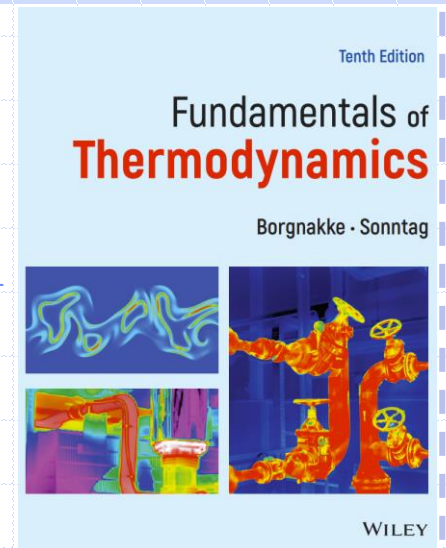


**Fundamentals of Thermodynamics**  
**Borgnakke – Sonntag**  
**10<sup>η</sup> έκδοση**  
**Εκδόσεις ΚΡΙΤΙΚΗ, 2023**



**Κεφάλαιο 7ο**  
**Ανάλυση εντροπίας για έναν**  
**όγκο ελέγχου**

*Επιμέλεια παρουσίασης*  
*καθηγήτης Γ. Σκόδρας*

# Περιεχόμενα...

- ✓ Εισαγωγή
- ✓ Η εξίσωση της εντροπίας για έναν όγκο ελέγχου
- ✓ Η διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης και η μη σταθεροποιημένη διεργασία
- ✓ Η διεργασία μονής ροής σταθεροποιημένης κατάστασης
- ✓ Αρχή αύξησης εντροπίας
- ✓ Εφαρμογές μηχανικής – Διατήρηση της ενέργειας και απόδοση διάταξης
- ✓ Βασικές έννοιες και σχέσεις

# Εισαγωγή...

- Εξετάζεται η γενικότερη εφαρμογή των εννοιών, η ανάλυση του όγκου ελέγχου και ορισμένες περιπτώσεις ειδικού ενδιαφέροντος
- Συζητούνται επίσης οι συνήθεις ορισμοί των θερμοδυναμικών αποδόσεων

# Η εξίσωση της εντροπίας για έναν όγκο ελέγχου...

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

ρυθμος μεταβολής = εισερχομενη εντροπια (in) – εξερχομενη εντροπια (out) + παραγωγη (gen)

$$\frac{dS_{cv}}{dt} = \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \sum \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

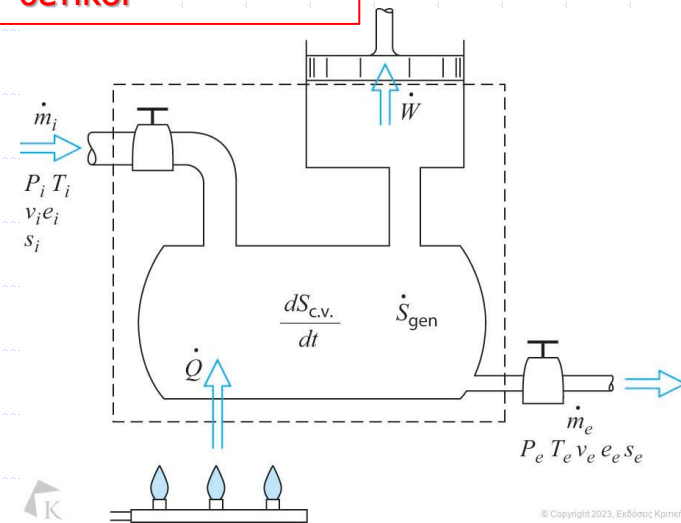
Ρυθμοί ροής μάζας που μεταφέρουν εντροπία

Οι όροι παραγωγής εντροπίας είναι θετικοί

$$S_{cv} = \int \rho s dV = m_{cv} s = m_A s_A + m_B s_B + m_C s_C + \dots$$

$$\dot{S}_{gen} = \int \rho \dot{s}_{gen} dV = \dot{S}_{gen A} + \dot{S}_{gen B} + \dot{S}_{gen C} + \dots$$

Οι όροι παραγωγής εντροπίας είναι μηδενικοί μόνο για αντιστρεπτές διεργασίες



# Η εξίσωση της εντροπίας για έναν όγκο ελέγχου...

Κατανομημένη σε επιφάνεια μεταφορά θερμότητας

$$\sum \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} = \int \frac{d\dot{Q}}{T} = \int_{surface} (\dot{Q}/A_{local}) T dA$$

- Οι όροι παραγωγής εντροπίας (από εσωτερική μη αντιστρεπτότητα) είναι γενικά θετικοί, θα ήταν όμως μηδενικοί για κάθε περιοχή στην οποία λαμβάνουν χώρα μόνο αντιστρεπτές διεργασίες
- Η μορφή του δεύτερου νόμου στην εξίσωση  $\frac{dS_{cm}}{dt} = \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \sum \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} + \dot{S}_{gen}$  είναι γενική, ώστε κάθε ειδική περίπτωση να καταλήγει σε μια μορφή που αποτελεί ένα υποτήμα (απλούστευση) αυτής της μορφής

# Η διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης και η μη σταθεροποιημένη διεργασία...

## Διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης

- Στις διεργασίες σταθεροποιημένης κατάστασης δεν υπάρχει χρονική μεταβολή της εντροπίας ανά μονάδα μάζας σε κάθε σημείο στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου, επομένως είναι:

$$\frac{dS_{cv}}{dt} = 0 \quad \text{οπότε:} \quad \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i = \sum \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

όροι σταθεροί με τον χρόνο

- Για μια είσοδο και μια έξοδο στον όγκο ελέγχου, με σταθερό ρυθμό, είναι:

$$\dot{m}(s_e - s_i) = \sum_{cv} \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} + \dot{S}_{gen} \Rightarrow s_e = s_i + \sum \frac{q}{T} + S_{gen}$$

ανά μονάδα μάζας  
Θετικός όρος

- Δεδομένου ότι η  $S_{gen}$  είναι πάντοτε μεγαλύτερη ή ίση με το μηδέν, για μια αδιαβατική διεργασία είναι:

$$s_e = s_i + S_{gen} \geq s_{rev i}$$

Η ισότητα για αντιστρεπτή αδιαβατική διεργασία

# Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες...

## Παράδειγμα 7.1

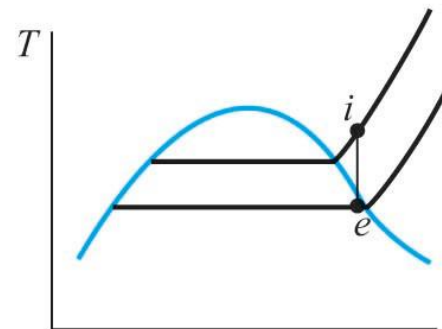
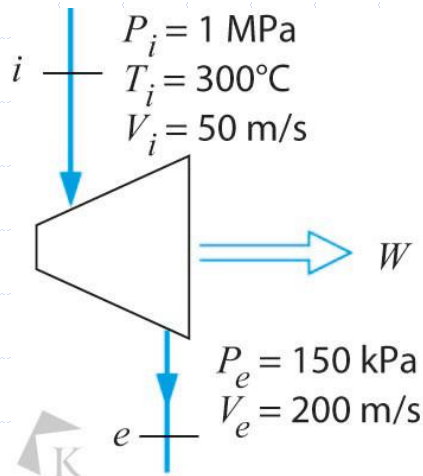
Σε έναν αεριοστρόβιλο εισέρχεται ατμός σε πίεση 1 MPa, θερμοκρασία 300°C, με ταχύτητα 50 m/s. Ο ατμός εγκαταλείπει τον στρόβιλο με πίεση 150 kPa και ταχύτητα 200 m/s. Προσδιορίστε το έργο ανά κιλό ατμό που ρέει στον στρόβιλο, υποθέτοντας ότι η διεργασία είναι αντιστρεπτή και αδιαβατική.

