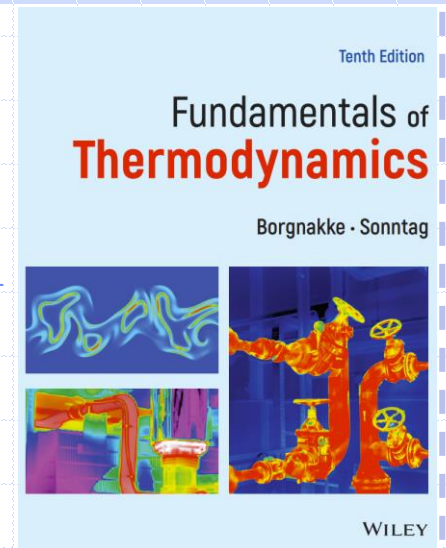


Fundamentals of Thermodynamics
Borgnakke – Sonntag
10^η έκδοση
Εκδόσεις ΚΡΙΤΙΚΗ, 2023



Κεφάλαιο 6ο
Εντροπία

Επιμέλεια παρουσίασης
καθηγήτριας Γ. Σκόδρας

Περιεχόμενα...

- ✓ Εισαγωγή
- ✓ Η εντροπία μιας καθαρής ουσίας
- ✓ Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες
- ✓ Συσχέτιση θερμοδυναμικών ιδιοτήτων
- ✓ Μετατροπή εντροπίας ενός στερεού ή υγρού
- ✓ Μεταβολή εντροπίας ενός ιδανικού αερίου
- ✓ Η αντιστρεπτή πολυτροπική διεργασία για ένα ιδανικό αέριο
- ✓ Αρχή αύξησης εντροπίας
- ✓ Η εντροπία ως μια εξίσωση ρυθμού
- ✓ Εντροπία και χάος
- ✓ Βασικές έννοιες και σχέσεις

Εισαγωγή...

- ❑ Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής αναφέρει ότι, κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε κύκλου στον οποίο υπόκειται ένα σύστημα, το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της θερμότητας είναι ίσο με το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του έργου, χωρίς να θέτει περιορισμούς στην κατεύθυνση της ροής της θερμότητας και του έργου
- ❑ Στην ευρύτερη έννοιά του, ο δεύτερος νόμος αναγνωρίζει ότι οι διεργασίες προχωρούν προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση αλλά όχι προς την αντίθετη
- ❑ Η δεξαμενή θερμότητας είναι ένα σώμα στο οποίο και από το οποίο μπορεί να μεταφέρεται θερμότητα επ' αόριστο χωρίς η θερμοκρασία του να μεταβάλλεται, δηλαδή παραμένει πάντοτε σε σταθερή θερμοκρασία (πχ. ωκεανός, η ατμόσφαιρα)
- ❑ Γίνεται διάκριση μεταξύ μιας δεξαμενής υψηλής θερμοκρασίας και μιας δεξαμενής χαμηλής θερμοκρασίας
- ❑ Μια δεξαμενή από την οποία μεταφέρεται θερμότητα ονομάζεται πηγή (source) και μια δεξαμενή στην οποία μεταφέρεται θερμότητα ονομάζεται αποδέκτης ή καταβόθρα (sink)

Εντροπία – Ιδιότητα ενός συστήματος...

- Στον αντιστρεπτό κύκλο 1-A-2-B-1 είναι: P

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B$$

- Ενώ στον αντιστρεπτό κύκλο 1-C-2-B-1 είναι:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B$$

- Αφαιρώντας κατά μέλη προκύπτει:

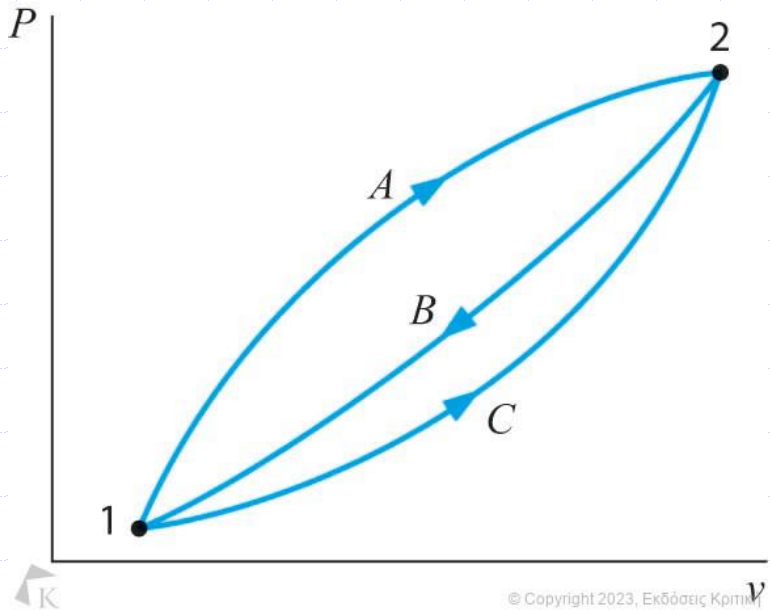
$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C$$

- Το ολοκλήρωμα είναι ανεξάρτητο της διαδρομής, εξαρτώμενο μόνο από τις αρχικές και τελικές συνθήκες:

$$dS \equiv \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev}$$

- Η μεταβολή υπολογίζεται από την σχέση:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev}$$



Αντιστρεπτοί κύκλοι

© Copyright 2023, Εκδόσεις Κρητικής

Εντροπία – Ιδιότητα ενός συστήματος...

- Εφόσον η εντροπία αποτελεί ιδιότητα, η μεταβολή της εντροπίας μιας ουσίας κατά τη μετάβαση από μια κατάσταση σε κάποια άλλη είναι η ίδια μεταξύ αυτών των δύο καταστάσεων για όλες τις διεργασίες, αντιστρεπτές ή μη αντιστρεπτές
- Η Εξίσωση $S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev}$ επιτρέπει τον υπολογισμό των μεταβολών της εντροπίας, αλλά δεν λέει τίποτα για τις απόλυτες τιμές της εντροπίας
- Από τον **τρίτο θερμοδυναμικό νόμο**, που βασίζεται σε παρατηρήσεις χημικών αντιδράσεων σε χαμηλή θερμοκρασία, συμπεραίνεται ότι, στη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός, η εντροπία όλων των καθαρών ουσιών (στην κατάλληλη κρυσταλλική δομή) είναι μηδενική
- Από τη στατιστική θερμοδυναμική προκύπτει ότι, στη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός, η εντροπία είναι μηδέν για όλες τις καθарές ουσίες που συμπεριφέρονται (υποθετικά) ως ιδανικά αέρια
- Όταν δεν υπάρχει μεταβολή της σύστασης, όπως στην περίπτωση μιας χημικής αντίδρασης, αρκεί να δοθούν οι τιμές της εντροπίας ως προς κάποια αυθαίρετα επιλεγμένη κατάσταση αναφοράς, όπως έγινε προηγουμένως κατά την καταγραφή των τιμών της εσωτερικής ενέργειας και της ενθαλπίας

Εντροπία – Ιδιότητα ενός συστήματος...

3^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα

Θεωρώντας τις ιδιότητες συστημάτων σε ισορροπία, στην θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός, το 3^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα διατυπώνεται ως εξής:

- ***“ Η εντροπία ενός ιδανικού κρυστάλλου στο απόλυτο μηδέν (0 Kelvin) είναι μηδενική ”***

Η διατύπωση του 3^{ου} Θερμοδυναμικού αξιώματος των Nernst–Simon, θεωρεί διεργασίες σε μια σταθερή, χαμηλή, θερμοκρασία:

- ***“ Η μεταβολή της εντροπίας οποιουδήποτε συμπυκνωμένου συστήματος που υφίσταται αντιστρεπτή ισοθερμοκρασιακή μεταβολή, προσεγγίζει το μηδέν, καθώς η θερμοκρασία της μεταβολής προσεγγίζει το απόλυτο μηδέν (0 K) ”***

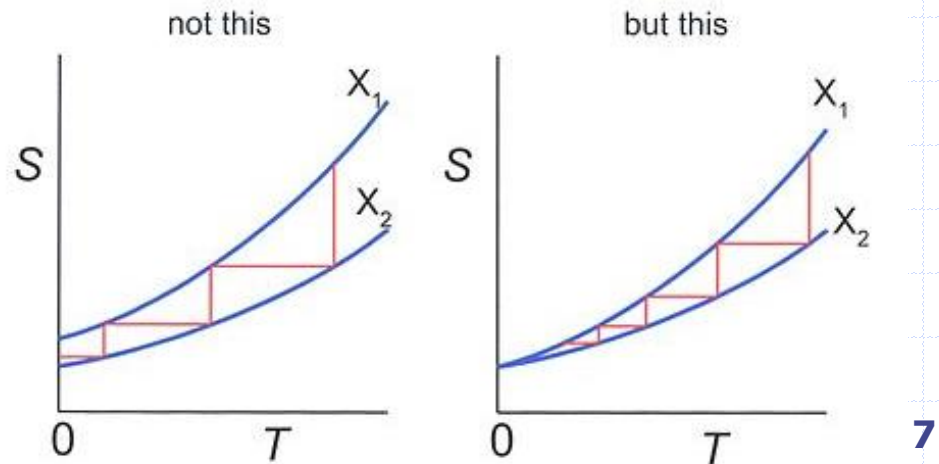
Εντροπία – Ιδιότητα ενός συστήματος...

3^{ος} Θερμοδυναμικός νόμος

Τα υγρά και τα στερεά, θεωρούνται εδώ, ως συμπυκνωμένο σύστημα, οπότε η κλασική διατύπωση του Nernst είναι:

- ***“Δεν είναι δυνατόν για οποιαδήποτε διεργασία, ανεξάρτητα από την ιδανικότητα της,, να μειώσει την εντροπία ενός συστήματος στην τιμή της στο απόλυτο μηδέν, μέσω πεπερασμένου αριθμού διεργασιών”***

Η φυσική σημασία της διατύπωσης Nernst–Simon είναι ότι *“δεν υπάρχει οποιαδήποτε διεργασία που μπορεί να φέρει ένα σύστημα στην θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός, μέσω πεπερασμένου αριθμού βημάτων”*



Εντροπία – Ιδιότητα ενός συστήματος...

