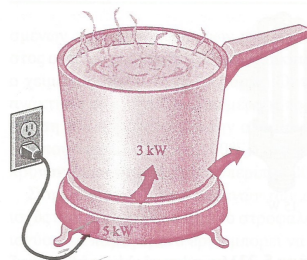
και μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα στην ίδια υποδοχή. Όπως φαίνεται, οι λάμπες φθορισμού, παρά το υψηλό αρχικό τους κόστος, μειώνουν σημαντικά τα κόστη φωτισμού, επειδή καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια. Οι λάμπες νατρίου υψηλής έντασης είναι οι πλέον αποδοτικές, όμως η χρήση τους περιορίζεται σε εξωτερικούς χώρους, επειδή το φως που παράγουν έχει κίτρινο χρώμα.

Αποδόσεις μπορούν να οριστούν και για τις κουζίνες, αφού είναι συσκευές που μετατρέπουν την ηλεκτρική ή τη χημική ενέργεια σε θερμότητα. Η απόδοση μιας κουζίνας ορίζεται ως ο λόγος της χρήσιμης ενέργειας που μεταφέρεται στο φαγητό προς την ενέργεια που καταναλώνει η συσκευή (Σχήμα 5-23). Οι ηλεκτρικές συσκευές είναι πιο αποδοτικές από τις συσκευές αερίου, όμως το κόστος χρησιμοποίησής τους είναι μεγαλύτερο (Πίνακας 5-2) εξαιτίας του μεγαλύτερου κόστους της μονάδας ηλεκτρισμού σε σχέση με τη μονάδα φυσικού αερίου.

Η απόδοση του μαγειρέματος εξαρτάται από τις συνήθειες του μάγειρα και τις συσκευές. Οι φούρνοι ρευμάτων αέρα και μικροκυμάτων είναι πιο αποδοτικοί από

Πίνακας 5-1
Απόδοση διαφόρων συστημάτων φωτισμού

Είδος φωτισμού	lumens/W
Απόδοση	
Καύση	
Κερί	0.2
Πυράκτωση	
Κοινή	5–20
Αλογόνου	15–25
Φθορισμού	
Κοινή	40–60
Υψηλής απόδοσης	70–90
Συμπαγής	50–80
Εκφόρτιση υψηλής έντασης	
Ατμών υδραργύρου	50–60
Αλογονιδίων μετάλλων	55–125
Νατρίου υψηλής πίεσης	100–150
Νατρίου χαμηλής πίεσης	> 200



$$\begin{aligned} \text{Απόδοση} &= \frac{\text{Ενέργεια που καταναλώνεται}}{\text{Ενέργεια που παρέχεται στη συσκευή}} \\ &= \frac{3 \text{ kWh}}{5 \text{ kWh}} = 0.60 \end{aligned}$$

Σχήμα 5-23 Η απόδοση μιας συσκευής μαγειρέματος είναι το κλάσμα της ενέργειας που παρέχεται στη συσκευή το οποίο μεταφέρεται στο φαγητό.

μετρα και θερμομέτρα, χρησιμοποιώντας το σύστημα αυτοκαθαρισμού του φούρνου μετά το μαγείρεμα και διατηρώντας καθαρή την εσωτερική επιφάνεια των φούρνων μικροκυμάτων.

Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει μια οικογένεια μπορεί να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα χρησιμοποιώντας αποδοτικές συσκευές και εφαρμόζοντας κάποια απλά μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας. Η εφαρμογή των μέτρων αυτών επιδρά θετικά στο **περιβάλλον**, εφόσον μειώνονται οι ποσότητες των ρυπαντικών ουσιών που

τους συμβατικούς φούρνους. Κατά μέσο όρο οι φούρνοι ρευμάτων αέρα (συναγωγής) εξοικονομούν το *ένα τρίτο* της ενέργειας που καταναλώνουν οι συμβατικοί φούρνοι, ενώ οι φούρνοι μικροκυμάτων, τα *δύο τρίτα*. Η απόδοση του μαγειρέματος μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας το μικρότερο φούρνο για το ψήσιμο, χρησιμοποιώντας μια κουζίνα πίεσης, ένα πήλινο σκεύος για τα βραστά και τις σούπες, χρησιμοποιώντας τη μικρότερη δυνατή κατσαρόλα ή τη μικρότερη εστία για μικρές κατσαρόλες, χρησιμοποιώντας κατσαρόλες με επίπεδη βάση σε ηλεκτρικές συσκευές ώστε να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή επαφή με την εστία, τοποθετώντας τα κατεψυγμένα τρόφιμα στο ψυγείο μέχρι να ξεπαγώσουν, αποφεύγοντας την προθέρμανση (εκτός εάν είναι εντέλως απαραίτητη), διατηρώντας σκεπασμένες τις κατσαρόλες, χρησιμοποιώντας χρονόμετρα και θερμομέτρα, χρησιμοποιώντας το σύστημα αυτοκαθαρισμού του φούρνου

Πίνακας 5-2

Κόστος της ενέργειας του μαγειρέματος μέσα σε μια κατσαρόλα με διάφορες συσκευές*.

[Πηγή: A. Wilson and J. Morrill, *Consumer Guide to Home Energy Savings*, Washington D.C.: American Council for an Energy-Efficient Economy, 1996, p. 192].

Συσκευή μαγειρέματος	Θερμοκρασία μαγειρέματος	Διάρκεια μαγειρέματος	Ενέργεια που καταναλώνεται	Κόστος ενέργειας
Ηλεκτρικός φούρνος	350°F (177°C)	1 h	2.0 kWh	\$0.16
Φούρνος με ρεύματα αέρα	325°F (163°C)	45 min	1.39 kWh	\$0.11
Φούρνος αερίου	350°F (177°C)	1 h	0.112 therm	\$0.07
Τηγάνι	420°F (216°C)	1 h	0.9 kWh	\$0.07
Τοστιέρα	425°F (218°C)	50 min	0.95 kWh	\$0.08
Πήλινο σκεύος	200°F (93°C)	7 h	0.7 kWh	\$0.06
Φούρνος μικροκυμάτων	“Υψηλή”	15 min	0.36 kWh	\$0.03

Το κόστος του ηλεκτρισμού θεωρείται ίσο με \$0.08/kWh και του αερίου \$0.06/therm.

εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Η παραγωγή του αερίου του σπιτιού απαιτείται οξείνη βροχή. Η μπιή των ρυπαντών τή στις Η.Π.Α. Η άνθρακα, 1.8 παραγωγής αερίου

ΠΑΡΑΛΕΙΨΗ Αερίου

Η απόδοση των εργασιών και η εργασία και η στο περιβάλλον ηλεκτρικής κτρικός καταστήσμου και τιστούν ο ενέργειας που

Λύση Στο και των

Ανάλυση Η που καταναλώνεται

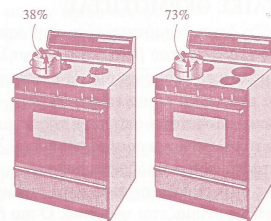
εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα κατά την καύση των καυσίμων στα σπίτια ή στις μονάδες παραγωγής ισχύος. Η καύση ενός *therm* φυσικού αερίου παράγει 6.4 kg διοξειδίου του άνθρακα (το οποίο προκαλεί κλιματολογικές αλλαγές), 4.7 g οξειδίων του αζώτου, 0.54 g υδρογονανθράκων (οι οποίοι προκαλούν καπνομίχλη), 2.0 g μονοξειδίου του άνθρακα (που είναι τοξικό) και 0.03 g διοξειδίου του θείου (που προκαλεί όξινη βροχή). Για κάθε *therm* φυσικού αερίου που εξοικονομείται αποφεύγεται η εκπομπή των ρυπαντικών αυτών ουσιών και εξοικονομούνται \$0.60 για το μέσο καταναλωτή στις Η.Π.Α. Για κάθε kWh ηλεκτρισμού που εξοικονομείται εξοικονομούνται 0.4 kg άνθρακα, 1.0 kg διοξειδίου του άνθρακα και 15 g διοξειδίου του θείου σε μια μονάδα παραγωγής ισχύος που χρησιμοποιεί άνθρακα.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5-3. Κόστος Μαγειρέματος με Ηλεκτρικές Συσκευές και Συσκευές Αερίου

Η απόδοση των συσκευών μαγειρέματος επηρεάζει το εσωτερικό κέρδος σε θερμότητα, αφού μια μη αποδοτική συσκευή καταναλώνει περισσότερη ενέργεια για την ίδια εργασία και η επιπρόσθετη ενέργεια που καταναλώνεται εμφανίζεται ως θερμότητα στο περιβάλλον. Η απόδοση των ανοιχτών καυστήρων υπολογίζεται ίση με 73% για τις ηλεκτρικές συσκευές και με 38% για τις συσκευές αερίου (Σχήμα 5-24). Έστω ένας ηλεκτρικός καυστήρας 2 kW που λειτουργεί σε μια περιοχή όπου το κόστος του ηλεκτρισμού και του φυσικού αερίου είναι αντίστοιχα \$0.09/kWh και \$0.55/*therm*. Να υπολογιστούν ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας του καυστήρα και το κόστος της μονάδας της ενέργειας που χρησιμοποιείται από τον ηλεκτρικό καυστήρα και τον καυστήρα αερίου.

