



Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Σχολή Μηχανικών Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Γ' εξάμηνο

Μάθημα Εφαρμ. Θερμοδυναμική Ι/ 6^η Ενότητα μαθήματος: Εντροπία

Διδάσκουσα Δρ. Κατερίνα Βαβουράκη

Google..search

Διδακτικά βιβλία για τους σπουδαστές της Ανώτατης Δημόσιας Σχολής Εμπορικού Ναυτικού (Α.Δ.Σ.Ε.Ν.):

1) Εφαρμοσμένη θερμοδυναμική (γ' έκδοση)

&

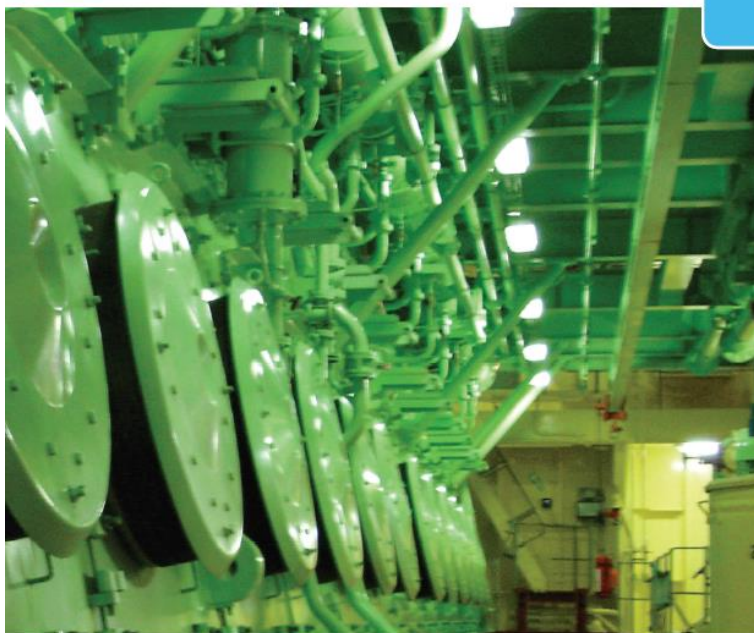
2) Παράρτημα τεχνικής Θερμοδυναμικής

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Ζ. ΠΑΓΩΝΑΡΗ

γ' έκδοση

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Εφαρμοσμένη θερμοδυναμική (γ' έκδοση)
Το βιβλίο αυτό απευθύνεται στους Μηχανικούς του Εμπορικού Ναυτικού και περιλαμβάνει τα βασικά λειτουργικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά μηχανών και μηχανημάτων όπως οι ΜΕΚ, οι στρόβιλοι, οι αεροσυμπιεστές, οι αεριοστρόβιλοι, οι ψυκτικές εγκαταστάσεις κ.ά.. Ο Μηχανικός του Εμπορικού Ναυτικού καλείται μέσω της Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής να εφαρμόσει στην πράξη τις αρχές και τους νόμους βάσει των οποίων λειτουργούν οι μηχανικές εγκαταστάσεις του πλοίου.

Βιβλίο: Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική, Κ.Ζ. ΠΑΓΩΝΑΡΗ ΑΘΗΝΑ 2020



ΑΝΩΤΕΡΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΣ ΣΧΟΛΕΣ
ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Κωνσταντίνου Ζ. Παγωνάρη
ΠΛΟΙΑΡΧΟΥ (Μ)Π.Ν.
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ-ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ Ν. Ρ.Γ.Σ. ΗΠ.Α.



Παράρτημα τεχνικής Θερμοδυναμικής

Το τεύχος αυτό αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του βιβλίου «Τεχνική Θερμοδυναμική», διότι περιλαμβάνει τους πίνακες και τα διαγράμματα που είναι απαραίτητα για την επίλυση των ασκήσεων επί της ύλης του βιβλίου. Ο διαχωρισμός των πινάκων και διαγραμμάτων από το βιβλίο κρίθηκε απαραίτητος, προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους σπουδαστές στις γραπτές εξετάσεις.

Βιβλίο: Παράρτημα Τεχνικής Θερμοδυναμικής, Κ.Ζ. ΠΑΓΩΝΑΡΗ ΑΘΗΝΑ 2002

<https://eclass.hmu.gr/>

στο μάθημα:

ΕΦΑΡΜ. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ Ι Γ' εξαμ. (2021-22) (MECH215)

<https://eclass.hmu.gr/courses/MECH215/>

Password: thermodynamics1

➤ **15 βδομάδες, 4ώρες/ βδομάδα= 60ώρες συνολικά**

Σύμφωνα με το **Πρόγραμμα Σπουδών 2019** του Τμήματος **Μηχ/Μηχ/ΕΛΜΕΠΑ**
Υλη μαθήματος:

1. Θεμελίωση των βασικών ενεργειακών μεγεθών, ορισμοί. Η έννοια του πεπερασμένου συστήματος και οι νόμοι της θερμοδυναμικής, εισαγωγική περιγραφή
2. Καταστατικά μεγέθη και καταστατικές εξισώσεις. Οι καθαρές ουσίες, φάσεις της ύλης. Το ιδανικό αέριο, η έννοια της ισορροπίας, η σταθερά του ιδανικού αερίου και η καταστατική εξίσωσή του
3. Οι μεταβολές ιδανικού αερίου
4. Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος, μετατροπή θερμότητας σε έργο
5. Θερμοδυναμικοί κύκλοι, Υπολογισμοί έργου και βαθμού απόδοσης
6. Η έννοια της Εντροπίας, Περιγραφή και ανάλυση θερμοδυναμικών κύκλων σε πεδία πίεσης – όγκου και ενθαλπίας – εντροπίας
7. Ο Δεύτερος Θερμοδυναμικός Νόμος. Ανάλυση θερμοδυναμικών κύκλων κινητήριων μηχανών και αντλίας θερμότητας
8. Αλλαγή φάσεων και εισαγωγή στην θερμοδυναμική των μιγμάτων
9. Γενίκευση της έννοιας της εντροπίας, Αναφορές στην στατιστική μηχανική και στην θεωρία της πληροφορίας
10. Ενέργεια και πληροφορία, σχεδιασμός θερμοδυναμικών συστημάτων
11. Από την Στατιστική Μηχανική στην Κοσμολογία, το εύρος ισχύος των νόμων της Θερμοδυναμικής και οι εφαρμογές του μηχανικού σήμερα και αύριο



Ενότητες μαθήματος:

Βασικές έννοιες- Ορισμοί

Πρώτος Νόμος Θερμοδυναμικής

Ιδιότητες καθαρής ουσίας

Ιδανικά αέρια- Διεργασίες- Κλειστό Θερμοδυναμικό σύστημα

Ανοιχτό Θερμοδυναμικό σύστημα- Διεργασίες

Δεύτερος Νόμος Θερμοδυναμικής, Αναστρεψιμότητα

Εντροπία

Θερμοδυναμικοί κύκλοι

6^η Ενότητα μαθήματος: Εντροπία



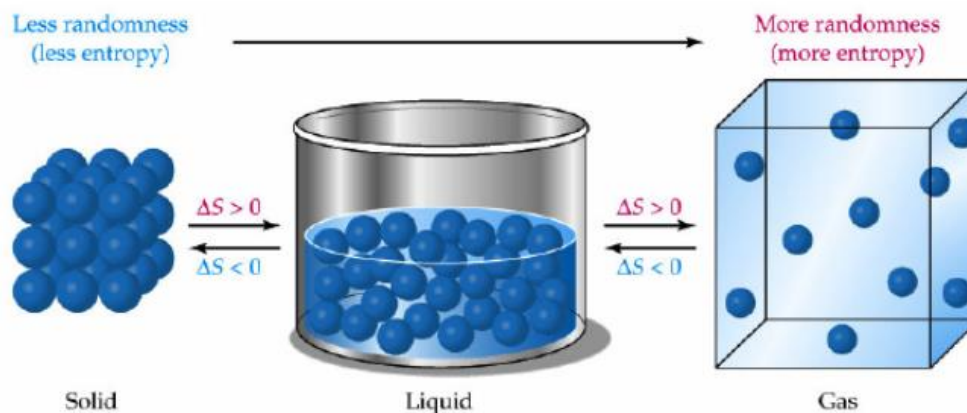
Εντροπία

- Εντροπία
- Εντροπία συστήματος- Κλειστό & Ανοιχτό σύστημα

Τι αντιπροσωπεύει η εντροπία

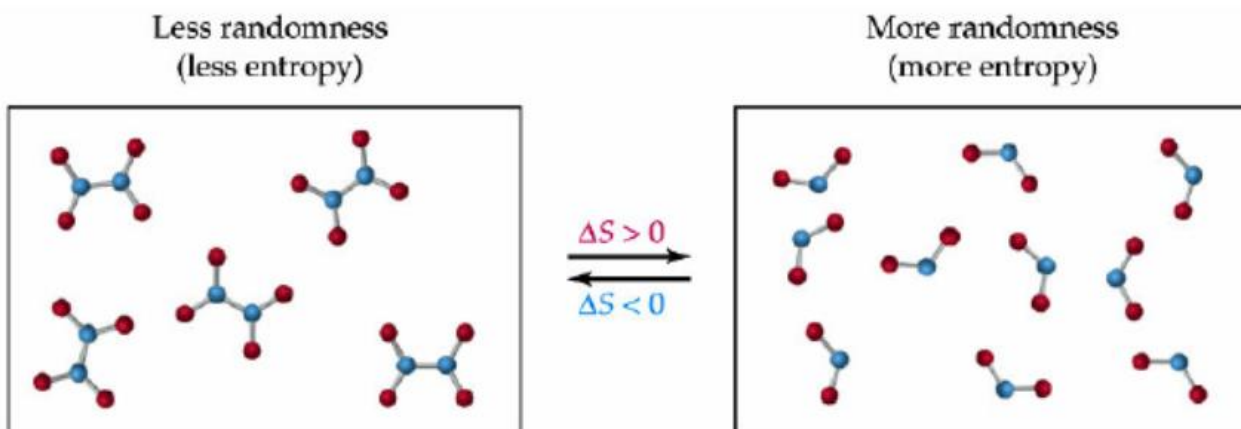
- Η **εντροπία (S)** είναι το μέτρο της τάξης ή της αταξίας ενός συστήματος.
- Μεγαλύτερη αταξία σημαίνει μεγαλύτερη εντροπία
- Η φύση τείνει σε καταστάσεις μεγαλύτερης εντροπίας