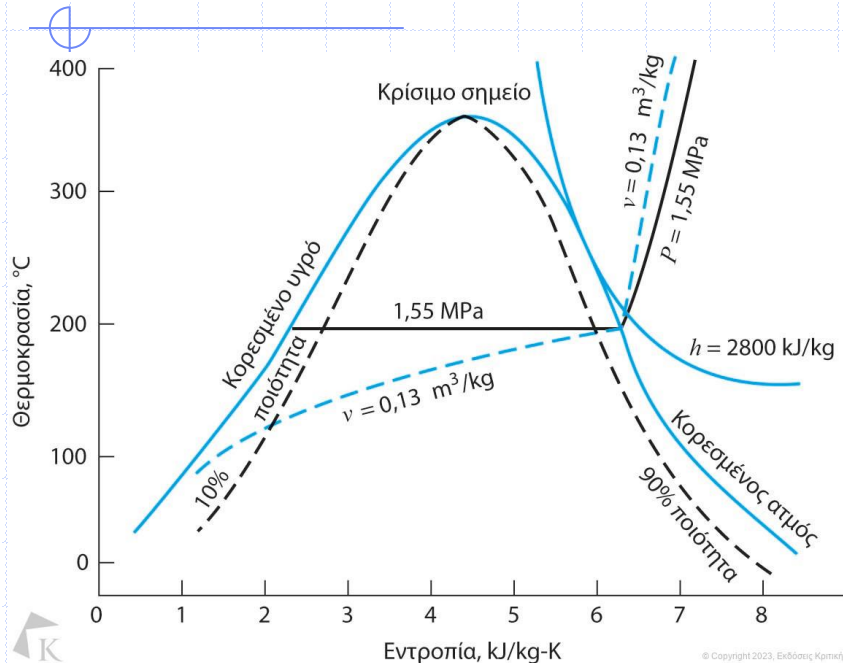
- ❑ Παρατηρήσαμε ότι η Q είναι συνάρτηση μετάβασης, και επομένως το δQ δεν είναι τέλειο διαφορικό
- ❑ Ωστόσο, δεδομένου ότι το $\left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev}$ αποτελεί θερμοδυναμική ιδιότητα, είναι ένα τέλειο διαφορικό
- ❑ Από μαθηματική πλευρά, διαπιστώνουμε ότι ένα ατελές διαφορικό μπορεί να μετατραπεί σε τέλειο διαφορικό με την εισαγωγή ενός παράγοντα ολοκλήρωσης
- ❑ Επομένως, το $\frac{1}{T}$ λειτουργεί ως παράγοντας ολοκλήρωσης για τη μετατροπή του ατελούς διαφορικού δQ στο τέλειο διαφορικό $\frac{\delta Q}{T}$ για μια αντιστρεπτή διεργασία

Η εντροπία μιας καθαρής ουσίας...

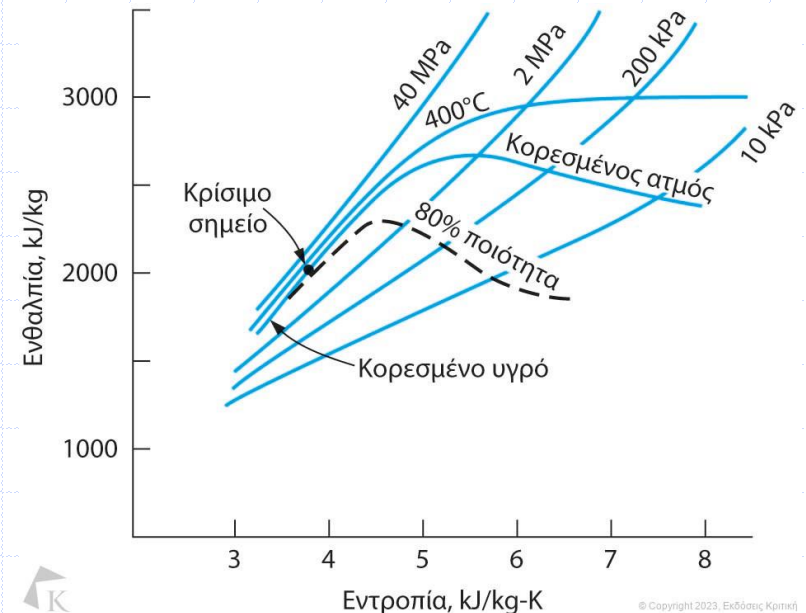
- ❑ Η **εντροπία** αποτελεί εκτατική θερμοδυναμική ιδιότητα ενός συστήματος, με μονάδες μέτρησης της ειδικής εντροπίας $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- ❑ Ο όρος εντροπία αναφέρεται τόσο στη συνολική εντροπία όσο και στην εντροπία ανά μονάδα μάζας
- ❑ Στη διφασική περιοχή, η εντροπία μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ποιότητα του ατμού:

$$s = (1 - x)s_f + xs_g \quad s = s_f + xs_{fg}$$

Η εντροπία μιας καθαρής ουσίας...



Διάγραμμα θερμοκρασίας –
εντροπίας για τον ατμό

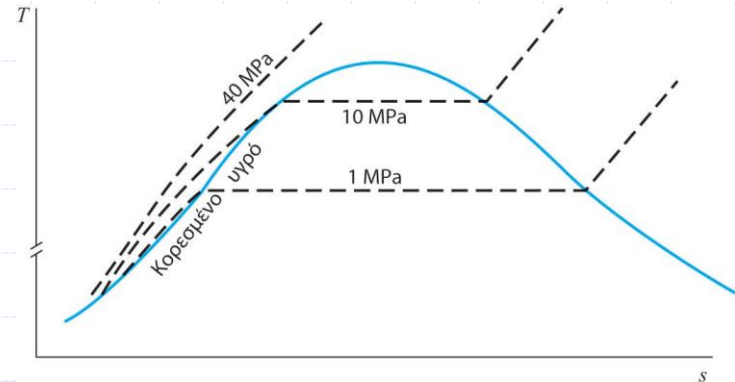


Διάγραμμα ενθαλπίας –
εντροπίας για τον ατμό

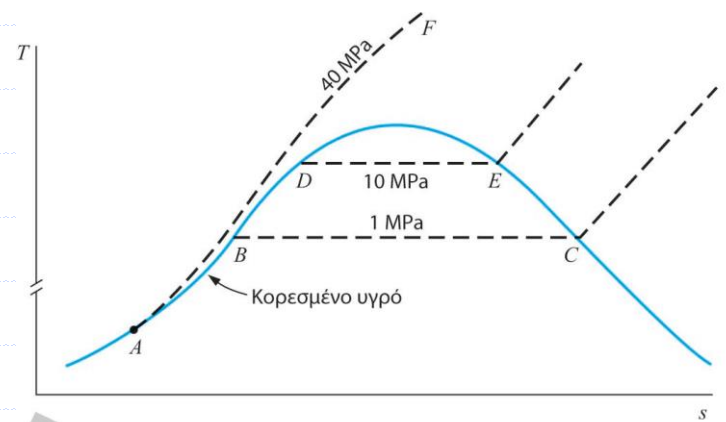
- Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες μιας ουσίας συχνά παρουσιάζονται σε διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας και σε διαγράμματα ενθαλπίας-εντροπίας, που ονομάζονται επίσης διαγράμματα Mollier, από τον Γερμανό Richard Mollier(1863-1935)

Η εντροπία μιας καθαρής ουσίας...

- Τα διαγράμματα είναι σημαντικά τόσο επειδή παρουσιάζουν θερμοδυναμικά δεδομένα όσο και γιατί επιτρέπουν την οπτικοποίηση των μεταβολών κατάστασης που λαμβάνουν χώρα σε διάφορες διεργασίες, ιδίως τα διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας
- Για τις περισσότερες ουσίες, η διαφορά μεταξύ της εντροπίας ενός συμπιεσμένου (υπόψυκτου) και ενός κορεσμένου υγρού στην ίδια θερμοκρασία είναι τόσο μικρή, ώστε μια διεργασία κατά την οποία το υγρό θερμαίνεται υπό σταθερή πίεση σχεδόν συμπίπτει με την καμπύλη κορεσμένου υγρού



(α)



(β)

Διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας για συμπιεσμένο υγρό νερό

Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες...

Διεργασία 1 – 2:
Ισοθερμοκρασιακή
πρόσδοση θερμότητας,
με αύξηση εντροπίας

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} = \frac{1}{T_H} \int_1^2 \delta Q = \frac{Q_2}{T_H}$$

Διεργασία 2 – 3:
Αντιστρεπτή αδιαβατική
εκτόνωση, σταθερής
εντροπίας

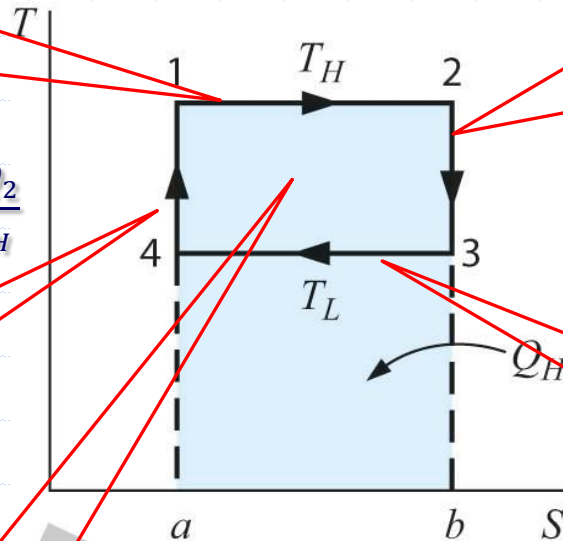
$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev}$$

Διεργασία 4 – 1:
Αντιστρεπτή αδιαβατική
συμπίεση, σταθερής
εντροπίας

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev}$$

Διεργασία 3 – 4:
Ισοθερμοκρασιακή
απόρριψη θερμότητας,
με μείωση εντροπίας

$$S_4 - S_3 = \int_3^4 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} = \frac{1}{T_L} \int_3^4 \delta Q = \frac{Q_4}{T_L}$$

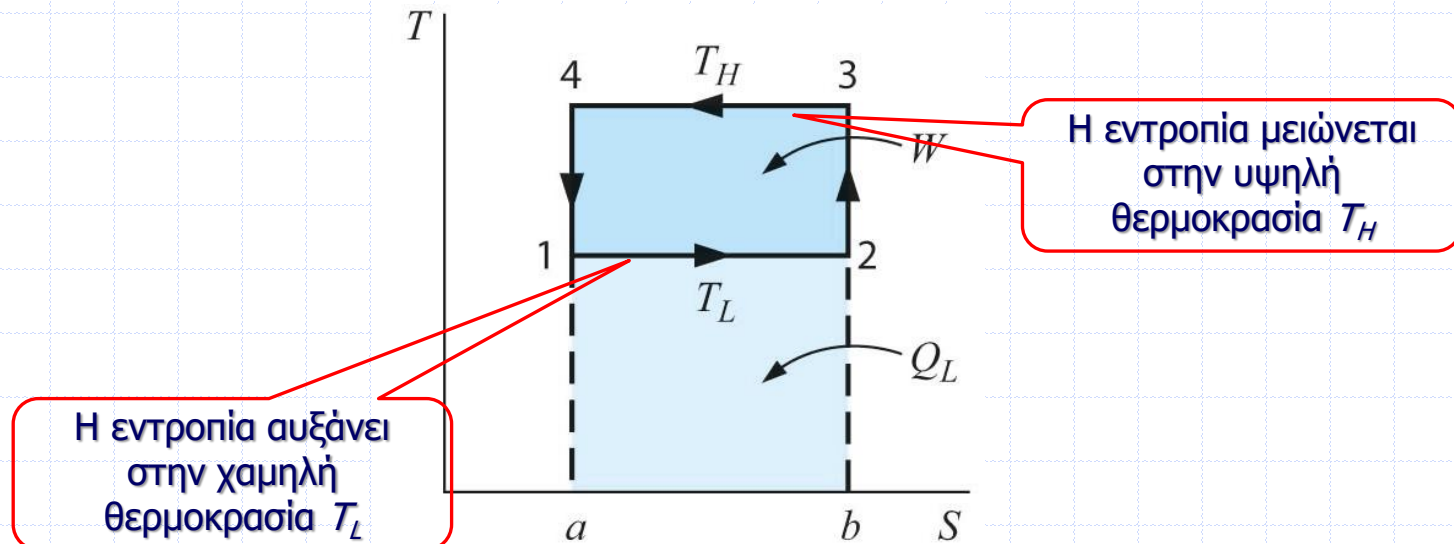


Το καθαρό έργο του
κύκλου είναι ίσο με την
καθαρή μεταφορά
θερμότητας, και είναι το
εμβαδόν 1 – 2 – 3 – 4 – 1

$$n_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{\text{εμβαδο } 1 - 2 - 3 - 4 - 1}{\text{εμβαδο } 1 - 2 - b - a - 1}$$

Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες...