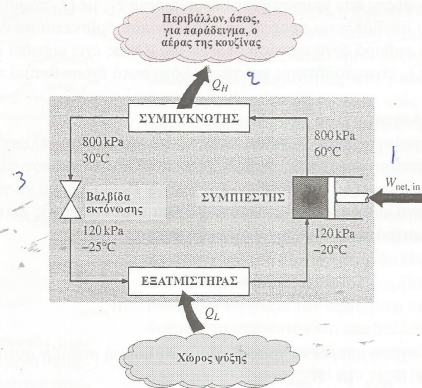
Λύση Στο παράδειγμα αυτό γίνεται μια οικονομική ανάλυση των ηλεκτρικών συσκευών και των συσκευών αερίου.

Ανάλυση Η απόδοση της ηλεκτρικής συσκευής είναι 78%. Επομένως, ένας καυστήρας που καταναλώνει 2 kW ηλεκτρικής ενέργειας παρέχει:



Συσκευή αερίου Ηλεκτρική συσκευή

Σχήμα 5-24 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 5-3.

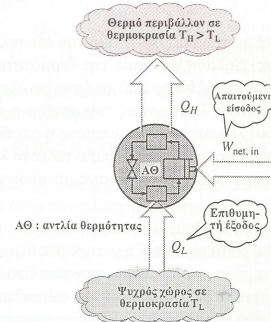


Σχήμα 5-25 Βασικά στοιχεία ενός συστήματος ψύξης και οι τυπικές συνθήκες λειτουργίας του.

Το ψυκτικό εισέρχεται στο συμπιεστή με τη μορφή ατμού και συμπιέζεται στην πίεση του συμπυκνωτή. Στην έξοδο του συμπιεστή, το ψυκτικό βρίσκεται σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία, καθώς ρέει μέσα από τις σπείρες του συμπυκνωτή και συμπυκνώνεται, αποβάλλοντας ενέργεια προς το περιβάλλον. Στη συνέχεια, εισέρχεται σ'έναν τριχοειδή σωλήνα όπου η θερμοκρασία και η πίεση του ελαττώνονται δραστικά εξαιτίας του φαινομένου του στραγγαλισμού. Το ψυκτικό με τη χαμηλή πλέον θερμοκρασία εισέρχεται στον εξατμιστήρα όπου και εξατμίζεται απορροφώντας θερμότητα από το χώρο ψύξης. Ο κύκλος συμπληρώνεται με την έξοδο του ψυκτικού από τον εξατμιστήρα και την είσοδο του στο συμπιεστή.

Σ'ένα συνηθισμένο ψυγείο μιας κοινής κουζίνας, ο χώρος της ψύξης, όπου η θερμότητα παράγεται από το ψυκτικό, παίζει το ρόλο του εξατμιστήρα, ενώ οι σπείρες στο πίσω μέρος του ψυγείου, όπου η θερμότητα αποβάλλεται προς τον αέρα της κουζίνας, παίζουν το ρόλο του συμπυκνωτή.

Στο σχήμα 5-26 παριστάνεται η αρχή λειτουργίας του ψυγείου. Στο σχήμα αυτό, με Q_L παριστάνεται το ποσό θερμότητας που παράγε-



Σχήμα 5-26 Η λειτουργία του ψυγείου αποσκοπεί στην απόμακρυνση θερμότητας Q_L από το χώρο που ψύχεται.

ται από το χώρο ψύξης που βρίσκεται σε θερμοκρασία T_L , με Q_H παριστάνεται το ποσό θερμότητας που αποβάλλεται προς το περιβάλλον που βρίσκεται σε θερμοκρασία T_H και με $W_{\text{net,in}}$ το καθαρό έργο εισόδου στο ψυγείο. Όπως έχει ειπωθεί και προηγουμένως, τα Q_L και Q_H είναι ποσότητες και για το λόγο αυτό έχουν θετικό πρόσημο.

Συντελεστής Λειτουργίας

Η *αποτελεσματικότητα* ενός ψυγείου εκφράζεται με το *συντελεστή λειτουργίας* (coefficient of performance) που συμβολίζεται με COP_R . Ο σκοπός του ψυγείου είναι να αφαιρεί θερμότητα (Q_L) από το χώρο της ψύξης. Προκειμένου να γίνει αυτό, απαιτείται κάποιο έργο εισόδου $W_{\text{net,in}}$. Οπότε, λογικά ο συντελεστής λειτουργίας (COP) ενός ψυγείου περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{COP}_R = \frac{\text{επιθυμητό αποτέλεσμα}}{\text{απαιτούμενη εισόδος}} = \frac{Q_L}{W_{\text{net,in}}} \quad (5-9)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί και με τη μορφή ρυθμών αντικαθιστώντας το Q_L με \dot{Q}_L και το $W_{\text{net,in}}$ με $\dot{W}_{\text{net,in}}$.

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας σε μια κυκλική διάταξη ισχύει ότι:

$$W_{\text{net,in}} = Q_H - Q_L \quad (\text{kJ}) \quad (5-10)$$

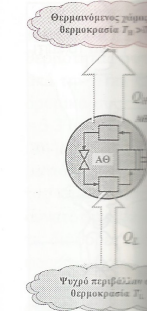
Αρα, ο COP δίνεται από τη σχέση:

$$\text{COP}_R = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1} \quad (5-11)$$

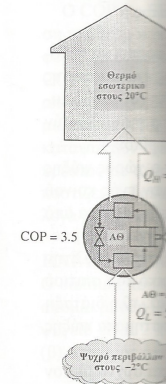
Σημειώνεται ότι η τιμή του συντελεστή COP_R μπορεί να είναι *μεγαλύτερη της μονάδας*. Δηλαδή, το ποσό της θερμότητας που αφαιρείται από το χώρο ψύξης μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το έργο εισόδου. Αυτό βρίσκεται σε αντίθεση με το συντελεστή θερμικής λειτουργίας του οποίου η τιμή δε μπορεί να ξεπερνά τη μονάδα. Ένας από τους λόγους για τους οποίους η απόδοση ενός ψυγείου εκφράζεται με μια διαφορετική παράμετρο, δηλ. από το συντελεστή λειτουργίας, είναι για να αποφευχθεί η πιθανότητα να εμφανιστούν αποδόσεις μεγαλύτερης της μονάδας.

Αντλίες Θερμότητας

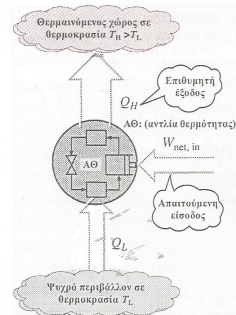
Μια δεύτερη διάταξη μεταφοράς θερμότητας από ένα μέσο χαμηλής θερμοκρασίας προς ένα μέσο υψηλής θερμοκρασίας είναι η *αντλία θερμότητας*, η οποία παριστάνεται στο σχήμα 5-27. Το ψυγείο και οι αντλίες θερμότητας πραγματοποιούν τον ίδιο ακριβώς κύκλο και διαφέρουν μόνο ως προς το σκοπό χρήσης τους. Ο σκοπός του ψυγείου είναι να διατηρεί το χώρο της ψύξης σε χαμηλή θερμοκρασία *απάγοντας* από αυτόν θερμότητα. Η απόρριψη θερμότητας προς ένα μέσο, που βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία, είναι απλά ένα απαραίτητο στάδιο της διεργασίας και όχι ο σκοπός της.



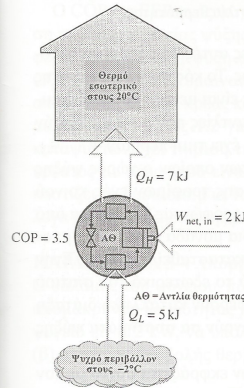
Σχήμα 5-27 Ο σκοπός της αντλίας είναι να παριστάνεται Q_H σε ένα θερμότερο περιβάλλον.



Σχήμα 5-28 Το έργο της αντλίας θερμότητας σε μια αντλία θερμότητας χρησιμοποιείται για να παριστάνεται ενέργεια από το περιβάλλον και να τα εισάγει στο εσωτερικό του χώρου, το οποίο βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία.



Σχήμα 5-27 Ο σκοπός μιας αντλίας είναι να παρέχει θερμότητα Q_H σ' ένα θερμότερο χώρο.



Σχήμα 5-28 Το έργο που παρέχεται σε μια αντλία θερμότητας χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει ενέργεια από το ψυχρό περιβάλλον και να το μεταφέρει στο εσωτερικό του σπιτιού το οποίο βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία.

Από την άλλη πλευρά, η αντλία θερμότητας χρησιμοποιείται για να διατηρεί ένα θερμαινόμενο χώρο σε υψηλή θερμοκρασία. Αυτό πετυχαίνεται με την απορρόφηση θερμότητας από μια πηγή χαμηλής θερμοκρασίας, όπως το νερό ενός ρεύματος ή ο ψυχρός αέρας του χειμώνα και με τη μεταφορά της σ' ένα μέσο που βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία, όπως, για παράδειγμα, το εσωτερικό ενός σπιτιού (Σχήμα 5-28).

