



«ΕΞΕΡΓΕΙΑ»

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

Σχολή Μηχανικών.

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Σημειώσεις για το μάθημα της

Θερμοδυναμικής II.

Δρ. Ευάγγελος Ι. Σακελλαρίου
Αθήνα, Απρίλιος 2022.

Εξεργειακή Ανάλυση

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	2
1.1. Η ιδέα της εξέργειας.....	3
1.2. Περιβάλλον και νεκρό σημείο.....	4
1.3. Ορίζοντας την Εξέργεια.....	4
2. Εξέργεια ενός συστήματος.....	0
2.1. Πτυχές της Εξέργειας.....	2
2.2. Ειδική εξέργεια.....	2
2.3. Μεταβολή της εξέργειας ενός συστήματος.....	5
3. Εξεργειακή ισορροπία στα κλειστά συστήματα.....	6
3.1. Εισαγωγή στην εξεργειακή ισορροπία των κλειστών συστημάτων.....	6
3.2. Εξεργειακή ισχύς κλειστού συστήματος.....	9
3.3. Εξεργειακή καταστροφή και απώλειες.....	9
3.4. Εξεργειακό ισοζύγιο ενός συστήματος.....	11
4. Ισορροπία εξεργειακής ισχύος εντός όγκου ελέγχου (ανοιχτά συστήματα).....	12
4.1. Σύγκριση Ενεργειακής και Εξεργειακής ανάλυσης σε όγκο ελέγχου υπό σταθερή κατάσταση λειτουργίας.....	13
4.2. Αξιολογώντας την καταστροφή της εξέργειας εντός του όγκου ελέγχου υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας.....	14
4.3. Εξεργειακή λογιστική ανάλυσης σε όγκο ελέγχου υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας.....	16
5. Εξεργειακή απόδοση (second law efficiency).....	18
5.1. Σύνδεση της πηγής με τον τελικό χρήστη.....	18
5.2. Εξεργειακή απόδοση κοινών εξαρτημάτων.....	20
5.2.1 Στρόβιλοι.....	20
5.2.2 Συμπιεστές και αντλίες.....	20
5.2.3 Εναλλάκτης θερμότητας.....	21
6. Θερμοοικονομικά (Thermoeconomics).....	22
6.1. Χρησιμοποιώντας την Εξέργεια στην σχεδίαση συστημάτων.....	22
7. Παραδείγματα: εξεργειακή ανάλυση συστημάτων.....	24
7.1. Εξεργειακή ανάλυση συστήματος αντλίας θερμότητας αβαθούς γεωθερμίας.....	24

1. Εισαγωγή

Η ενέργεια διατηρείται σε κάθε συσκευή ή σύστημα, δεν μπορεί να καταστραφεί απλώς μετατρέπεται από μία μορφή (ηλεκτρισμός π.χ.) σε μία άλλη μορφή (θερμική π.χ.).

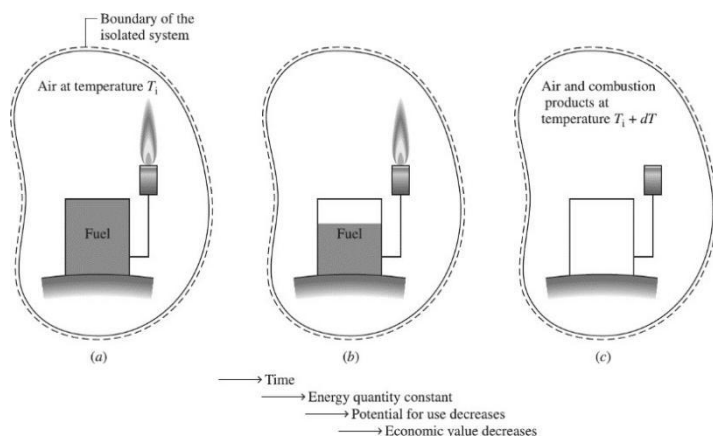
Ωστόσο η αρχή διατήρησης της ενέργειας δεν επαρκεί να αξιολογήσουμε την χρήση των ενεργειακών πόρων σε ένα σύστημα!

Παράδειγμα:

Στο Σχήμα 1, βλέπουμε ένα δοχείο με καύσιμο το οποίο είναι εντός απομονωμένου χώρου με τον αέρα να το περιρρέει (a). Στην συνέχεια το καύσιμο καίγεται και παράγει θερμότητα (b) και ως αποτέλεσμα θερμαίνεται ο απομονωμένος χώρος, που περιέχει τον αέρα και τα καυσαέρια.

Από αυτήν τη σκοπιά, μπορούμε να πούμε ότι η ενέργεια διατηρήθηκε εντός του απομονωμένου χώρου, δεν διέφυγε, αλλά μετασχηματίστηκε σε διαφορετική μορφή (από χημική σε θερμική). Ωστόσο, αυτό το θερμό μείγμα αέρα και καυσαερίων δεν μπορώ να το χρησιμοποιήσω για πολλά πράγματα. Σε αντίθεση, στην αρχική κατάσταση (a) το καύσιμο μπορώ να το χρησιμοποιήσω για την παραγωγή μηχανικού έργου ή ηλεκτρισμού.

Συμπέρασμα: το σύστημα έχει μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής έργου (εξέργεια) πριν την καύση του καυσίμου, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλες εργασίες και αυτή η ικανότητα παραγωγής έργου **χάθηκε**. (Η εξέργεια καταστρέφεται!!!)



Σχήμα 1. Ενέργεια διατηρείται η εξέργεια καταστρέφεται.

Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το καύσιμο στην αρχική του κατάσταση έχει οικονομική αξία σε αντίθεση με το αποτέλεσμα της καύσης όπου δεν έχει οικονομική αξία, διότι είναι μείγμα αέρα και καυσαερίων σε χαμηλή θερμοκρασία. Μέσω του προηγούμενου συμπεράσματος, μπορούμε να πούμε ότι η εξέργεια έχει άμεση σύνδεση με την οικονομία ενός συστήματος.

Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε την αξία που έχει η κάθε μορφή ενέργειας, όπως π.χ. ο ηλεκτρισμός είναι μία ευγενής μορφή ενέργειας, σε αντίθεση με τη θερμότητα όπου είναι στο χαμηλότερο σκαλί. Τα παραπάνω, εναλλακτικά, μπορούν να ειπωθούν όπως: η αξία της εκάστοτε μορφής που βρίσκεται η ενέργεια είναι άμεσα συνδεδεμένη με το τι εν δυνάμει μπορεί να παράγουμε με την δεδομένη ποσότητα και στην συγκεκριμένη μορφή. Ο

ηλεκτρισμός μπορεί να μετατραπεί σχεδόν στα πάντα (κίνηση, θερμότητα, φως κτλ.), σε αντίθεση με την θερμότητα, που δύσκολα μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό.

Γνωρίζουμε από την θερμοδυναμική ότι η **ΕΝΕΡΓΕΙΑ** διατηρείται, δεν καταστρέφεται αλλά μετατρέπεται από μια μορφή σε άλλη.

Ποιος είναι ο ορισμός της ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ;

«Είναι η δυνατότητα να έχω αποτέλεσμα»

να θερμάνω νερό, να ανυψώσω ένα αντικείμενο κτλ.

Η **ΕΞΕΡΓΕΙΑ** δεν διατηρείται και μπορεί να καταστραφεί.

Ποιος είναι ο ορισμός της ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ;

«Είναι η δυνατότητα να παράγω έργο»

(παρακάτω θα την ορίσουμε με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια)

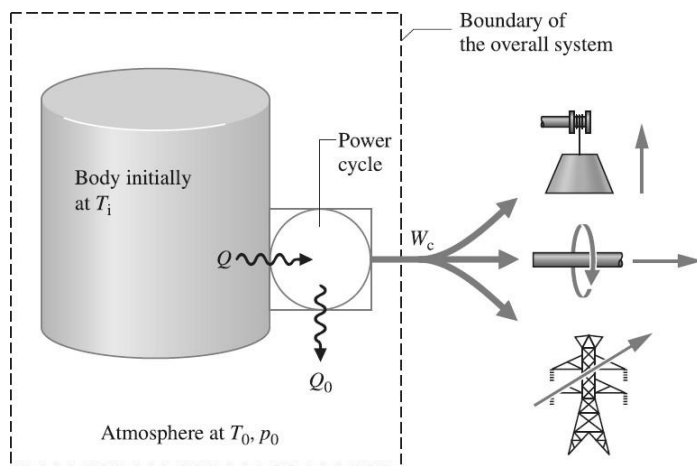
Παλαιότερα η εξέργεια ονομαζόταν ενεργειακή διαθεσιμότητα (energy availability)

1.1. Η ιδέα της εξέργειας

Η βασική ιδέα και οι βάσεις για την ανάπτυξη της εξέργειας έχουν τεθεί μέσω της μελέτης της εντροπίας:

- Η δυνατότητα παραγωγής έργου υφίσταται όταν δύο (και περισσότερα) συστήματα σε διαφορετική κατάσταση αλληλεπιδράσουν.
- Και το έργο μπορεί να αναπτυχθεί όταν τα δύο αυτά συστήματα (και περισσότερα) επιτρέπεται να έρθουν σε ενεργειακή ισορροπία

Στο Σχήμα 2., βλέπουμε ένα θερμό αντικείμενο σε θερμοκρασία T_i να αφήνεται να απολέσει την θερμότητα του στο περιβάλλον, με θερμοκρασία T_o και πίεση P_o . **Αν ανάμεσα στις δύο δεξαμενές θερμότητας την T_i και T_o** τοποθετούσαμε μία μηχανή παραγωγής έργου (power cycle), θα παρήγαμε έργο W_c το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανύψωση ενός φορτίου, για να περιστρέφει ένας άξονας ή την παραγωγή ηλεκτρισμού. Όταν η θερμοκρασία και η πίεση του θερμού δοχείου είναι ίση με αυτές του περιβάλλοντος χώρου, το σύστημα παύει να έχει την ικανότητα να παράγει έργο. Το Q_o είναι η θερμότητα που απορρίπτει το σύστημα προς το περιβάλλον και δεν μετέτρεψε σε έργο. Η εξέργεια είναι το μέγιστο θεωρητικό έργο που μπορούμε να πάρουμε από το υπάρχον σύστημα. Καλό είναι να σημειώσουμε ότι το ίδιο αποτέλεσμα στο σύστημα μας θα είχαμε αν η δεξαμενή T_i ήταν σε χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος. Σε αυτή την περίπτωση ο μόνος περιορισμός για την παραγωγή έργου θα ήταν η δυνατότητα της δεξαμενής.