- ❑ Η αύξηση της T_H ενώ η T_L παραμένει σταθερή αυξάνει την απόδοση
- ❑ Η μείωση της T_L ενώ η T_H παραμένει σταθερή αυξάνει την απόδοση
- ❑ Η απόδοση τείνει στο 100% καθώς η απόλυτη θερμοκρασία στην οποία η θερμότητα απορρίπτεται τείνει στο μηδέν
- ❑ Αν ο κύκλος Carnot αντιστραφεί, έχουμε ένα ψυγείο ή μια αντλία θερμότητας



Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες...

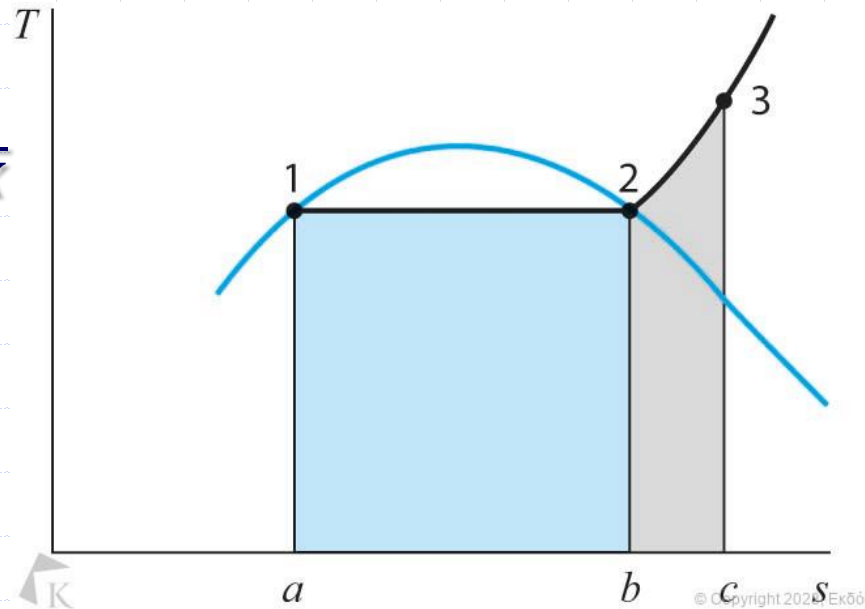
$$s_2 - s_1 = s_{fg} = \frac{1}{m} \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} = \frac{1}{mT} \int_1^2 \delta Q = \frac{{}_1q_2}{T} = \frac{h_{fg}}{T}$$

$$h_{fg} = 1317,1 \text{ kJ/kg}$$

$$T = 311,06 + 273,15 = 584,21 \text{ K}$$

$$s_{fg} = \frac{h_{fg}}{T} = \frac{1317,1 \text{ kJ/kg}}{584,21 \text{ K}} = 2,2544 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$${}_2q_3 = \frac{1}{m} \int_2^3 \delta Q = \int_3^2 T ds$$



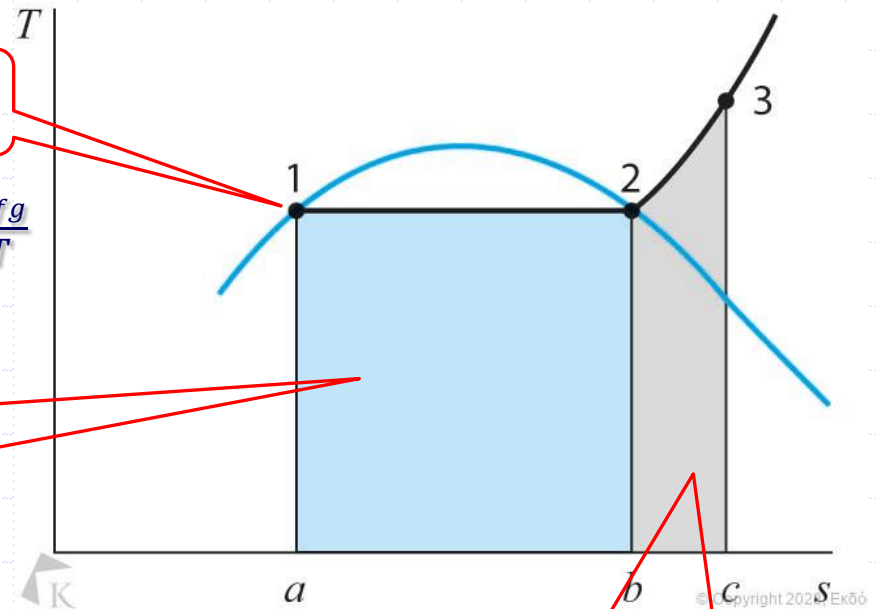
Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες...

- Διεργασίες που είναι εσωτερικά αντιστρεπτές, δηλαδή δεν έχουν καμία μη αντιστρεπτότητα εντός των ορίων του συστήματος

$$s_2 - s_1 = s_{fg} = \frac{1}{m} \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} = \frac{1}{mT} \int_1^2 \delta Q = \frac{1q_2}{T} = \frac{h_{fg}}{T}$$

Για εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες, το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της διεργασίας παριστάνει την θερμότητα που μεταφέρεται

Αλλαγή φάσης υπό σταθερή πίεση



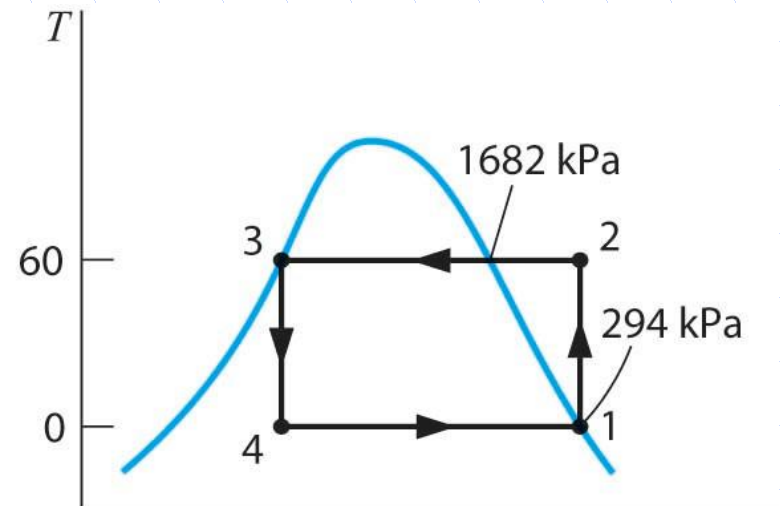
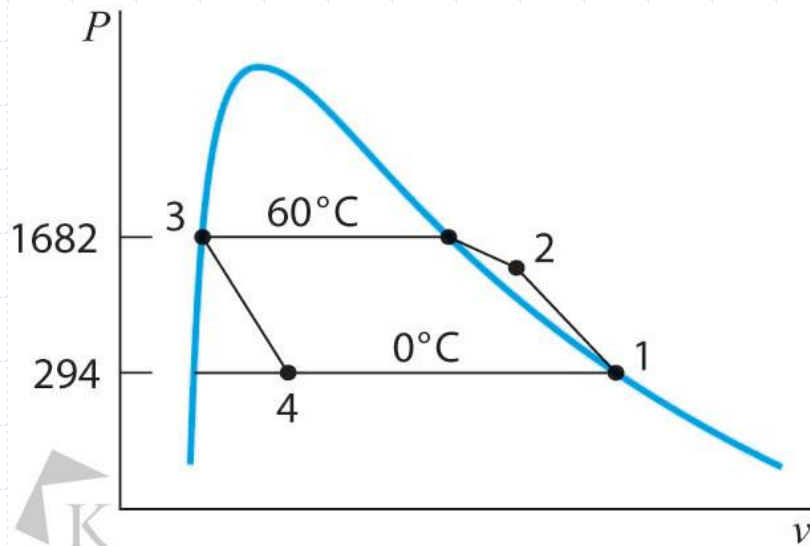
Η μεταφορά θερμότητας στον κορεσμένο ατμό υπό σταθερή πίεση οδηγεί σε υπερθέρμανση

$${}_2q_3 = \frac{1}{m} \int_2^3 \delta Q = \int_2^3 T ds$$

Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες...

Παράδειγμα 6.1

Θεωρήστε μια αντλία θερμότητας που λειτουργεί σε κύκλο Carnot με εργαζόμενο ρευστό το R-134a. Θερμότητα απορροφάται από το R-134a στους 0°C , μια διεργασία κατά την οποία το R-134a από διφασικό μείγμα μετατρέπεται σε κορεσμένο ατμό. Στους 60°C , η θερμότητα απορρίπτεται από το R-134a και συμπυκνώνεται σε κορεσμένο υγρό. Βρείτε την πίεση μετά τη συμπίεση, πριν τη διεργασία απόρριψης θερμότητας, και προσδιορίστε τον συντελεστή απόδοσης για τον κύκλο

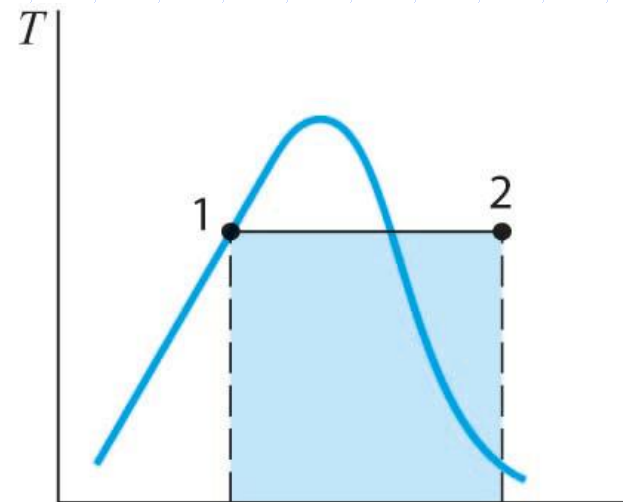
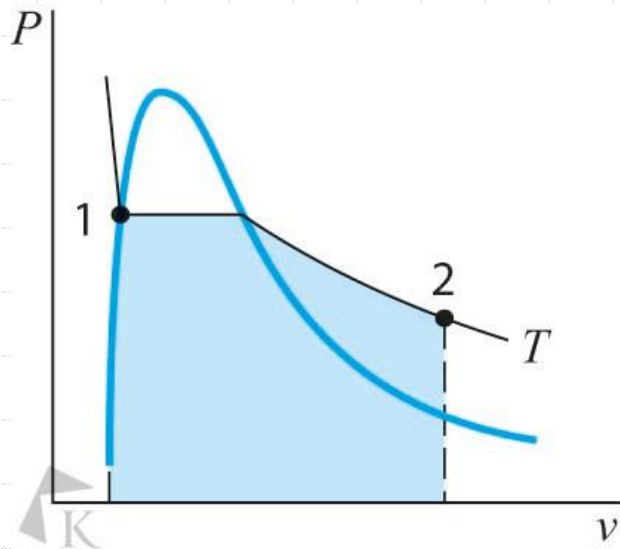


© Copyright 2023, Εκδόσεις Κρημ

Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες...

Παράδειγμα 6.2

Μια διάταξη κυλίνδρου/εμβόλου περιέχει 1 L κορεσμένο υγρό ψυκτικού μέσου R-410A στους 20°C. Το έμβολο διαστέλλεται αργά, διατηρώντας σταθερή θερμοκρασία έως μια τελική πίεση 400 kPa σε μια αντιστρεπτή διεργασία. Υπολογίστε το παραγόμενο έργο και τη μεταφορά θερμότητας που απαιτούνται για την ολοκλήρωση αυτής της διεργασίας



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

Συσχέτιση θερμοδυναμικών ιδιοτήτων...