Εάν ένα συνηθισμένο ψυγείο τοποθετηθεί στο παράθυρο ενός σπιτιού με την πόρτα του ανοικτή προς το εξωτερικό του σπιτιού, τότε θα λειτουργήσει σαν αντλία θερμότητας. Αυτό θα συμβεί γιατί θα προσπαθήσει να ψύξει τον εξωτερικό αέρα αντλώντας θερμότητα από αυτόν και αποβάλλοντας τη θερμότητα αυτή στο εσωτερικό του σπιτιού διαμέσου των σπειρών που βρίσκονται στο πίσω μέρος του (Σχήμα 5-29).

Η απόδοση μιας αντλίας θερμότητας εκφράζεται επίσης με το **συντελεστή λειτουργίας** COP_{HP} , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$COP_{HP} = \frac{\text{επιθυμητό αποτέλεσμα}}{\text{απαιτούμενη είσοδος}} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} \quad (5-12)$$

και δίνεται επίσης από τη σχέση:

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H} \quad (5-13)$$

Η σύγκριση των εξισώσεων 5-9 και 5-12 οδηγεί στο ακόλουθο αποτέλεσμα:

$$COP_{HP} = COP_R + 1 \quad (5-14)$$

για τις ίδιες τιμές Q_L και Q_H . Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι ο συντελεστής λειτουργίας μιας αντλίας θερμότητας είναι πάντοτε μεγαλύτερος από τη μονάδα, γιατί ο COP_R είναι πάντοτε θετικός. Αυτό σημαίνει ότι, στη χειρότερη περίπτωση, μια αντλία θερμότητας θα λειτουργεί σα θερμάστρα ηλεκτρικής αντίστασης που θα παρέχει στο σπίτι θερμότητα ίση με την ενέργεια που καταναλώνει. Στην πράξη, ένα μέρος της Q_H μπορεί να χαθεί προς τον εξωτερικό αέρα μέσα από τις σωληνώσεις και

Τα περισσότερα κλιματιστικά έχουν τιμές EER μεταξύ 8 και 12 (COP μεταξύ 2.3 και 3.5). Μια αντλία θερμότητας υψηλής απόδοσης, που κατασκευάστηκε από την Tran Company και χρησιμοποιεί ένα παλινδρομικό συμπιεστή μεταβλητής ταχύτητας, έχει COP = 3.3 όταν λειτουργεί σαν αντλία θερμότητας και EER ίση με 16.9 (COP ίσο με 5.0), όταν λειτουργεί σαν κλιματιστικό. Η χρήση συμπιεστών μεταβλητής ταχύτητας και ανεμιστήρων δίνει στις διάφορες μονάδες τη δυνατότητα να λειτουργούν στη μέγιστη απόδοση για τις διάφορες ανάγκες θέρμανσης ή ψύξης και για διαφορετικές καιρικές συνθήκες, ενώ η λειτουργία των μονάδων αυτών ελέγχεται από μικροεπεξεργαστή. Για παράδειγμα, κατά τη λειτουργία τους σαν κλιματιστικά, οι ταχύτητες του συμπιεστή θα πρέπει να είναι υψηλότερες τις θερμότερες ημέρες και χαμηλότερες τις ψυχρότερες και με την κατάλληλη ρύθμιση επιτυγχάνεται η υψηλότερη απόδοση.

Ο COP ή ο EER ενός ψυγείου μειώνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας ψύξης. Για το λόγο αυτό δε σμφέρει οικονομικά η ψύξη σε χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή που χρειάζεται. Οι COP των ψυγείων κυμαίνονται από 2.5 έως 3.0 για θαλάμους κοπής και προετοιμασίας, από 2.3 έως 2.6 για κρέας και γαλακτοκομικά, από 1.2 έως 1.5 για κατεψυγμένα τρόφιμα και από 1.0 έως 1.2 για μονάδες παγωτού. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο COP των καταψυκτών έχει τη μισή τιμή του COP των ψυγείων κρέατος. Επομένως, η ψύξη του κρέατος με αέρα (που είναι αρκετά κρύος, ώστε να ψύξει τα κατεψυγμένα τρόφιμα) κοστίζει το διπλάσιο. Για να εξοικονομηθεί η μέγιστη δυνατή ενέργεια, θα πρέπει ανάλογα με τις απαιτήσεις της μονάδας να χρησιμοποιούνται ξεχωριστά συστήματα ψύξης.

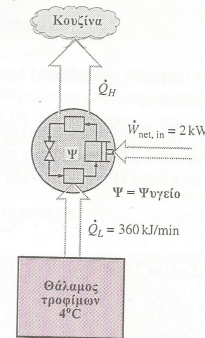
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5-4 Απόρριψη Θερμότητας από ένα Ψυγείο

Ο θάλαμος του ψυγείου, που παριστάνεται στο σχήμα 5-30, διατηρείται στους 4°C με απομάκρυνση θερμότητας με ρυθμό 360 kJ/min. Αν η απαιτούμενη παροχή ισχύος στο ψυγείο είναι 2 kW, να υπολογιστούν: (α) ο συντελεστής λειτουργίας του ψυγείου και (β) ο ρυθμός αποβολής θερμότητας προς το δωμάτιο.

Λύση Η ισχύς που καταναλώνει το ψυγείο δίνεται στην εκφώνηση. Ο συντελεστής λειτουργίας του και ο ρυθμός απόρριψης θερμότητας θα υπολογιστούν παρακάτω.

Παραδοχές Επικρατούν σταθερές συνθήκες λειτουργίας

Ανάλυση (α) Ο συντελεστής λειτουργίας του ψυγείου ορίζεται από την εξίσωση 5-9, η οποία με τη μορφή ρυθμού γράφεται ως εξής:



Σχήμα 5-30 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 5-4.

$$\text{COP}_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{\text{net,in}}} = \frac{360 \text{ kJ/min}}{2 \text{ kW} \cdot \frac{60 \text{ kJ/min}}{1 \text{ kW}}} = 3$$

Δηλαδή, για κάθε kJ παρεχόμενου έργου, παράγονται από το θάλαμο ψύξης 3 kJ θερμότητας.

(β) Ο ρυθμός αποβολής θερμότητας προς το δωμάτιο για την κυκλική αυτή διάταξη προσδιορίζεται από την αρχή διατήρησης της ενέργειας σε συσκευές που λειτουργούν σε κύκλο (Εξίσωση 5-10) και γράφεται ως εξής:

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}_{\text{net,in}} = 360 \text{ kJ/min} + (2 \text{ kW}) \left(\frac{60 \text{ kJ/min}}{1 \text{ kW}} \right) = 480 \text{ kJ/min}$$

Σχόλια Σημειώνεται ότι τόσο η ενέργεια που παράγεται από το ψυχόμενο χώρο, όσο και η ενέργεια που προσδίδεται στο ψυγείο, είτε με τη μορφή θερμότητας, είτε με τη μορφή ηλεκτρικού έργου, τελικά καταλήγουν στον αέρα του δωματίου και γίνονται μέρος της εσωτερικής του ενέργειας. Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι η ενέργεια μπορεί να αλλάξει μορφή ή να μεταφερθεί από το ένα μέρος του χώρου στο άλλο, αλλά δε μπορεί ποτέ να καταστραφεί κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας.

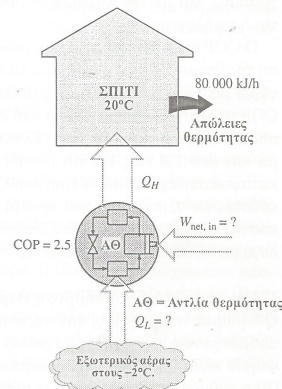
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5-5 Θέρμανση ενός Σπιτιού με μια Αντλία Θερμότητας

Για την κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων ενός σπιτιού και τη διατήρηση της θερμοκρασίας του στους 20°C χρησιμοποιείται μια αντλία θερμότητας. Μια μέρα που η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα έχει πέσει στους -2°C, οι θερμικές απώλειες του σπιτιού υπολογίζονται ότι είναι 80000 kJ/h. Αν στις συνθήκες αυτές η αντλία έχει COP ίσο με 2.5, να υπολογιστούν: (α) η ισχύς που καταναλώνεται από την αντλία θερμότητας και (β) ο ρυθμός πρόσληψης θερμότητας από τον εξωτερικό αέρα.

Λύση Ο συντελεστής λειτουργίας της αντλίας δίνεται στην εκφώνηση. Η ισχύς που καταναλώνεται και ο ρυθμός απορρόφησης θερμότητας θα υπολογιστούν παρακάτω.

Παραδοχές Επικρατούν σταθερές συνθήκες λειτουργίας

Ανάλυση (α) Η ισχύς που καταναλώνεται από την αντλία θερμότητας του σχήματος 5-31 μπορεί να υπολογιστεί από τον ορισμό του συντελεστή λειτουργίας (Εξίσωση 5-12), ο οποίος με τη μορφή ρυθμού γράφεται ως εξής:



Σχήμα 5-31 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 5-5.

(β) Το σπίτι χ...
πρέπει να διατη...
χει στο σπίτι θε...
μεταφοράς θερμ...
αρχής διατήρη...

Σχόλια Αυτό το...
στο σπίτι, μόνο...
80000 kJ/h κοστ...
τας με τη μορφή...
μα θερμάστρα...
έπρεπε να παρε...
σήμαινε ότι το...
γεγονός αυτό εξ...
σπιτιών και των...
τα ηλεκτρικής θ...