Όγκος ελέγχου: Στρόβιλος στο Σχήμα

Κατάσταση εισόδου: Καθορισμένη (Σχήμα)

Κατάσταση εξόδου:  $P_e$   $V_e$  γνωστές

Διεργασία: Σταθεροποιημένη κατάσταση, αντιστρεπτή και αδιαβατική





# Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες...

## Παράδειγμα 7.2

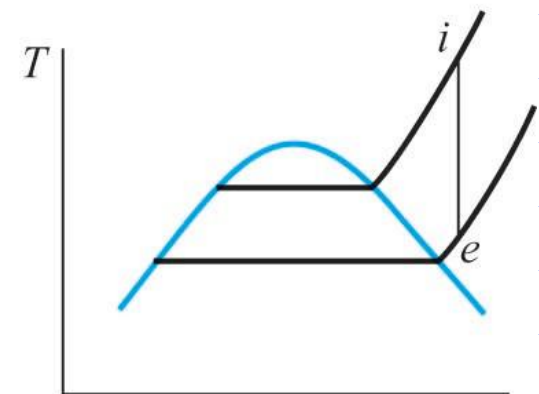
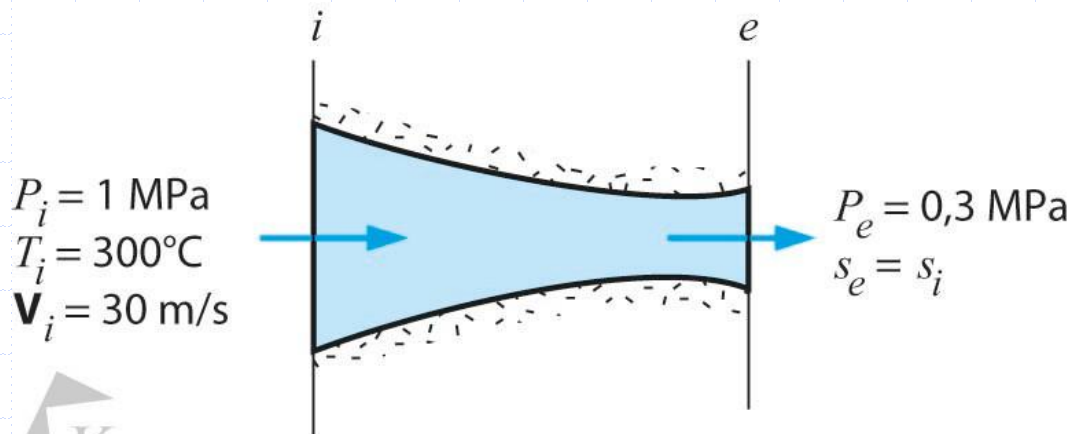
Θεωρήστε την αντιστρεπτή αδιαβατική ροή ατμού μέσω ενός ακροφυσίου. Ο ατμός εισέρχεται στο ακροφύσιο υπό 1 MPa και στους 300°C, με ταχύτητα 30 m/s. Η πίεση του ατμού στην έξοδο του ακροφυσίου είναι ίση με 0,3 MPa. Προσδιορίστε την ταχύτητα εξόδου του ατμού από το ακροφύσιο, υποθέτοντας μια αντιστρεπτή, αδιαβατική διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης

Όγκος ελέγχου: Ακροφύσιο στο Σχήμα

Κατάσταση εισόδου: Καθορισμένη (Σχήμα)

Κατάσταση εξόδου:  $P_e$  γνωστή

Διεργασία: Σταθεροποιημένη κατάσταση, αντιστρεπτή και αδιαβατική





# Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες...

## Παράδειγμα 7.2AM

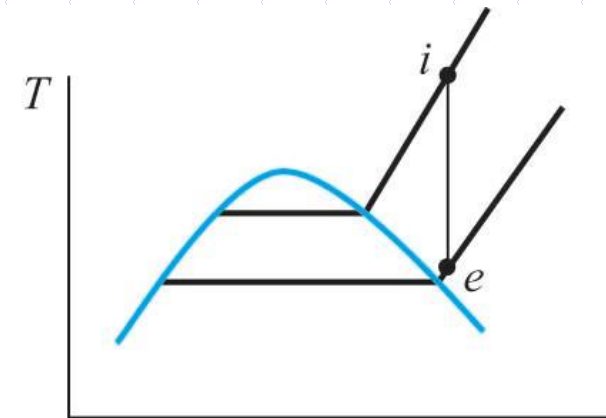
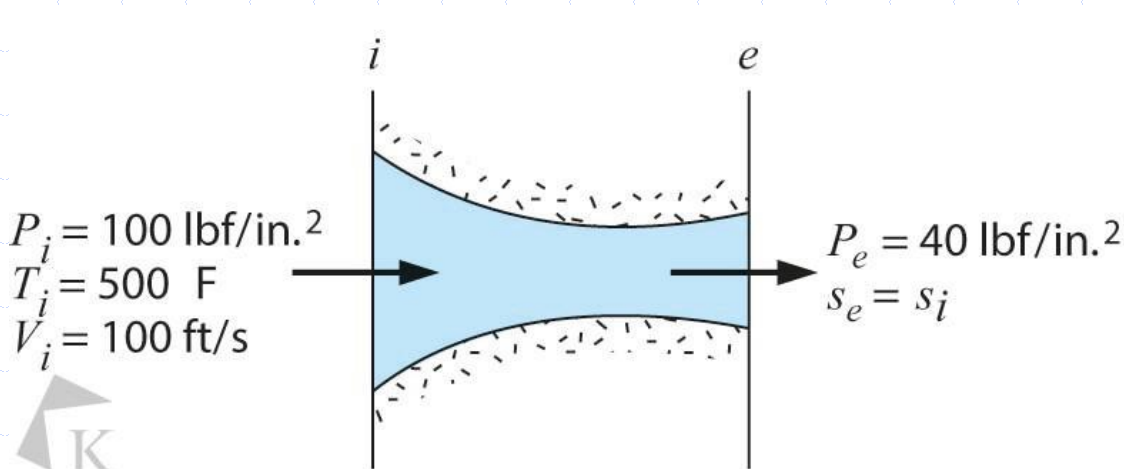
Θεωρήστε την αντιστρεπτή αδιαβατική ροή ατμού μέσω ενός ακροφυσίου. Ο ατμός εισέρχεται στο ακροφύσιο υπό  $100 \text{ lbf/in}^2$  και στους  $500^\circ\text{F}$ , με ταχύτητα  $100 \text{ ft/s}$ . Η πίεση του ατμού στην έξοδο του ακροφυσίου είναι ίση με  $40 \text{ lbf/in}^2$ . Προσδιορίστε την ταχύτητα εξόδου του ατμού από το ακροφύσιο, υποθέτοντας μια αντιστρεπτή, αδιαβατική διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης

Όγκος ελέγχου: Ακροφύσιο στο Σχήμα

Κατάσταση εισόδου: Καθορισμένη (Σχήμα)

Κατάσταση εξόδου:  $P_e$  γνωστή

Διεργασία: Σταθεροποιημένη κατάσταση, αντιστρεπτή και αδιαβατική



# Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες...