- Σχέσεις TdS για μια απλή συμπιεστή ουσία, απουσία κινητικής ή δυναμικής ενέργειας (εξισώσεις Gibbs):

$$TdS = dU + P dV$$

$$TdS = dH - V dP$$

$$1^\circ \text{ Θ.Ν.} \quad \delta Q = dU + \delta W$$

$$2^\circ \text{ Θ.Ν.} \quad \delta Q = T dS$$

$$\delta W = P dV$$

$$\Rightarrow TdS = dU + P dV \quad \text{ή} \quad T ds = du + P dv$$

$$\text{ή} \quad dS = \frac{dU}{T} + \frac{PdV}{T} \quad \text{ή} \quad ds = \frac{du}{T} + \frac{Pdv}{T}$$

$$H \equiv U + P V$$

$$dH = dU + P dV + V dP$$

$$TdS = dU + P dV$$

$$\Rightarrow TdS = dH - V dP \quad \text{ή} \quad T ds = dh - v dP$$

$$\text{ή} \quad dS = \frac{dH}{T} - \frac{VdP}{T} \quad \text{ή} \quad ds = \frac{dh}{T} - \frac{vdP}{T}$$

- Θεωρώντας ουσίες με σταθερή σύσταση, διαφορετικές από μια απλή συμπιεστή ουσία, προκύπτουν:

Έργο $\delta W = P dV - F dL - \sigma dA - EMF dZ$

Εντροπία $TdS = dU + PdV - FdL - \sigma dA - EMF dZ$

Μεταβολή εντροπίας ενός στερεού ή υγρού...

- Για τα στερεά και τα υγρά (ασυμπίεστα) έχειδειχθεί ότι $dh \approx du \approx C dT$, οπότε είναι:

$$\left. \begin{array}{l} T ds = du + P dv \\ dh \approx du \approx C dT \end{array} \right\} \Rightarrow ds \approx \frac{du}{T} \approx \frac{C}{T} dT \xrightarrow{C \text{ σταθερό}} s_2 - s_1 \approx C \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Μεταβολή εντροπίας ενός στερεού ή υγρού...

Παράδειγμα 6.3

Ένα κιλό νερό στην υγρή φάση θερμαίνεται από τους 20°C στους 90°C. Υπολογίστε τη μεταβολή της εντροπίας, υποθέτοντας σταθερή ειδική θερμότητα, και συγκρίνετε το αποτέλεσμα με αυτό που προκύπτει όταν χρησιμοποιείτε τους πίνακες του ατμού.

Μάζα ελέγχου: Νερό

Αρχικές και τελικές

καταστάσεις: Γνωστές

Μοντέλο: Σταθερή ειδική θερμότητα, τιμή σε θερμοκρασία δωματίου

Μετατροπή εντροπίας ενός ιδανικού αερίου...

- Για ένα ιδανικό αέριο είναι:

$$\left. \begin{array}{l} T ds = du + P dv \\ du = C_{v0} dT \\ \frac{P}{T} = \frac{R}{v} \end{array} \right\} \Rightarrow ds = C_{v0} \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} \Rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{v0} \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

και

$$\left. \begin{array}{l} T ds = dh - v dP \\ dh = C_{p0} dT \\ \frac{v}{T} = \frac{R}{P} \end{array} \right\} \Rightarrow ds = C_{p0} \frac{dT}{T} + R \frac{dP}{P} \Rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{p0} \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

- Απαιτείται η γνώση της συσχέτισης των C_{v0} και C_{p0} με την θερμοκρασία T
- Επειδή $C_{p0} - C_{v0} = R$ αρκεί η γνώση της μιας μόνο από τις ειδικές θερμότητες

Μετατροπή εντροπίας ενός ιδανικού αερίου...

- Για σταθερή ειδική θερμότητα (ανεξάρτητη της θερμοκρασίας) είναι:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{p0} \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \Rightarrow \quad s_2 - s_1 = C_{p0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

και

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{v0} \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad \Rightarrow \quad s_2 - s_1 = C_{v0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

- Ολοκληρώνοντας τα αποτελέσματα των υπολογισμών της στατιστικής θερμοδυναμικής από τη θερμοκρασία αναφοράς T_0 μέχρι οποιαδήποτε άλλη θερμοκρασία T ορίζεται η **πρότυπη εντροπία**:

Πρότυπη εντροπία $s_T^0 = \int_{T_0}^T \frac{C_{p0}}{T} dT$

- Οπότε μεταξύ δύο οποιονδήποτε καταστάσεων 1 και 2 είναι:

$$s_2 - s_1 = (s_{T_2}^0 - s_{T_1}^0) - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Μετατροπή εντροπίας ενός ιδανικού αερίου...

Παράδειγμα 6.4

Μετατροπή εντροπίας ενός ιδανικού αερίου...

Παράδειγμα 6.5

Υπολογίστε τη μεταβολή της εντροπίας ανά κιλό καθώς αέρας θερμαίνεται από 300 σε 600K ενώ η πίεση μειώνεται από 400 σε 300 kPa.

Υποθέτουμε:

1. Σταθερή ειδική θερμότητα
2. Μεταβλητή ειδική θερμότητα

Μετατροπή εντροπίας ενός ιδανικού αερίου...

- Σε μια ισεντροπική διεργασία, το αριστερό σκέλος της εξίσωσης $s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{p0} \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$ μηδενίζεται (μηδενική μεταβολή εντροπίας) και περιγράφει την σχέση μεταξύ της πίεσης και της θερμοκρασίας στην αρχική και τελική κατάσταση, συμπεριλαμβάνοντας και την σχέση της ειδικής θερμότητας C_{p0} με την θερμοκρασία T
- Στους υπολογισμούς γίνεται χρήση της πρότυπης εντροπίας οι τιμές της οποίας λαμβάνονται από πίνακες

Μετατροπή εντροπίας ενός ιδανικού αερίου...

Παράδειγμα 6.6

Ένα κιλό (1 kg) αέρα περιέχεται σε μια διάταξη κυλίνδρου/εμβόλου σε πίεση 400 kPa και θερμοκρασία 600K. Ο αέρας εκτονώνεται στα 150 kPa με μια αντιστρεπτή αδιαβατική διεργασία. Υπολογίστε το έργο που παράγει ο αέρας.

Μάζα ελέγχου: Αέρας

Αρχική κατάσταση: P_1, T_1 κατάσταση 1 καθορισμένη

Τελική κατάσταση: P_2

Διεργασία: Αντιστρεπτή και αδιαβατική

Μετατροπή εντροπίας ενός ιδανικού αερίου...

ΠΙΝΑΚΑΣ Α.7.1 Ιδιότητες ιδανικού αερίου του αέρα, πρότυπη εντροπία σε πίεση 0,1 MPa (1 Bar)*

$T(K)$	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s_T^0 (kJ/kg-K)	$T(K)$	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s_T^0 (kJ/kg-K)
400	286,49	401,30	7,15926	1700	1391,80	1879,76	8,76472
420	301,04	421,59	7,20875	1750	1438,97	1941,28	8,80039
440	315,64	441,93	7,25607	1800	1486,33	2002,99	8,83516
460	330,31	462,34	7,30142	1850	1533,87	2064,88	8,86908
480	345,04	482,81	7,34499	1900	1581,59	2126,95	8,90219
500	359,84	503,36	7,38692	1950	1629,47	2189,19	8,93452
520	374,73	523,98	7,42736	2000	1677,52	2251,58	8,96611
540	389,69	544,69	7,46642	2050	1725,71	2314,13	8,99699
560	404,74	565,47	7,50422	2100	1774,06	2376,82	9,02721
580	419,87	586,35	7,54084	2150	1822,54	2439,66	9,05678
600	435,10	607,32	7,57638	2200	1871,16	2502,63	9,08573
620	450,42	628,38	7,61090	2250	1919,91	2565,73	9,11409

Μετατροπή εντροπίας ενός ιδανικού αερίου...

- Σε μια ισεντροπική διεργασία ιδανικού αερίου είναι:

$$s_2 - s_1 = 0 = C_{p0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$\Rightarrow \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = \frac{R}{C_{p0}} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{R}{C_{p0}}}$$

$$\frac{R}{C_{p0}} = \frac{C_{p0} - C_{v0}}{C_{p0}} = \frac{k - 1}{k} \quad k = \frac{C_{p0}}{C_{v0}}$$

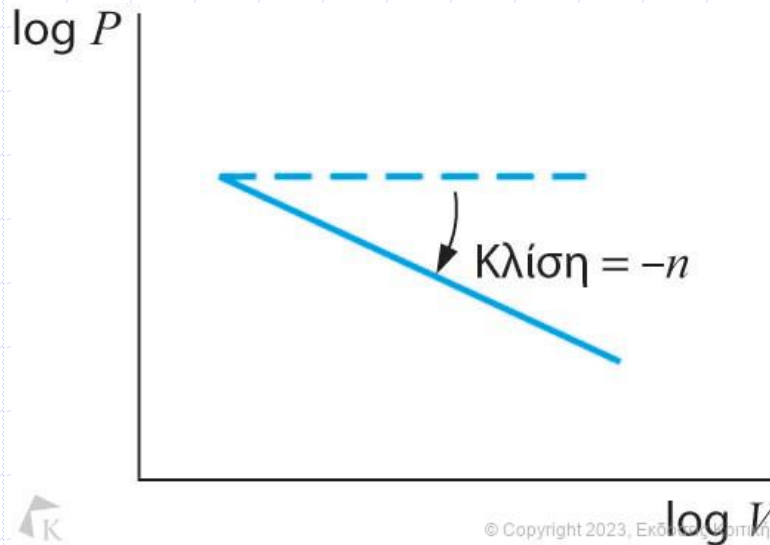
και με $Pv^k = \text{σταθερο}$

είναι:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{(k-1)} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k$$

Η αντιστρεπτή πολυτροπική διεργασία για ένα ιδανικό αέριο...