Ο Δεύτερος Ν...
Υπάρχουν δύο...
τύπωση των Κε...
χθηκε στην προ...
ται στα ψυγεία...

Δεν είναι δε...
μοναδικό στα...
προς ένα σώμ...

Είναι γνωστό...
άλλο θερμότερο...
κατασκευαστεί...
χρότερο προς έ...
σμένα ψυγεία...
μπορεί να λειτο...
ενέργειας, όπως...
ση αυτή, η επιπ...
ρά θερμότητας...
ποσού ενέργεια...
στο περιβάλλον...

$$\dot{W}_{\text{net, in}} = \frac{\dot{Q}_H}{\text{COP}_{\text{HP}}} = \frac{80\,000 \text{ kJ/h}}{2.5} = 32\,000 \text{ kJ/h} \quad (\text{ή } 8.9 \text{ kW})$$

(β) Το σπίτι χάνει θερμότητα με ρυθμό 80000 kJ/h. Εάν η θερμοκρασία του σπιτιού πρέπει να διατηρηθεί σταθερή στους 20°C, τότε η αντλία θερμότητας πρέπει να παρέχει στο σπίτι θερμότητα με τον ίδιο ρυθμό, δηλαδή 80000 kJ/h. Στη συνέχεια, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από τον εξωτερικό αέρα υπολογίζεται από την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ενέργειας στην κυκλική διάταξη (Εξίσωση 5-10):

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W}_{\text{net, in}} = (80\,000 - 32\,000) \text{ kJ/h} = 48\,000 \text{ kJ/h}$$

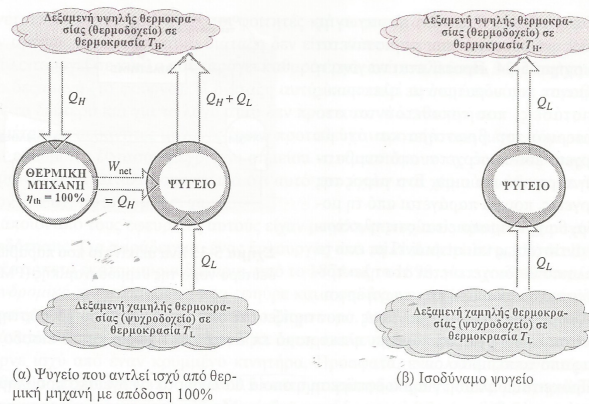
Σχόλια Αυτό σημαίνει ότι από το ποσό των 80000 kJ/h θερμότητας, που παρέχονται στο σπίτι, μόνο τα 48000 kJ/h προέρχονται από τον εξωτερικό αέρα. Οπότε, από τα 80000 kJ/h κοστίζουν μόνο τα 32000 kJ/h, τα οποία παρέχονται στην αντλία θερμότητας με τη μορφή ηλεκτρικού έργου. Εάν, αντί για αντλία θερμότητας, χρησιμοποιούσαν μια θερμάστρα ηλεκτρικής αντίστασης, τότε ολόκληρο το ποσό των 80000 kJ/h θα έπρεπε να παρασχεθεί στην αντίσταση με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό θα σήμαινε ότι το ποσό που θα ξοδευόταν για θέρμανση θα ήταν 2.5 φορές υψηλότερο. Το γεγονός αυτό εξηγεί την ευρεία διάδοση των αντλιών θερμότητας για τη θέρμανση των σπιτιών και των κτιρίων και το λόγο για τον οποίο προτιμούνται από τα απλά συστήματα ηλεκτρικής θέρμανσης παρά το υψηλό τους κόστος.

Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής: Η Διατύπωση του Clausius

Υπάρχουν δύο κλασικές διατυπώσεις του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής: Η διατύπωση των Kelvin και Planck, η οποία αναφέρεται στις θερμικές μηχανές και αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο και η διατύπωση του Clausius, η οποία αναφέρεται στα ψυγεία και στις αντλίες θερμότητας. Η διατύπωση του Clausius είναι η εξής:

Δεν είναι δυνατό να κατασκευαστεί μια διάταξη η οποία να λειτουργεί σε κύκλο με μοναδικό στόχο τη μεταφορά θερμότητας από ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας προς ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας.

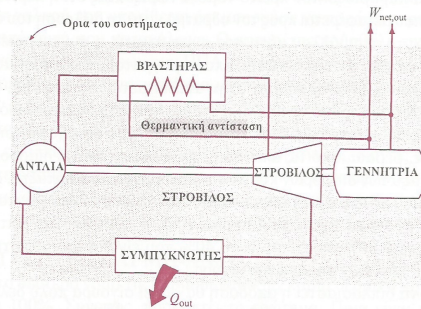
Είναι γνωστό ότι η θερμότητα δε ρέει από μόνη της από ένα μέσο πιο κρύο προς ένα άλλο θερμότερο. Η διατύπωση αυτή του Clausius δεν ισχυρίζεται ότι είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μια κυκλική διάταξη που να μεταφέρει θερμότητα από ένα μέσο ψυχρότερο προς ένα θερμότερο. Στην πραγματικότητα, αυτό ακριβώς κάνουν τα συνηθισμένα ψυγεία οικιακής χρήσης. Η διατύπωση αυτή απλά δηλώνει ότι ένα ψυγείο δε μπορεί να λειτουργήσει, εάν ο συμπιεστής δεν προσλάβει έργο από μια εξωτερική πηγή ενέργειας, όπως, για παράδειγμα, ένα ηλεκτρικό κινητήρα (Σχήμα 5-32). Στην περίπτωση αυτή, η επίδραση της διάταξης στο περιβάλλον περιλαμβάνει εκτός από τη μεταφορά θερμότητας από ένα ψυχρότερο σώμα σ' ένα θερμότερο και την κατανάλωση ενός ποσού ενέργειας με τη μορφή έργου. Αυτό σημαίνει ότι η διεργασία αφήνει τα ίχνη της στο περιβάλλον. Έτσι, τα συνηθισμένα οικιακά ψυγεία βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία



Σχήμα 5-33 Απόδειξη ότι η παραβίαση της διατύπωσης των Kelvin και Planck οδηγεί σε παραβίαση της διατύπωσης του Clausius.

που να λειτουργεί. Αυτό όμως δεν έχει σταθεί μέχρι στιγμής αρκετό για να σταματήσει τους εφευρέτες από τις προσπάθειες τους να ανακαλύψουν κάποια καινούρια μηχανή.

Μια διάταξη που παραβιάζει τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής (δημιουργώντας ενέργεια) ονομάζεται **αιεκίνητη μηχανή πρώτου είδους** (perpetual-motion machine of the first kind, PMM1) και μια διάταξη που παραβιάζει το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής ονομάζεται **αιεκίνητη μηχανή δεύτερου είδους** (PMM2).



Σχήμα 5-34 Μια αιεκίνητη μηχανή που παραβιάζει τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής (PMM1).

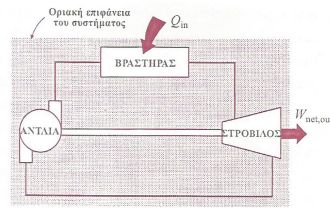
Θεωρείται η διάταξη παραγωγής ισχύος με υδρατμό που παριστάνεται στο σχήμα 5-34. Προτείνεται να γίνει η θέρμανση του υδρατμού με ηλεκτρικές αντιστάσεις, που τοποθετούνται στο εσωτερικό του βραστήρα και όχι με ενέργεια που προέρχεται από συμβατικά ή πυρηνικά καύσιμα. Ένα μέρος της ενέργειας, που θα παράγεται από τη μονάδα, θα χρησιμοποιείται στις ηλεκτρικές αντιστάσεις και στην αντλία, ενώ το υπόλοιπο θα διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο σαν καθαρή παραγωγή έργου.

Ο εφευρέτης αυτής της μονάδας υποστηρίζει ότι από τη στιγμή που το σύστημα θα τεθεί σε λειτουργία θα παράγει ηλεκτρισμό επ'άπειρο και χωρίς καμιά είσοδο ενέργειας από το περιβάλλον.

Πρόκειται, δηλαδή, για μια εφεύρεση η οποία θα λύσει το ενεργειακό πρόβλημα του πλανήτη, εάν βέβαια μπορέσει να λειτουργήσει. Με μια προσεκτική εξέταση του συστήματος, που περικλείεται από τη γραμμοσκιασμένη περιοχή, γίνεται φανερό ότι το σύστημα παρέχει συνεχώς ενέργεια στο περιβάλλον με ρυθμό $\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{net,out}$ χωρίς να προσλαμβάνει καθόλου ενέργεια. Δηλαδή, το σύστημα αυτό δημιουργεί ενέργεια με ρυθμό $\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{net,out}$, γεγονός που αποτελεί καθαρή παραβίαση του πρώτου νόμου. Επομένως, αυτή η απίθανη διάταξη δεν είναι παρά μια PMM1 και δεν αξίζει καμιάς επιπλέον ανάλυσης.