Σχήμα 2.

1.2. Περιβάλλον και νεκρό σημείο

Το περιβάλλον στην θερμοδυναμική ανάλυση είναι το μέρος του κόσμου που περιβάλλει το σύστημα που μελετάται. Το περιβάλλον και οι ιδιότητες του είναι σημαντικές για την ανάλυση του συστήματος, και ο λόγος είναι ότι πολλές φορές αντιπροσωπεύει μία από της δύο θερμές δεξαμενές. Το περιβάλλον που θεωρούμε για την εξεργειακή ανάλυση του συστήματος το ονομάζουμε «**εξεργειακό περιβάλλον αναφοράς**» ή απλώς **περιβάλλον**. Στην πλειονότητα των μελετών και των προβλημάτων που θα χρειαστεί να αναλύσουμε το περιβάλλον δεχόμαστε ότι περιγράφεται από θερμοκρασία **25 °C (298 K)** και πίεση **1 atm**. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι, οι εντατικές ιδιότητες (θερμοκρασία, πίεση κτλ.) του περιβάλλοντος δεν αλλοιώνονται – δεν αλλάζουν από την λειτουργία του συστήματος.

Όταν το σύστημα προς ανάλυση έχει προσεγγίσει και φτάσει (είναι ίσο) τις ίδιες ιδιότητες με το περιβάλλον, Το και P_0 , τότε έχει φτάσει στο **νεκρό σημείο (dead state)**. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να παραχθεί πλέον έργο από το ζευγάρι περιβάλλον και σύστημα.

1.3. Ορίζοντας την Εξέργεια

Εξέργεια είναι **το μέγιστο θεωρητικό έργο που μπορούμε να πάρουμε από το διευρυμένο σύστημα που περιέχει το σύστημα προς μελέτη και το περιβάλλον**, όταν τα δυο μέρη του συστήματος φτάνουν σε ισορροπία στο νεκρό σημείο.

Η αλληλεπίδραση του συστήματος με το περιβάλλον σχεδόν πάντα περιέχει κάποιον εξοπλισμό, όπως μία θερμική μηχανή, όπου βοηθάει να εκτελέσει το σκοπό της η διάταξη. Μπορούμε να πούμε ότι το μέγιστο έργο θα το πετύχουμε όταν η λειτουργία της μηχανής είναι πλήρως αντιστρεπτή.

2. Εξέργεια ενός συστήματος

Σημαντική σημείωση: στην μελέτη μας, η εξέργεια θα αναφέρεται με το κεφαλαίο **E** και η ειδική εξέργεια με το πεζό **e**. Η ενέργεια σε αντίθεση θα αναφέρεται με το italic **E** και η ειδική ενέργεια με το italic **e**. Θα υπάρχει διευκρίνιση όπου χρειαστεί.

Μέσω της εξίσωσης 1 μπορούμε να υπολογίσουμε την εξέργεια που περιέχει ένα σύστημα, ένα ρευστό, και μάλιστα ο υπολογισμός αυτός θα μας δώσει το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί από το υπό μελέτη σύστημα (με την ανάγκη να ορίσουμε την Εξέργεια).

$$E = (U - U_o) + p_o(V - V_o) - T_o(S - S_o) + KE + PE \quad 1$$

Στην εξίσωση 1: **U** εσωτερική ενέργεια, **p_o** απόλυτη πίεση περιβάλλοντος, **V** όγκος του συστήματος, **T_o** θερμοκρασία περιβάλλοντος, **KE** κινητική ενέργεια, **PE** δυναμική ενέργεια. Με τον δείκτη **o** παρουσιάζονται όλες οι μεταβλητές που χαρακτηρίζουν το περιβάλλον και δηλώνουν το **dead state** του συστήματος.

Απόδειξη της εξίσωσης 1:

Η εξίσωση 1 μπορεί να αποδειχτεί εφαρμόζοντας τις εξισώσεις για την ενεργειακή ισορροπία και την ισορροπία της εντροπίας στο διευρυμένο σύστημα του Σχήματος 3. Η εξέργεια είναι το μέγιστο έργο W_c που μπορεί να αποδώσει το σύστημα όταν αυτό φτάσει στο dead state.

Ενεργειακή ισορροπία:

Η μεταβολή της συνολικής ενέργειας ΔE_c του διευρυμένου συστήματος είναι ίση με το σύνολο της θερμότητας και του έργου όπου διαφεύγει από το συνδυασμένο σύστημα (εξίσωση 2). Με το τρόπο που έχουμε ορίσει το περιβάλλον, δεν μπορούμε να έχουμε ροή θερμότητας εκτός του ορίου του περιβάλλοντος, $Q_c = 0$. Όποτε, η μεταβολή της ενέργειας που εσωκλείεται από το όριο του περιβάλλοντος είναι ίση με την παραγωγή έργου.

$$\Delta E_c = \dot{Q}_c + W_c \quad 2$$

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι, το παραγόμενο έργο W_c προκύπτει από την μεταβολή της ενέργειας στα δύο μέρη του διευρυμένου συστήματος: το σύστημα και το περιβάλλον. Αν θέσουμε την αρχική ενέργεια **του συστήματος με E**, αυτή θα περιέχει την εσωτερική, την δυναμική και κινητική ενέργεια. Η εν μέρη μεταβολή της ενέργειας του συστήματος ως προς το περιβάλλον θα επιφέρει μόνο μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια του περιβάλλοντος U_o , για τον λόγο ότι η KE και η PE είναι μηδέν για το περιβάλλον. Επομένως, η μεταβολή του συστήματος (Σχήμα 3) αποδίδεται από την εξίσωση 3, το ΔU_e είναι η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του περιβάλλοντος.

$$\Delta E_c = (U_c + E) + \Delta U_e \quad 3$$

Σχετικά με την μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του περιβάλλοντος, γράφοντας την σε μορφή μεταβολής ενθαλπίας έχουμε την εξίσωση 4. Τα T_o και p_o είναι σταθερά και δεν μεταβάλλονται.

$$\Delta U_e = T_o \Delta S_e - p_o \Delta V_e \quad 4$$

Συνδέοντας τις εξίσωση 3 και 4 έχουμε την εξίσωση 5.

$$\Delta E_c = (U_o - E) + T_o \Delta S_e - p_o \Delta V_e \quad 5$$

Και συνδέοντας την εξίσωση 2 με την εξίσωση 5, και λύνοντας ως προς το έργο έχουμε την εξίσωση 6. Στην εξίσωσή 6 έχουμε αναπτύξει και την διαφορά του όγκου που λαμβάνει μέρος κατά την μεταβολή ($V-V_o$).

$$W_c = (E - U_o) - p_o(V - V_o) - T_o \Delta S_e \quad 6$$

Η εξίσωση 6 μας υπολογίζει το έργο όπου μπορεί να παραχθεί από το διευρυμένο σύστημα όταν αυτό φτάνει στο dead state. Για να υπολογίσουμε το μέγιστο έργο που μπορούμε να παραλάβουμε από το συνδυασμένο σύστημα, θα πρέπει να αξιολογήσουμε την εντροπία του συστήματος. Αυτό θα το κάνουμε μέσω της εξίσωσης ισορροπίας της εντροπίας (εξίσωση 7). Στο συνδυασμένο σύστημα έχουμε μόνο δημιουργία εντροπίας, οπότε εξίσωση 7 απλοποιείται στην εξίσωση 8. Ο ρυθμός αύξησης της εντροπία οφείλεται στις μη αντιστρέψιμες μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στο διευρυμένο σύστημα όπως αυτό φτάνει στο dead state.

$$\frac{dS}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_{in} \dot{m}_{in} S_{in} - \sum_{ex} \dot{m}_{ex} S_{ex} + \dot{\sigma} \quad 7$$

$$\Delta S_c = \dot{\sigma}_c \quad 8$$

Το σύνολο της διαφοράς εντροπίας, οφείλεται στην διαφορά που συνδέει στο σύστημα και την διαφορά που προσφέρεται από το περιβάλλον (εξίσωση 9).

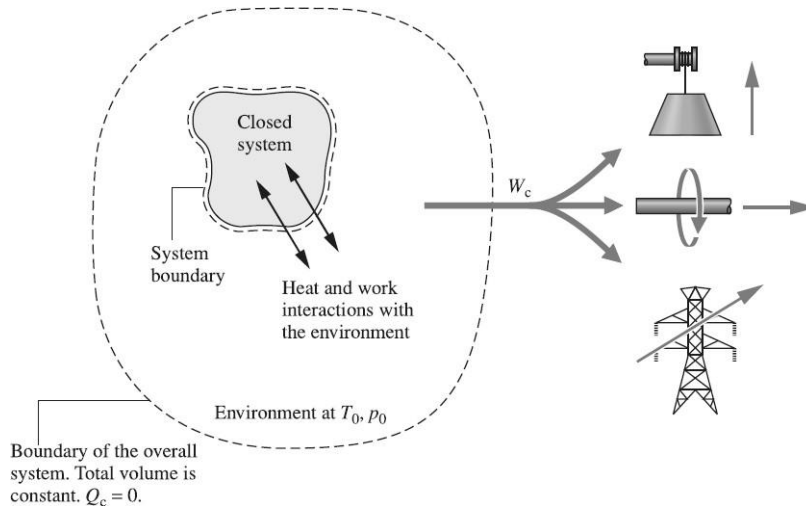
$$\Delta S_c = (S_o - S) + \Delta S_e \quad 9$$

Αν συνδέσουμε τις εξισώσεις 8, 9 και 6, δημιουργείται η εξίσωση 10.