Εντροπία στερεής, υγρής και αέριας φάσης



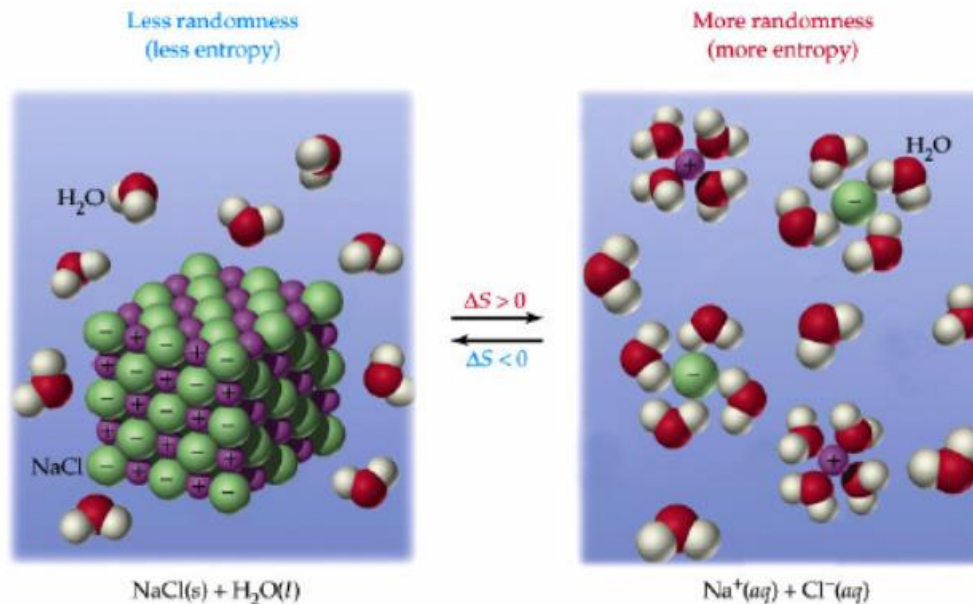
- $S_{\text{solid}} < S_{\text{liquid}} < S_{\text{gas}}$
- Η πρότυπη εντροπία S° ενός σώματος είναι η εντροπία σε Θερμοκρασία 25°C και πίεση 1 atm
- Η μεταβολή της εντροπίας είναι $\Delta S = S_2 - S_1$

Εντροπία και αταξία



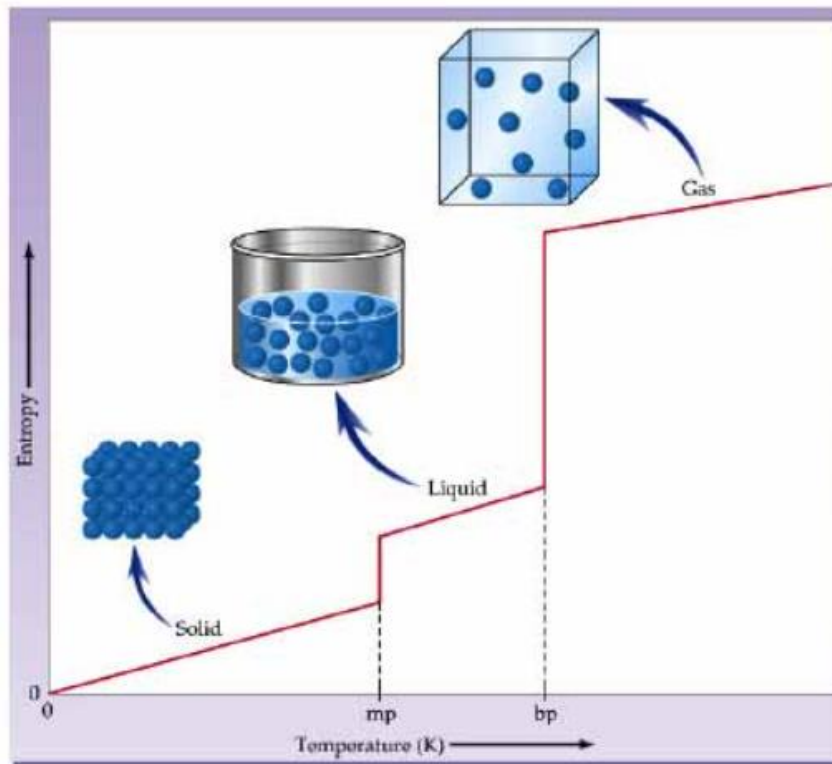
- Η διάσπαση του μορίου N_2O_4 σε δύο μόρια NO_2 οδηγεί σε αύξηση της εντροπίας του συστήματος

Εντροπία και αταξία



- Η διάλυση του μορίου NaCl σε νερό H₂O οδηγεί σε αύξηση της εντροπίας

Μεταβολή της εντροπίας με τη θερμοκρασία



- Η εντροπία μιας τέλεια κρυσταλλωμένης ουσίας στους 0 K είναι μηδέν
- Η εντροπία αυξάνει με τη θερμοκρασία
- Στο σημεία τήξης και στο σημείο βρασμού υπάρχει μια βηματική αύξηση στην εντροπία

Πρότυπη Εντροπία χημικών ενώσεων

Substance	Formula	S° [J/(K · mol)]
<i>Gases</i>		
Acetylene	C_2H_2	200.8
Ammonia	NH_3	192.3
Carbon dioxide	CO_2	213.6
Carbon monoxide	CO	197.6
Ethylene	C_2H_4	219.5
Hydrogen	H_2	130.6
Methane	CH_4	186.2
Nitrogen	N_2	191.5
Nitrogen dioxide	NO_2	240.0
Dinitrogen tetroxide	N_2O_4	304.2
Oxygen	O_2	205.0

η πρότυπη
εντροπία των
χημικών στοιχείων
δεν είναι μηδέν
ενώ η πρότυπη
ενθαλπία τους
είναι μηδέν

Πρότυπη Εντροπία χημικών ενώσεων

Substance	Formula	S° [J/(K · mol)]
<i>Liquids</i>		
Acetic acid	<chem>CH3CO2H</chem>	160
Ethanol	<chem>CH3CH2OH</chem>	161
Methanol	<chem>CH3OH</chem>	127
Water	<chem>H2O</chem>	69.9
<i>Solids</i>		
Calcium carbonate	<chem>CaCO3</chem>	92.9
Calcium oxide	<chem>CaO</chem>	39.7
Diamond	<chem>C</chem>	2.4
Graphite	<chem>C</chem>	5.7
Iron	<chem>Fe</chem>	27.3
Iron(III) oxide	<chem>Fe2O3</chem>	87.4

η πρότυπη
εντροπία διαμαντιού
είναι μικρότερη από
του γραφίτη



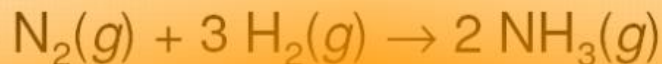
Υπολογισμός της Πρότυπης Εντροπίας Χημικών Αντιδράσεων

Η πρότυπη ΔS° για μια χημική αντίδραση υπολογίζεται
από τη σχέση

$$\Delta S^\circ_{\text{rxn}} = \sum nS^\circ_{\text{(Products)}} - \sum nS^\circ_{\text{(Reactants)}}$$

Πρότυπη Εντροπία χημικών αντιδράσεων

Με βάση τους πίνακες υπολογίστε την μεταβολή της πρότυπης εντροπίας των χημικών αντιδράσεων



$$\begin{aligned} S^\circ(\text{N}_2) &= 191.5 \text{ J/K} \cdot \text{mol} \\ S^\circ(\text{H}_2) &= 130.6 \text{ J/K} \cdot \text{mol} \\ S^\circ(\text{NH}_3) &= 192.3 \text{ J/K} \cdot \text{mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S^\circ &= 2 \cdot 192.3 - 1 \cdot 191.5 - 3 \cdot 130.6 \text{ (J/K} \cdot \text{mol)} \\ \Delta S^\circ &= -198.7 \text{ J/K} \cdot \text{mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S^\circ(\text{CaCO}_3) &= 92.6 \text{ J/K} \cdot \text{mol} \\ S^\circ(\text{CaO}) &= 39.7 \text{ J/K} \cdot \text{mol} \\ S^\circ(\text{CO}_2) &= 213.6 \text{ J/K} \cdot \text{mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S^\circ &= 1 \cdot 39.7 + 1 \cdot 213.6 - 1 \cdot 92.6 \text{ (J/K} \cdot \text{mol)} \\ \Delta S^\circ &= +160.7 \text{ J/K} \cdot \text{mol} \end{aligned}$$

Εντροπία και αντιστρεπτότητα

Η ιδιότητα που συνδέεται με την αντιστρεπτότητα μιας διεργασίας είναι η εντροπία, η οποία έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Σε ένα κλειστό σύστημα που ανταλλάσσει θερμότητα ή/και έργο με το περιβάλλον η εντροπία συνδέεται μόνο με το ποσό της θερμότητας που ανταλλάσσεται με την σχέση

$$\text{ή} \quad dS \geq \delta Q/T$$
$$S_2 - S_1 \geq \int_{T_1}^{T_2} \frac{\delta Q}{T}$$

Όπου δQ το στοιχειώδες ποσό θερμότητας που ανταλλάσσεται σε θερμοκρασία T .