Στη συνέχεια, εξετάζεται μια δεύτερη εξαιρετική ιδέα του ίδιου εφευρέτη, ο οποίος, αφού πείστηκε ότι η ενέργεια δε μπορεί να δημιουργηθεί, πρότεινε την ακόλουθη μετατροπή, η οποία κατά τη γνώμη του θα βελτιώνει κατά πολύ τη θερμική απόδοση της μονάδας χωρίς να παραβιάζει τον πρώτο νόμο. Γνωρίζοντας ότι η περισσότερη από τη μισή θερμότητα, που μεταφέρεται προς τον υδρατμό κατά τη διέλευση του από το φούρνο, αποβάλλεται προς το περιβάλλον μέσα στο συμπυκνωτή, ο συγκεκριμένος εφευρέτης πρότεινε να καταργηθεί ο συμπυκνωτής όπου πραγματοποιείται όλη αυτή η απώλεια ενέργειας και ο ατμός να διοχετεύεται στην αντλία μετά το στρόβιλο, όπως φαίνεται στο σχήμα 5-35. Με τον τρόπο αυτό όλη η θερμότητα, που θα προσδιδόταν στον ατμό από το βραστήρα, θα μετατρέποταν σε έργο και η μονάδα θα είχε θεωρητική απόδοση 100%. Ορισμένες, βέβαια, από τις απώλειες, που οφείλονταν σε διαρροές θερμότητας και σε τριβές μεταξύ των διαφόρων κινητών εξαρτημάτων της διάταξης, δεν ήταν δυνατό να αποφευχθούν, με αποτέλεσμα να ελαττώνουν το συντελεστή λειτουργίας. Παρόλα αυτά, εάν το σύστημα σχεδιαστεί προσεκτικά, ο συντελεστής λειτουργίας δε θα είναι μικρότερος από 80% σε σχέση με το 40% που είναι ο συντελεστής λειτουργίας των πραγματικών μονάδων παραγωγής ισχύος.

Η πιθανότητα να διπλασιαστεί η απόδοση θα φανεί σίγουρα πολύ δελεαστική στους διευθυντές της μονάδας. Εάν βέβαια δεν έχουν τις κατάλληλες γνώσεις, τότε θα δώσουν μια ευκαιρία στον παραπάνω εφευρέτη, εφόσον με την πρώτη ματιά τίποτα δε



Σχήμα 5-35 Ένα αεικίνητο που παραβιάζει το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής (PMM2).

φαίνεται να είναι δυνατόν αμέσως να δοθούν λεπτομέρειες γιατί λειτουργεί μόνο δεξιοτεχνικά. Αμέτρητοι αμερικανοί εφευρέτες και μόνο για τον μόνον ένα χρόνο

Κάποιος επιστήμονας ματοδότησε, ανέλεξε αρκετά παλινδρομικά κληροπάρια, το θάνατό του έπαιρνε και πείσθη να αποχρησθεί ενόψει όμως απαιτήσεων πάνω εφευρέτη.

Το Γραφείο Πάτρους αιτήσεων, που αεικίνητες μηχανές σκοντάκι, 1918, κατάφερε οι αιτήσεις από το 1982, το Γραφείο, η οποία περιελάμβανε τα κλειδιά της κή ενέργεια από το 1985 το Εθνικό τέλος το πιστωτικό μπαταρία. Δεν απ

Οι άνθρωποι μυαλά, αλλά επί σταθεί στον παρ πολύ καλό για

5-7 ΑΝΤΙΣΤΡ

Σύμφωνα με το έχει απόδοση η απόδοση μιας

φαίνεται να είναι λάθος. Όμως, οι φοιτητές και οι φοιτήτριες της θερμοδυναμικής θα δουν αμέσως ότι η παραπάνω διάταξη δεν είναι τίποτα περισσότερο από ένα PMM2, γιατί λειτουργεί σε κύκλο και παράγει καθαρό έργο, ενώ εναλλάσσει θερμότητα με μια μόνο δεξαμενή (το φούρνο). Η διάταξη αυτή ικανοποιεί τον πρώτο νόμο, παραβιάζει όμως το δεύτερο και για το λόγο αυτό δεν πρόκειται να λειτουργήσει.

Αμέτρητες αεικίνητες μηχανές έχουν προταθεί και προτείνονται μέχρι σήμερα. Μερικοί εφευρέτες έφτασαν μέχρι του σημείου να πατεντάρουν τις συσκευές τους μόνο και μόνο για να καταλάβουν τελικά ότι αυτό που έχουν στα χέρια τους δεν ήταν παρά μόνον ένα άχρηστο κομμάτι χαρτί.

Κάποιοι από τους εφευρέτες αυτούς είχαν μεγάλη επιτυχία ως προς την παροχή χρηματοδότησης: Για παράδειγμα, ένας ξυλουργός από τη Philadelphia, ο J.W. Kelly, συνέλεξε αρκετά εκατομμύρια δολάρια, από το 1874 ως το 1898, για τον υδροπνευματικό-παλινδρομικό-κινητήρα-κενού που εφηύρε και ο οποίος μπορούσε να κινήσει ένα ολόκληρο τρένο για 3000 μίλια μ' ένα μόνο λίτρο νερό. Αυτό φυσικά δεν έγινε ποτέ. Μετά το θάνατό του, το 1898, ανακαλύφθηκε ότι η συσκευή επίδειξης που χρησιμοποιούσε έπαιρνε ισχύ από έναν κρυμμένο κινητήρα. Πρόσφατα, ένας όμιλος επενδυτών είχε πεισθεί να επενδύσει το ποσό των 2.5 εκατομμυρίων δολαρίων σ' ένα μυστηριώδη *μεγεθυντή ενέργειας*, ο οποίος πολλαπλασίαζε οποιαδήποτε ισχύ δέχόταν. Ο δικηγόρος τους όμως απαίτησε να έχει πρώτα τη γνώμη ενός ειδικού. Μπροστά στους επιστήμονες, ο παραπάνω εφευρέτης δεν τόλμησε να παρουσιάσει τη συσκευή επίδειξης που “κατασκεύασε”.

Το Γραφείο Διπλωμάτων Ευρεσιτεχνίας των Ηνωμένων Πολιτειών, μετά από χιλιάδες αιτήσεις, το 1918 αποφάσισε να μην ασχολείται με τις αιτήσεις που είχαν σχέση με αεικίνητες μηχανές. Πολλά όμως διπλώματα ευρεσιτεχνίας αεικίνητων μηχανών βρίσκονται ακόμη στα αρχεία του γραφείου και μερικές από αυτές, ακόμα και μετά το 1918, κατάφεραν να περάσουν χωρίς να αναγνωριστούν. Αρκετοί εφευρέτες, των οποίων οι αιτήσεις είχαν απορριφθεί, κατέφυγαν ακόμα και στη δικαιοσύνη. Για παράδειγμα, το 1982, το Γραφείο Διπλωμάτων Ευρεσιτεχνίας απέρριψε μια τεράστια διάταξη, η οποία περιείχε εκατοντάδες χιλιόγραμμα από περιστρεφόμενους μαγνήτες και χιλιόμετρα καλωδίων χαλκού που υποτίθεται ότι μπορούσε να παράγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από αυτή που κατανάλωνε. Ο εφευρέτης πρόσβαλε την απόφαση και το 1985 το Εθνικό Γραφείο Μέτρων των ΗΠΑ εξέτασε τελικά τη μηχανή για να εκδόσει στο τέλος το πιστοποιητικό ότι ήταν απλά μια μηχανή χωρίς σκοπό η οποία λειτουργούσε με μπαταρία. Δεν έπεισε όμως τον εφευρέτη ότι η μηχανή του δεν πρόκειται να δουλέψει.

Οι άνθρωποι που προτείνουν αεικίνητες μηχανές έχουν συνήθως πολύ εφευρετικά μυαλά, αλλά ελλιπείς γνώσεις θερμοδυναμικής μηχανικής. Κανείς δε μπορεί να αντισταθεί στον πειρασμό να δημιουργήσει μια αεικίνητη μηχανή. Αλλά, εάν κάτι φαίνεται πολύ καλό για να είναι αληθινό, τότε μπορεί πραγματικά να είναι.

5-7 ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΕΣ ΚΑΙ ΜΗ-ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Σύμφωνα με το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, καμιά θερμική μηχανή δε μπορεί να έχει απόδοση 100%. Συνεπώς, προκύπτει το ερώτημα: Ποια είναι η μέγιστη δυνατή απόδοση μιας μηχανής; Πριν απαντηθεί το παραπάνω ερώτημα, πρέπει να δοθεί ο ορι-

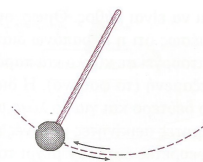
σμός μιας εξιδευκειμένης διεργασίας που είναι γνωστή ως *αντιστρεπτή διεργασία*.

Οι διεργασίες, που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5-1, πραγματοποιούνται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Εφόσον η διεργασία ολοκληρωθεί, δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί από μόνη της στην αντίθετη κατεύθυνση για να οδηγήσει το σύστημα πίσω στην αρχική του κατάσταση. Για το λόγο αυτό, οι διεργασίες αυτές ανήκουν στην κατηγορία των *μη-αντιστρεπτών διεργασιών*. Όταν κρυώσει ένα φλιτζάνι καφέ, δεν πρόκειται να ξαναθερμανθεί ανακτώντας από το περιβάλλον τη θερμική ενέργεια που έχασε. Αν μπορούσε να συμβεί κάτι τέτοιο, τότε το περιβάλλον αλλά και το σύστημα (το φλιτζάνι με τον καφέ) θα επέστρεφαν στις αρχικές τους καταστάσεις και η διεργασία θα ήταν αντιστρεπτή.