$$W_c = (E - U_o) + p_o(V - V_o) - T_o(S - S_o) - T_o \sigma_c \quad 10$$

Τέλος, γνωρίζοντας ότι το $E=U+KE+PE$, έχουμε την τελική εξίσωση 11. Σε αυτήν την εξίσωση, το έργο – εξέργεια δίνεται από δύο σημεία λειτουργίας, το υπάρχον σημείο και το σημείο του dead state. Το υπογραμμισμένο μέρος της εξίσωσης μπορεί να μας προσφέρει την μέγιστη, θεωρητικά, εξέργεια του συνδυασμένου συστήματος. Αυτό το μέγιστο μπορεί να επιτευχθεί όταν δεν υπάρχουν μη αντιστρεψιμότητες στο σύστημα μας και η δημιουργία της εντροπίας σ_c είναι 0. Αυτό βεβαίως είναι ένα θεωρητικό συμπέρασμα, για τον λόγο ότι ΠΑΝΤΑ – ΠΑΝΤΑ έχουμε δημιουργία εντροπίας στο σύστημα μας, και ΠΟΤΕ – ΠΟΤΕ δεν μπορεί να είναι αρνητική.

$$\underline{W_c = (U - U_o) + p_o(V - V_o) - T_o(S - S_o) + KE + PE - T_o \sigma_c} \quad 11$$



Σχήμα 3. Διευρυμένο σύστημα για την απόδειξη της εξίσωσης εξέργειας ενός συστήματος

2.1. Πτυχές της Εξέργειας

Η σημαντικότερες ιδιότητες – πτυχές της εξέργειας:

- Η εξέργεια ενός συστήματος είναι πάντα συνυφασμένη με το περιβάλλον που είναι τοποθετημένο.
- Η εξέργεια δεν μπορεί να είναι αρνητική.
- Η εξέργεια δεν συντηρείται κατά την μεταβολή ενός συστήματος, αλλά καταστρέφεται.
- Η εξέργεια ορίζεται ως το μέγιστο έργο που μπορεί να προσφέρει το σύστημα σε σχέση με το υπάρχον περιβάλλον (dead state).
- Όταν το σύστημα είναι σε θερμική και μηχανική ισορροπία με το περιβάλλον τότε η εξέργεια είναι μηδέν.
- Η μονάδες μέτρησης της εξέργειας είναι ίδιες με αυτές της ενέργειας kJ, kWh κτλ.

2.2. Ειδική εξέργεια

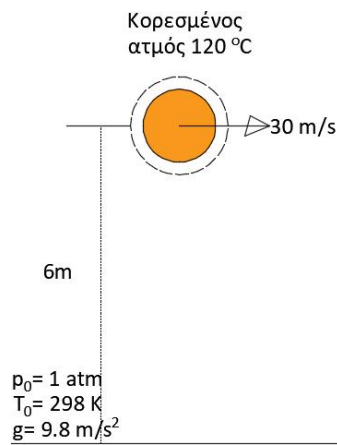
Αν και η εξέργεια είναι εντατικό μέγεθος, είναι για την ευκολία μας στην πράξη, να την διαιρούμε με την μάζα και να εργαζόμαστε με την ειδική εξέργεια (kJ/kg). Η μονάδες είναι ίδιες με την ειδική ενέργεια, ενθαλπία, εσωτερική ενέργεια. Η εξίσωση 12 περιγράφει τη ειδική εξέργεια ενός συστήματος ως προς το περιβάλλον.

$$e = (u - u_o) + p_o(v - v_o) - T_o(s - s_o) + \frac{V^2}{2} + gz \quad 12$$

Η κινητική ενέργεια και η δυναμική ενέργεια αξιολογούνται με βάση το περιβάλλον, και για αυτό δεν γράφουμε την διαφορά τους. Θεωρούμε ότι πάντα αξιολογούνται με βάση το περιβάλλον (πλανήτης, όχημα κτλ.).

Παράδειγμα 1

Να υπολογιστεί η **ειδική εξέργεια** κορεσμένου ατμού ($x=1$) στους $120\text{ }^\circ\text{C}$, με ταχύτητα 30 m/s και ύψος 6 m . Το περιβάλλον αναφοράς είναι $T_0=298\text{ K}$ ($25\text{ }^\circ\text{C}$), $p_0=1\text{ atm}$ και $g=9,8\text{ m/s}^2$.



$$e = (u - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

- Από πίνακα A2 για κορεσμένο ατμό στους $120\text{ }^\circ\text{C}$ έχω: $v=0,8919\text{ m}^3/\text{kg}$, $u=2529,3\text{ kJ/kg}$ και $s=7,1296\text{ kJ/kg K}$
- Αντίστοιχα για το σημείο ισορροπίας $25\text{ }^\circ\text{C}$ και $p_0=1\text{ atm}$ έχω: $v_0=1,0029 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{kg}$, $u_0=104,88\text{ kJ/kg}$ και $s_0=0,3674\text{ kJ/kg K}$

$$e = [(2529.3 - 104.88) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}] + [1.01324 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} (0.8919 - 1.0029 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}})] [\frac{1 \text{kJ}}{10^3 \text{N} \cdot \text{m}}] - [298 \text{K} (7.1296 - 0.3674) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}] + [\frac{(30 \text{m/s})^2}{2} + (9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 6 \text{m})] [\frac{1 \text{N}}{1 \text{kg} \cdot \text{m/s}^2}] [\frac{1 \text{kJ}}{10^3 \text{N} \cdot \text{m}}] = (2424.42 + 90.27 - 2015.14 + 0.45 + 0.06) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Παράδειγμα 2

Κύλινδρος μηχανής αυτοκινήτου περιέχει 2450 cm³ προϊόντα καύσης σε πίεση 7 bar και θερμοκρασία 876 °C ακριβώς πριν ανοίξει η βαλβίδα και εξέλθουν. Να υπολογιστεί η ειδική εξέργεια του αερίου σε kJ/kg. Να αγνοηθεί η κινητική και δυναμική ενέργεια του αερίου, και να μοντελοποιηθεί ως τέλειο αέριο. T₀ = 300 K και p₀ = 1.013 bar.



Έχουμε την εξίσωση 12

$$e = (u - u_o) + p_o(v - v_o) - T_o(s - s_o) + \frac{V^2}{2} + gz$$

Από πίνακα 22 για της ιδιότητας του αέρα ως ιδανικό αέριο:

The internal energy and entropy terms are evaluated using data from Table A-22, as follows:

$$\begin{aligned} u - u_o &= (880.35 - 214.07) \text{ kJ/kg} \\ &= 666.28 \text{ kJ/kg} \\ s - s_o &= s^\circ(T) - s^\circ(T_o) - \frac{\bar{R}}{M} \ln \frac{p}{p_o} \\ &= \left(3.11883 - 1.70203 - \left(\frac{8.314}{28.97} \right) \ln \left(\frac{7}{1.013} \right) \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\ &= 0.8621 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \\ T_o(s - s_o) &= (300 \text{ K})(0.8621 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \\ &= 258.62 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

The $p_o(v - v_o)$ term is evaluated using the ideal gas equation of state: $v = (\bar{R}/M)T/p$ and $v_o = (\bar{R}/M)T_o/p_o$, so

$$\begin{aligned} p_o(v - v_o) &= \frac{\bar{R}}{M} \left(\frac{p_o T}{p} - T_o \right) \\ &= \frac{8.314}{28.97} \left(\frac{(1.013)(1140)}{7} - 300 \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= -38.75 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Substituting values into the above expression for the specific exergy

$$\begin{aligned} \text{① } e &= (666.28 + (-38.75) - 258.62) \text{ kJ/kg} \\ &= 368.91 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

2.3. Μεταβολή της εξέργειας ενός συστήματος

Σε ένα κλειστό σύστημα η εξέργεια του μπορεί να μεταβληθεί, από μία κατάσταση σε μία άλλη. Αυτή η μεταβολή μπορεί να οφείλεται στην εισροή ή εκροή θερμότητας από το σύστημα, ή και από την παραγωγή ή κατανάλωση έργου. Για να υπολογίσουμε την διαφορά της εξέργειας, βάση μίας μεταβολής του συστήματος, θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση 1, όπου θα την επιλύσουμε για την αρχική (Εξίσωση 13) και τελική κατάσταση (εξίσωση 14).

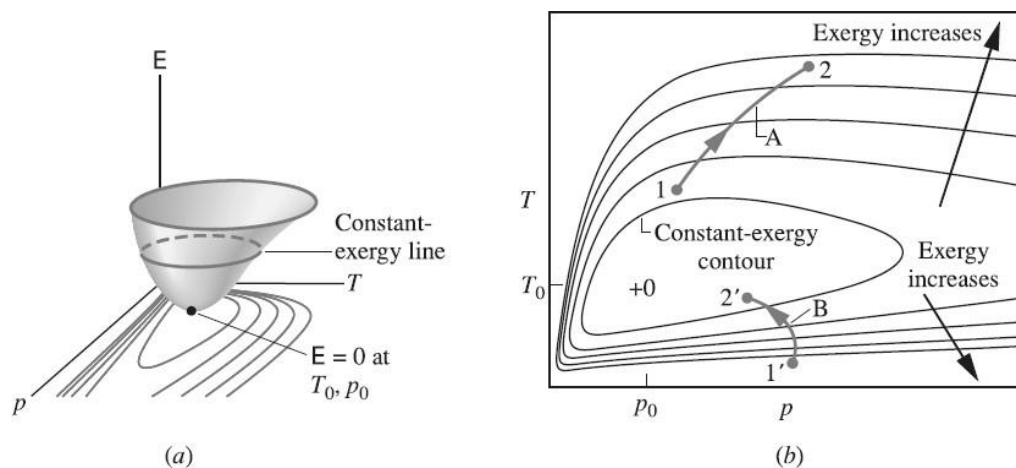
$$E_1 = (U_1 - U_0) + p_0(V_1 - V_0) - T_0(S_1 - S_0) + KE_1 + PE_1 \quad 13$$

$$E_2 = (U_2 - U_0) + p_0(V_2 - V_0) - T_0(S_2 - S_0) + KE_2 + PE_2 \quad 14$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 13 και 14, έχουμε την εξίσωση 15. Στην εξίσωση παρατηρούμε ότι η εσωτερική ενέργεια U_0 , ο όγκος V_0 και η εντροπία S_0 έχουν αφαιρεθεί από την μείξη των δυο εξισώσεων.

$$E_1 - E_2 = (U_1 - U_2) + p_0(V_1 - V_2) - T_0(S_1 - S_2) + (KE_1 - KE_2) + (PE_1 - PE_2) \quad 15$$

Μπορούμε να αποτυπώσουμε την μεταβολή της εξέργειας ενός συστήματος και να την προβάλλουμε στους άξονες θερμοκρασίας και πίεσης. Επίσης η μεταβολή μπορεί να προσδιοριστεί με βάση τις ισο-εξεργειακές καμπύλες. Μπορούμε να δούμε πότε ένα σύστημα προχωράει προς την ελάττωση ή την αύξηση της εξέργειας του, σε σχέση με το dead state T_0 και p_0 .