Η **ισότητα ισχύει για αντιστρεπτή διεργασία**, ενώ σε αναντίστρεπτη διεργασία η εντροπία αυξάνει περισσότερο από το $\int \delta Q/T$

Εντροπία (11/26)

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} \quad (8.1)$$

όπου: s_1 , s_2 η ειδική εντροπία του εργαζόμενου μέσου στην κατάσταση 1 και κατάσταση 2 αντίστοιχα σε J/kgK.

Η ειδική και η ολική εντροπία ενός μέσου συνδέονται με τη σχέση:

$$s = \frac{S}{m}$$

όπου: S η ολική εντροπία του εργαζόμενου μέσου σε J/K.

Για μια **ισοθερμοκρασιακή αναστρέψιμη** διεργασία (σχ. 8.1) από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2, όπου $T_1 = T_2 = T$, η εξίσωση (8.1) γίνεται:

$$s_2 - s_1 = \frac{q}{T} \quad (8.1\alpha)$$

όπου: q η θερμότητα που προσδίνεται στη διεργασία σε J/kg και T η απόλυτη θερμοκρασία της διεργασίας σε K.

Σ' ένα **κλειστό σύστημα** η αλλαγή της εντροπίας συνοψίζεται στα εξής:

- 1) Η εντροπία θα μειωθεί όταν από το σύστημα αφαιρέσουμε θερμότητα, με την προϋπόθεση ότι όλες οι διεργασίες είναι αναστρέψιμες.
- 2) Η εντροπία θα παραμείνει σταθερή όταν έχουμε **ανατρέψιμη αδιαβατική** διεργασία. Μία τέτοια διεργασία ονομάζεται και **ισοεντροπική**.
- 3) Η εντροπία θα αυξηθεί όταν στο σύστημα προσθέσουμε θερμότητα, είτε η διεργασία είναι αναστρέψιμη είτε όχι.
- 4) Η εντροπία ενός μονωμένου συστήματος θα αυξηθεί όταν έχουμε μη αναστρέψιμες διεργασίες.

Το ότι η εντροπία ενός **αδιαβατικά μονωμένου συστήματος** πρέπει πάντα να αυξάνει, δεν σημαίνει ότι πρέπει να αυξάνει και η εντροπία **όλων των τμημάτων** του. Κι αυτό γιατί σε πολλές πραγματικές διεργασίες βρίσκουμε σε άλλα μεν τμήματα αύξηση της εντροπίας και σε άλλα μείωσή της. Αυτό όμως που συμβαίνει είναι ότι η αύξηση της εντροπίας είναι μεγαλύτερη από τη μείωση και επομένως η **ολική εντροπία ενός μονωμένου συστήματος** πρέπει πάντα να μεγαλώνει.

Εντροπία και αντιστρεπτικότητα

- ❑ Σε ένα κλειστό μονωμένο σύστημα $\delta Q = 0$ οπότε η προηγούμενη σχέση γίνεται

$$dS \geq 0$$

- ❑ Ένα σύστημα μαζί με το περιβάλλον του μπορούν να θεωρηθούν ως απομονωμένο σύστημα, άρα οποιαδήποτε αναντίστρεπτη διεργασία συνοδεύεται από αύξηση της συνολικής εντροπίας συστήματος και περιβάλλοντος
- ❑ Η παραπάνω ανισότητα μπορεί να γραφεί σε μορφή ισότητας αν προστεθεί ένας όρος παραγωγής εντροπίας (πάντα θετικός ή μηδέν) που συνδέεται με την αναντιστρεπτικότητα της διεργασίας

$$dS = \delta Q/T + \delta S_g$$

- ✓ Ο όρος της παραγωγής εντροπίας (δS_g) είναι μηδέν σε αντιστρεπτή διεργασία και αυξάνει όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση από τις συνθήκες ισορροπίας
- ✓ Είναι δηλαδή ένα μέτρο της αναντιστρεπτικότητας της διεργασίας
- ✓ Ο όρος αυτός συνδέεται με την απώλεια σε διαθέσιμη ενέργεια, δηλαδή με την υποβάθμιση της ενέργειας λόγω αναντιστρεπτικότητας της διεργασίας



Εντροπία (14/26)

Εντροπία και αντιστρεπτότητα

- ☐ Σε ανοιχτό σύστημα η προηγούμενη σχέση έχει την μορφή

$$(dS)_{OE} = s_1 \delta m_1 - s_2 \delta m_2 + \delta Q/T + \delta S_g$$

Όπου $(dS)_{OE}$ είναι η μεταβολή εντροπίας στον όγκο ελέγχου, m_1 , m_2 η εισερχόμενη και εξερχόμενη μάζα και s_1 , s_2 η αντίστοιχη ειδική εντροπία (kJ/kg/K)

- Διαφορίζοντας ως προς τον χρόνο η παραπάνω σχέση παίρνει την μορφή

$$\left(\frac{dS}{dt}\right) = \left(\sum \dot{m}_i S_i\right)_1 - \left(\sum \dot{m}_i S_i\right)_2 + \frac{\delta Q/T}{dt} + \frac{\delta S_g}{dt}$$

Συσσώρευση Εισροή Εκροή Παραγωγή

Η παραπάνω σχέση είναι ένα **ισοζύγιο εντροπίας** αντίστοιχο με το ισοζύγιο ενέργειας ανοιχτού συστήματος (συσσώρευση = εισροή - εκροή + παραγωγή).

- ☐ Ο όρος $(\sum m_i s_i)_1$ είναι η συνολική εντροπία που εισέρχεται με τα ρεύματα εισόδου και $(\sum m_i s_i)_2$ είναι η συνολική εντροπία των ρευμάτων εξόδου
- ☐ Ο όρος $(\delta Q/T)/dt$ είναι ο ρυθμός αύξησης της εντροπίας λόγω μεταφοράς θερμότητας και ο όρος $\delta S_g/dt$ είναι ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας λόγω αναντιστρεπτότητας
- ☐ Η αναντιστρεπτότητα μπορεί να οφείλεται σε διάφορα αίτια όπως ότι η θερμότητα μεταφέρεται υπό αυξημένο ΔT , σε τριβές, σε διάχυση κλπ
- ☐ Ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας εκφράζει ποσοτικά την υποβάθμιση της ενέργειας, δηλαδή της απώλεια της δυνατότητας παραγωγής έργου

Σε ένα ανοικτό σύστημα όπου έχουμε μία σταθερή ροή μάζας \dot{m} , η αλλαγή της εντροπίας είναι:

$$\dot{m}(s_0 - s_i) \geq \frac{\delta \dot{Q}}{T} \quad (8.2)$$

όπου: s_i, s_0 η ειδική εντροπία του εργαζόμενου μέσου στην είσοδο και έξοδο του συστήματος αντίστοιχα σε J/kgK,

$\delta \dot{Q}$ η μεταβολή της θερμότητας σε W,

T η απόλυτη θερμοκρασία της διεργασίας σε K και

\dot{m} η ροή μάζας σε kg/s.

Εάν δεν έχουμε μεταφορά θερμότητας, τότε η εξίσωση (8.2) γίνεται:

$$s_0 \geq s_i \quad (8.3)$$

Επομένως για σταθερή αδιαβατική ροή μάζας, η εντροπία αυξάνεται ή παραμένει σταθερή· ποτέ δεν ελαττώνεται.