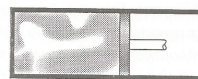
Αντιστρεπτή διεργασία ονομάζεται η διεργασία εκείνη, η οποία μπορεί να λάβει χώρα και κατά την αντίθετη κατεύθυνση χωρίς να αφήσει κανένα ίχνος στο περιβάλλον (Σχήμα 5-36). Αυτό σημαίνει ότι τόσο το σύστημα όσο και το περιβάλλον, μετά το τέλος της διεργασίας, επιστρέφουν στην αρχική τους κατάσταση. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί μόνο, εάν είναι μηδέν το καθαρό ποσό της θερμότητας και του έργου που εναλλάσσεται μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της συνδυασμένης διεργασίας (της πραγματικής και της αντίστροφης). Οι διεργασίες που δεν είναι αντιστρεπτές ονομάζονται **μη-αντιστρεπτές**.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, ανεξάρτητα από το κατά πόσο η διεργασία είναι αντιστρεπτή ή μη-αντιστρεπτή, ένα σύστημα είναι δυνατόν να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση. Όμως, σε μια αντιστρεπτή διεργασία, η επιστροφή του συστήματος στην αρχική του κατάσταση μπορεί να λάβει χώρα χωρίς η συνολική διεργασία να αφήσει κανένα ίχνος στο περιβάλλον. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια μιας μη-αντιστρεπτής διεργασίας, το περιβάλλον θα πρέπει να καταναλώσει κάποιο έργο, με αποτέλεσμα να μην επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση.

Στη φύση δεν πραγματοποιούνται αντιστρεπτές διεργασίες. Αυτές αποτελούν απλά εξιδανικεύσεις των πραγματικών διεργασιών. Οι *πραγματικές* διατάξεις μπορούν να προσεγγίσουν έως ένα βαθμό τις αντιστρεπτές διεργασίες, χωρίς όμως να καταφέρνουν να τις πετύχουν επακριβώς. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι διεργασίες στη φύση είναι μη-αντιστρεπτές. Γιατί όμως στη θερμοδυναμική γίνεται τόσος λόγος για τις αντιστρεπτές διεργασίες; Δύο λόγοι υπάρχουν για αυτό. Πρώτον, γιατί είναι εύκολες κατά την ανάλυση τους, εφόσον το σύστημα σε μια αντιστρεπτή διεργασία διέρχεται από διαδοχικές καταστάσεις ισορροπίας. Δεύτερον, γιατί αυτές εξυπηρετούν σαν ιδανικά πρότυπα σύμφωνα με τα οποία μπορούν να συγκριθούν οι πραγματικές διεργασίες.



(α) Εκκρεμές χωρίς τριβές.



(β) Αντιστρεπτή εκτόνωση και αντιστρεπτή συμπίεση (ψευδοισορροπίας) ενός αερίου.

Σχήμα 5-36 Δύο συνηθισμένες αντιστρεπτές διεργασίες.

Σχήμα 5-37

Οι μηχανισμοί παραγωγής έργου, που να παρέχουν την απαιτούμενη συμπίεση και να μην-αντιστρεπτικές. Οι αντιστρεπτικές στοιχών μη-αντιστρεπτικές από την αντιστρεπτή διεργασία σεργίζει την διεργασία παραγωγής ξη καταναλώσεως.

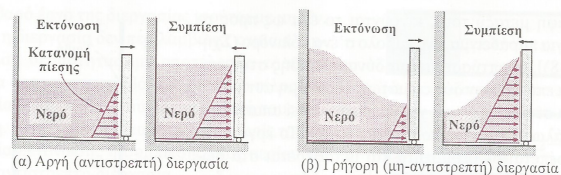
Η έννοια της πραγματικών διεργασιών, πραγματικής διεργασίας σύγκρισης, λιγότερο είναι, και κατά τη δεύτερο νόμο.

Αιτίες Αναντιστρεπτότητας

Οι βασικές αιτίες αναντιστρεπτότητας λαμβάνονται η αιτία εξαιτίας μιας ανελαστικής αντιστρεπτή διεργασία. Στη συνέχεια, αντιστρεπτότητας.

Τριβή

Η τριβή αποτελεί δέεται με την κίνηση.



Σχήμα 5-37 Οι αντιστρεπτές διεργασίες παρέχουν περισσότερο και καταναλώνουν λιγότερο έργο.

Οι μηχανικοί ασχολούνται με τις αντιστρεπτές διεργασίες, γιατί οι διατάξεις παραγωγής έργου, όπως οι κινητήρες των αυτοκινήτων και οι στρόβιλοι υδρατμού, πρέπει να παρέχουν το μέγιστο δυνατό έργο και οι διατάξεις που καταναλώνουν έργο, όπως οι συμπιεστές και οι αντλίες, πρέπει να απαιτούν το ελάχιστο δυνατό έργο, εάν στη θέση των μη-αντιστρεπτών λαμβάνουν χώρα αντιστρεπτές διεργασίες (Σχήμα 5-37).

Οι αντιστρεπτές διεργασίες μπορούν να θεωρηθούν σαν τα θεωρητικά όρια των αντίστοιχων μη-αντιστρεπτών διεργασιών. Κάποιες διεργασίες είναι περισσότερο μη-αντιστρεπτές από κάποιες άλλες. Παρόλο που είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί μια αντιστρεπτή διεργασία, μπορεί όμως να προσεγγιστεί. Όσο περισσότερο μια διεργασία προσεγγίζει την αντιστρεπτότητα, τόσο περισσότερο έργο παράγει, εάν πρόκειται για διεργασία παραγωγής έργου και τόσο λιγότερο έργο καταναλώνει, εάν πρόκειται για διάταξη κατανάλωσης έργου.

Η έννοια της αντιστρεπτής διεργασίας οδηγεί στον ορισμό της απόδοσης των πραγματικών διεργασιών του δεύτερου νόμου, η οποία εκφράζει το βαθμό προσέγγισης της πραγματικής διεργασίας από την αντίστοιχη αντιστρεπτή. Αυτό δίνει τη δυνατότητα της σύγκρισης διαφορετικών διατάξεων που σχεδιάζονται για τον ίδιο σκοπό. Όσο καλύτερος είναι ο σχεδιασμός, τόσο λιγότερες είναι οι αναντιστρεπτότητες που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία και τόσο υψηλότερη η απόδοση της διάταξης σύμφωνα με το δεύτερο νόμο.

Αιτίες Αναντιστρεπτότητας (Μη-Αντιστρεπτότητα)

Οι βασικές αιτίες που καθιστούν μια διεργασία μη-αντιστρεπτή ονομάζονται παράγοντες αναντιστρεπτότητας (μη-αντιστρεπτότητας). Στους παράγοντες αυτούς περιλαμβάνονται η τριβή, η φυσική διαστολή, η ανάμιξη δύο αερίων, η μεταφορά θερμότητας εξαιτίας μιας πεπερασμένης θερμοκρασιακής διαφοράς, οι ηλεκτρικές αντιστάσεις, οι ανελαστικές παραμορφώσεις των στερεών και οι χημικές αντιδράσεις. Μια αντιστρεπτή διεργασία δεν περιλαμβάνει κανένα από αυτούς τους παραπάνω παράγοντες. Στη συνέχεια, εξετάζονται μερικοί από τους πιο διαδεδομένους παράγοντες αναντιστρεπτότητας.

Τριβή

Η τριβή αποτελεί έναν από τους πιο κοινούς παράγοντες αναντιστρεπτότητας και συνδέεται με την κίνηση των διαφόρων εξαρτημάτων. Όταν δύο σώματα, που βρίσκονται

σε επαφή μεταξύ τους, κινούνται το ένα ως προς το άλλο [για παράδειγμα, ένα έμβολο σ' ένα κύλινδρο (Σχήμα 5-38)], αναπτύσσεται μια δύναμη τριβής στην επιφάνεια επαφής των δύο σωμάτων. Η δύναμη αυτή αντίκειται στην κίνηση και για να υπερνικηθεί απαιτεί την κατανάλωση κάποιας ποσότητας έργου. Το έργο αυτό μετατρέπεται σε θερμότητα και μεταφέρεται στα σώματα που βρίσκονται σε επαφή, γεγονός που αποδεικνύεται από την αύξηση της θερμοκρασίας τους. Όταν αντιστραφεί η κατεύθυνση της κίνησης των δύο σωμάτων, αυτά θα επανέλθουν στην αρχική τους θέση, αλλά η διεπιφάνεια δε θα ψυχθεί και η θερμότητα τριβής δε θα ξαναγίνει έργο. Το αντίθετο μάλιστα, το περισσότερο έργο θα μετατραπεί σε θερμότητα προκειμένου να υπερνικηθεί τις δυνάμεις τριβής, οι οποίες θα αντίκεινται στην αντίθετη κίνηση. Αφού το σύστημα (τα σώματα που κινήθηκαν) και το περιβάλλον δε μπορούν να επιστρέψουν στις αρχικές τους καταστάσεις, η διεργασία είναι μη-αντιστρεπτή. Ετσι, κάθε διεργασία που εμπιέχει φαινόμενα τριβής είναι μη-αντιστρεπτή. Όσο μεγαλύτερες είναι οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται, τόσο περισσότερο μη-αντιστρεπτή είναι η διεργασία.