## Παράδειγμα 7.3

Ένας εφευρέτης ανακοινώνει ότι διαθέτει έναν συμπιεστή ψύξης που λαμβάνει κορεσμένους ατμούς R-134a σε θερμοκρασία  $-20^{\circ}\text{C}$  και μεταφέρει τον ατμό σε 1 MPa και σε θερμοκρασία  $40^{\circ}\text{C}$ . Η διεργασία συμπίεσης είναι αδιαβατική. Η διεργασία που περιγράφεται παραβιάζει τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής;

Όγκος ελέγχου: Συμπιεστής

Κατάσταση εισόδου: Καθορισμένη (κορεσμένος ατμός σε  $T_i$ )

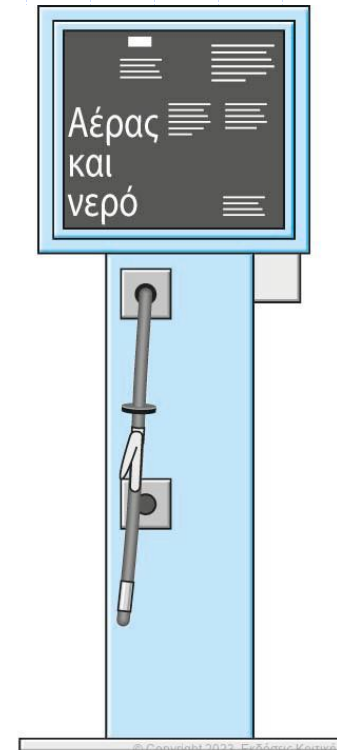
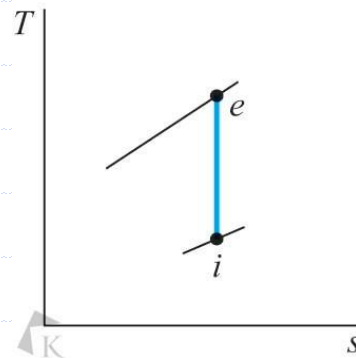
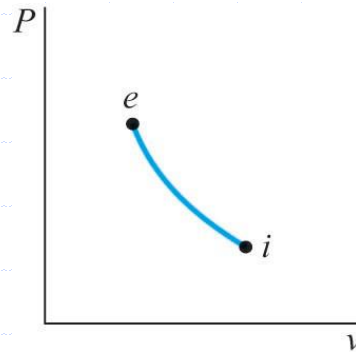
Κατάσταση εξόδου: ( $P_e$ ,  $T_e$  γνωστές)

Διεργασία: Σταθεροποιημένη κατάσταση, αδιαβατική

# Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες...

## Παράδειγμα 7.4

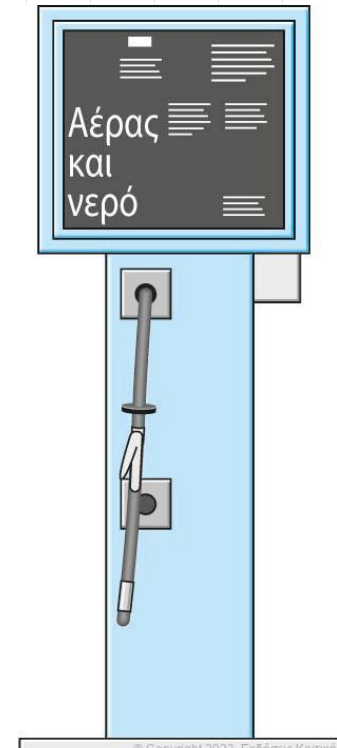
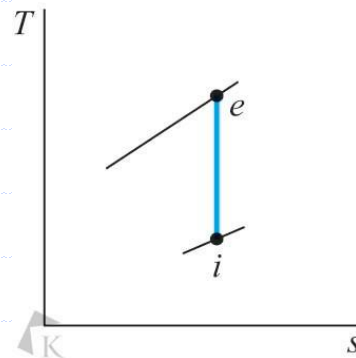
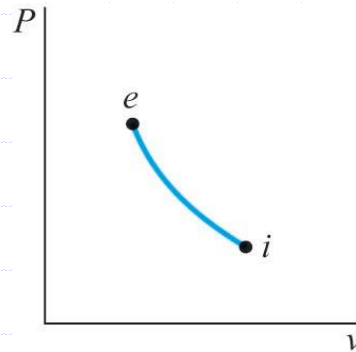
Ένας συμπιεστής αέρα σε κάποιο βενζινάδικο (βλ. σχήμα) δέχεται μια ροή ατμοσφαιρικού αέρα σε πίεση 100 kPa και θερμοκρασία 290 K και τον συμπιέζει στα 1000 kPa σε μια αντιστρεπτή αδιαβατική διεργασία. Θέλουμε να βρούμε το ειδικό έργο που απαιτείται και τη θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο



# Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες...

## Παράδειγμα 7.4AM

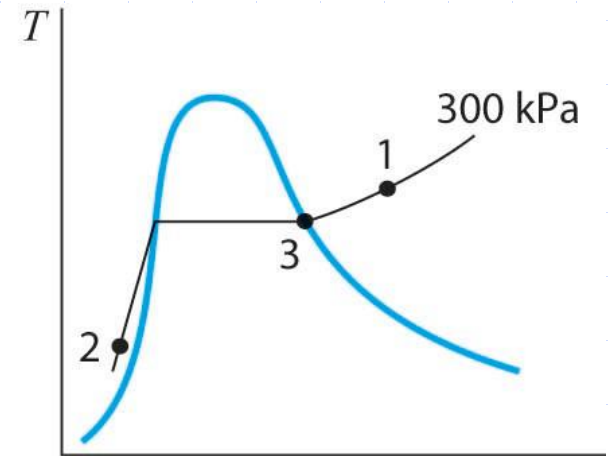
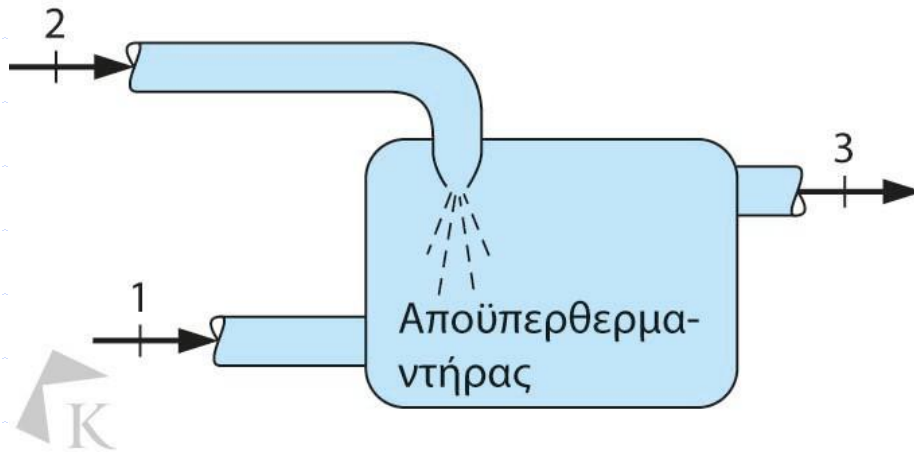
Ένας συμπιεστής αέρα σε κάποιο βενζινάδικο (βλ. σχήμα 7.4) δέχεται μια ροή ατμοσφαιρικού αέρα σε πίεση  $14,7 \text{ lbf/in}^2$  και θερμοκρασία  $520\text{R}$  και τον συμπιέζει στις  $147 \text{ lbf/in}^2$  σε μια αντιστρεπτή αδιαβατική διεργασία. Θέλουμε να βρούμε το ειδικό έργο που απαιτείται και τη θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο



# Μεταβολή της εντροπίας σε αντιστρεπτές διεργασίες...

## Παράδειγμα 7.5

Ένας αποϋπερθερμαντήρας λειτουργεί με έγχυση νερού στην υγρή φάση σε μια ροή υπέρθερμου ατμού. Με ατμό 2 kg/s σε πίεση 300 kPa και θερμοκρασία 200°C να εισρέει, ποιος ρυθμός ροής μάζας του νερού στην υγρή φάση στους 20°C πρέπει να προστεθεί ώστε να δημιουργηθεί κορεσμένος ατμός στα 300 kPa; Θέλουμε επίσης να μάθουμε τον ρυθμό παραγωγής εντροπίας στη διεργασία.



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

# Η διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης και η μη σταθεροποιημένη διεργασία...

## Μη σταθεροποιημένη διεργασία

- Στις διεργασίες μη σταθεροποιημένης κατάστασης ο 2<sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος για έναν όγκο ελέγχου είναι:

$$\frac{d}{dt}(ms)_{cv} = \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \sum \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

ολοκληρώνοντας για χρονικό διάστημα  $t$ , είναι:

$$\Rightarrow \int \frac{d}{dt}(ms)_{cv} dt = (m_2 s_2 - m_1 s_1)_{cv}$$

επίσης είναι:

$$\int_0^t \left( \sum \dot{m}_i s_i \right) dt = \sum m_i s_i \quad \int_0^t \left( \sum \dot{m}_e s_e \right) dt = \sum m_e s_e \quad \int_0^t \dot{S}_{gen} dt = {}_1S_{2gen}$$

# Η διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης και η μη σταθεροποιημένη διεργασία...

- Επομένως, για χρονική περίοδο  $t$ , ο 2<sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος για μη σταθεροποιημένη διεργασία είναι:

$$(m_2 s_2 - m_1 s_1)_{cv} = \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \int_0^t \sum_{cv} \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} dt + {}_1S_{2gen}$$

- Για ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλο τον όγκο ελέγχου κάθε χρονική στιγμή, το ολοκλήρωμα απλοποιείται:

$$\int_0^t \sum_{cv} \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} dt = \int_0^t \frac{1}{T} \sum_{cv} \dot{Q}_{cv} dt = \int_0^t \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} dt$$

οπότε ο 2<sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος για μη σταθεροποιημένη διεργασία γίνεται:

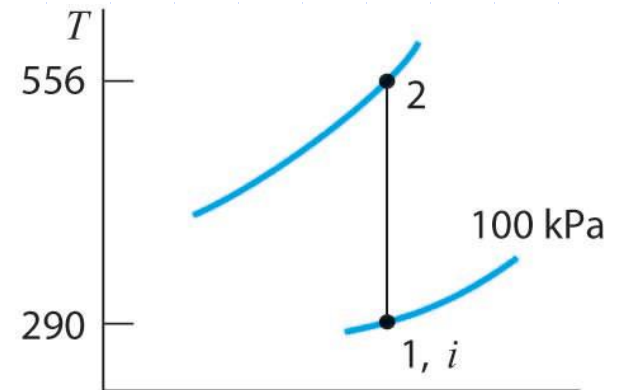
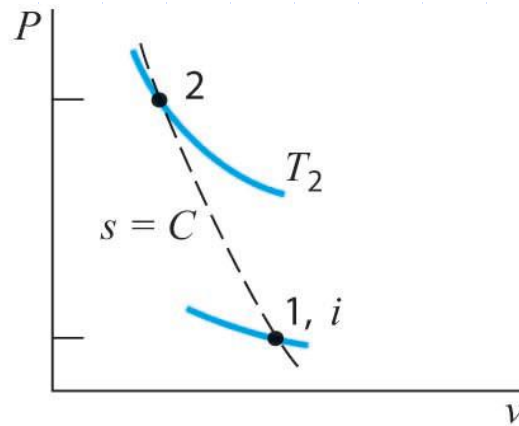
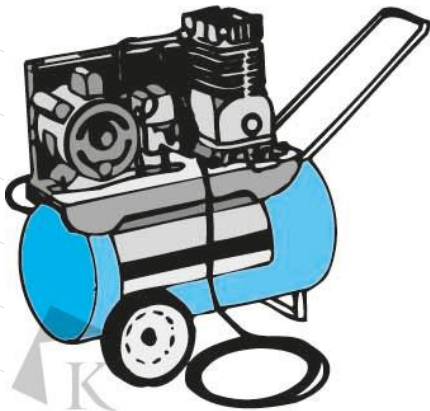
$$(m_2 s_2 - m_1 s_1)_{cv} = \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \int_0^t \frac{\dot{Q}_{cv}}{T} dt + {}_1S_{2gen}$$



# Η διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης και η μη σταθεροποιημένη διεργασία...

## Παράδειγμα 7.6

Έστω ότι μια δεξαμενή αέρα περιέχει 40 L αέρα σε πίεση 100 kPa και θερμοκρασία περιβάλλοντος 17°C. Ο αδιαβατικός και αντιστρεπτός συμπιεστής τίθεται σε λειτουργία ώστε να φορτίζει τη δεξαμενή μέχρι μια πίεση ίση με 1000 kPa. Στη συνέχεια απενεργοποιείται. Θέλουμε να μάθουμε πόσο ζεσταίνεται ο αέρας στη δεξαμενή και τη συνολική ποσότητα έργου που απαιτείται για την πλήρωση της δεξαμενής.