Σχήμα 4. Αποτύπωση της εξέργειας στους άξονες T και p , και η ισο-εξεργειακή αποτύπωση.

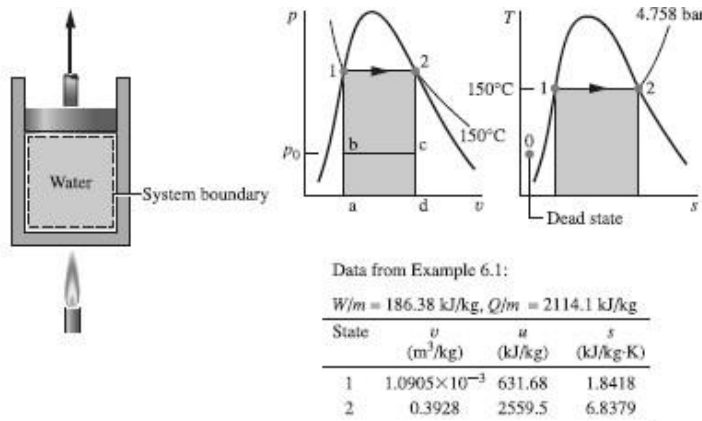
αντίθεση με το έργο που παραμένει αναλλοίωτο ανεξάρτητα από το περιβάλλον να ενεργεί.

$$E_Q = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_o}{T_b}\right) \delta Q = \left[\begin{array}{l} \text{ροή εξέργειας} \\ \text{μέσω θερμότητας} \end{array} \right] \quad 17$$

$$E_W = W - p_o (V_2 - V_1) = \left[\begin{array}{l} \text{ροή εξέργειας} \\ \text{μέσω έργου} \end{array} \right] \quad 18$$

Παράδειγμα 3

Νερό αρχικά σε κορεσμένη υγρή μορφή στους 150 °C (423,15 K) εμπεριέχεται σε έναν κύλινδρο. Το νερό θερμαίνεται ως την κορεσμένη αέρια κατάσταση υπό σταθερή πίεση. Η θερμοκρασία και η πίεση του περιβάλλοντος είναι $T_0 = 20\text{ °C}$ και $p_0 = 1\text{ bar}$, ενώ θεωρούμε ότι η κίνηση και η βαρύτητα δεν επηρεάζουν την κατάσταση του νερού. Να υπολογιστεί a) ειδική η μεταβολή της ειδικής εξέργειας, b) η μεταφορά της εξέργειας μέσω θερμότητας ανά kg, c) η μεταφορά της εξέργειας λόγω έργου ανά kg και c) και η καταστροφή της εξέργειας ανά kg.



Engineering Model:

1. The water in the piston-cylinder assembly is a closed system.
2. The process is internally reversible.
3. Temperature and pressure are constant during the process.
4. Ignore the effects of motion and gravity.
5. $T_0 = 293.15\text{ K}$, $p_0 = 1\text{ bar}$.

Fig. E7.2

Analysis:

(a) Using Eq. 7.3 together with assumption 4, we have per unit of mass

$$e_2 - e_1 = u_2 - u_1 + p_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) \quad (\text{a})$$

With data from Fig. E7.2

$$\begin{aligned} e_2 - e_1 &= (2559.5 - 631.68) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left(1.0 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) (0.3928 - (1.0905 \times 10^{-3})) \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \\ &\quad - 293.15 \text{ K} (6.8379 - 1.8418) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\ &= (1927.82 + 39.17 - 1464.61) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 502.38 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

(b) Noting that temperature remains constant, Eq. 7.5, on a per unit of mass basis, reads

$$\frac{E_q}{m} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \frac{Q}{m} \quad (\text{b})$$

With $Q/m = 2114.1\text{ kJ/kg}$ from Fig. E7.2

$$\frac{E_q}{m} = \left(1 - \frac{293.15 \text{ K}}{423.15 \text{ K}}\right) \left(2114.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = 649.49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

(c) With $W/m = 186.38\text{ kJ/kg}$ from Fig. E7.2 and $p_0(v_2 - v_1) = 39.17\text{ kJ/kg}$ from part (a), Eq. 7.6 gives, per unit of mass,

$$\begin{aligned} \frac{E_w}{m} &= \frac{W}{m} - p_0(v_2 - v_1) \\ &= (186.38 - 39.17) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 147.21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned} \quad (\text{c})$$

(d) Since the process is internally reversible, the exergy destruction is necessarily zero. This can be checked by inserting the results of parts (a)–(c) into an exergy balance. Thus, solving Eq. 7.4b for the exergy destruction per unit of mass, evaluating terms, and allowing for roundoff, we get

$$\begin{aligned} \frac{E_d}{m} &= -(e_2 - e_1) + \frac{E_q}{m} - \frac{E_w}{m} \\ &= (-502.38 + 649.49 - 147.21) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 0 \end{aligned}$$

3.2. Εξεργειακή ισχύς κλειστού συστήματος

Αναλόγως την εφαρμογή μπορούμε να κάνουμε χρήση της εξεργειακής ανάλυσης, βασισμένη στην εξέργεια ως ποσότητα ή την ειδική ποσότητα (ειδική εξέργεια) ή ως εξεργειακή ισχύς. Η εξεργειακή ισχύς ενός κλειστού συστήματος αποδίδεται μέσω της εξίσωσης 19.

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) Q_j - \left(W - p_o \frac{dV}{dt}\right) - E_d \quad 19$$

Ο αριστερός όρος της ισότητας είναι ο ρυθμός μεταβολής της εξέργειας και ο άκρα-δεξιός όρος (E_d) είναι ο ρυθμός καταστροφής της εξέργειας. Στην περίπτωση που αναλύουμε το σύστημα υπό σταθερή λειτουργία, η εξίσωση 19 μεταβάλλεται στη εξίσωση 20.

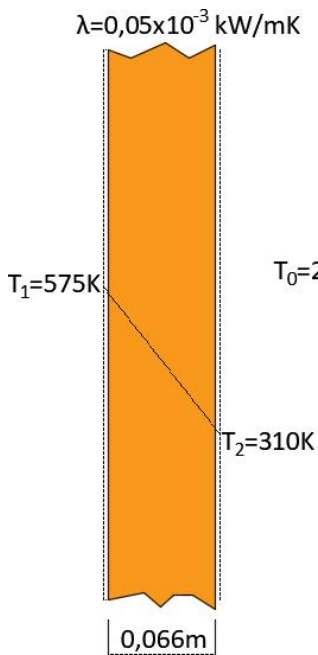
$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) Q_j - W - E_d \quad 20$$

3.3. Εξεργειακή καταστροφή και απώλειες

Σε πολλά συστήματα μετατροπής ενέργειας καταναλώνουμε ορυκτά καύσιμα. Η θερμοκρασία κατά την καύση του καύσιμου μπορεί να είναι αρκετά ψηλότερη από την απαιτούμενη για την διεργασία. Ως αποτέλεσμα έχουμε δημιουργία αρκετής εξέργειας όπου αναγκαστικά θα κάνουμε χρήση ένα μέρος αυτής. Επίσης, με την υψηλότερη θερμοκρασία κατά την καύση ενός καύσιμου αυξάνονται και οι ενεργειακές απώλειες (μη αντιστρέψιμα). Μέσω της εξεργειακής ανάλυσης, μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε τα συστήματα παραγωγής ενέργειας κάνοντας ορθότερη χρήση των πόρων που έχουμε διαθέσιμους (συνδυασμός θερμοκρασίας καύσης και κατανάλωσης πχ.).

Παράδειγμα 4

Τα πλαϊνά τοιχώματα ενός ατμολέβητα είναι κατασκευασμένα από θερμική μόνωση πάχους 0,066 m και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda=0,05 \times 10^{-3}$ kW/mK, η μόνωση είναι εγκιβωτισμένη με λαμαρίνα και από τις δυο πλευρές. Υπό σταθερή λειτουργία η θερμοκρασία στο εσωτερικό τοίχωμα του ατμολέβητα έχει μετρηθεί $T_1=575$ K και η εξωτερική στα $T_2=310$ K. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντα χώρου έχει μετρηθεί στα 293 K. Να υπολογιστεί σε kW/m² του τοιχώματος: α) η θερμή ισχύς που διαφεύγει από τα τοιχώματα, β) η εξεργειακή ροή με βάση την θερμότητα που διαπερνάει την εσωτερική και την εξωτερική επιφάνεια των τοιχωμάτων, γ) ο ρυθμός καταστροφής της εξέργειας στα τοιχώματα.



α) Υπό σταθερή κατάσταση λειτουργίας η θερμική ροή από τα τοιχώματα είναι:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\frac{\lambda}{L}(T_2 - T_1) = -\left(\frac{0.05 \times 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{mK}}}{0.066 \text{m}}\right) \cdot (310 - 575 \text{K}) = 0.2 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Προσοχή: η ροή θερμότητας θα είναι ίση και από τις δύο πλευρές.