- Για μια διεργασία με μεταφορά θερμότητας η γραφική παράσταση του $\log P$ ως προς $\log V$ είναι ευθεία γραμμή, και το γινόμενο $P V_n$ είναι σταθερό



$$\frac{d \ln P}{d \ln V} = -n \Rightarrow d \ln P + n d \ln V = 0$$

$$\text{και } P v^n = \text{σταθερο} = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

- Η διεργασία καλείται πολυτροπική, και ισχύουν οι σχέσεις:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(n-1)}{n}} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1}$$

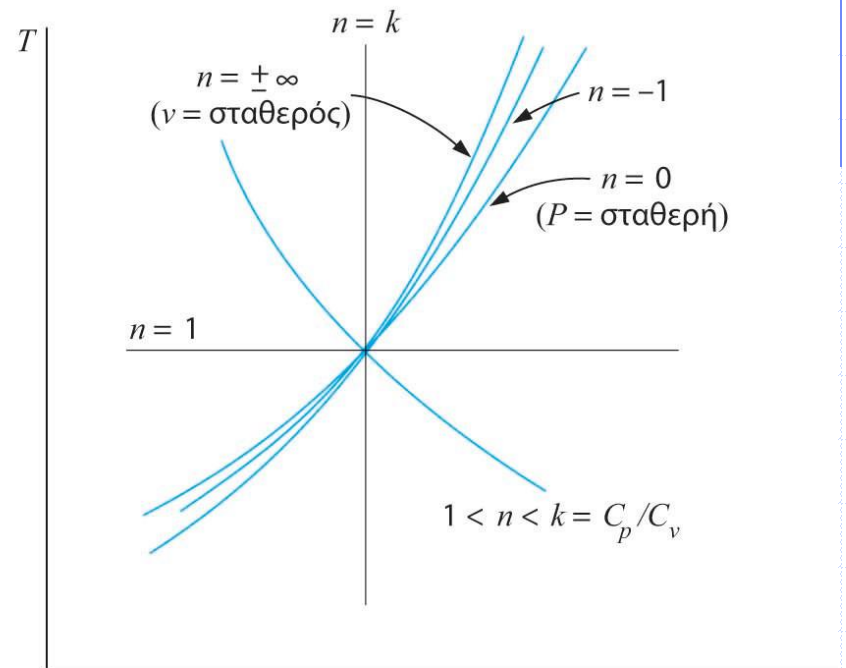
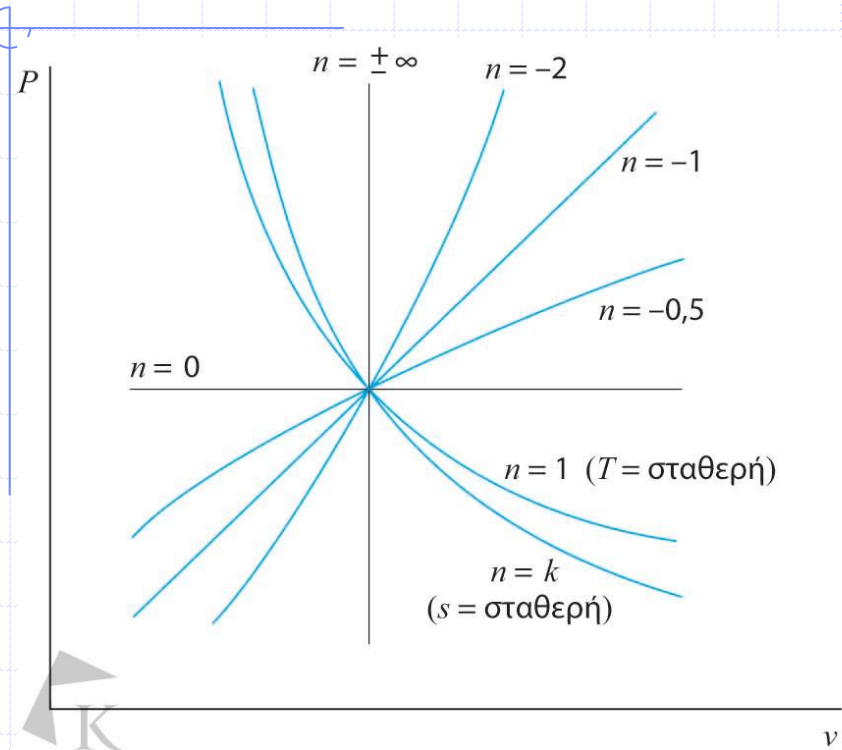
Η αντιστρεπτή πολυτροπική διεργασία για ένα ιδανικό αέριο...

- Για μια μάζα ελέγχου ιδανικού αερίου, το παραγόμενο έργο μιας αντιστρεπτής πολυτροπικής διεργασίας είναι ($\forall n \neq 1$):

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV \quad \text{και} \quad Pv^n = \text{σταθερο} \Rightarrow$$

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV = \text{σταθερο} \int_1^2 \frac{dV}{V^n} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - n} \quad \forall n \neq 1$$

Η αντιστρεπτή πολυτροπική διεργασία για ένα ιδανικό αέριο...



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτικής

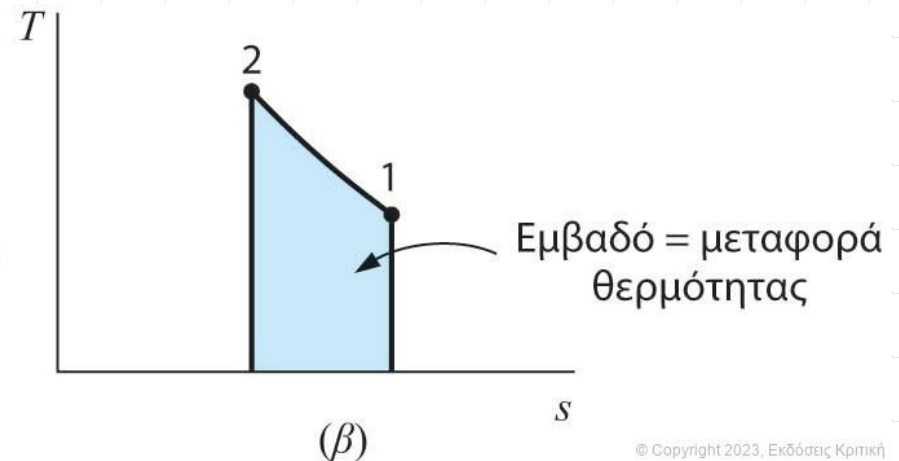
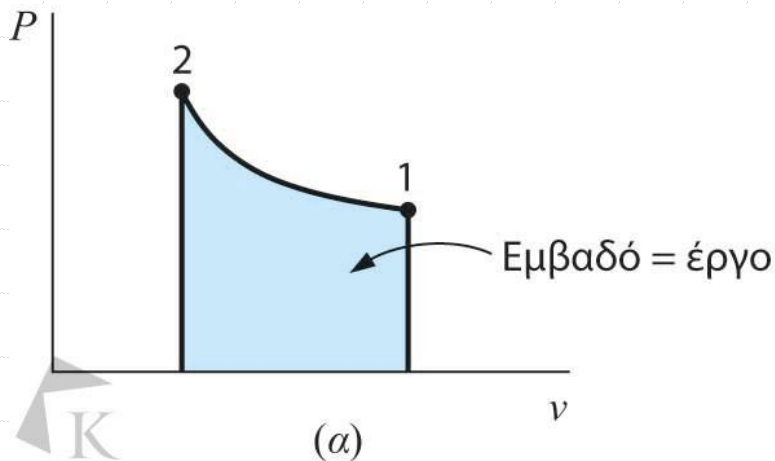
- Ισοβαρής διεργασία:
- Ισοθερμοκρασιακή διεργασία:
- Ισεντροπική διεργασία:
- Ισόχωρη διεργασία:

- $n = 0$ $P = \text{σταθερή}$
- $n = 1$ $T = \text{σταθερή}$
- $n = k$ $s = \text{σταθερή}$
- $n = \infty$ $v = \text{σταθερός}$

Η αντιστρεπτή πολυτροπική διεργασία για ένα ιδανικό αέριο...

Παράδειγμα 6.7

Σε μια αντιστρεπτή διεργασία, το άζωτο συμπιέζεται σε έναν κύλινδρο από τα 100 kPa και τους 20°C έως τα 500 kPa. Κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας συμπίεσης, η σχέση μεταξύ της πίεσης και του όγκου είναι $P V^{1,3} = \text{σταθερή}$. Υπολογίστε το έργο και τη μεταφορά θερμότητας ανά κιλό και δείξτε αυτή τη διεργασία στα διαγράμματα $P - v$ και $T - s$



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

Η αντιστρεπτή πολυτροπική διεργασία για ένα ιδανικό αέριο...

- Σε μια αντιστρεπτή ισοθερμοκρασιακή μεταβολή ιδανικού αερίου είναι:

$$Pv = \text{σταθερο} = P_1V_1 = P_2V_2 \quad \text{και} \quad du = 0$$

- Το παραγόμενο έργο στα κινούμενα όρια μιας απλής συμπίεστης μάζας κατά τη διάρκεια μιας αντιστρεπτής ισοθερμοκρασιακής μεταβολής είναι:

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV \Rightarrow {}_1W_2 = \int_1^2 P dV = \text{σταθερο} \int_1^2 \frac{dV}{V} = P_1V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1V_1 \ln \frac{P_1}{P_2}$$

$$\text{ή} \quad {}_1W_2 = m R T \ln \frac{V_2}{V_1} = m R T \ln \frac{P_1}{P_2}$$

- Σε μια αντιστρεπτή ισοθερμοκρασιακή μεταβολή, η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας είναι $du = 0$ και $Pv = P_1V_1 = P_2V_2 = \text{σταθερό}$, οπότε η μεταφορά θερμότητας είναι:

$${}_1q_2 = \int_1^2 T ds = \int_1^2 du + \int_1^2 P dV = \int_1^2 P dV = P_1v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Μεταβολή της εντροπίας μιας μάζας ελέγχου κατά την διάρκεια μιας μη αντιστρεπτής διεργασίας...

- Ο κύκλος που αποτελείται από τις αντιστρεπτές διεργασίες A και B είναι αντιστρεπτός, οπότε είναι:

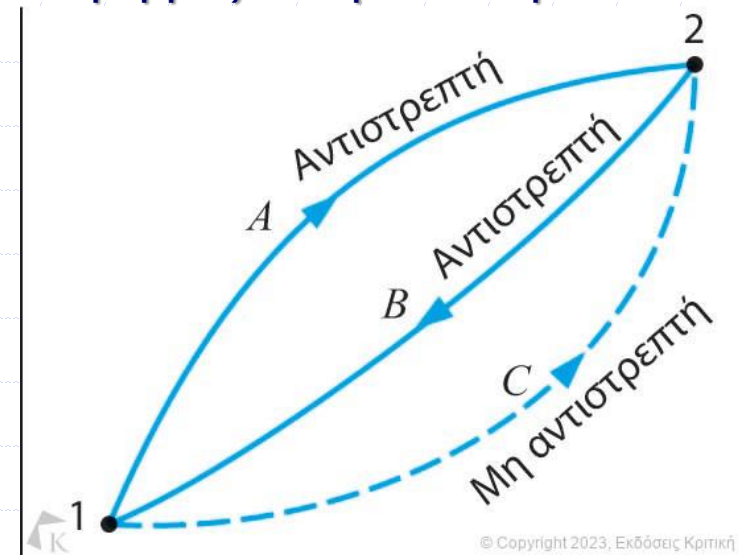
$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B = 0$$

- Ο κύκλος που αποτελείται από την μη αντιστρεπτή διεργασία C και την αντιστρεπτή B είναι μη αντιστρεπτός, οπότε εφαρμόζεται η ανισότητα του Clausius, οπότε:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B < 0$$

- Αφαιρώντας κατά μέλη και αναδιατάσσοντας:

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A > \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C$$



Μεταβολή εντροπίας μάζας ελέγχου για μη αντιστρεπτή διεργασία

Μεταβολή της εντροπίας μιας μάζας ελέγχου κατά την διάρκεια μιας μη αντιστρεπτής διεργασίας...

- Εφόσον η διαδρομή A είναι αντιστρεπτή και η εντροπία αποτελεί μια ιδιότητα:

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A = \int_1^2 dS_A = \int_1^2 dS_C$$

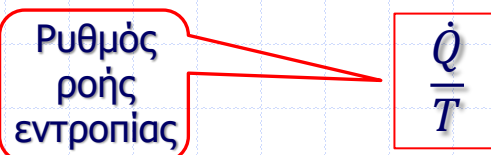
Επομένως:

$$\int_1^2 dS_C > \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C$$

- Καθώς η διαδρομή C είναι τυχαία, το γενικό αποτέλεσμα είναι:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \qquad S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

Ρυθμός
ροής
εντροπίας


$$\frac{\dot{Q}}{T}$$

Παραγωγή εντροπίας και η εξίσωση της εντροπίας...