© Copyright 2023, Εκδόσεις Σκρπτική

# Διεργασία μονής ροής σταθεροποιημένης κατάστασης...

- Όταν μια διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης περιλαμβάνει μια μονή ροή ρευστού προς και από έναν όγκο ελέγχου, η εξίσωση της ενέργειας μπορεί να γραφτεί ως:

$$q + h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + gZ_i = h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e + w$$

- Ο 2<sup>ος</sup> θερμοδυναμικός νόμος είναι:  $s_i + s_{gen} + \int \frac{\delta q}{T} = s_e$

και σε διαφορική μορφή:  $\delta s_{gen} + \delta q/T = ds \Rightarrow \delta q = T ds - T \delta s_{gen}$

- Χρησιμοποιώντας την 2<sup>η</sup> σχέση  $T ds = dh - v dP$  υπολογίζεται το q:

$$\delta q = T ds - T \delta s_{gen} = dh - v dP - T \delta s_{gen}$$

οπότε:

$$q = \int_i^e \delta q = \int_i^e dh - \int_i^e v dP - \int_i^e T \delta s_{gen} = h_e - h_i - \int_i^e v dP - \int_i^e T \delta s_{gen}$$

# Διεργασία μονής ροής σταθεροποιημένης κατάστασης...

- Επιλύοντας την εξίσωση ενέργειας ως προς το έργο, είναι:

$$\begin{aligned}w &= q + h_i - h_e + \frac{1}{2}(V_i^2 - V_e^2) + q(Z_i - Z_e) \\ &= h_e - h_i - \int_i^e v dP - \int_i^e T \delta s_{gen} + h_i - h_e + \frac{1}{2}(V_i^2 - V_e^2) + g(Z_i - Z_e)\end{aligned}$$

οι όροι της ενθαλπίας απαλείφονται, και το αξονικό έργο για πραγματική διεργασία σε μονή ροή γίνεται:

$$w = - \int_i^e v dP + \frac{1}{2}(V_i^2 - V_e^2) + g(Z_i - Z_e) - \int_i^e T \delta s_{gen}$$

Θετικός  
όρος,  
πάντοτε  
αφαιρείται

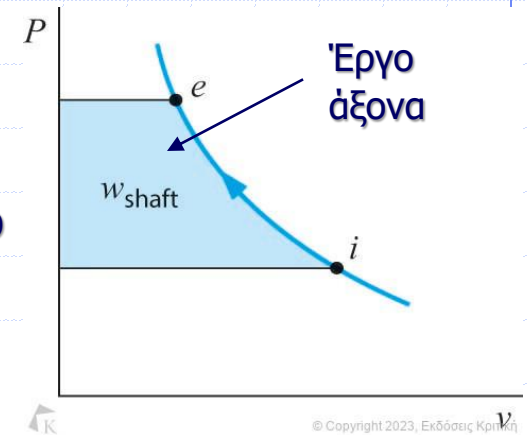
- Το αξονικό έργο σχετίζεται με τις μεταβολές της πίεσης, της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας (μεμονωμένα ή συνδυαστικά)
- Όταν η πίεση αυξάνει (αντλία ή συμπιεστής) το έργο τείνει να είναι αρνητικό, ενώ όταν η πίεση μειώνεται (στρόβιλος) το έργο τείνει να είναι θετικό
- Ο ειδικός όγκος δεν επηρεάζει το πρόσημο του έργου αλλά το μέγεθος του (μεγάλος ειδικός όγκος (αέριο) παράγει μεγάλο έργο και μικρός ειδικός όγκος (υγρό) μικρό έργο)
- Αν ο όγκος ελέγχου δεν περιλαμβάνει άξονα ( $w = 0$ ) τότε οι όροι δεξιά αλληλοαναιρούνται

# Διεργασία μονής ροής σταθεροποιημένης κατάστασης...

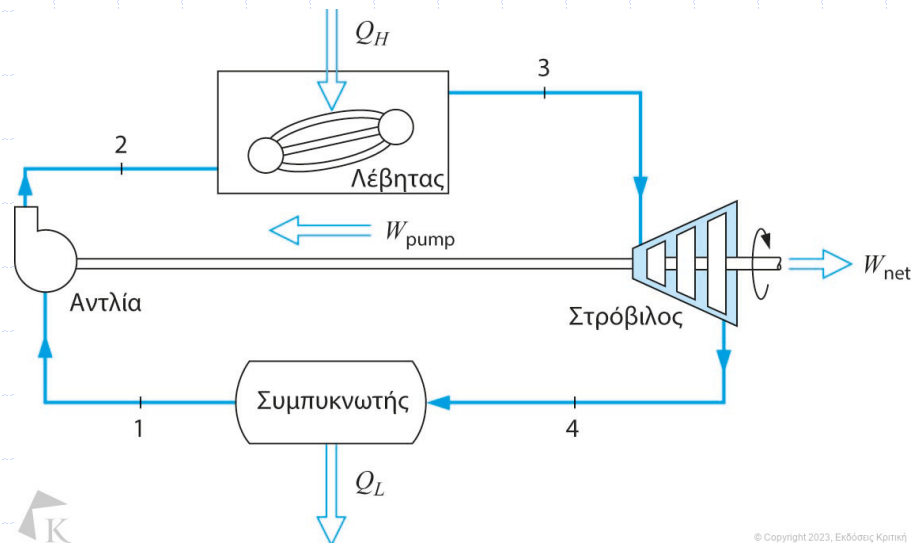
- Αντιστρεπτή διεργασία, σταθεροποιημένης κατάστασης, χωρίς μεταβολή κινητικής και δυναμικής ενέργειας (ενδεχομένως και αδιαβατική), το έργο άξονα είναι:

$$w = - \int_i^e v dP$$

- Το έργο άξονα δεν σχετίζεται με το έργο ογκομεταβολής  $\int_1^2 P dv$



Η κατανάλωση ισχύος στην αντλία είναι πολύ μικρότερη από την παραγόμενη στον στρόβιλο



# Διεργασία μονής ροής σταθεροποιημένης κατάστασης...

- Θεωρώντας αντιστρεπτή ροή ασυμπίεστου ρευστού ( $v = \text{σταθερός}$ ), προκύπτει:

$$w = -v(P_e - P_i) + \frac{1}{2}(V_i^2 - V_e^2) + g(Z_i - Z_e)$$

Γενικευμένη  
εξίσωση Bernoulli

που για μηδενικό έργο γίνεται:

$$vP_i + \frac{1}{2}V_i^2 + gZ_i = vP_e + \frac{1}{2}V_e^2 + gZ_e$$

- Το άθροισμα του έργου ροής ( $Pv$ ), της κινητικής ενέργειας και της δυναμικής ενέργειας είναι σταθερό κατά μήκος μιας καμπύλης ροής (πχ. καθώς η ροή αυξάνεται, προκύπτει μια αντίστοιχη μείωση της κινητικής ενέργειας ή της πίεσης)

# Διεργασία μονής ροής σταθεροποιημένης κατάστασης...

- Για μια πολυτροπική διεργασία σταθεροποιημένης κατάστασης χωρίς μεταβολή κινητικής και δυναμικής ενέργειας, είναι:

$$w = - \int_i^e v dP \quad \text{και} \quad Pv^n = \text{σταθερο}$$

$$w = - \int_i^e v dP = C \int_i^e \frac{dP}{P^{1/n}} = - \frac{n}{1-n} (P_e v_e - P_i v_i) = - \frac{nR}{n-1} (T_e - T_i)$$

- Αν η μεταβολή είναι ισοθερμοκρασιακή, τότε  $n = 1$  το ολοκλήρωμα γίνεται:

$$w = - \int_i^e v dP = \text{σταθερο} \int_i^e \frac{dP}{P} = -P_i v_i \ln \frac{P_e}{P_i}$$

# Διεργασία μονής ροής σταθεροποιημένης κατάστασης...

## Παράδειγμα 7.7

Υπολογίστε το έργο ανά κιλό για την ισεντροπική άντληση του νερού από τα 100 kPa και τους 30°C έως τα 5 MPa.