Η τριβή δεν εμφανίζεται μόνο σε δύο στερεά σώματα που είναι σε επαφή μεταξύ τους. Αναπτύσσεται επίσης και μεταξύ ενός ρευστού και ενός στερεού, καθώς επίσης και μεταξύ δύο ρευσμάτων ρευστού με διαφορετικές ταχύτητες. Στον κινητήρα του αυτοκινήτου, ένα σημαντικό μέρος της ισχύος που αναπτύσσεται χρησιμοποιείται για την εξουδετέρωση της τριβής (της έρπουσας δύναμης) μεταξύ του αέρα και των εξωτερικών επιφανειών του αυτοκινήτου. Η ισχύς αυτή στη συνέχεια γίνεται μέρος της εσωτερικής ενέργειας του αέρα. Η διεργασία αυτή δε μπορεί να αντιστραφεί, ώστε να ανακτηθεί η ενέργεια που χάθηκε στον αέρα, παρόλο που, εάν συνέβαινε κάτι τέτοιο, δε θα παραβίαζε τον πρώτο νόμο.

Εκτόνωση και Συμπίεση σε Κατάσταση Μη-Ψευδοϊσορροπίας

Στο κεφάλαιο 1, η διεργασία σε κατάσταση ψευδοϊσορροπίας (αντιστρεπτή) ορίστηκε η διεργασία εκείνη κατά τη διάρκεια της οποίας το σύστημα βρίσκεται διαρκώς κοντά σε κατάσταση ισορροπίας. Για παράδειγμα, θεωρείται μια διάταξη εμβόλου-κύλινδρου που είναι αδιαβατική και χωρίς τριβές. Στη συνέχεια, το έμβολο σπρώχνεται μέσα στον κύλινδρο και συμπιέζει το αέριο. Εάν η ταχύτητα του εμβόλου δεν είναι πολύ μεγάλη, τότε η πίεση και η θερμοκρασία του αερίου θα αυξάνονται ομοιόμορφα σε όλη του την έκταση. Εφόσον το σύστημα βρίσκεται διαρκώς πολύ κοντά σε διαδοχικές καταστάσεις ισορροπίας, η διεργασία λέγεται ότι διεξάγεται σε συνθήκες ψευδοϊσορροπίας.

Στη συνέχεια, η εξωτερική δύναμη ελαττώνεται επιτρέποντας στο αέριο να εκτονωθεί. Ανάλογα, εάν η εκτόνωση του αερίου διεξαχθεί αρκετά αργά, τότε η διεργασία εκτόνωσης θα είναι επίσης ψευδοϊσορροπίας. Όταν το έμβολο κατά την εκτόνωση του επιστρέψει στην αρχική του θέση, το ολικό έργο ογκομεταβολής (PdV), που προσδόθηκε στο αέριο κατά την συμπίεση του, θα επιστρέψει στο περιβάλλον. Δηλαδή, το συνο-



Σχήμα 5-38 Η τριβή καθιστά μια διεργασία μη-αντιστρεπτή.

λικό καθαρό έργο. Επίσης, η διεργασία λεπίδραση θεωρείται σύστημα που αποτελεί διεργασία μη-αντιστρεπτή. Επειδή η διεργασία εκτελείται να μια αντιστρεπτή

Θεωρείται παρόμοια οποία όμως δε διατηρείται, όπως παρόμοια έμβολο κινήσει, τότε τα μόρια που βρίσκονται στην επιφάνεια του εμβόλου να απομακρυνθούν από τον μπροστινό τοίχο της πίεσης, ώστε να γίνει παρόμοια. Άλλες περιπτώσεις που σαν αποτέλεσμα του μαθητικού έργου του εμβόλου. Εξαιτίας της συμπίεσης μη-αντιστρεπτή διεργασία που διεξάγεται και όταν το έμβολο του κυλίνδρου κινείται, οπότε θα διατηρηθεί αυτής της χαμηλής ψευδοϊσορροπίας. Κατά συνέπεια το έργο που καταναλώνεται της διεργασίας που γίνεται του θέσει, το αέριο με το έλλειμμα που

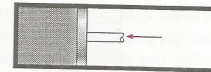
Το σύστημα μεταφέροντας αυτό το πλεονέκτημα θερμότητας. Ομοίως, στην αρχική του κατάσταση. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει. Αυτό, βέβαια, δε είναι νόμο της θερμοδυναμικής και το περιβάλλον, μετέραςμα ότι η εκ-

λικό καθαρό έργο της διεργασίας ισούται με μηδέν. Επίσης, η διεργασία δεν περιλαμβάνει καμιά αλληλεπίδραση θερμότητας, με αποτέλεσμα τόσο το σύστημα όσο και το περιβάλλον, μετά το τέλος της διεργασίας, να επιστρέψουν στην αρχική τους κατάσταση. Έτσι, η αργή αδιαβατική και χωρίς τριβές διεργασία εκτόνωσης ή συμπίεσης ενός αερίου είναι μια αντιστρεπτή διεργασία.

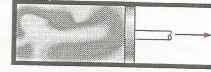
Θεωρείται τώρα η ίδια αδιαβατική διεργασία, η οποία όμως διεξάγεται σε συνθήκες ψευδοϊσορροπίας, όπως παριστάνεται στο σχήμα 5-39. Εάν το έμβολο κινηθεί απότομα συμπιέζοντας το αέριο, τότε τα μόρια του αερίου που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του εμβόλου δε θα έχουν αρκετό χρόνο να απομακρυνθούν, με αποτέλεσμα να συσσωρευτούν μπροστά σε αυτό. Αυτό θα οδηγήσει σε αύξηση της πίεσης κοντά στην επιφάνεια του εμβόλου, ώστε να γίνει υψηλότερη, από την πίεση, στις υπό-

λοιπες περιοχές του κυλίνδρου. Αυτή η ανομοιομορφία της κατανομής της πίεσης έχει σαν αποτέλεσμα η διεργασία να πάψει να είναι διεργασία ψευδοϊσορροπίας. Το πραγματικό έργο σγκομεταβολής θα είναι συνάρτηση της πίεσης κοντά στην επιφάνεια του εμβόλου. Εξαιτίας της αυξημένης αυτής τιμής της πίεσης στην επιφάνεια του εμβόλου, η συμπίεση μη-ψευδοϊσορροπίας θα απαιτεί περισσότερο έργο από ό,τι η αντίστοιχη διεργασία που διεξάγεται σε συνθήκες ψευδοϊσορροπίας. Κατά την αντίστροφη διεργασία και όταν το αέριο αφηθεί να εκτονωθεί απότομα, τα μόρια του αερίου στο εσωτερικό του κυλίνδρου δε θα είναι σε θέση να ακολουθήσουν τη γρήγορη κίνηση του εμβόλου, οπότε θα δημιουργηθεί μια περιοχή υποπίεσης μπροστά από το έμβολο. Εξαιτίας αυτής της χαμηλής τιμής της πίεσης κοντά στο έμβολο, η διεργασία, που δεν είναι ψευδοϊσορροπίας, θα παράγει μικρότερο έργο συγκριτικά με την αντίστοιχη ψευδοϊσορροπίας. Κατά συνέπεια, το έργο που παράγεται κατά την εκτόνωση είναι μικρότερο από το έργο που καταναλώνει το περιβάλλον, με αποτέλεσμα να παρατηρείται στο τέλος της διεργασίας ένα έλλειμμα έργου. Όταν, τέλος, το έμβολο επιστρέψει στην αρχική του θέση, το αέριο θα έχει ένα πλεόνασμα εσωτερικής ενέργειας, το οποίο θα ισούται με το έλλειμμα του έργου περιβάλλοντος.

Το σύστημα μπορεί εύκολα να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση, απομακρύνοντας αυτό το πλεόνασμα της εσωτερικής ενέργειας στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας. Ομως, ο μόνος τρόπος με τον οποίο το περιβάλλον μπορεί να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση είναι η πλήρης μετατροπή της θερμότητας αυτής σε έργο. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει μόνο από μια θερμική μηχανή που θα έχει απόδοση 100%. Αυτό, βέβαια, δε μπορεί να συμβεί ούτε θεωρητικά, γιατί θα παραβίαζε το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Από τη στιγμή που μόνο το σύστημα, και όχι το περιβάλλον, μπορεί να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η εκτόνωση και η συμπίεση ενός αερίου σε συνθήκες μη-ψευδοϊσορρο-



(α) Γρήγορη συμπίεση

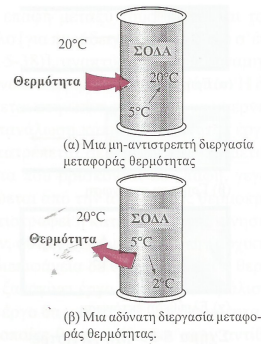


(β) Γρήγορη εκτόνωση



(γ) Ελεύθερη εκτόνωση

Σχήμα 5-39 Μη-Αντιστρεπτές διεργασίες εκτόνωσης και συμπίεσης.