Η εντροπία μεταβάλλεται:

- Επειδή ανταλλάσσεται θερμότητα με το περιβάλλον

Η μεταβολή αυτή μπορεί να είναι θετική (όταν το σύστημα απορροφά θερμότητα) ή αρνητική (όταν το σύστημα αποδίδει θερμότητα)

- Επειδή η διεργασία είναι αναντίστροφη

Η μεταβολή αυτή είναι θετική (αναντίστροφη διεργασία) ή μηδέν (αντιστρεπτή διεργασία)

✓ Αντιστρεπτή διεργασία $dS = 0$

✓ Αναντίστροφη διεργασία $dS > 0$

Επιστρέφοντας στο έργο αντιστρεπτής μηχανής που δίνεται από την σχέση

$$W_{\max} = Q_1 \frac{T_1 - T_0}{T_1} \text{ επισημαίνεται ότι:}$$

- Η μεταβολή εντροπίας ενός θερμοδοχείου θερμοκρασίας T_1 από το οποίο παίρνουμε θερμότητα Q_1 για παραγωγή έργου είναι $\Delta S_1 = Q_1 / T_1$
- Η μεταβολή εντροπίας του περιβάλλοντος στο οποίο απορρίπτεται θερμότητα Q_0 σε θερμοκρασία T_0 είναι $\Delta S_0 = Q_0 / T_0$
- Σύμφωνα με τα προηγούμενα η μεταβολή εντροπίας του θερμοδοχείου είναι ίση και αντίθετη με την μεταβολή εντροπίας του περιβάλλοντος και η συνολική μεταβολή εντροπίας (θερμοδοχείου και περιβάλλοντος) είναι $\Delta S_1 - \Delta S_0 = 0$, όπως αναμένεται από μια αντιστρεπτή διεργασία

8.4 Υπολογισμός της εντροπίας για τέλεια αέρια

Για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε την εντροπία, θα πρέπει να γνωρίζουμε τις τιμές που παίρνει για τις διάφορες καταστάσεις του εργαζόμενου μέσου στη λειτουργία ενός συστήματος. Θα υπολογίσουμε πρώτα την εντροπία των αερίων σε ένα κλειστό σύστημα με τη χρήση των νόμων του τέλειου αερίου και μετά την εντροπία των καθαρών ουσιών.

Για μία αναστρέψιμη διεργασία, στην οποία θεωρούμε ότι οι ειδικές θερμότητες c_p , c_v και c_n είναι σταθερές, η μεταβολή της εντροπίας του αερίου μεταξύ δύο καταστάσεων 1 και 2 υπολογίζεται από τις σχέσεις*:

$$S_2 - S_1 = mc_n \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (8.4)$$

$$S_2 - S_1 = mc_v \ln \frac{T_2}{T_1} + mR \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (8.5)$$

$$S_2 - S_1 = mc_p \ln \frac{T_2}{T_1} - mR \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (8.6)$$

$$c_n = \frac{c_p - kc_v}{1 - k}$$

Έτσι υπάρχουν τρεις εξισώσεις που περιγράφουν τη μεταβολή της εντροπίας για ένα τέλειο αέριο μέσα σε ένα κλειστό σύστημα. Η χρησιμοποίηση μίας από τις τρεις εξισώσεις εξαρτάται από τα στοιχεία του προβλήματος και φυσικά θα προτιμηθεί αυτή που δίνει την ευκολότερη λύση.

Παράδειγμα 1

Τρία χιλιόγραμμα αέρα θερμαίνονται από 27°C σε 527°C, ενώ η πίεση αυξάνει από 100 kPa σε 500 kPa. Να προσδιοριστεί η μεταβολή της εντροπίας του αέρα με τη βοήθεια μίας από τις παραπάνω εξισώσεις.

Λύση

Από τα δεδομένα του προβλήματος φαίνεται ότι η εξίσωση (8.6) μάς δίνει αμέσως τη λύση. Έτσι έχουμε ότι:

$$\text{Για } T_1 = 273 + 27 = 300 \text{ K} \quad T_2 = 273 + 527 = 800 \text{ K}$$

$$p_1 = 100 \text{ kPa} \quad p_2 = 500 \text{ kPa}$$

και από τον Πίνακα Γ6 $c_p = 1,005 \text{ kJ/kgK}$ και $R = 0,287 \text{ kJ/kgK}$,

$$\text{οπότε } S_2 - S_1 = 3 \times \left(1,005 \times \ln \frac{800}{300} - 0,287 \times \ln \frac{500}{100} \right) = 1,57 \text{ kJ/K}$$

3^{ος} τρόπος..



$$S_2 - S_1 = mc_v \ln \frac{T_2}{T_1} + mR \ln \frac{V_2}{V_1}$$

2^{ος} τρόπος..



$$S_2 - S_1 = mc_n \ln \frac{T_2}{T_1}$$

1^{ος} τρόπος..



$$S_2 - S_1 = mc_p \ln \frac{T_2}{T_1} - mR \ln \frac{p_2}{p_1}$$

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.

Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.

ΑΕΡΙΟ	M lbm/pmole	c_p Btu/lbm-R	c_p kJ/kg-K	c_v Btu/lbm-R	c_v kJ/kg-K	k	R ft·lbf/lbm-R	R kJ/kg-K
Άσετυλίνη (C_2H_2)	26.036	0.4048	1.6947	0.3285	1.3753	1.232	59.35	0.3195
Αέρας	28.97	0.24	1.0047	0.1714	0.7176	1.4	53.34	0.287
Άμμωνία (NH_3)	17.032	0.499	2.089	0.382	1.5992	1.304	90.73	0.4882
Άργόν (A)	39.95	0.1244	0.5208	0.0747	0.3127	1.666	38.68	0.2081
Διοξείδιο άνθρακα (CO_2)	44.01	0.2016	0.844	0.1565	0.6552	1.288	35.11	0.1889
Μονοξείδιο άνθρακα (CO)	28.01	0.2487	1.0412	0.1778	0.7444	1.399	55.17	0.2968
Χλώριο (Cl_2)	70.914	0.1144	0.4789	0.0864	0.3617	1.324	21.79	0.1172
Αιθάνιο (C_2H_6)	30.068	0.4186	1.7525	0.3526	1.4761	1.187	51.39	0.2765
Αιθυλένιο (C_2H_4)	28.052	0.3654	1.5297	0.2946	1.2333	1.24	55.09	0.2964
Ήλιο (He)	4.003	1.241	5.1954	0.745	3.1189	1.666	386.04	2.077
Υδρογόνο (H_2)	2.016	3.419	14.3136	2.434	10.190	1.4	766.54	4.125
Υδραζίνη (N_2H_4)	32.048	0.393	1.6453	0.33	1.3815	1.195	48.22	0.2594
Μεθάνιο (CH_4)	16.043	0.5099	2.1347	0.3861	1.6164	1.321	96.33	0.5183
Νέο (Ne)	20.183	0.246	1.0298	0.1476	0.6179	1.666	76.57	0.4120
Άζωτο (N_2)	28.016	0.2484	1.0399	0.1775	0.7431	1.399	55.16	0.2968
Όξυγόνο (O_2)	32	0.2194	0.9185	0.1573	0.6585	1.395	48.29	0.2598
Προπάνιο (C_3H_8)	44.094	0.3985	1.6683	0.3535	1.4799	1.127	35.05	0.1886
Διοξείδιο θείου (SO_2)	64.07	0.1487	0.6225	0.1177	0.4927	1.263	24.12	0.1298
Υδρατμός (H_2O)	18.016	0.4454	1.8646	0.3352	1.4033	1.329	85.77	0.4615
Ξένο (Xe)	131.3	0.0378	0.1582	0.0227	0.0950	1.666	11.77	0.0633

Εντροπία (20γ/26)

2ος τρόπος..

Για να υπολογίσουμε την αλλαγή της εντροπίας από τις εξισώσεις (8.4) και (8.5) θα πρέπει πρώτα να βρούμε τους αγνώστους που είναι c_n , V_2 και V_1 . Από την εξίσωση του τέλει αερίου έχουμε:

$$V_1 = \frac{mRT_1}{p_1} = \frac{3 \times 0,287 \times 300}{100} = 2,583 \text{ m}^3$$

$$V_2 = \frac{mRT_2}{p_2} = \frac{3 \times 0,287 \times 800}{500} = 1,378 \text{ m}^3$$

Από την εξίσωση (6.30α) βρίσκουμε το c_n :

$$c_n = \frac{c_p - nc_v}{1 - n} = 0,534 \text{ kJ/kg K}$$

Οπότε, αντικαθιστώντας στην εξίσωση (8.4) έχουμε:

$$S_2 - S_1 = m c_k \ln \frac{T_2}{T_1} = 3 \times 0,534 \times \ln \frac{800}{300} = 1,57 \text{ kJ/K}$$

3ος τρόπος..

$$S_2 - S_1 = m c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + m R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$S_2 - S_1 = m c_k \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Από τα δεδομένα της άσκησης μπορούμε να πούμε ότι η διεργασία είναι πολυτροπική, γιατί έχουμε μεταβολή της πίεσης, της θερμοκρασίας και του όγκου και, επίσης, στην εκφώνηση δεν αναφέρεται ότι το σύστημα είναι μονωμένο, δηλαδή $Q \neq 0$. Έχουμε λοιπόν, εξίσωση (6.25):

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n \quad \text{ή} \quad \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n = \frac{p_2}{p_1}$$

και λύνοντας ως προς n παίρνουμε:

$$n = \frac{\ln(p_2/p_1)}{\ln(V_1/V_2)} = \frac{\ln(500/100)}{\ln(2,583/1,378)} = 2,56$$

«Μια **πολυτροπική διεργασία** είναι μια θερμοδυναμική διαδικασία που υπακούει στη σχέση: $PV^n = C$, όπου p είναι η πίεση, V είναι όγκος, n είναι ο πολυτροπικός δείκτης και C είναι μια σταθερά. Η εξίσωση της πολυτροπικής διαδικασίας μπορεί να περιγράψει πολλαπλές διαδικασίες επέκτασης και συμπίεσης που περιλαμβάνουν μεταφορά θερμότητας. »

Επίσης από την εξίσωση (8.5) παίρνουμε:

$$S_2 - S_1 = \left(3 \times 0,717 \times \ln \frac{800}{300} \right) + \left(3 \times 0,287 \times \ln \frac{1,378}{2,583} \right)$$

$$\text{ή} \quad S_2 - S_1 = 1,57 \text{ kJ/K}$$

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.

Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.

ΑΕΡΙΟ	M lbm/pmole	c_p Btu/lbm-R	c_p kJ/kg-K	c_v Btu/lbm-R	c_v kJ/kg-K	k	R ft·lbf/lbm-R	R kJ/kg-K
Άσετυλίνη (C_2H_2)	26.036	0.4048	1.6947	0.3285	1.3253	1.232	59.35	0.3195
Αέρας	28.97	0.24	1.0047	0.1714	0.7176	1.4	53.34	0.287
Αμμωνία (NH_3)	17.032	0.499	2.089	0.382	1.5992	1.304	90.73	0.4882
Αργόν (A)	39.95	0.1244	0.5208	0.0747	0.3127	1.666	38.68	0.2081
Διοξείδιο άνθρακα (CO_2)	44.01	0.2016	0.844	0.1565	0.6552	1.288	35.11	0.1889
Μονοξείδιο άνθρακα (CO)	28.01	0.2487	1.0412	0.1778	0.7444	1.399	55.17	0.2968
Χλώριο (Cl_2)	70.914	0.1144	0.4789	0.0864	0.3617	1.324	21.79	0.1172
Αιθάνιο (C_2H_6)	30.068	0.4186	1.7525	0.3526	1.4761	1.187	51.39	0.2765
Αιθυλένιο (C_2H_4)	28.052	0.3654	1.5297	0.2946	1.2333	1.24	55.09	0.2964
Ήλιο (He)	4.003	1.241	5.1954	0.745	3.1189	1.666	386.04	2.077
Υδρογόνο (H_2)	2.016	3.419	14.3136	2.434	10.190	1.4	766.54	4.125
Υδραζίνη (N_2H_4)	32.048	0.393	1.6453	0.33	1.3815	1.195	48.22	0.2594
Μεθάνιο (CH_4)	16.043	0.5099	2.1347	0.3861	1.6164	1.321	96.33	0.5183
Νέο (Ne)	20.183	0.246	1.0298	0.1476	0.6179	1.666	76.57	0.4120
Αζωτο (N_2)	28.016	0.2484	1.0399	0.1775	0.7431	1.399	55.16	0.2968
Οξυγόνο (O_2)	32	0.2194	0.9185	0.1573	0.6585	1.395	48.29	0.2598
Προπάνιο (C_3H_8)	44.094	0.3985	1.6683	0.3535	1.4799	1.127	35.05	0.1886
Διοξείδιο θείου (SO_2)	64.07	0.1487	0.6225	0.1177	0.4927	1.263	24.12	0.1298
Υδρατμός (H_2O)	18.016	0.4454	1.8646	0.3352	1.4033	1.329	85.77	0.4615
Ξένο (Xe)	131.3	0.0378	0.1582	0.0227	0.0950	1.666	11.77	0.0633

Εντροπία (21α/26)

Παράδειγμα 2

Αέρας εκτονώνεται **ισοεντροπικά** μέσα σ' έναν κύλινδρο από θερμοκρασία 838°C και πίεση 4 bar σε πίεση 1 bar. Να υπολογιστεί το έργο **ανά μονάδα μάζας** που έδωσε ο αέρας κατά την εκτόνωση.

$$w = \frac{W}{m}$$

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{m}$$

$$q = \frac{Q}{m}$$

Λύση

Εδώ έχουμε ένα **κλειστό σύστημα** (σχ. 8.2). Εφόσον έχουμε **ισοεντροπική εκτόνωση**, **$Q = 0$** και **$s = \text{σταθερή}$** · γιατί, όπως είπαμε, η **ισοεντροπική εκτόνωση** είναι διεργασία αναστρέψιμη **και** αδιαβατική ($Q = 0$).

Ο πρώτος νόμος είναι, εξίσωση (4.10):

$$q = \Delta u + w \quad (1)$$

αλλά $q = 0$, οπότε

$$w = u_1 - u_2$$

Από την εξίσωση (6.9) έχουμε ότι:

$$w = u_1 - u_2 = c_v(T_1 - T_2) \quad (2)$$

Επειδή η διεργασία είναι **αδιαβατική**, από την εξίσωση (6.21) έχουμε:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{k/k-1}$$

όπου για αέρα **$k = 1,4$** (Πίνακας Γ6).

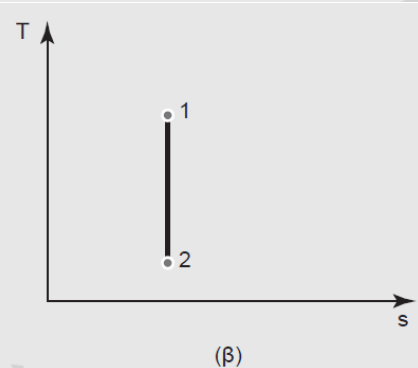
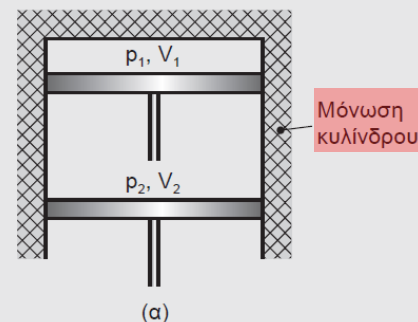
Λύνουμε ως προς T_2 και παίρνουμε:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} = 1111 \times \left(\frac{1}{4} \right)^{0,4/1,4} = 1111 \times 0,67 = 748 \text{ K}$$

$$\text{ή } t_2 = 475^\circ\text{C}$$

Αντικαθιστούμε στην εξίσωση (2), ($c_v = 0,717 \text{ kJ/kg K}$) και έχουμε:

$$W = 0,717 \times (1111 - 748) = \boxed{260 \text{ kJ/kg}}$$



Σχ. 8.2
Εκτόνωση αερίου σε κύλινδρο

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.

Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.

ΑΕΡΙΟ	M lbm/pmole	c_p Btu/lbm-R	c_p kJ/kg-K	c_v Btu/lbm-R	c_v kJ/kg-K	k	R ft·lbf/lbm-R	R kJ/kg-K
Άσετυλίνη (C_2H_2)	26.036	0.4048	1.6947	0.3285	1.3253	1.232	59.35	0.3195
Αέρας	28.97	0.24	1.0047	0.1714	0.7176	1.4	53.34	0.287
Άμμωνία (NH_3)	17.032	0.499	2.089	0.382	1.5992	1.304	90.73	0.4882
Άργόν (A)	39.95	0.1244	0.5208	0.0747	0.3127	1.666	38.68	0.2081
Διοξείδιο άνθρακα (CO_2)	44.01	0.2016	0.844	0.1565	0.6552	1.288	35.11	0.1889
Μονοξείδιο άνθρακα (CO)	28.01	0.2487	1.0412	0.1778	0.7444	1.399	55.17	0.2968
Χλώριο (Cl_2)	70.914	0.1144	0.4789	0.0864	0.3617	1.324	21.79	0.1172
Αιθάνιο (C_2H_6)	30.068	0.4186	1.7525	0.3526	1.4761	1.187	51.39	0.2765
Αιθυλένιο (C_2H_4)	28.052	0.3654	1.5297	0.2946	1.2333	1.24	55.09	0.2964
Ήλιο (He)	4.003	1.241	5.1954	0.745	3.1189	1.666	386.04	2.077
Υδρογόνο (H_2)	2.016	3.419	14.3136	2.434	10.190	1.4	766.54	4.125
Υδραζίνη (N_2H_4)	32.048	0.393	1.6453	0.33	1.3815	1.195	48.22	0.2594
Μεθάνιο (CH_4)	16.043	0.5099	2.1347	0.3861	1.6164	1.321	96.33	0.5183
Νέο (Ne)	20.183	0.246	1.0298	0.1476	0.6179	1.666	76.57	0.4120
Αζωτο (N_2)	28.016	0.2484	1.0399	0.1775	0.7431	1.399	55.16	0.2968
Οξυγόνο (O_2)	32	0.2194	0.9185	0.1573	0.6585	1.395	48.29	0.2598
Προπάνιο (C_3H_8)	44.094	0.3985	1.6683	0.3535	1.4799	1.127	35.05	0.1886
Διοξείδιο θείου (SO_2)	64.07	0.1487	0.6225	0.1177	0.4927	1.263	24.12	0.1298
Υδρατμός (H_2O)	18.016	0.4454	1.8646	0.3352	1.4033	1.329	85.77	0.4615
Ξένο (Xe)	131.3	0.0378	0.1582	0.0227	0.0950	1.666	11.77	0.0633

Η εντροπία καθαρής ουσίας

Ας δούμε τώρα πώς μπορούμε να υπολογίσουμε την εντροπία μιας καθαρής ουσίας. Πιο συγκεκριμένα, θα εξετάσουμε την εντροπία της πιο αντιπροσωπευτικής καθαρής ουσίας, του νερού. Η εντροπία του νερού περιλαμβάνεται στους πίνακες ατμού που αναφέραμε στο πέμπτο κεφάλαιο (Πίνακες Γ1, Γ2 και Γ3). Εξάλλου ως ιδιότητα του εργαζόμενου μέσου, μπορεί να υπολογιστεί όπως οι άλλες ιδιότητες, δηλαδή η ενθαλπία h , η ειδική εσωτερική ενέργεια u κ.λπ. Έτσι την **εντροπία ενός υγρού ατμού με βαθμό ξηρότητας x** την υπολογίζουμε με βάση την εξίσωση (5.2), όπου αντί για την ενθαλπία h , θεωρούμε την εντροπία s . Δηλαδή:

$$s = s_f + x s_{fg} \quad (8.7)$$

όπου: s_f η εντροπία του κεκορεσμένου νερού σε J/kgK και
 s_{fg} η εντροπία ατμοποίησης σε J/kgK.