Όγκος ελέγχου:

Κατάσταση εισόδου:

Κατάσταση εξόδου:

Διεργασία:

Αντλία

$P_i, T_i$  γνωστές, κατάσταση καθορισμένη

$P_e$  γνωστή

Σταθεροποιημένη κατάσταση, ισεντροπική



# Διεργασία μονής ροής σταθεροποιημένης κατάστασης...

## Παράδειγμα 7.8

Θεωρήστε ένα ακροφύσιο που χρησιμοποιείται για τον ψεκασμό νερού στην υγρή φάση. Αν η πίεση του αγωγού είναι 300 kPa και η θερμοκρασία του νερού ισούται με 20°C, πόσο υψηλή μπορεί να είναι η ταχύτητα που δημιουργεί ένα ιδανικό ακροφύσιο στη ροή εξόδου;

# Αρχή αύξησης της εντροπίας...

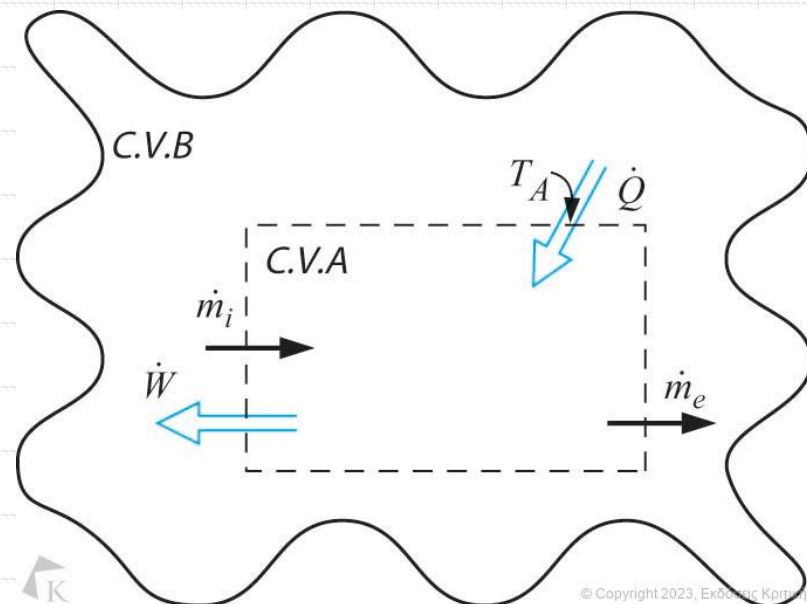
- Επιλύοντας την εξίσωση ενέργειας ως προς το έργο, είναι:

$$\frac{dS_{cv A}}{dt} = \dot{m}_i s_i - \dot{m}_e s_e + \frac{\dot{Q}}{T_A} + \dot{S}_{gen A}$$

$$\frac{dS_{cv B}}{dt} = -\dot{m}_i s_i + \dot{m}_e s_e + \frac{\dot{Q}}{T_A} + \dot{S}_{gen B}$$

---


$$\begin{aligned} \frac{dS_{net}}{dt} &= \frac{dS_{cv A}}{dt} + \frac{dS_{cv B}}{dt} \\ &= \cancel{\dot{m}_i s_i} - \cancel{\dot{m}_e s_e} + \frac{\dot{Q}}{T_A} + \dot{S}_{gen A} - \cancel{\dot{m}_i s_i} + \cancel{\dot{m}_e s_e} + \frac{\dot{Q}}{T_A} + \dot{S}_{gen B} \\ &= \dot{S}_{gen A} + \dot{S}_{gen B} \geq 0 \end{aligned}$$



- Για να μπορεί να γίνει μεταφορά θερμότητας πρέπει  $T_B \geq T_A$ , δηλαδή πραγματοποιείται σε μια πεπερασμένη διαφορά θερμοκρασίας, οπότε στο περιβάλλον λαμβάνει χώρα μια μη αντιστρεπτή διεργασία (εξωτερικά μη αντιστρεπτή διεργασία)

# Αρχή αύξησης της εντροπίας...

- Θάλαμος ανάμιξης με δύο ροές εισόδου και μια έξοδο, σε σταθεροποιημένες συνθήκες, χωρίς αξονικό έργο ενώ η κινητική και δυναμική ενέργεια είναι αμελητέες:

$$\text{Εξίσωση ενέργειας} \quad 0 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3 + \dot{Q}$$

$$\text{Εξίσωση εντροπίας} \quad 0 = \dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_2 s_2 - \dot{m}_3 s_3 + \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

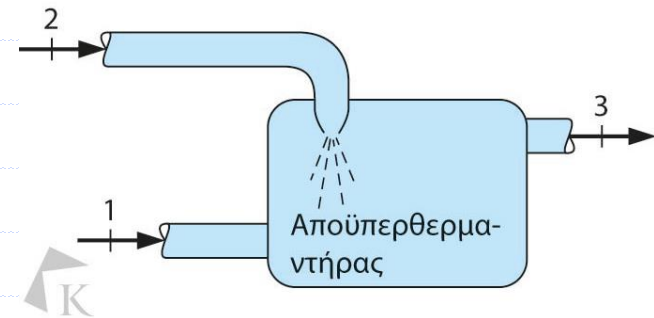
- Κανονικοποιώντας ( $y = \dot{m}_1/\dot{m}_3$  και  $1 - y = \dot{m}_2/\dot{m}_3$ ) προκύπτει:

$$h_3 = y h_1 + (1 - y) h_2 + \tilde{q}$$

$$\tilde{q} = \dot{Q}/\dot{m}_3$$

$$\tilde{s}_{gen} = \dot{S}_{gen}/\dot{m}_3$$

$$s_3 = y s_1 + (1 - y) s_2 + \tilde{q}/T + \tilde{s}_{gen}$$



- Αν η μεταφορά θερμότητας είναι μηδενική, η ενθαλπία εξόδου γίνεται ο σταθμισμένος μέσος όρος της ροής μάζας των δύο ενθαλπιών εισόδου, και η εντροπία εξόδου γίνεται ο σταθμισμένος μέσος όρος της ροής μάζας των δύο εντροπιών εισόδου συν ένα ποσό που οφείλεται στην παραγωγή εντροπίας
- Καθώς η παραγωγή εντροπίας είναι θετική (με ελάχιστο το μηδέν), η εντροπία εξόδου είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα μια καθαρή αύξηση της εντροπίας, η οποία αποθηκεύεται στο περιβάλλον

# Αρχή αύξησης της εντροπίας...

## Παράδειγμα 7.9

Κορεσμένος ατμός R-410A εισέρχεται στον μη μονωμένο συμπιεστή ενός οικιακού κεντρικού συστήματος κλιματισμού στους 5°C. Ο ρυθμός ροής του ψυκτικού μέσω του συμπιεστή είναι 0,08 kg/s και η ηλεκτρική ισχύς εισόδου ισούται με 3 kW. Η κατάσταση εξόδου είναι 65°C και 3000 kPa. Κάθε μεταφορά θερμότητας από τον συμπιεστή γίνεται προς το περιβάλλον στους 30°C. Προσδιορίστε τον ρυθμό παραγωγής εντροπίας για αυτή τη διεργασία.