β) η εξεργειακή ροή που εξέρχεται στην εσωτερική πλευρά του ατμολέβητα μέσω της θερμότητας είναι:

$$\frac{\dot{E}_{q1}}{A} = \left[1 - \frac{T_0}{T_1}\right] \frac{\dot{Q}}{A} = \left[1 - \frac{293}{575}\right] \cdot 0.2 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} = 0.1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

β) η εξεργειακή ροή που εξέρχεται στην εξωτερική πλευρά του ατμολέβητα μέσω της θερμότητας είναι:

$$\frac{\dot{E}_{q2}}{A} = \left[1 - \frac{T_0}{T_2}\right] \frac{\dot{Q}}{A} = \left[1 - \frac{293}{310}\right] \cdot 0.2 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} = 0.01 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

γ) ο ρυθμός καταστροφής της εξεργειακής ροής εντός των τειχών υπολογίζεται γνωρίζοντας ότι το :

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W} - \dot{E}_d \quad \Rightarrow$$

$$\frac{\dot{E}_d}{A} = \frac{\dot{E}_{q1}}{A} - \frac{\dot{E}_{q2}}{A} = (0.1 - 0.01) \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} = 0.09 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Η εξεργειακή ανάλυση μας έδωσε μια αληθή εικόνα σχετικά με τις απώλειες θερμότητας. Η καταστροφή της εξεργειακής ισχύος δηλώνει την εισαγωγή της αντιστρεψιμότητας που διαπράττουμε καίγοντας το καύσιμο και παράγοντας θερμοκρασία υψηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία απ' όπου διαπερνάει η θερμότητα κατά τη ροή της, τόσο αυξάνεται και η καταστροφή της εξεργειακής ισχύος.

$$\frac{\dot{E}_{q2}}{A} = \left[1 - \frac{T_0}{T_2}\right] \frac{\dot{Q}}{A} \quad \text{Ποια θερμοκρασία πρέπει να έχει η πηγή θέρμανσης των κτηρίων;}$$

3.4. Εξεργειακό ισοζύγιο ενός συστήματος

Με το εξεργειακό ισοζύγιο, καταγράφουμε τα επί μέρους ποσά της εξέργειας, αυτά που εισέρχονται, φεύγουν, αποθηκεύονται και καταστρέφονται. Με αυτόν το τρόπο έχουμε την πλήρη εικόνα της εξέργειας σε ένα σύστημα. Για την καλύτερη κατανόησή της υποθέσουμε το εξεργειακό ισοζύγιο ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού, Πίνακας 1. Στον πίνακα έχουμε το 100 % της εξέργειας που προσφέρεται μέσω του ορυκτού καυσίμου (natural gas etc.). Αυτό το συνολικό 100 % καταναλώνεται στις επιμέρους διεργασίες του σταθμού. **Ως στόχο, έχουμε το να παραλάβουμε το μεγαλύτερο δυνατόν ποσό μηχανικού έργου**, αυτό θα μας δώσει τον ηλεκτρισμό. Οπότε επεμβαίνοντας στα στοιχεία που καταστρέφεται η εξέργεια, μπορούμε να έχουμε μεγαλύτερο κέρδος από το δυνητικά διαθέσιμο (εξέργεια). Είναι σημαντικό, να πούμε ότι το ενεργειακό ισοζύγιο στην παρούσα εγκατάσταση θα είχε διαφορετική μορφή.

Πίνακας 1. Εξεργειακό ισοζύγιο ατμοηλεκτρικού σταθμού

ΑΗΣ εξεργειακό ισοζύγιο	
Προϊόντα	
Μηχανικό έργο	30%
Απώλειες στον σύστημα ψύξης, απόρριψη στο περιβάλλον	1%
Απώλειες από καμινάδα	1% (υποθέτουμε)
Εξεργειακή καταστροφή	
Ατμολέβητα - καύση	30% (υποθέτουμε)
Ατμολέβητα -Ε.Θ	30%
Ατμοστρόβιλος	5%
Αντλία	-
Συμπυκνωτής	3%
Σύνολο	100%

4. Ισορροπία εξεργειακής ισχύος εντός όγκου ελέγχου (ανοιχτά συστήματα)

Η πλειοψηφία των συστημάτων στην μηχανική μπορούν να χαρακτηριστούν ως ανοιχτά. Από αυτή την οπτική, η μελέτη της ροής της εξεργειας έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η νέα οντότητα που εισάγουμε στην μελέτη ισορροπίας της εξεργειακής ισχύος στα ανοιχτά συστήματα είναι η ροή εξεργειας μέσω της αλλαγής της μάζας του συστήματος. Μέσω της εξίσωσης 21 μπορούμε να υπολογίσουμε τη μεταβολή της εξεργειας εντός ενός όγκου ελέγχου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η εξίσωση 19 όπου μελετάμε τα κλειστά συστήματα, είναι μία ειδική περίπτωση της μελέτης των ανοιχτών συστημάτων παραλείποντας τη ροή μάζας από και προς το σύστημα.

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) Q_j - \left(W - p_o \frac{dV}{dt}\right) + \sum_i m_i e_{fi} - \sum_e m_e e_{fe} - E_d \quad 21$$

Στην εξίσωση 21, το υπογραμμισμένο μέρος είναι η ροή της ενέργειας από και προς το σύστημα. Στην περίπτωση όπου το σύστημα δεν μεταβάλλεται στον χρόνο (steady state $dE/dt=0$), η ισορροπία της εξεργειας στο ανοιχτό σύστημα μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης 22.

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) Q_j - W + \sum_i m_i e_{fi} - \sum_e m_e e_{fe} - E_d \quad 22$$

Όπως αναφέραμε, ο νέος όρος στις εξισώσεις μας είναι η ροή της εξεργειας μέσω της ροής της μάζας, αυτό το ονομάζουμε **ειδική εξεργειακή ροή (e_f)**. Η εξίσωση 23 μας δίνει την ειδική εξεργειακή ροή.

$$e_f = (h - h_o) - T_o(s - s_o) + \frac{V^2}{2} + gz \quad 23$$

Σε αυτό το σημείο, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι, η ειδική εξεργειακή ροή είναι η ποσότητα της ειδικής εξεργειας που έχουμε υπολογίσει μέσω της εξίσωσης 12, με την μόνη διαφορά ότι η εξίσωση 12 δεν περιέχει την εξεργεια που εισέρχεται ως ροή έργου. Έτσι, η σχέση 24 μας δίνει την ισότητα που συνδέει την ειδική εξεργειακή ροή και την ειδική εξεργεια. Ο όρος $v(p-p_o)$ είναι το έργο που συνοδεύει των ρευστό και αξιολογείται με βάση το περιβάλλον.

$$e_f = e + v(p - p_o) \quad 24$$

Επίσης είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι, στην εξίσωση 22, η θερμική ισχύς δεν είναι πλέον αυτούσια αλλά για να μετατραπεί σε εξεργεια που μεταφέρεται μέσω της θερμικής ισχύος πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση 25. Επίσης, αντίστοιχα για την εξεργειακή ισχύς που εισέρχεται και εξέρχεται από το σύστημα με την ροή μάζας θα πρέπει να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης 26.

$$E_{qj} = \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) Q_j \quad 25$$

$$E_f = m e_f \quad 26$$

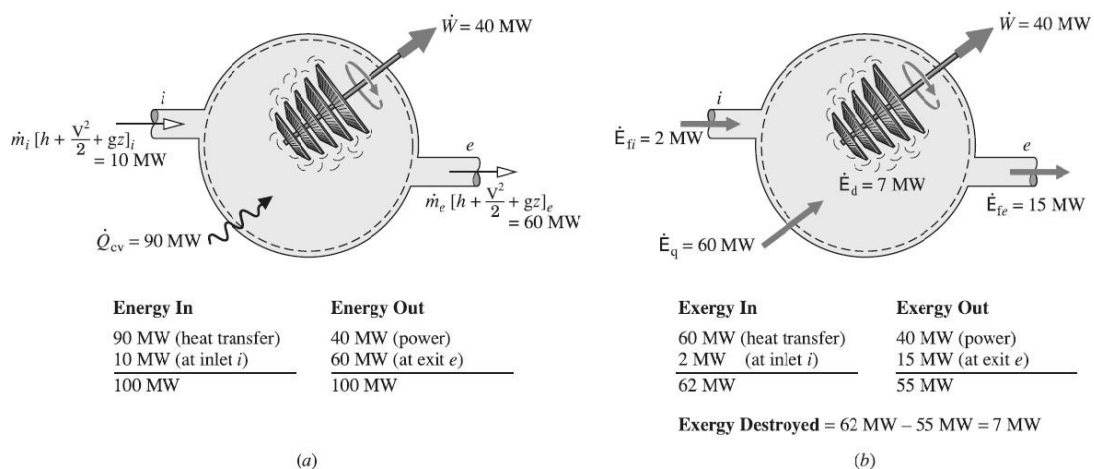
4.1. Σύγκριση Ενεργειακής και Εξεργειακής ανάλυσης σε όγκο ελέγχου υπό σταθερή κατάσταση λειτουργίας.

Αν και η ενέργεια και η εξέργεια έχουν τις ίδιες μονάδες (kJ, kWh), και η ροή της εξέργειας συμβαίνει ταυτόχρονα με την ροή ενέργειας, παρόλα αυτά, οι δύο οντότητες βασίζονται σε διαφορετικές αρχές. Έτσι η ενεργειακή ανάλυση είναι βασισμένη στο πρώτο Θ.Α. και η εξεργειακή ανάλυση στο δεύτερο Θ.Α.

- Η ενέργεια διατηρείται σε αντίθεση με την εξέργεια που καταστρέφεται
- Με την εξέργεια αποδίδεται το έργο, η θερμότητα, η ροή μάζας που μπορεί να μετατραπεί σε καθαρό έργο και αυτά όλα με βάση το περιβάλλον που υπάρχει το σύστημα και λειτουργεί

Για να γίνουν κατανοητά τα παραπάνω, θα δώσουμε ένα παράδειγμα: Στο Σχήμα 5 βλέπουμε την μεταφορά ισχύος σε ένα όγκο ελέγχου με μία είσοδο και μία έξοδο, υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας (steady state). Το σύστημα βλέπουμε να έχει μεταφορά ισχύος μέσω θερμότητας, έργου και μέσω μεταφοράς μάζας όπου εισέρχεται και εξέρχεται από το όριο του. Στο Σχήμα 5, στο a μέρος βλέπουμε την ενεργειακή ανάλυση και στο μέρος b βλέπουμε την εξεργειακή ανάλυση, τα δύο μέρη είναι ίδια απλώς αλλάζουμε την ανάλυση. Στα δύο σχήματα, μπορούμε να προσέξουμε ότι: το μέγεθος της ενέργειας που εισέρχεται και εξέρχεται είναι διαφορετικό από το μέγεθος της εξέργειας που εισέρχεται και εξέρχεται. Αντίστοιχα και η θερμική ισχύς που εισέρχεται είναι διαφορετική από την Εξέργεια όπου εισέρχεται μέσω της θερμικής ισχύος. Σε αντίθεση, το έργο έχει το ίδιο μέγεθος και στις δυο αναλύσεις (η εξέργεια είναι εξ ορισμού το έργο και δεν απαιτείτε μετατροπή από το ενεργειακό φάσμα). Η εξέργεια που εισέρχεται μέσω της θερμικής ισχύος υπολογίζεται με την εξίσωση 25 και αντίστοιχα η εξέργεια που εισέρχεται και εξέρχεται από τον όγκο υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης 26. Μελετώντας την ενεργειακή ανάλυση βλέπουμε ότι το ισοζύγιο εισόδου και εξόδου είναι το ίδιο μέγεθος 100 MW. Σε αντίθεση, το εξεργειακό ισοζύγιο μας επιδεικνύει ότι στο σύστημα μας καταστράφηκαν 7 MW εξέργειας, το οποία δεν χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή έργου.