- Η μεταβολή της εντροπίας σε μια μη αντιστρεπτή διεργασία είναι μεγαλύτερη από τη μεταβολή σε μια αντιστρεπτή διεργασία για ίδια δQ και T , δηλαδή:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_{gen}$$

Παραγωγή εντροπίας στην μάζα ελέγχου

και $\delta S_{gen} \geq 0$

Η ισότητα ισχύει για αντιστρεπτές διεργασίες

- Η ποσότητα της εντροπίας δS_{gen} είναι η παραγωγή (generation) εντροπίας στη διεργασία λόγω μη αντιστρεπτοτήτων που προκύπτουν στο εσωτερικό του συστήματος, και μπορεί να προέλθει από την τριβή, τις ελεύθερες εκτονώσεις και την εσωτερική μεταφορά ενέργειας (ανακατανομή) για μια πεπερασμένη διαφορά θερμοκρασίας
- Εκτός από αυτή την εσωτερική παραγωγή εντροπίας, είναι δυνατές εξωτερικές μη αντιστρεπτότητες κατά τη μεταφορά θερμότητας για πεπερασμένες διαφορές θερμοκρασίας καθώς το δQ μεταφέρεται από μια δεξαμενή ή με τη μηχανική μεταφορά έργου.

Παραγωγή εντροπίας και η εξίσωση της εντροπίας...

- Σε μια αντιστρεπτή διεργασία, η παραγωγή εντροπίας είναι ίση με μηδέν και επομένως οι όροι της μεταφοράς θερμότητας και του έργου είναι:

$$\delta Q = T dS \quad \text{και} \quad \delta W = P dV$$

- Σε μια μη αντιστρεπτή διεργασία η παραγωγή εντροπίας είναι διάφορη του μηδενός, η μεταφορά θερμότητας και η μεταφορά θερμότητας είναι:

$$\delta Q_{irr} = T dS - T \delta S_{gen}$$

και επομένως είναι μικρότερη από αυτή της αντιστρεπτής περίπτωσης για την ίδια μεταβολή κατάστασης dS

$$\left. \begin{array}{l} \text{Ισοζύγιο} \\ \text{ενέργειας} \quad \delta Q_{irr} = dU + \delta W_{irr} \\ 1^{\text{η}} \text{ σχέση} \\ T dS \quad T dS = dU + P dV \end{array} \right\} \Rightarrow \delta W_{irr} = P dV - T \delta S_{gen}$$

Το έργο μειώνεται κατά μια ποσότητα ανάλογη με την παραγωγή εντροπίας

- Ο όρος ($T \delta S_{gen}$) καλείται **απώλεια έργου** (lost work) και εκφράζει τον περιορισμό της ικανότητας παραγωγής έργου

Παραγωγή εντροπίας και η εξίσωση της εντροπίας...

- Με ολοκλήρωση της $dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_{gen}$ προκύπτει:

Ισοζύγιο
εντροπίας

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 dS = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{2 gen}$$

- Στο όριο μιας αντιστρεπτής διεργασίας, η παραγωγή εντροπίας είναι μηδενική, και η ανωτέρω εξίσωση μεταπίπτει στην:

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

όπου ισχύει η ισότητα, και το έργο γίνεται $\int P dV$

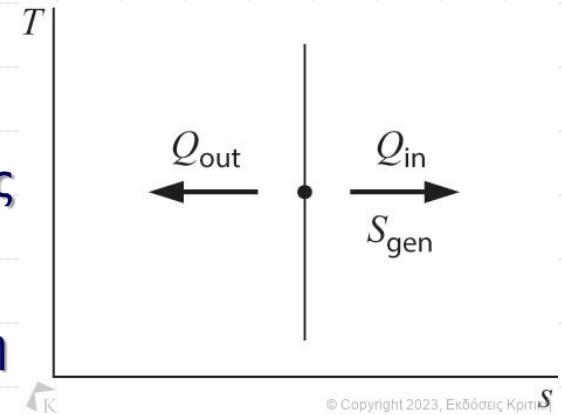
- Η εξίσωση του ισοζυγίου της εντροπίας για μια μάζα ελέγχου θα μπορούσε να περιλαμβάνει πολλά υποσυστήματα, και μπορεί να γραφτεί στη γενική μορφή:

$$\Delta \text{Εντροπία} = \text{εισοδος (in)} - \text{εξοδος (out)} + \text{παραγωγή (gen)}$$

- Η εντροπία μπορεί να παραχθεί, αλλά δεν μπορεί να καταστραφεί

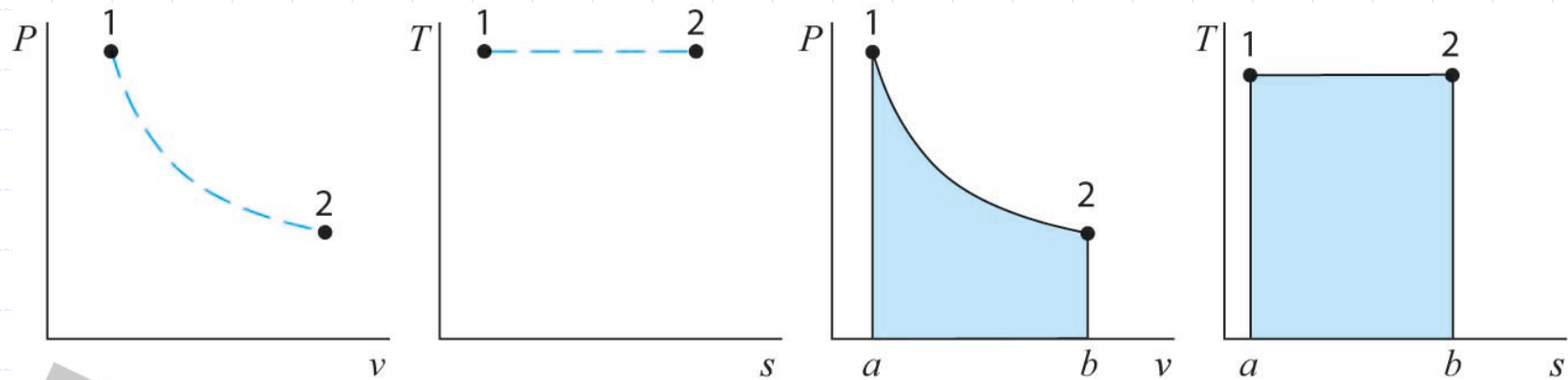
Παραγωγή εντροπίας και η εξίσωση της εντροπίας...

- ❑ Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους η εντροπία ενός συστήματος μπορεί να αυξηθεί: (1) με τη μεταφορά θερμότητας σε αυτό και (2) με μια μη αντιστρεπτή διεργασία
- ❑ Δοθέντος ότι η παραγωγή εντροπίας δεν μπορεί να είναι αρνητική, η εντροπία ενός συστήματος είναι δυνατό να μειωθεί μόνο με τη μεταφορά θερμότητας από το σύστημα
- ❑ Για μια αδιαβατική διεργασία, $\delta Q = 0$, και επομένως κάθε αύξηση της εντροπίας συνδέεται πάντοτε με μη αντιστρεπτότητες
- ❑ Συνέπεια των μη αντιστρεπτοτήτων είναι το πραγματικό έργο να είναι μικρότερο από το αντιστρεπτό, και άρα, μικρότερη παραγωγή έργου από τη μάζα ελέγχου σε μια διεργασία εκτόνωσης και κατανάλωση περισσότερου έργου ($\delta W < 0$) σε μια διεργασία συμπίεσης
- ❑ Η μεταβολή της s σχετίζεται με τη μεταφορά θερμότητας που διαρρέει την επιφάνεια ελέγχου, επομένως οποιαδήποτε αύξηση για τον όγκο ελέγχου συνοδεύεται από ίσου μεγέθους μείωση έξω από τον όγκο ελέγχου



Παραγωγή εντροπίας και η εξίσωση της εντροπίας...

- Το έργο για μια μη αντιστρεπτή διεργασία δεν είναι ίσο με $\int P dV$ και η μεταφορά θερμότητας δεν είναι ίση με $\int T dS$, και άρα, στα διαγράμματα $P-v$ και $T-s$ το εμβαδό κάτω από τη γραμμή της διαδρομής δεν αναπαριστά αντίστοιχα έργο και θερμότητα



Μη αντιστρεπτές διεργασίες

Αντιστρεπτές διεργασίες

Αρχή αύξησης της εντροπίας...

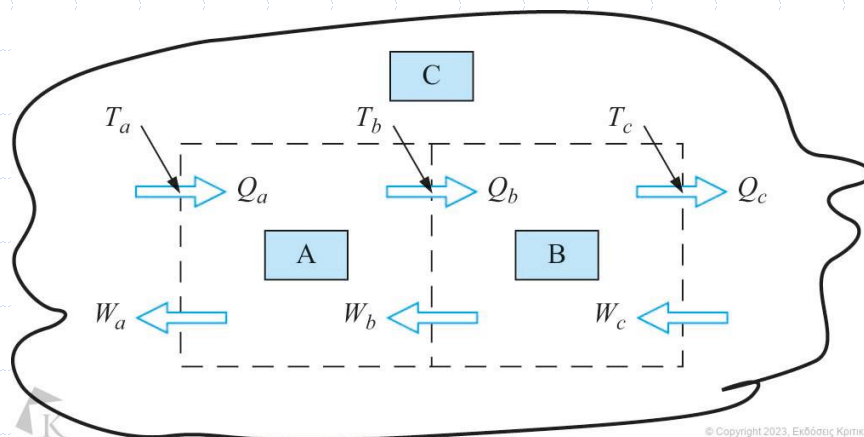
Μεταβολή = εισοδος (in) – εξοδος (out) + παραγωγή (gen)

Ενέργεια

$$(E_2 - E_1)_A = Q_a - W_a - Q_b + W_b$$

$$(E_2 - E_1)_B = Q_b - W_b - Q_c + W_c$$

$$(E_2 - E_1)_C = Q_c + W_a - Q_a - W_c$$



$$(E_2 - E_1)_{total} = (E_2 - E_1)_A + (E_2 - E_1)_B + (E_2 - E_1)_C$$

$$= Q_a - W_a - Q_b + W_b + Q_b - W_b - Q_c + W_c + Q_c + W_a - Q_a - W_c = 0$$

- ❑ Η συνολική ενέργεια δεν έχει μεταβληθεί, δηλαδή η ενέργεια διατηρείται (όλοι οι όροι μεταφοράς στο δεξιό σκέλος απαλείφονται ανά ζεύγη)
- ❑ Η ενέργεια δεν αποθηκεύεται στην ίδια μορφή ή θέση που είχε πριν τη διεργασία, η συνολική ποσότητα όμως παραμένει ίδια

Αρχή αύξησης της εντροπίας...