Όγκος ελέγχου: Συμπιεστής σε  $T_0$  περιβάλλοντος

Κατάσταση εισόδου:  $T_i$ ,  $x_i$  γνωστά· κατάσταση καθορισμένη

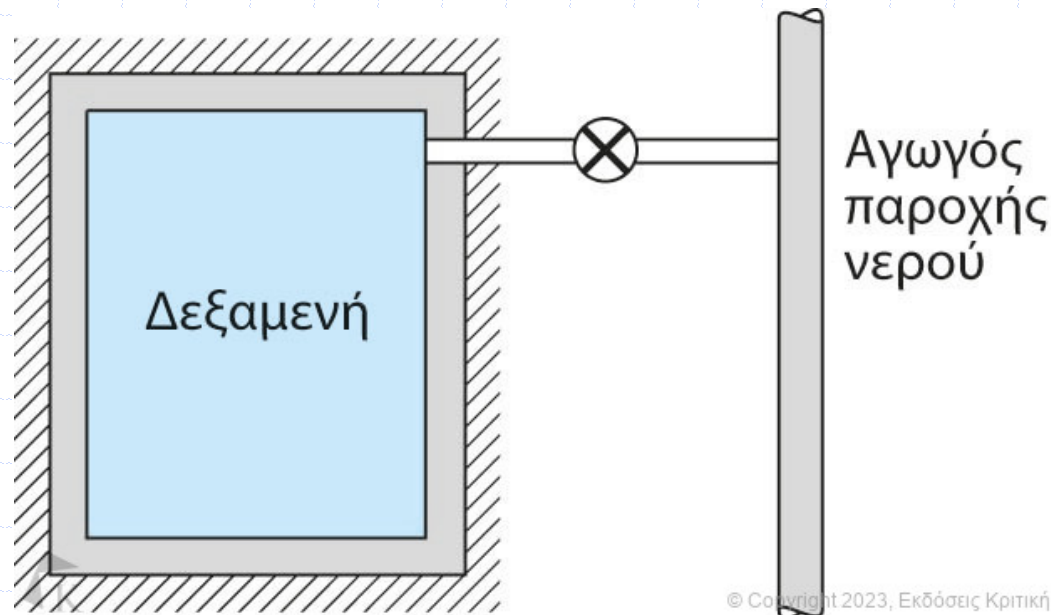
Κατάσταση εξόδου:  $P_e$ ,  $T_e$  γνωστές· κατάσταση καθορισμένη

Διεργασία: Μονή ροή ρευστού σε σταθεροποιημένη κατάσταση

# Αρχή αύξησης της εντροπίας...

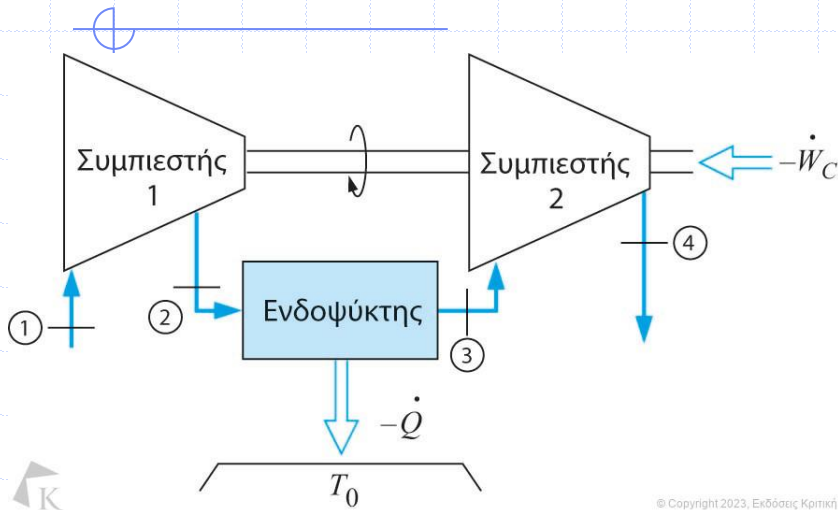
## Παράδειγμα 7.10

Μια άκαμπτη μονωμένη δεξαμενή περιέχει  $2 \text{ m}^3$  νερό σε πίεση  $100 \text{ kPa}$  και θερμοκρασία  $150^\circ\text{C}$ . Η δεξαμενή φορτίζεται μέσω μιας βαλβίδας με ατμό από έναν αγωγό στα  $400 \text{ kPa}$  και στους  $200^\circ\text{C}$  έως ότου η ροή σταματήσει. Θέλουμε να βρούμε την τελική μάζα, τη θερμοκρασία και την παραγωγή εντροπίας κατά τη διεργασία.



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

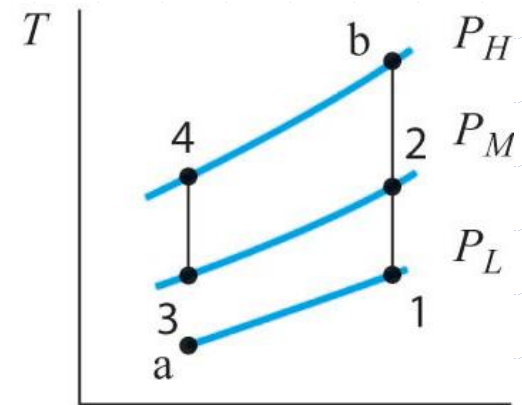
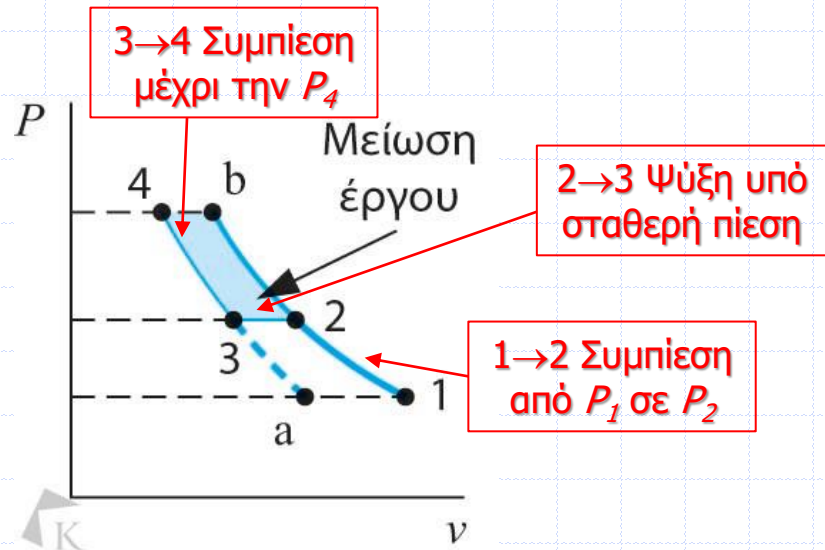
# Εφαρμογές μηχανικής – Διατήρηση της ενέργειας και απόδοση διάταξης...