Το Σημαντικό συμπέρασμα: « η εξεργειακή ανάλυση μας δίνει μία καλύτερη εικόνα για την απόδοση του συστήματος σε σύγκριση με την ενεργειακή, για τον λόγο ότι, συμπεριλαμβάνει άμεσα τις μη αντιστρεψιμότητες »



Σχήμα 5. Σύγκριση της ενεργειακής (a) και της εξεργειακής (b) ανάλυσης.

4.2. Αξιολογώντας την καταστροφή της εξέργειας εντός του όγκου ελέγχου υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας.

Με το ακόλουθο παράδειγμα, βλέπουμε πως με την χρήση του ισοζυγίου της ροής μάζας, ενέργειας και εξέργειας μπορούμε να αξιολογήσουμε την καταστροφή της εξέργειας εντός του όγκου ελέγχου υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Στο παρακάτω παράδειγμα βλέπουμε έναν εναλλάκτη θερμότητας, από ενεργειακής άποψης ο εναλλάκτης δεν έχει απώλειες ενεργειακές, αλλά από εξεργειακής άποψης υπάρχουν μη αντιστρεψιμότητες.

Παράδειγμα 5

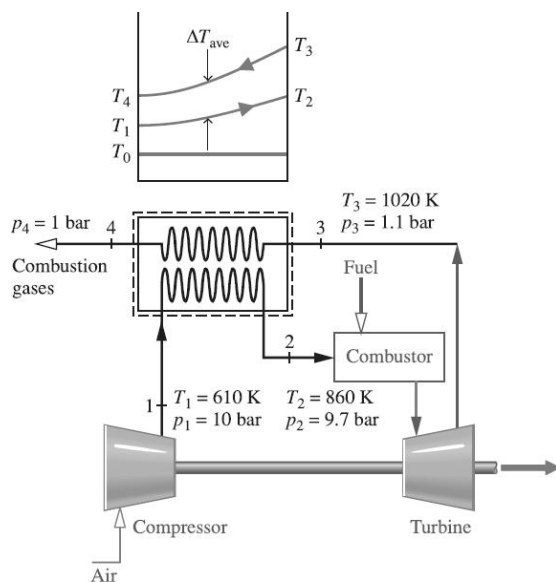
Καταστροφή εξέργειας σε εναλλάκτη θερμότητας.

Συμπιεσμένος αέρας εισέρχεται σε εναλλάκτη αντί-ροής, όπου λειτουργεί υπό σταθερές συνθήκες στα 610 K, 10 bar και εξέρχεται στα 860 K, 9.7 bar. Θερμά καυσαέρια εισέρχονται στο δεύτερο ρεύμα του εναλλάκτη με 1020 K, 1.1 bar και εξέρχονται στο 1 bar. Και τα δύο ρεύματα, αέρα και καυσαερίων, έχουν ίση παροχή μάζας 90 kg/s. Η μεταφορά θερμότητας από τον εναλλάκτη στο περιβάλλον μπορεί να αγνοηθεί, καθώς και η δυναμική και η κινητική ενέργεια. Επίσης, να υποθέσουμε ότι τα καυσαέρια μπορούν να αξιολογηθούν με τις ιδιότητες του αέρα και ότι, και οι δύο ροές μπορούν να εκτιμηθούν ως ιδανικά αέρια.

Να υπολογιστούν για συνθήκες περιβάλλοντος $T_0 = 300$ K, $p_0 = 1$ bar:

1. Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων
2. Η καθαρή μεταβολή της εξέργειας από τις εισόδους στις εξόδους και των δύο ροών
3. Η εξεργειακή ισχύς που καταστρέφεται εντός του εναλλάκτη σε MW

Επίλυση:



Σχετικά με την απάντηση στο ερώτημα 1, η ενεργειακή ισορροπία στον εναλλάκτη προκύπτει να είναι ότι η θερμότητα που θα δώσει το ρεύμα των καυσαερίων θα προσληφθεί εξολοκλήρου από το ρεύμα του αέρα, μιας και δεν έχουμε απώλειες προς το περιβάλλον και η δυναμική και κινητική ενέργεια δεν λαμβάνονται υπόψιν.

$$0 = \dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{m}(h_3 - h_4)$$

Από τον πίνακά ιδιοτήτων του αέρα A-22, εντοπίζουμε όλες τις ενθαλπίες εκτός της 4, όπου και θα λύσουμε την παραπάνω εξίσωση για να την υπολογίσουμε. (h_1 617.53 kJ/kg, h_2 888.27 kJ/kg, h_3 1068.89 kJ/kg).

$$h_4 = 1068.89 + 617.53 - 88.27 = 798.15 \text{ kJ/kg}$$

Από τον πίνακα A-22 (ιδιοτήτων αέρα), την ειδική ενθαλπία 4 θα την υπολογίσουμε μέσω γραμμικής παρεμβολής με την θερμοκρασία να είναι **505 °C**.

Σχετικά με το 2^ο ερώτημα: η απάντηση θα δοθεί επιλύοντας την εξίσωση 23 όπου θα μας δώσει την ειδική ροή της εξέργειας στην είσοδο και στην έξοδο. Μετά πολλαπλασιάζοντας με την ροή της μάζας (ανά sec) θα έχουμε την εξεργειακή ισχύς εισόδου και εξόδου, όπου η διαφορά τους μας προσφέρει την απάντηση στο ερώτημα.

Για το ρεύμα του αέρα:

$$\begin{aligned} \dot{m}(e_{f2} - e_{f1}) &= \dot{m}[(h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1)] \\ &= \dot{m}[(h_2 - h_1) - T_0(s_2^o - s_1^o - R \ln \frac{P_2}{P_1})] \\ &= 90 \text{kg/s} [(888.27 - 617.53) - 300 \text{K} (2.79783 - 2.42644 - \frac{8.314}{28.97} \ln \frac{9.7}{10}) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}] \\ &= 14103 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 14.1 \text{MW} \end{aligned}$$

Για το ρεύμα των καυσαερίων:

$$\begin{aligned} \dot{m}(e_{f4} - e_{f3}) &= \dot{m}[(h_4 - h_3) - T_0(s_4 - s_3)] \\ &= 90 \text{kg/s} [(798.15 - 1068.89) - 300 \text{K} (2.68769 - 2.99034 - \frac{8.314}{28.97} \ln \frac{1}{1.1}) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}] \\ &= -16934 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = -16.93 \text{MW} \end{aligned}$$

Σημείωση:

- s^o είναι ένα μέγεθος συσχετισμένο με την εντροπία που το παίρνουμε από πίνακες, το μέγεθος αυτό μας βοηθάει να υπολογίσουμε την εντροπία στα ιδανικά αέρια (A-22).
- Για να υπολογίσω το R του αερίου που θα μελετήσω, θα διαιρέσω την παγκόσμια σταθερά των αερίων με το μοριακό βάρος του αερίου.

Η απάντηση στο 3^ο ερώτημα είναι:

$$\begin{aligned} 0 &= \sum_j (1 - \frac{T_0}{T_j}) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \dot{m}(e_{f3} - e_{f4}) - \dot{m}(e_{f2} - e_{f1}) - \dot{E}_d \\ \dot{m}(e_{f3} - e_{f4}) - \dot{m}(e_{f2} - e_{f1}) - \dot{E}_d &= 0 \\ 16.93 \text{MW} - 14.1 \text{MW} &= \dot{E}_d = 2.83 \text{MW} \end{aligned}$$

(σημείωση $\dot{E}_d = T_0 \sigma_{cv}$ παραγωγή εντροπίας)

Ως συμπέρασμα θα μπορούσαμε να πούμε ότι, ενεργειακά δεν φαίνεται να χάνουμε κάτι από την διαδικασία της μεταφοράς θερμότητας στο εναλλάκτη, αλλά εξεργειακά 2.83 MW εξέργειας καταστρέφονται, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή έργου.

4.3. Εξεργειακή λογιστική ανάλυσης σε όγκο ελέγχου υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας

Θα προσπαθήσουμε να δούμε την λογιστική ανάλυση της εξέργειας ενός συστήματος μέσω ενός παραδείγματος.

Παράδειγμα 6

Εξεργειακή λογιστική ανάλυση εντός ατμοστρόβιλου.

Ατμός εισέρχεται σε στρόβιλο με πίεση 30 bar, θερμοκρασία 400 °C και ταχύτητα 160 m/s. Ο ατμός εξέρχεται από τον στρόβιλο ως κορεσμένος ατμός με θερμοκρασία 100 °C και ταχύτητα 100 m/s. Σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας ο ατμοστρόβιλος αναπτύσσει ειδικό έργο 540 kJ / kg από τον ατμό που διέρχεται από μέσα του. Μεταφορά ειδικής θερμότητας από τον στρόβιλο στο περιβάλλον είναι 22.6 kJ/kg και η μεταφορά διεξάγεται σε μέση θερμοκρασία 350 K. Να διεξάγουμε λογιστική ανάλυση της εξέργειας στον ατμοστρόβιλο, λαμβάνοντας ως θερμοκρασία εξεργειακού περιβάλλοντος τους 25 οC και πίεση $p_0 = 1 \text{ atm}$.

Για την επίλυση του προβλήματος θα πρέπει να έχουμε ως εικόνα την εξίσωση 22:

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) Q_j - W + \sum_i m_i e_{fi} - \sum_e m_e e_{fe} - E_d$$

Στην ανώτερη εξίσωση, ο άγνωστος είναι η ροή εξεργειακής ισχύος που εισέρχεται και εξέρχεται από τον στρόβιλο και η καταστροφή της εξεργειακής ισχύος E_d .