Την εντροπία τη χρησιμοποιούμε επίσης ως μία από τις συντεταγμένες των διαγραμμάτων του ατμού. Δύο είναι τα πιο χρήσιμα διαγράμματα στα οποία, εκτός από την εντροπία, η άλλη συντεταγμένη είναι η απόλυτη θερμοκρασία ή η ενθαλπία. Τα διαγράμματα αυτά θα μας είναι πολύ χρήσιμα στην επίλυση των προβλημάτων για εγκαταστάσεις ατμού.

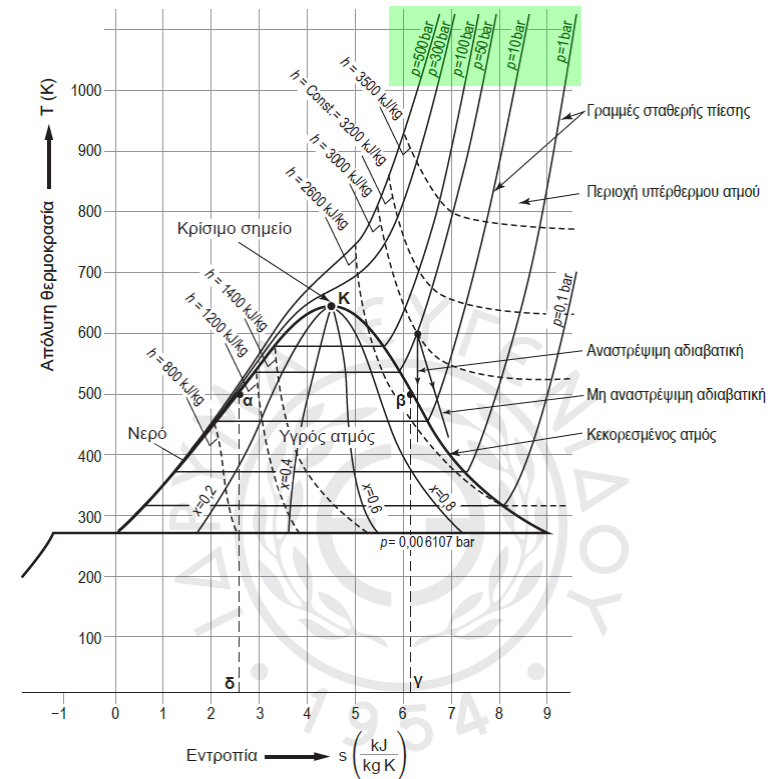
Διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας (T-s)

Στο σχήμα 8.3 φαίνεται το διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας (T-s) του ατμού, όπου περιλαμβάνονται οι περιοχές του κεκορεσμένου νερού, υγρού ατμού και υπέρ-θερμου ατμού. Είναι πολύ χρήσιμο, γιατί περιέχει τα εξής βασικά στοιχεία:

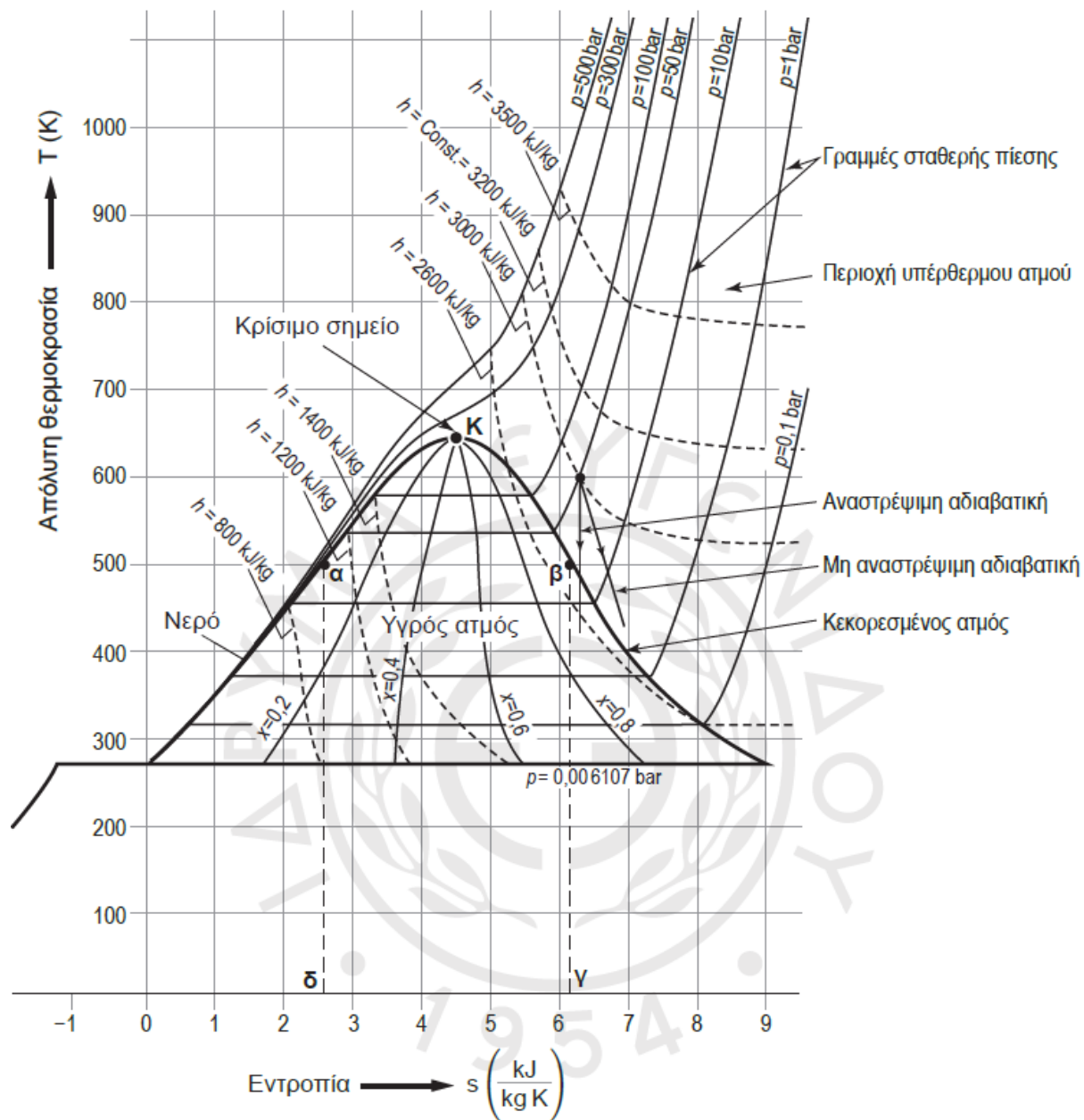
- 1) Οι επιφάνειες επάνω στο διάγραμμα έχουν τις μονάδες του έργου (kJ).
- 2) Στην περιοχή του υγρού ατμού οι γραμμές σταθερής πίεσης είναι οριζόντιες.
- 3) Σε μία αναστρέψιμη διεργασία, η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη είναι ίση με τη μεταφορά της θερμότητας κατά τη διάρκεια της διεργασίας αυτής.

Στη διάρκεια της αναστρέψιμης ισοθερμοκρασιακής διεργασίας αβ (σχ. 8.3) το ποσό της θερμότητας q που μεταφέρεται, ισούται με:

$$q = T (s_{\beta} - s_{\alpha}) \quad (8.8)$$



Σχ. 8.3
Διάγραμμα ατμού T-s



Σχ. 8.3
Διάγραμμα ατμού T-s

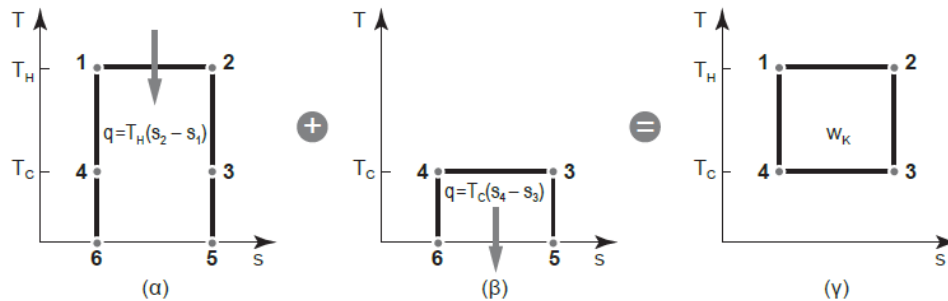
Εντροπία (23β/26)

Στο διάγραμμα T-s (σχ. 8.3) η ποσότητα $T(s_\beta - s_\alpha)$ είναι φυσικά η επιφάνεια αβγδ κάτω από τη γραμμή αβ.