Σχήμα 5-40 (α) Η μεταφορά θερμότητας κατά μήκος μιας πεπερασμένης διαφοράς θερμοκρασίας είναι μη-αντιστρεπτή και (β) η αντίστροφη διεργασία είναι αδύνατη.

Μεταφορά Θερμότητας

Μια άλλη πολύ διαδεδομένη μορφή αναντιστρεπτότητας είναι η μεταφορά θερμότητας κατά μήκος μιας πεπερασμένης διαφοράς θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, θεωρείται ένα παγωμένο κουτί σόδας σ' ένα δωμάτιο με συνηθισμένη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο σχήμα 5-40. Η θερμότητα θα μετακινηθεί από το θερμότερο δωμάτιο προς τη ψυχρότερη σόδα. Ο μόνος τρόπος να αντιστραφεί η διεργασία και η σόδα να επιστρέψει στην αρχική της θερμοκρασία είναι να ψυχθεί το κουτί, διεργασία που απαιτεί κάποια κατανάλωση έργου. Στο τέλος της αντίστροφης διεργασίας, η σόδα θα βρίσκεται στην αρχική της κατάσταση, όχι όμως και το περιβάλλον. Η εσωτερική ενέργεια του τελευταίου θα έχει αυξηθεί κατά ένα ποσό ίσο με το έργο που καταναλώθηκε από το ψυγείο. Ο μόνος τρόπος να επανέλθει και το περιβάλλον στην αρχική του κατάσταση είναι η επίρροια αυτή της εσωτερικής ενέργειας να μετατραπεί όλη σε έργο, κάτι που δεν μπορεί να συμβεί χωρίς να παραβιαστεί ο δεύτερος νόμος. Εφόσον μόνον το σύστημα, και όχι το σύστημα και το περιβάλλον, μπορεί να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση, η μεταφορά θερμότητας κατά μήκος μιας πεπερασμένης διαφοράς θερμοκρασίας είναι μια μη-αντιστρεπτή διεργασία.

Η μεταφορά θερμότητας μπορεί να λάβει χώρα μόνο, όταν υπάρχει μια διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος. Έτσι, είναι αδύνατο από φυσικής άποψης να λάβει χώρα μια αντιστρεπτή μεταφορά θερμότητας. Όμως, η διεργασία μεταφοράς θερμότητας μπορεί να είναι όλο και περισσότερο αντιστρεπτή καθώς

πίας είναι μη-αντιστρεπτές διεργασίες.

Ένα άλλο παράδειγμα εκτόνωσης σε συνθήκες μη-ψευδοϊσορροπίας αποτελεί και η ελεύθερη εκτόνωση ενός αερίου, το οποίο διαχωρίζεται από ένα χώρο στον οποίο επικρατεί κενό διαμέσου μιας μεμβράνης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5-39γ. Όταν σπάσει η μεμβράνη, το αέριο θα καταλάβει ολόκληρο τον όγκο του δοχείου. Ο μόνος τρόπος για να επανέλθει το σύστημα στην αρχική του κατάσταση είναι να συμπιεστεί το αέριο στον αρχικό του όγκο, ενώ ταυτόχρονα θα απάγεται θερμότητα μέχρι το σύστημα να φθάσει στην αρχική του θερμοκρασία. Από υπολογισμούς με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι το ποσό της θερμότητας, που απάγεται από το αέριο, ισούται με το έργο που προσδίδεται σε αυτό από το περιβάλλον. Η επαναφορά του περιβάλλοντος στην αρχική του κατάσταση απαιτεί την πλήρη μετατροπή αυτής της θερμότητας σε έργο, γεγονός που θα παραβίαζε το δεύτερο νόμο.

Επομένως, η ελεύθερη εκτόνωση αερίου είναι μια μη-αντιστρεπτή διεργασία.

η διαφορά...
αυτή, η μετα...
σίας dT μετα...
κατεύθυνση...
απαιτεί κάποια...
θεωρητική δια...
Οσο μικρότερο...
ρος είναι και...
μικρή, απαιτεί...
φής και μετα...
μότητας απαι...
οικονομικά.

Εσωτερική Ενέργεια

Οποιαδήποτε...
περιβάλλοντος...
δεν εμφανίζονται...
περιβάλλοντος.

Μια διεργασία...
εμφανίζονται...
τη διαφορά...
χικές καταστά...
πορεία προς...
ισορροπίας, και...
η αντίστροφη...
σίας είναι η δια...
Μια διεργασία...
κόν επαναπο...
κά αντιστρεπ...
ενός συστήμα...
ταξύ της διε...
ται στη θερμο...
Μια διεργασία...
ή απλά αντισ...
στρεπτότητας...
εξωτερικό του...
ολικά αντισ...
ται μεταφορά...
ρασμένης δια...
σε κατάσταση...
φαινόμενα στα...
Για παράδει...
τητας σε δύο...

η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο σωμάτων τείνει στο μηδέν. Στην περίπτωση αυτή, η μεταφορά θερμότητας κατά μήκος μιας απειροελάχιστης διαφοράς θερμοκρασίας dT μπορεί να θεωρηθεί αντιστρεπτή. Καθώς η διαφορά dT τείνει στο μηδέν, η κατεύθυνση της διεργασίας μπορεί να αντιστραφεί (τουλάχιστον θεωρητικά) χωρίς να απαιτεί κάποια ψύξη. Σημειώνεται ότι η αντιστρεπτή μεταφορά θερμότητας είναι μια θεωρητική διεργασία και δε μπορεί να επιτευχθεί στην πράξη.

Όσο μικρότερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο σωμάτων, τόσο μικρότερος είναι και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι μικρή, οποιαδήποτε σημαντική μεταφορά θερμότητας απαιτεί μεγάλη επιφάνεια επαφής και μεγάλα χρονικά διαστήματα. Έτσι, παρόλο που η αντιστρεπτή μεταφορά θερμότητας είναι θερμοδυναμικά επιθυμητή, δεν είναι καθόλου πρακτική και δε συμφέρει οικονομικά.

Εσωτερικά και Εξωτερικά Αντιστρεπτές Διεργασίες

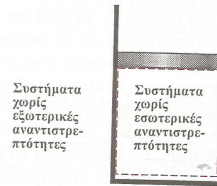
Οποιαδήποτε διεργασία αποτελεί μια αλληλεπίδραση μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντος του, ενώ η αντιστρεπτή διεργασία είναι αυτή που κατά την εξέλιξη της δεν εμφανίζονται αναντιστρεπτότητες τόσο ως προς το σύστημα όσο και ως προς το περιβάλλον.

Μια διεργασία ονομάζεται **εσωτερικά αντιστρεπτή**, όταν κατά την εξέλιξη της δεν εμφανίζονται αναντιστρεπτότητες μέσα στις οριακές επιφάνειες του συστήματος. Κατά τη διάρκεια μιας εσωτερικά αντιστρεπτής διεργασίας, το σύστημα διέρχεται από διαδοχικές καταστάσεις ισορροπίας και, όταν η διεργασία αντιστραφεί, το σύστημα στην πορεία προς την αρχική του κατάσταση διέρχεται από τις ίδιες ακριβώς καταστάσεις ισορροπίας. Αυτό σημαίνει ότι για μια εσωτερικά αντιστρεπτή διεργασία, η ευθεία και η αντίστροφη διεργασία ταυτίζονται. Ένα παράδειγμα εσωτερικά αντιστρεπτής διεργασίας είναι η διεργασία ψευδοίσορροπίας που εξετάστηκε προηγούμενος.

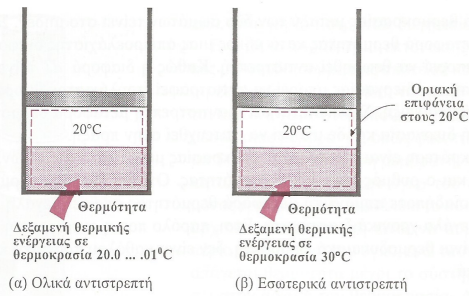
Μια διεργασία ονομάζεται **εξωτερικά αντιστρεπτή**, όταν στο εξωτερικό των οριακών επιφανειών του συστήματος δεν εμφανίζονται αναντιστρεπτότητες. Μια εξωτερικά αντιστρεπτή διεργασία είναι η μεταφορά θερμότητας μεταξύ μιας δεξαμενής και ενός συστήματος, όταν η επιφάνεια επαφής μεταξύ της δεξαμενής και του συστήματος βρίσκεται στη θερμοκρασία της δεξαμενής.

Μια διεργασία ονομάζεται **ολικά αντιστρεπτή** ή **απλά αντιστρεπτή**, εάν δεν εμφανίζει αναντιστρεπτότητες τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό του συστήματος (Σχήμα 5-41). Σε μια ολικά αντιστρεπτή διεργασία δεν πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας κατά μήκος μιας πεπερασμένης διαφοράς θερμοκρασίας ή μεταβολές σε κατάσταση μη-ψευδοίσορροπίας, τριβές ή άλλα φαινόμενα στα οποία να χάνεται ενέργεια.

Για παράδειγμα, θεωρείται η μεταφορά θερμότητας σε δύο πανομοιότυπα συστήματα, τα οποία



Σχήμα 5-41 Μια αντιστρεπτή διεργασία δεν εμφανίζει ούτε εξωτερικές ούτε εσωτερικές αναντιστρεπτότητες.



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 ΔT .

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-