Όποτε, θα υπολογίσουμε σε πρώτη φάση την εισροή και εκροή της εξεργειακής ισχύος μέσω της εξίσωσης 23 (τις ενθαλπίες και τις εντροπίες τις πήραμε από πίνακες A4 και A2).

$$e_f = (h - h_o) - T_o(s - s_o) + \frac{V^2}{2} + gz$$

$$e_{f1} - e_{f2} = (h_1 - h_2) - T_o(s_1 - s_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right) + g(z_1 - z_2)$$

$$e_{f1} - e_{f2} = \left[(3230.9 - 2676.1) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 298(6.9212 - 7.3549) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left[\frac{160^2 - 100^2}{2} \right] \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \left[\frac{1\text{N}}{1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2}, \frac{1\text{kJ}}{10^3\text{N} \cdot \text{m}} \right] \right]$$

$$= 691.84 \text{kJ} / \text{kg}$$

Η εξέργεια που φεύγει από το σύστημα μέσω των απωλειών θερμότητας είναι:

$$\frac{\dot{E}_j}{\dot{m}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \frac{\dot{Q}_j}{\dot{m}}$$

$$= \left(1 - \frac{298}{350}\right) \cdot \left(-22.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$= -3.36 \text{kJ} / \text{kg}$$

Και η καταστροφή της εξεργειακής ισχύος:

$$\frac{\dot{E}_d}{\dot{m}} = \left(1 - \frac{T_o}{T_b}\right) \frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}}{\dot{m}} + (e_{f1} - e_{f2})$$

$$\frac{\dot{E}_d}{\dot{m}} = -3.36 - 540 + 691.84 = 148.48 \text{ kJ / kg}$$

Και την λογιστική της εξεργειακής ανάλυσης:

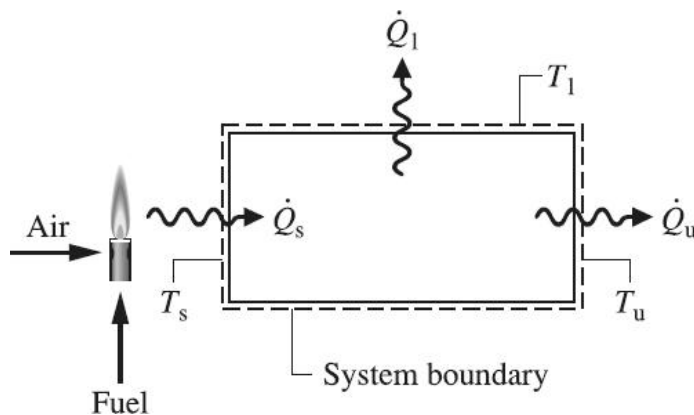
Η εξέργεια που εισέρχεται	691.84 kJ/kg	100%
Η εξέργεια που μετατρέπεται σε έργο	540.00 kJ/kg	78.05%
Η εξέργεια που διαφεύγει ως θερμότητας	3.36 kJ/kg	0.49%
Ο ρυθμός καταστροφής της <u>εξέργειας</u>	148.48 kJ/kg	21.46%
	691.84 kJ/kg	100%

5. Εξεργειακή απόδοση (second law efficiency)

Με το βαθμό της εξεργειακής απόδοσης μπορούμε να αξιολογήσουμε ένα σύστημα ή την μετατροπή ενέργειας, κατά το πόσο αποδοτικά λειτουργεί ή διεξάγεται ή μεταβολή. Αυτό που θα δείξουμε σε αυτό το κεφάλαιο είναι ο δείκτης που μπορεί να αξιολογήσει ένα σύστημα στο σύνολο του, όπου μπορεί να έχει πολλές μορφές ενέργειας (ηλεκτρισμό, θερμότητα, κινητική κτλ.). Ο όρος: second law efficiency είναι συνώνυμο της εξεργειακής απόδοσης.

5.1. Σύνδεση της πηγής με τον τελικό χρήστη

Σύστημα όπως είναι αυτά των θερμοηλεκτρικών σταθμών και της θέρμανσης κτηρίων, απαιτούν την καύση ορυκτών καυσίμων, όπως είναι το φυσικό αέριο, λιγνίτης και το πετρέλαιο. Για παράδειγμα Σχήμα 6, έχουμε την καύση όπου αποδίδει στο σύστημα θερμότητα \dot{Q}_s με θερμοκρασία στην επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας T_s , η χρήσιμη θερμότητα \dot{Q}_u αποδίδεται σε θερμοκρασία T_u και τέλος, έχουμε τις θερμικές απώλειες του συστήματος \dot{Q}_l όπου λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασία T_l . Αν το Σχήμα 6 αναπαριστά ένα σύστημα θέρμανσης, το T_s ή θερμοκρασία καύσης του καύσιμου, η θερμοκρασία T_u είναι αυτή που απαιτείται για την θέρμανση του κτηρίου και η θερμοκρασία T_l είναι η θερμοκρασία που έχουν οι τοίχοι του κτηρίου.



Σχήμα 6. Καύση ορυκτού καυσίμου και χρήση της θερμότητας

Για το σύστημα του Σχήμα 6:

Η **ενεργειακή** ισορροπία του συστήματος σε σταθερή λειτουργία και χωρίς παρουσία έργου είναι:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_s - \dot{Q}_u - \dot{Q}_l - W$$

Η **εξεργειακή** ισορροπία του συστήματος, υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας και με παρουσία μόνο θερμότητας είναι:

$$\frac{dE_{ex}}{dt} = \left(1 - \frac{T_o}{T_s}\right) \dot{Q}_s - \left(1 - \frac{T_o}{T_u}\right) \dot{Q}_u - \left(1 - \frac{T_o}{T_l}\right) \dot{Q}_l - [W - p_o \frac{dV}{dt}] - E_d$$

Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης (η) του συστήματος είναι:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_s}$$

Ο εξεργειακός βαθμός (ε) του συστήματος είναι:

$$\varepsilon = \frac{\left(1 - \frac{T_o}{T_u}\right) Q_u}{\left(1 - \frac{T_o}{T_s}\right) Q_s}$$

Με βάση την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι:

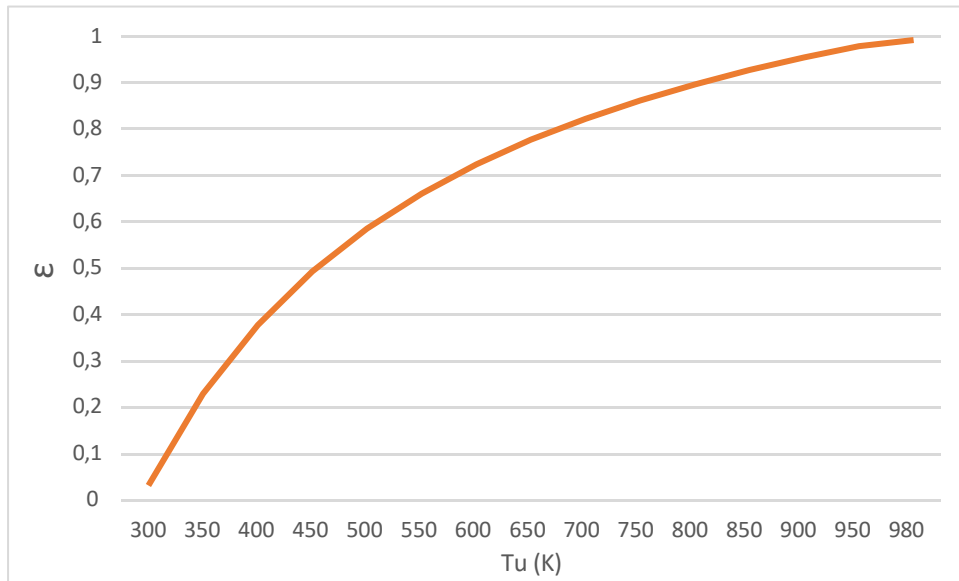
$$\varepsilon = \eta \cdot \frac{\left(1 - \frac{T_o}{T_u}\right)}{\left(1 - \frac{T_o}{T_s}\right)}$$

27

Στην εξίσωση 27, βλέπουμε ότι: ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι το γινόμενο του ενεργειακού βαθμού απόδοσης και ενός κλάσματος που αξιολογεί το εξεργειακό αποτέλεσμα του συστήματος.

«Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι ένας δείκτης όπου: μας δηλώνει πόσο αποδοτικά έχει μετατραπεί η ενέργεια σε σχέση με το μέγιστο έργο που μπορούμε να πάρουμε από αυτήν».

Αυτό που επιδιώκουμε στα συστήματα είναι να έχουν το μέγιστο ενεργειακό βαθμό απόδοσης (ο οποίο λαμβάνει τιμές από 0 ως 1). Αλλά ακόμα και ενεργειακός βαθμός απόδοσης να είναι 1, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης θα είναι μικρότερος. Η αξιολόγηση της εξεργειακής χρήσης του συστήματος έγκειται στο λόγο της εξίσωσης 27, όπου αν η θερμοκρασία T_u και T_s έχουν την ίδια τιμή, τότε έχουμε τον μέγιστο εξεργειακό βαθμό απόδοσης. Αυτό το βλέπουμε και στο Σχήμα 7, όπου έχουμε τυπώσει τον εξεργειακό βαθμό του συστήματος, για ενεργειακό βαθμό απόδοσης $\eta=1$ και μεταβάλλοντας την θερμοκρασία που κάνουμε χρήση της θερμότητας, η θερμοκρασία καύσης παραμένει σταθερή. Παρατηρούμε ότι: α) ο ε αποκτάει τις μέγιστες τιμές του όταν η δύο θερμοκρασίες (T_s και T_u) προσεγγίζουν την ίδια τιμή 1000 K, β) είναι σκόπιμο τα συστήματα που έχουν καύση και κατά συνέπεια έχουν υψηλή θερμοκρασία εισόδου της θερμότητας στο σύστημα, να χρησιμοποιούνται για βιομηχανικές εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή θερμοκρασία για την παραγωγή ατμού πχ. Παρατηρήστε, για την θερμοκρασία θέρμανσης κτηρίων (300-350 K) πόσο χαμηλός είναι ο βαθμός εξεργειακής απόδοσης.



Σχήμα 7. Εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος Σχήμα 6, ως συνάρτηση της θερμοκρασία του φορτίου T_u και με σταθερή θερμοκρασία καύσης $T_s = 1000$ K.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι: είναι σημαντικό να έχουμε τον μέγιστο ενεργειακό βαθμό απόδοσης του συστήματος, αλλά για να έχουμε και την καλύτερη χρήση της ενέργειας θα πρέπει να ταιριάζουμε την παραγωγή της θερμότητας με την κατανάλωση της στο πεδίο της θερμοκρασίας.