4) Η **ισοεντροπική ή αναστρέψιμη αδιαβατική διεργασία** είναι κατακόρυφη ευθεία γραμμή.

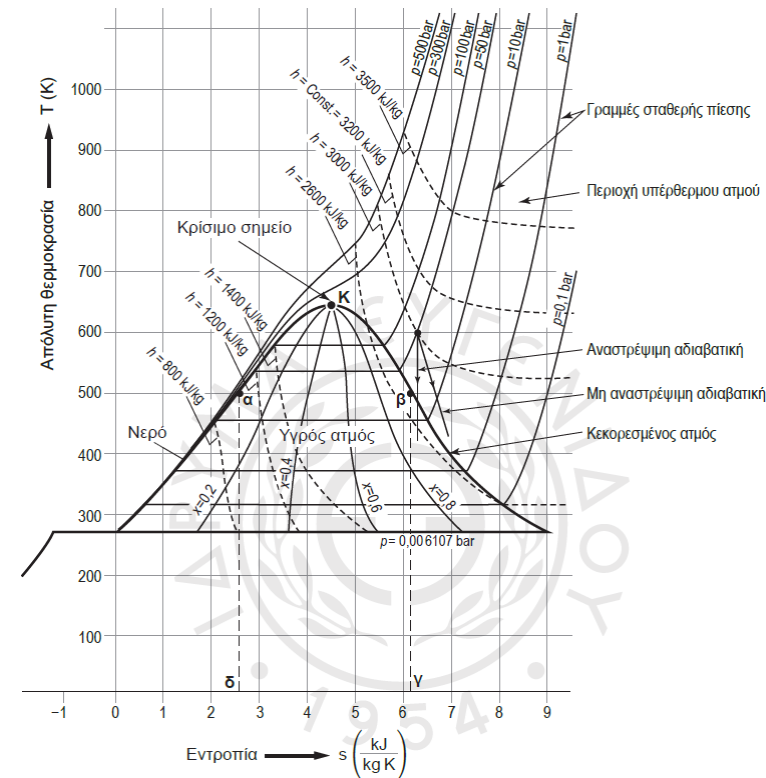
5) Σε έναν κύκλο που αποτελείται από αναστρέψιμες διεργασίες, δηλαδή σε έναν αναστρέψιμο κύκλο, η επιφάνεια που περικλείεται από τις γραμμές οι οποίες παριστάνουν τις διεργασίες αυτές είναι ίση με το καθαρό ή ωφέλιμο έργο που παράγεται και συνεπώς ίση και με τη θερμότητα (ωφέλιμη) που χρειάζεται για να παραχθεί το έργο αυτό. Στο ίδιο διάγραμμα T-s στο σχήμα 8.4(α) π.χ. η επιφάνεια 1-2-5-6-1 μάς δίνει τη **θερμότητα που προσδίνεται στο σύστημα στην ισοθερμοκρασιακή διεργασία**

1-2, $T_1 = T_H = \text{σταθ.}$ Η επιφάνεια 4-3-5-6-4 μάς δίνει τη θερμότητα που απορρίπτεται στην ισοθερμοκρασιακή διεργασία 3-4, $T_C = T_4 = \text{σταθ.}$ [σχ. 8.4(β)]. Η διαφορά αυτών των δύο επιφανειών είναι η επιφάνεια 1-2-3-4-1 [σχ. 8.4(γ)], που παριστάνει την καθαρή θερμότητα q_K , η οποία δόθηκε στο σύστημα και είναι ίση με το καθαρό έργο w_K .



Σχ. 8.4

Γραφική παρουσίαση του καθαρού έργου



Σχ. 8.3
Διάγραμμα ατμού T-s

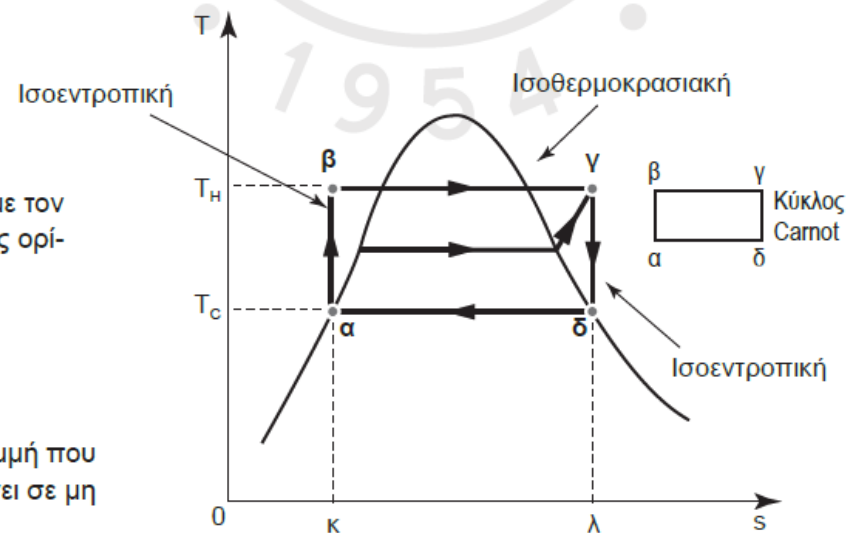
6) Από το διάγραμμα βρίσκουμε τον **θερμικό βαθμό απόδοσης ενός αναστρέψιμου κύκλου**. Εάν ο κύκλος έχει τη διεύθυνση των δεικτών του ρολογιού, τότε έχουμε έναν κύκλο παραγωγής μηχανικού έργου. Όπως είπαμε προηγουμένως, το καθαρό έργο είναι η επιφάνεια που περικλείεται από τον κύκλο και η θερμότητα που προσ-

7) Εάν το εργαζόμενο μέσο **εκτελεί έναν κύκλο Carnot**, η διαδρομή του στο διάγραμμα T-s θα είναι ένα ορθογώνιο. Στο σχήμα 8.5 φαίνεται ο κύκλος Carnot αβγδα με εργαζόμενο μέσο τον ατμό. Όπως είπαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο κύκλος αποτελείται από δύο διεργασίες σταθερής θερμοκρασίας (ισοθερμοκρασιακές, οριζόντιες γραμμές βγ, δα) και δύο ισοεντροπικές διεργασίες (κατακόρυφες γραμμές αβ, γδ). Στην περίπτωση αυτή, όπου όλες οι διεργασίες είναι αναστρέψιμες, ο **θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Carnot** είναι:

$$\eta_{\theta} = \frac{\text{επιφάνεια αβγδα}}{\text{επιφάνεια κβγλκ}}$$

Από τη γεωμετρία, ο λόγος των επιφανειών στην εξίσωση (8.9) είναι ίσος με τον λόγο των υψών των δύο ορθογωνίων, δηλαδή με $(T_H - T_C)/T_H$, όπως ακριβώς ορίσαμε τον θερμικό βαθμό απόδοσης στην εξίσωση (7.5).

8) Μία αδιαβατική μη αναστρέψιμη διεργασία παριστάνεται από μία γραμμή που έχει κλίση προς τα δεξιά (σχ. 8.3), και αυτό γιατί η εντροπία πάντα μεγαλώνει σε μη αναστρέψιμες διεργασίες.

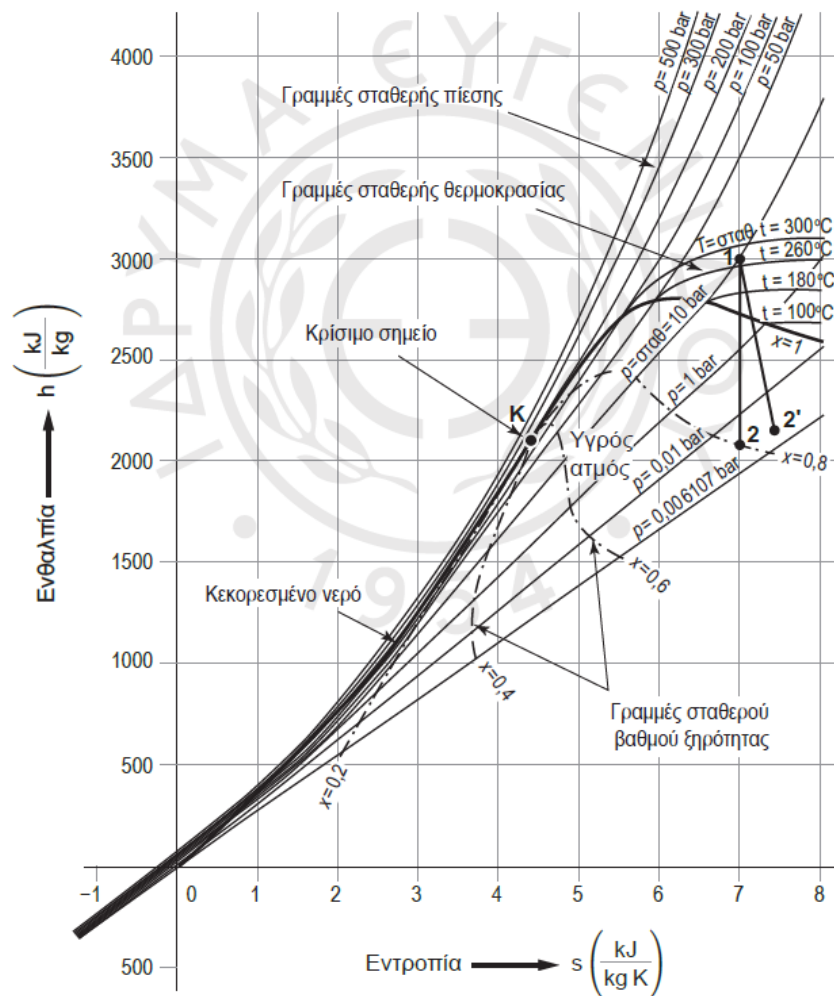


Σχ. 8.5
Ο κύκλος Carnot στο διάγραμμα T-s

Διάγραμμα Mollier ενθαλπίας - εντροπίας ($h-s$)