Εντροπία

$$(S_2 - S_1)_A = \int \frac{\delta Q_a}{T_a} - \int \frac{\delta Q_b}{T_b} + S_{gen A}$$

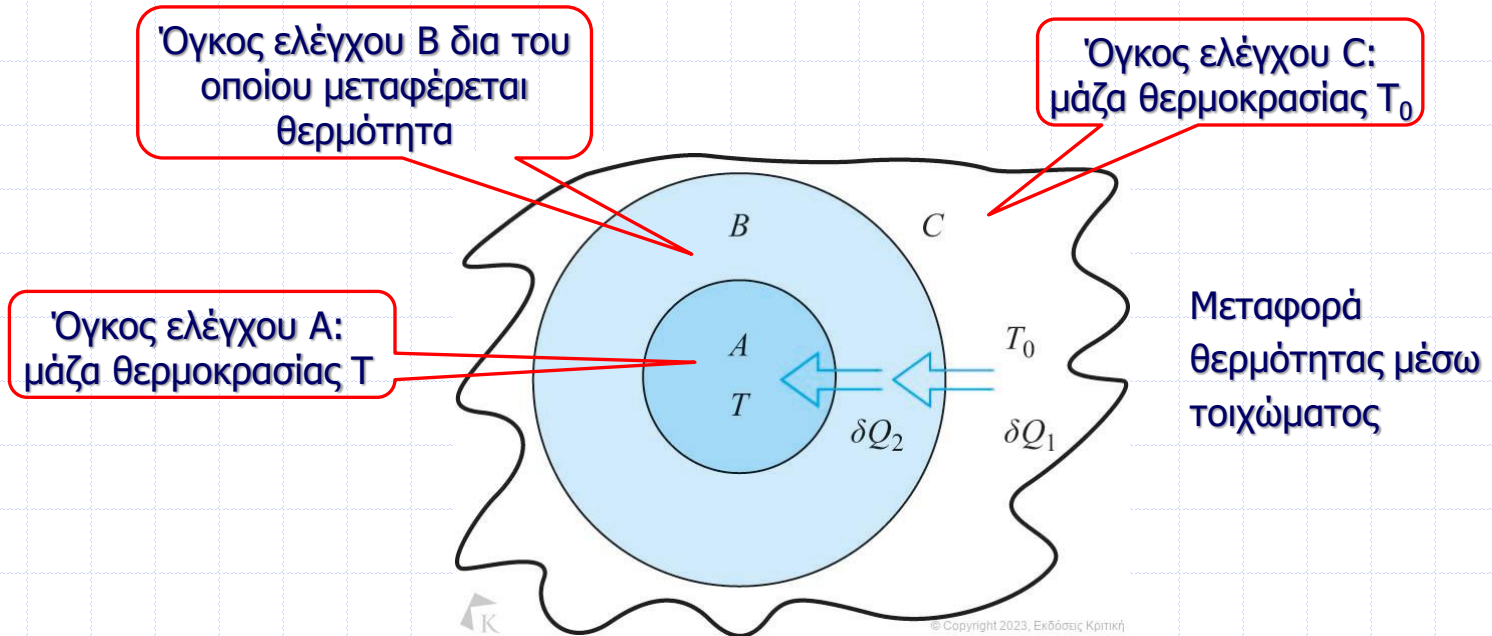
$$(S_2 - S_1)_B = \int \frac{\delta Q_b}{T_b} - \int \frac{\delta Q_c}{T_c} + S_{gen B}$$

$$(S_2 - S_1)_C = \int \frac{\delta Q_c}{T_c} - \int \frac{\delta Q_a}{T_a} + S_{gen C}$$

$$\begin{aligned}(S_2 - S_1)_{total} &= (S_2 - S_1)_A + (S_2 - S_1)_B + (S_2 - S_1)_C \\ &= \int \frac{\delta Q_a}{T_a} - \int \frac{\delta Q_b}{T_b} + S_{gen A} + \int \frac{\delta Q_b}{T_b} - \int \frac{\delta Q_c}{T_c} + S_{gen B} + \int \frac{\delta Q_c}{T_c} - \int \frac{\delta Q_a}{T_a} + S_{gen C} \\ &= S_{gen A} + S_{gen B} + S_{gen C} \geq 0\end{aligned}$$

- ❑ Για την εντροπία όλοι οι όροι μεταφοράς απαλείφονται, αφήνοντας μόνο τους θετικούς όρους της παραγωγής εντροπίας για κάθε τμήμα του συνολικού κόσμου
- ❑ Η συνολική εντροπία αυξάνεται και στη συνέχεια δεν διατηρείται
- ❑ Μόνο εφόσον έχουμε αντιστρεπτές διεργασίες σε όλα τα τμήματα του κόσμου θα μηδενιστεί το δεξί σκέλος

Αρχή αύξησης της εντροπίας...



Εξίσωση ενέργειας:

$$dE = 0 = \delta Q_1 - \delta Q_2 \Rightarrow \delta Q_1 = \delta Q_2 = \delta Q$$

Εξίσωση εντροπίας:

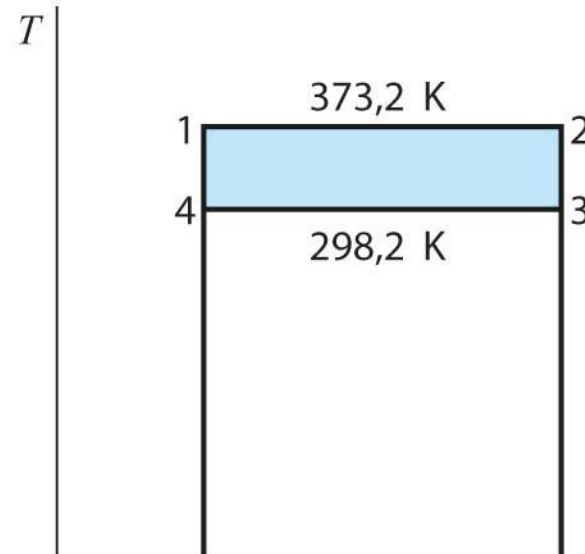
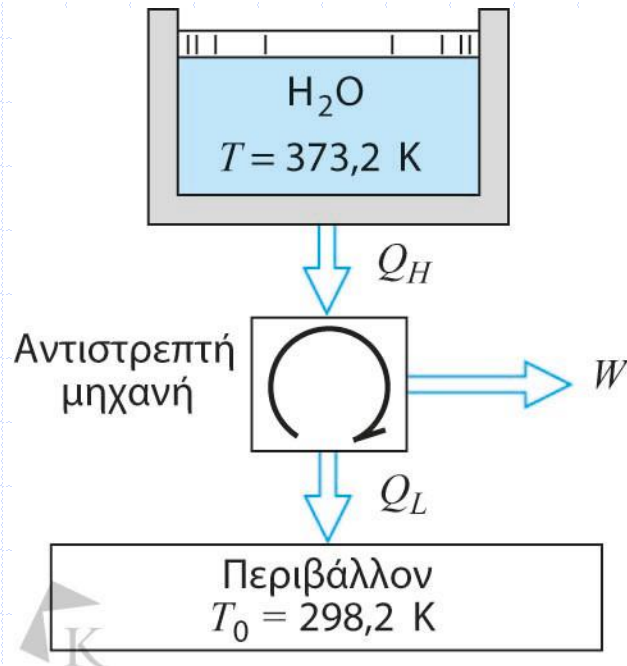
$$dS = 0 = \frac{\delta Q}{T_0} - \frac{\delta Q}{T} + S_{gen B} \Rightarrow$$

$$S_{gen B} = \frac{\delta Q}{T_0} - \frac{\delta Q}{T} = \delta Q \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \geq 0$$

Αρχή αύξησης της εντροπίας...

Παράδειγμα 6.8

Ας υποθέσουμε ότι 1 kg κορεσμένος υδρατμός στους 100°C συμπυκνώνεται προς κορεσμένο υγρό στους 100°C σε μια διεργασία σταθερής πίεσης με μεταφορά θερμότητας στον περιβάλλοντα αέρα, ο οποίος βρίσκεται στους 25°C. Πόση είναι η καθαρή αύξηση της εντροπίας νερού και περιβάλλοντος;



Η εντροπία ως μια εξίσωση ρυθμού...

Ισοζύγιο εντροπίας

Πεπερασμένη μεταβολή $S_2 - S_1 = \int_1^2 dS = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{2\ gen}$

Διεργασία $dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_{gen} \Rightarrow \frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \frac{\delta Q}{dt} + \frac{\delta S_{gen}}{dt}$

Ρυθμός μεταβολής εντροπίας ως αποτέλεσμα του ρυθμού ροής εντροπίας στην μάζα ελέγχου

$$\frac{dS_{cm}}{dt} = \sum \frac{1}{T} \dot{Q} + \dot{S}_{gen}$$

Η εντροπία ως μια εξίσωση ρυθμού...

Παράδειγμα 6.9

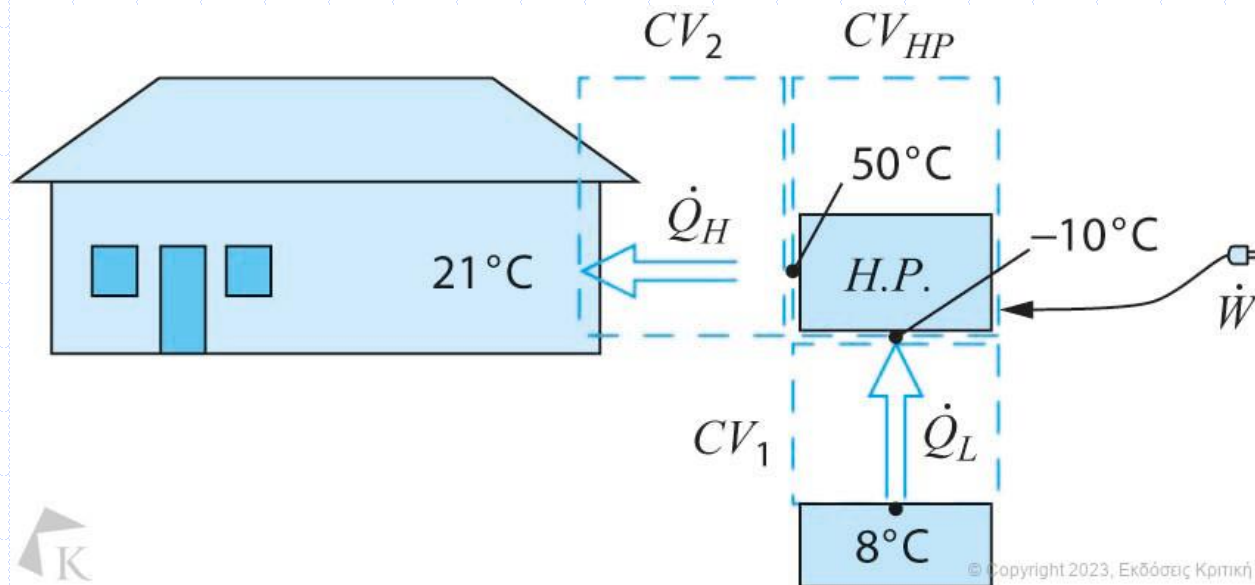
Θεωρήστε ένα ηλεκτρικό θερμαντικό σώμα που μετατρέπει 1 kW ηλεκτρικής ισχύος σε ρυθμό ροής θερμότητας 1 kW, η οποία ελευθερώνεται στους 600 K από την επιφάνεια (surface) της θερμής αντίστασης. Ας εξετάσουμε τη διεργασία μετατροπής της ενέργειας από ηλεκτρική σε μεταφορά θερμότητας και ας βρούμε τον ρυθμό συνολικής παραγωγής εντροπίας

Μάζα ελέγχου: Η αντίσταση του ηλεκτρικού θερμαντικού σώματος
Κατάσταση: Σταθερή θερμοκρασία αντίστασης 600 K

Η εντροπία ως μια εξίσωση ρυθμού...

Παράδειγμα 6.10

Θεωρήστε ένα σύγχρονο κλιματιστικό που χρησιμοποιεί R-410A το οποίο λειτουργεί ως αντλία θερμότητας, όπως φαίνεται στο Σχήμα. Διαθέτει συντελεστή απόδοσης 4 με ισχύ εισόδου 10 kW. Η ψυχρή πλευρά είναι θαμμένη υπόγεια, όπου η θερμοκρασία φτάνει τους 8°C, ενώ η θερμή πλευρά είναι ένα σπίτι το οποίο διατηρείται στους 21°C. Για λόγους απλούστευσης, υποθέτουμε ότι ο κύκλος έχει υψηλή θερμοκρασία 50°C και χαμηλή θερμοκρασία -10°C. Θα θέλαμε να βρούμε πού παράγεται η εντροπία σε σχέση με την αντλία θερμότητας, υποθέτοντας λειτουργία σταθεροποιημένης κατάστασης.