5.2. Εξεργειακή απόδοση κοινών εξαρτημάτων

Σε αυτήν την ενότητα θα αναφέρουμε τις εξισώσεις για των υπολογισμό του εξεργειακού βαθμού απόδοσης των συνηθέστερων εξαρτημάτων.

5.2.1 Στρόβιλοι

Σε σταθερή λειτουργία, οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον είναι αμελητέες.

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) Q_j - W + \sum_i m_i e_{fi} - \sum_e m_e e_{fe} - E_d$$

Ο βαθμός απόδοσης

$$\varepsilon = \frac{W/m}{e_{f_in} - e_{f_out}}$$

$$e_f = (h - h_o) - T_o(s - s_o) + \frac{V^2}{2}$$

5.2.2 Συμπιεστές και αντλίες

Σε σταθερή λειτουργία, οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον είναι αμελητέες.

$$\varepsilon = \frac{\dot{e}_{f_in} - \dot{e}_{f_out}}{\dot{W}/\dot{m}}$$

Οι αντλίες και οι συμπιεστές είναι μηχανήματα όπου προσλαμβάνουν ενέργεια και αποδίδουν ενέργεια στο ρευστό που συμπιέζουν – κυκλοφορούν.

5.2.3 Εναλλάκτης θερμότητας

Σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας και αγνοώντας τις απώλειες προς το περιβάλλον.

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) Q_j - W_{cv} + m(e_{f3} - e_{f4}) - m(e_{f2} - e_{f1}) - E_d$$

$$\varepsilon = \frac{m_{\text{cold}}(e_{f_{\text{out}}} - e_{f_{\text{in}}})}{m_{\text{hot}}(e_{f_{\text{in}}} - e_{f_{\text{out}}})}$$

6. Θερμοοικονομικά (Thermoconomics)

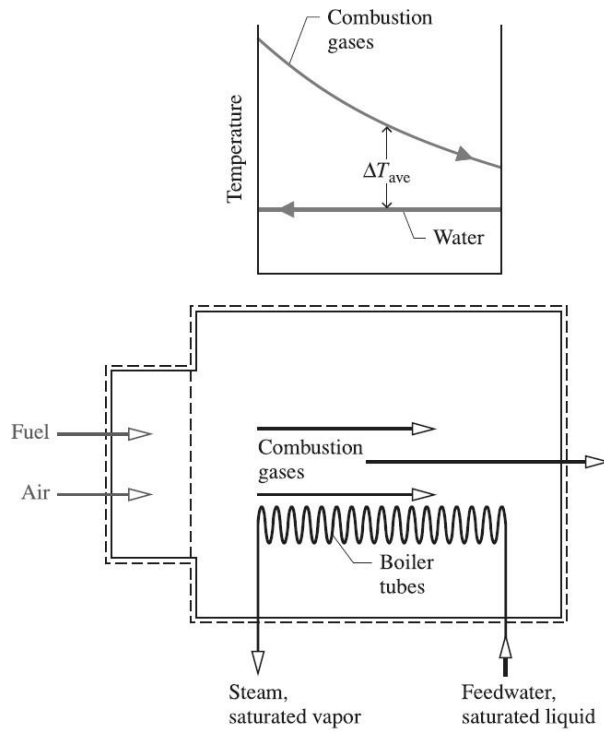
Τα θερμικά συστήματα έχουν να κάνουν με την μεταφορά θερμότητας και έργου από και προς το περιβάλλον. Η ανάλυση τους περιέχει την θερμοδυναμική, την μετάδοση θερμότητας και την ροή των ρευστών, την τεχνολογία των υλικών και της καύσης, καθώς και πολλών άλλων αντικειμένων. Όταν λειτουργεί ένα σύστημα και θέλουμε να βελτιώσουμε την απόδοση του ή όταν θέλουμε να κατασκευάσουμε ένα νέο σύστημα ή μία νέα διαδικασία, αυτά τα κάνουμε ώστε να είναι οικονομικά καλύτερα – βέλτιστα. Η βελτιώσεις να προσφέρουν πχ. χαμηλότερη κατανάλωση καύσιμου ή η διαδικασία να είναι το οικονομικότερο σενάριο από τα διαθέσιμα. Όποτε, θερμοοικονομικά είναι ο κλάδος της μηχανικής που εξετάζει την οικονομική βελτίωση των συστημάτων μέσω της θερμοδυναμική – εξεργειακής αύξησης της απόδοσης τους.

6.1. Χρησιμοποιώντας την Εξέργεια στην σχεδίαση συστημάτων

Για να κατανοήσουμε πώς μπορεί να χρησιμοποιήσουμε την εξέργεια για την σχεδίαση συστημάτων θα κάνουμε ένα λογικό παράδειγμα. Στο Σχήμα 8, έχουμε έναν ατμολέβητα όπου λαμβάνει καύσιμο και αέρα, ο στόχος του είναι να θερμάνει το νερό που μπαίνει μέσω του εναλλάκτη θερμότητας και να το μετατρέψει σε κορεσμένο ατμό.

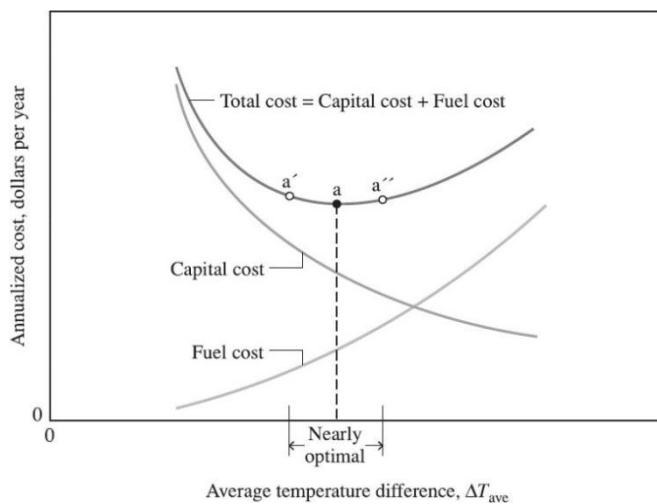
Σε αυτό το σύστημα έχουμε δυο βασικές πηγές μη-αντιστρεψιμότητας: α) την μεταφορά θερμότητας από τα καυσαέρια στο νερό (το έχουμε αναλύσει στο 5.1) και την δημιουργία εντροπίας που παράγεται κατά την καύση (δεν το έχουμε αναλύσει, αλλά συμβαίνει). Ας απλουστεύσουμε το σύστημα του Σχήμα 8, όποτε έχουμε ένα μέρος που καταναλώνουμε καύσιμο (καυστήρας) και έναν εναλλάκτη θερμότητας που μεταφέρεται η θερμότητα από τα καυσαέρια στο νερό.

Ας δούμε την αξιολόγηση από την σκοπιά του εναλλάκτη και ποια θα μπορούσε να είναι τα βέλτιστα τεχνικά χαρακτηριστικά του. Ως σχεδιαστική σταθερά βρεχόμαστε την ΔT_{ave} όπου είναι η μέση διαφορά θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του εναλλάκτη θερμότητας (Σχήμα 8). Από την μετάδοση θερμότητας γνωρίζουμε ότι για το ΔT_{ave} έχει άμεση σχέση με την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας που έχει ο εναλλάκτης, όποτε θέλουμε μεγάλη επιφάνεια για μικρό ΔT_{ave} , και κατά συνέπεια μεγαλύτερο αρχικό κόστος του εναλλάκτη (capital cost). Σχετικά με το καύσιμο, αυξάνει η κατανάλωση (fuel cost) του όσο αυξάνει το ΔT_{ave} , για τον λόγο ότι θέλουμε περισσότερη θερμότητα για να μεταφέρουμε την απαιτούμενη ενέργεια στο νερό, ώστε να μετατραπεί σε ατμό.



Σχήμα 8. Σύστημα ατμολέβητα

Με βάση τα παραπάνω, αν κάνουμε ανάλυση για το πρώτο έτος λειτουργίας του συστήματος, το ετήσιο συνολικό κόστος (total cost) είναι το άθροισμα του κόστους καυσίμου και του αρχικού κεφαλαίου. Στο Σχήμα 9, έχουμε τυπώσει το ετήσιο κόστος του καυσίμου, το κόστος αγοράς του ατμολέβητα και το ετήσιο κόστος του συστήματος, ως συνάρτηση του ΔT_{ave} . Στο σχήμα παρατηρούμε ότι το μικρότερο ετήσιο κόστος (a) προκύπτει και μπορεί να επιλεγεί ως το καλύτερο σενάριο. Παρατηρούμε ότι η επιλογή μας μπορεί να κινηθεί εντός πλαισίου από την τιμή a' στην a'' .



Σχήμα 9. Ετήσια Εξεργειακή-οικονομική ανάλυση ατμολέβητα

7. Παραδείγματα: εξεργειακή ανάλυση συστημάτων

7.1. Εξεργειακή ανάλυση συστήματος αντλίας θερμότητας αβαθούς γεωθερμίας

Μια γεωθερμική αντλία θερμότητας λειτουργεί υπό σταθερές συνθήκες με ψυκτικό ρευστό λειτουργίας το R134a. Θερμότητα που αποδίδει στο συμπυκνωτή η αντλία θερμότητας είναι $10 \text{ kW}_{\text{th}}$, και η πηγή της θερμότητας της αντλίας θερμότητας είναι ο γεω-εναλλάκτης. Το σχήμα μας δίνει τα δεδομένα. Όλα τα εξαρτήματα της αντλίας θερμότητας είναι αδιαβατικά. Να υπολογιστούν:

1. Η παροχή όγκου θερμού αέρα στο σπίτι σε m^3/s [απάντηση 0,441]
2. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή [απάντηση 0.825]
3. Η ισχύς του συμπιεστή σε kW [1.86]
4. Ο συντελεστής αποδοτικότητας της αντλίας θερμότητας (COP) [απάντηση 5.38]
5. Η παροχή όγκου νερού από τον γεω-εναλλάκτη σε l/s [απάντηση 0.646]
6. Να διεξαχθεί εξεργειακή ανάλυση στο σύστημα (exergy accounting) και υπολογιστή ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος [απάντηση 0.71]