Το διάγραμμα Mollier είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στους μηχανικούς που ασχολούνται με εγκαταστάσεις ατμού, γιατί μπορούν με βάση αυτό να προσδιορίσουν γραφικά την κατάσταση του ατμού πριν και μετά την εκτόνωση στον στρόβιλο με αρκετή ακρίβεια, χωρίς να χρησιμοποιήσουν τους πίνακες ατμού. Στο σχήμα 8.6 μία ισοεντροπική εκτόνωση μέσα σ' έναν στρόβιλο από την κατάσταση 1 (εισαγωγή του ατμού στον στρόβιλο), μέχρι το σημείο 2 (εξαγωγή από τον στρόβιλο), παριστάνεται με μία κατακόρυφη γραμμή. Η τομή της γραμμής αυτής με τη γραμμή της πίεσης εξαγωγής του στρόβιλου μάς δίνει το σημείο 2' έτσι προσδιορίζουμε αμέσως την κατάσταση της εκτόνωσης (σημείο 2) χωρίς να χρησιμοποιήσουμε τους πίνακες ατμού. Πιο συγκεκριμένα, το σημείο 1 έχει ενθαλπία $h_1 \approx 3000 \text{ kJ/kg}$ και εντροπία $s_1 \approx 7 \text{ kJ/kgK}$ και το σημείο 2 ενθαλπία $h_2 \approx 2100 \text{ kJ/kg}$ και φυσικά την ίδια εντροπία $s_2 = s_1$. Σύμφωνα δε με την εξίσωση (4.15) και δεδομένου ότι $\dot{Q} = 0$, το έργο είναι ίσο με $h_1 - h_2 \approx 900 \text{ kJ/kg}$.

Στο σχήμα 8.6 φαίνεται επίσης η πραγματική εκτόνωση 1-2 στον στρόβιλο. Παρατηρούμε εδώ ότι η εντροπία αυξήθηκε σε σχέση με την ισοεντροπική εκτόνωση. Ήταν κάτι που περιμέναμε, γιατί, όπως είπαμε και προηγουμένως, η εντροπία πάντα αυξάνει σε μία πραγματική εκτόνωση, αφού, λόγω τριβών και άλλων απωλειών, η εκτόνωση δεν μπορεί να είναι αναστρέψιμη διεργασία.



Σχ. 8.6
Διάγραμμα ενθαλπίας - εντροπίας για ατμό (Mollier)

Παράδειγμα 2

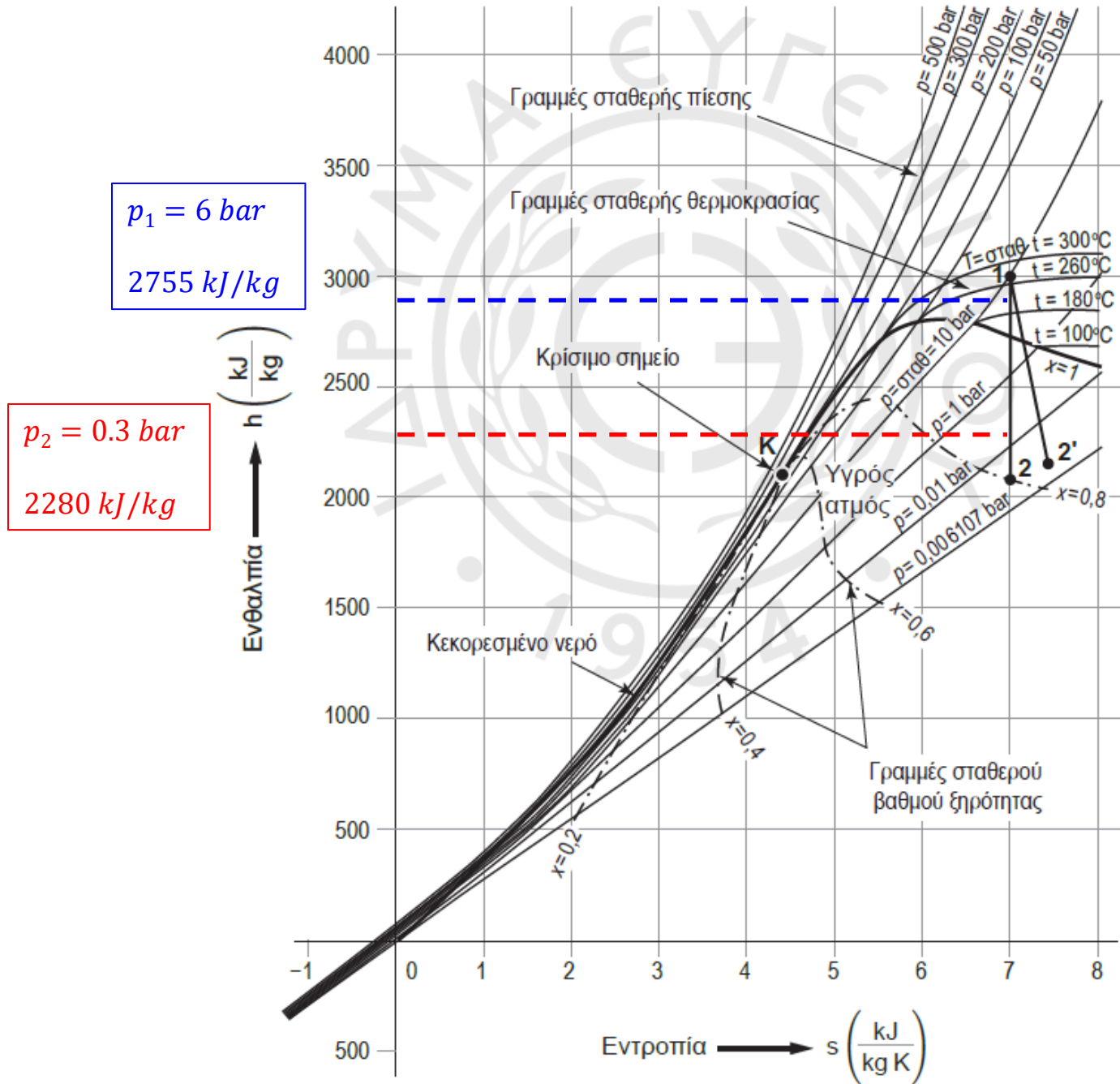
Να βρεθεί το έργο του στροβίλου με τη βοήθεια του διαγράμματος Mollier.

Για αρχική και τελική πίεση 6 και 0.3bar, αντίστοιχα.

Λύση

το **διάγραμμα Mollier** είναι πολύ χρήσιμο, γιατί μας δίνει απαντήσεις με απλή γραφική μέθοδο. Στο παράδειγμά μας η λύση είναι μία απλή κάθετος γραμμή (ή γραμμή εκτόνωσης) στον άξονα της εντροπίας του διαγράμματος. Η αρχή της γραμμής (σημείο 1) είναι το σημείο που ορίζεται από την τομή της γραμμής $p_1 = 6 \text{ bar}$ και της καμπύλης του ξηρού κεκορεσμένου ατμού. Στην κλίμακα της ενθαλπίας διαβάζουμε $h_1 = 2755 \text{ kJ/kg}$. Το τέλος της εκτόνωσης (σημείο 2) ορίζεται από την τομή της γραμμής εκτόνωσης και της γραμμής $p_2 = 0,3 \text{ bar}$. Για το σημείο 2 διαβάζουμε ότι $h_2 = 2280 \text{ kJ/kg}$, οπότε το έργο της εκτόνωσης του ατμού βρίσκεται ως:

$$w_{12} = h_1 - h_2 = 2755 - 2280 = 475 \text{ kJ/kg}$$



Σχ. 8.6
Διάγραμμα ενθαλπίας - εντροπίας για ατμό (Mollier)



Εντροπία (26α/26)

https://www.youtube.com/watch?v=YM-uykVfq_E



Εντροπία (26β/26)

<https://www.youtube.com/watch?v=mg0hueOyoAw>