Η εντροπία ως μια εξίσωση ρυθμού...

- Πραγματική θερμική μηχανή που λειτουργεί σε συνθήκες σταθεροποιημένης κατάστασης:

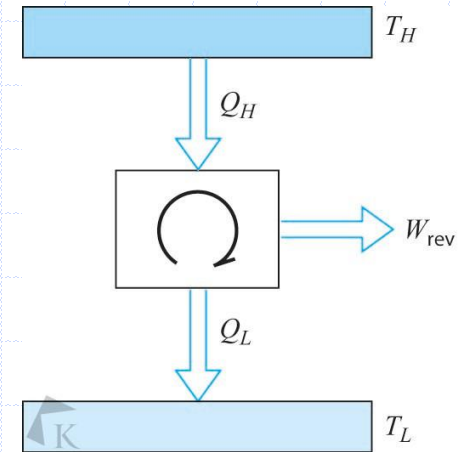
$$\left. \begin{aligned} 0 &= \dot{Q}_H - \dot{Q}_L - \dot{W}_{HE} \\ 0 &= \frac{\dot{Q}_H}{T_H} - \frac{\dot{Q}_L}{T_L} + \dot{S}_{gen} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \dot{Q}_L = \frac{T_L}{T_H} \dot{Q}_H + T_L \dot{S}_{gen}$$

- Αντικαθιστώντας στο ισοζύγιο ενέργειας:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{HE} &= \dot{Q}_H - \dot{Q}_L \\ &= \dot{Q}_H - \frac{T_L}{T_H} \dot{Q}_H - T_L \dot{S}_{gen} \\ &= \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) \dot{Q}_H - T_L \dot{S}_{gen} \end{aligned}$$

- Το αποτέλεσμα συνδέεται με την πραγματική απόδοση

$$\begin{aligned} \dot{W}_{HE} &= n_{HE \text{ carnot}} \dot{Q}_H - \text{απώλεια (loss)} \\ &= n_{HE \text{ actual}} \dot{Q}_H \end{aligned}$$



Η εντροπία ως μια εξίσωση ρυθμού...

- Πραγματικό ψυγείο (αντλία θερμότητας) που λειτουργεί σε συνθήκες σταθεροποιημένης κατάστασης:

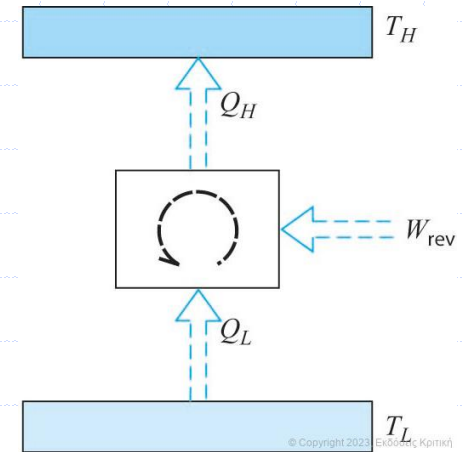
$$\left. \begin{aligned} 0 &= \dot{Q}_L - \dot{Q}_H + \dot{W}_{ref} \\ 0 &= \frac{\dot{Q}_L}{T_L} - \frac{\dot{Q}_H}{T_H} + \dot{S}_{gen} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \dot{Q}_H = \frac{T_H}{T_L} \dot{Q}_L + T_H \dot{S}_{gen}$$

- Για την έκφραση της θερμότητας \dot{Q}_L ως προς το εισερχόμενο έργο αντικαθιστούμε στην εξίσωση ενέργειας:

$$0 = \dot{Q}_L - \left[\frac{T_H}{T_L} \dot{Q}_L + T_H \dot{S}_{gen} \right] + \dot{W}_{ref} \Rightarrow \dot{Q}_L = \frac{T_L}{T_H - T_L} \dot{W}_{ref} - \frac{T_H T_L}{T_H - T_L} \dot{S}_{gen}$$

- Το αποτέλεσμα συνδέεται με τον πραγματικό συντελεστή απόδοσης

$$\begin{aligned} \dot{Q}_L &= \beta_{carnot} \dot{W}_{ref} - \text{απώλεια (loss)} \\ &= \beta_{actual} \dot{W}_{ref} \end{aligned}$$

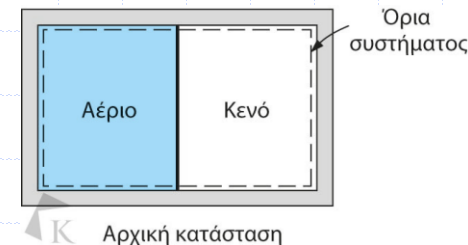


Η εντροπία ως μια εξίσωση ρυθμού...

- ❑ Το μέγιστο όφελος επιτυγχάνεται για μια αντιστρεπτή διεργασία, $\dot{S}_{gen} = 0$, καθώς η εξίσωση του έργου δίνει μέγιστο \dot{W}_{HE} για μια δεδομένη εισροή \dot{Q}_H , ενώ για το ψυγείο το ισοζύγιο ενέργειας δίνει μέγιστο \dot{Q}_L για ένα δεδομένο \dot{W}_{ref} εισόδου
- ❑ Για μια αντιστρεπτή διάταξη, η ανάλυση προέβλεψε την απόδοση της θερμικής μηχανής Carnot και του συντελεστή απόδοσης του ψυγείου Carnot
- ❑ Για μια πραγματική διάταξη, η ανάλυση δείχνει ότι η μείωση της απόδοσης (χαμηλότερα \dot{W}_{HE} και \dot{Q}_L) είναι ευθέως ανάλογη της παραγωγής εντροπίας

Εντροπία και χάος...

- ❑ Πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής "τι είναι ενέργειδ"
- ❑ Δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής "τι είναι εντροπιδ"
- ❑ Στην στατιστική θερμοδυναμική, η εντροπία ως ιδιότητα ορίζεται με όρους πιθανοτήτων
- ❑ Η καθαρή αύξηση της εντροπίας που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια μιας μη αντιστρεπτής διεργασίας συνδέεται με τη μεταβολή από μια λιγότερο πιθανή σε μια περισσότερο πιθανή κατάσταση
- ❑ Σε ένα πολύ απλό σύστημα, οι ιδιότητες όπως η U και η S , υπολογίζονται ως μέσοι όροι για πολλά σωματίδια σε μοριακό επίπεδο, επομένως αυτά (άτομα και μόρια) δεν υφίστανται όλα στην ίδια ακριβώς κβαντική κατάσταση
- ❑ Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών διαμορφώσεων, πιθανών για δεδομένη μακροσκοπικά κατάσταση, που εισάγουν αβεβαιότητα ή χάος στο σύστημα



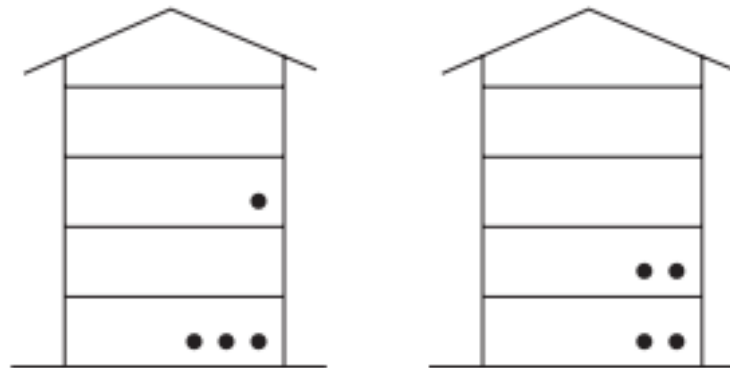
Εξίσωση Boltzmann

$$S \equiv k \ln w$$

Σταθερά Boltzmann

w είναι ο συνολικός αριθμός των πιθανών διαμορφώσεων του συστήματος (θερμοδυναμική πιθανότητα)

Εντροπία και χάος...



Αριθμός ορόφου		0	1	2	3	4
Αριθμός σωμάτων α:		3				1
Αριθμός σωμάτων β:		2	1		1	
Αριθμός σωμάτων γ:		2		2		
Αριθμός σωμάτων δ:		1	2	1		
Αριθμός σωμάτων ε:			4			

Αριθμός ορόφου		0	1	2	3	4
Αριθμός σωμάτων στ:		3		1		
Αριθμός σωμάτων ζ:			2	2		

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Ανισότητα του Clausius:

$$\oint \frac{dQ}{T} = -S_{\text{gen}}$$

Εντροπία:

$$dS = \frac{dQ}{T} + dS_{\text{gen}} \cdot dS_{\text{gen}} \geq 0$$

Εξίσωση ρυθμού για την εντροπία:

$$\dot{S}_{\text{c.m.}} = \sum \frac{\dot{Q}_{\text{c.m.}}}{T} + \dot{S}_{\text{gen}}$$

Ρυθμός ροής εντροπίας από Q:

$$\dot{Q}/T$$

Εξίσωση εντροπίας:

$$m(s_2 - s_1) = \int_1^2 \frac{dQ}{T} + {}_1S_2_{\text{gen}} \cdot {}_1S_2_{\text{gen}} \geq 0$$

Συνολική μεταβολή εντροπίας:

$$\Delta S_{\text{net}} = \Delta S_{\text{cv}} + \Delta S_{\text{surr}} = \sum \Delta S_{\text{gen}} \geq 0$$

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Απώλεια έργου, ορισμός:

$$W_{\text{lost}} = \int T dS_{\text{gen}}$$

Πραγματικό έργο μετακίνησης
οριακών επιφανειών:

$${}_1W_2 = \int P dV - W_{\text{lost}}$$

Σχέσεις Gibbs:

$$T ds = du + P dv$$

(Σχέσεις ιδιοτήτων)

$$T ds = dh - v dP$$

Στερεά, υγρά:

$$v = \text{σταθερός} \cdot dv = 0$$

Μεταβολή της s :

$$s_2 - s_1 = \int \frac{du}{T} = \int C \frac{dT}{T} \approx C \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Ιδανικό αέριο:

Πρότυπη εντροπία:

$$s_T^0 = \int_{T_0}^T \frac{C_p}{T} dT$$

Μεταβολή της s :

$$s_2 - s_1 = s_{T_2}^0 - s_{T_1}^0 - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Για σταθερές C_p, C_v :

$$s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Για σταθερές C_p, C_v :

$$s_2 - s_1 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Λόγος ειδικών θερμοτήτων:

$$k = C_p / C_v$$

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Πολυτροπικές διεργασίες:

$$Pv^n = \text{σταθερό} \cdot PV^n = \text{σταθερό}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{n-1}}$$

Ειδικό έργο:

$$n \neq 1: {}_1w_2 = \frac{1}{1-n} (P_2v_2 - P_1v_1) = \frac{R}{1-n} (T_2 - T_1)$$

$$n = 1: {}_1w_2 = P_1v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = RT_1 \ln \frac{P_1}{P_2}$$

Το έργο είναι έργο μετακίνησης οριακών επιφανειών $w = \int P dV$

Ταυτοποιήσιμες διεργασίες:

$n = 0$: $P = \text{σταθερή}$ · ισοβαρής

$n = 1$: $T = \text{σταθερή}$ · ισοθερμοκρασιακή

$n = k$: $s = \text{σταθερή}$ · ισεντροπική

$n = \pm\infty$: $v = \text{σταθερός}$ · ισόχωρη (ισομετρική)

Θερμοδυναμική

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!