Συμπίεση δύο σταδίων με ενδιάμεση ψύξη

$$w_C = -w = \frac{nR}{1-n} T_i \left( \frac{T_e}{T_i} - 1 \right) = \frac{nR}{1-n} T_i \left[ \left( \frac{P_e}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

- Στην περίπτωση του στροβίλου αντί για ενδιάμεση ψύξη γίνεται αναθέρμανση



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

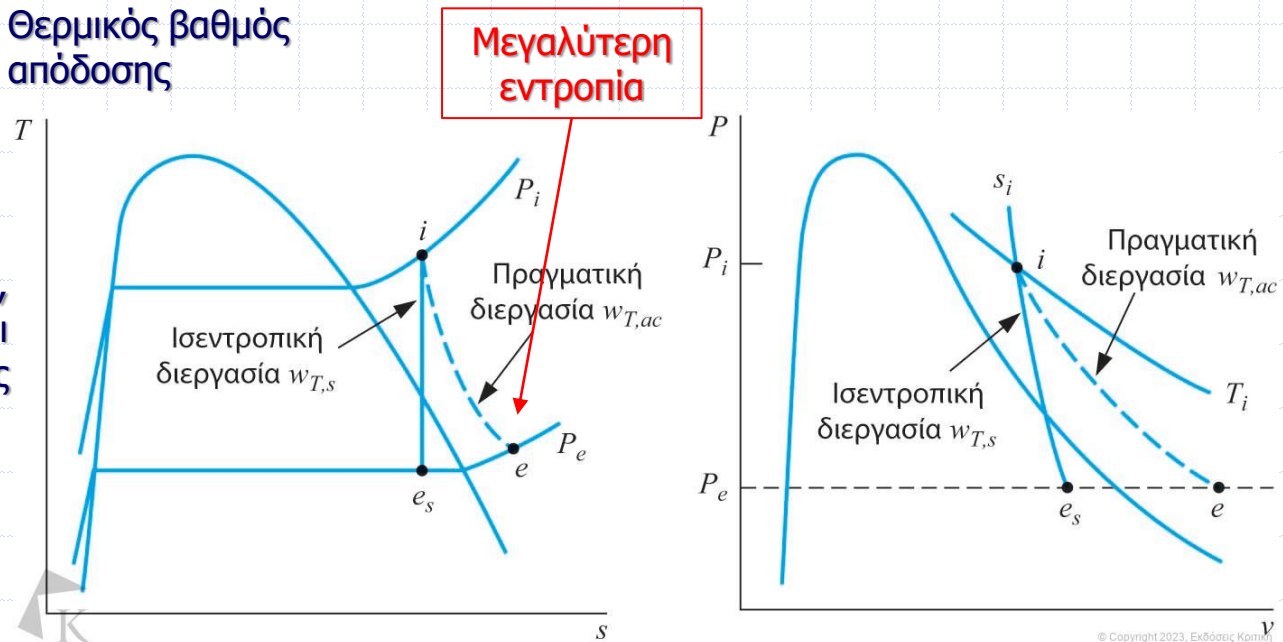


# Εφαρμογές μηχανικής – Διατήρηση της ενέργειας και απόδοση διάταξης...

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H}$$

Θερμικός βαθμός απόδοσης

Ατμοστρόβιλος, ιδανικός και πραγματικός



- Το παραγόμενο έργο πραγματικού στρόβιλου είναι **μικρότερο** από αυτό του ιδανικού (αντιστρεπτού)

Θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης

$$\eta_{turbine} = \frac{w_{T,ac}}{w_{T,s}} = \frac{h_i - h_e}{h_i - h_{e,s}}$$



# Εφαρμογές μηχανικής – Διατήρηση της ενέργειας και απόδοση διάταξης...

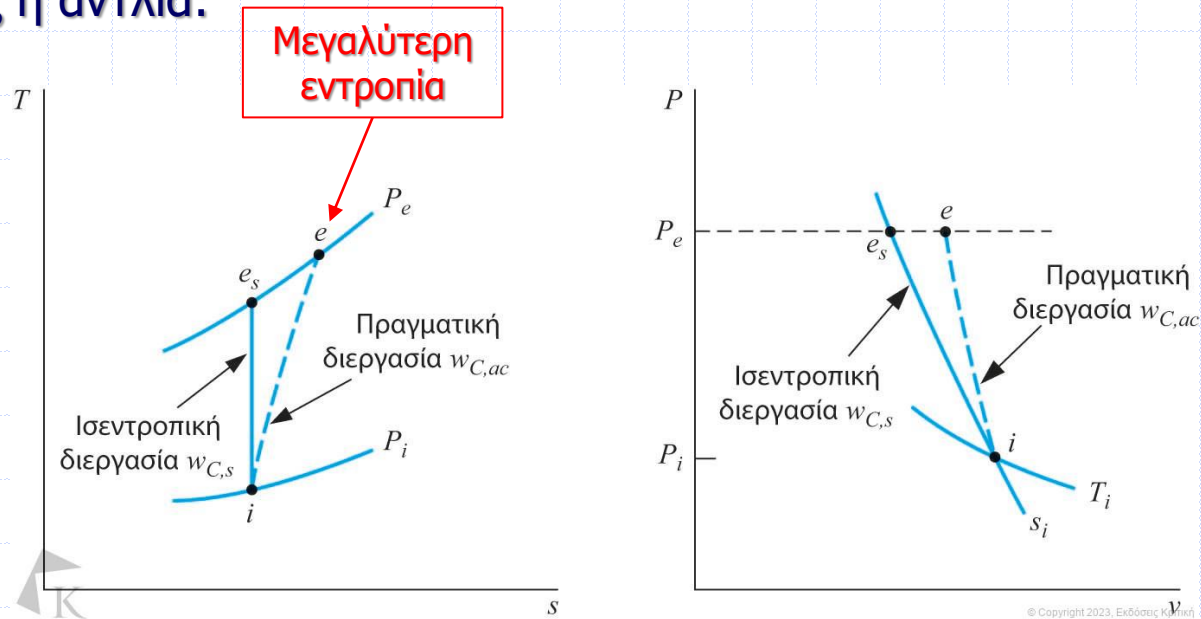
## Παράδειγμα 7.11

Ένας ατμοστρόβιλος δέχεται ατμό σε πίεση 1 MPa και θερμοκρασία 300°C. Ο ατμός εγκαταλείπει τον στρόβιλο με πίεση 15 kPa. Το έργο εξόδου του στροβίλου μετρήθηκε και βρέθηκε ίσο με 600 kJ/kg ατμό ο οποίος ρέει μέσω του στροβίλου. Προσδιορίστε την απόδοση του στροβίλου.

Όγκος ελέγχου: Στρόβιλος σε σταθεροποιημένη κατάσταση και έστω αδιαβατικός  
Κατάσταση εισόδου:  $P_i, T_i$  γνωστές· κατάσταση καθορισμένη  
Κατάσταση εξόδου:  $P_e$  γνωστή

# Εφαρμογές μηχανικής – Διατήρηση της ενέργειας και απόδοση διάταξης...

- Συμπιεστής ή αντλία:



- Το καταναλισκόμενο έργο πραγματικού συμπιεστή ή αντλίας είναι **μεγαλύτερο** από αυτό του ιδανικού (αντιστρεπτού)

Θερμοδυναμικός  
βαθμός απόδοσης

$$n_{comp} = \frac{w_{C,s}}{w_{C,ac}} = \frac{h_i - h_{e,s}}{h_i - h_e}$$

$$n_{comp} = \frac{w_{C,T}}{w_{C,ac}}$$

# Εφαρμογές μηχανικής – Διατήρηση της ενέργειας και απόδοση διάταξης...

## Παράδειγμα 7.12

Αέρας εισέρχεται σε έναν υπερσυμπιεστή αυτοκινήτου σε πίεση 100 kPa και θερμοκρασία 300K και συμπιέζεται στα 150 kPa. Η απόδοση ισούται με 70%. Πόσο είναι το έργο που απαιτείται στην είσοδο ανά κιλό αέρα; Πόση είναι η θερμοκρασία εξόδου;

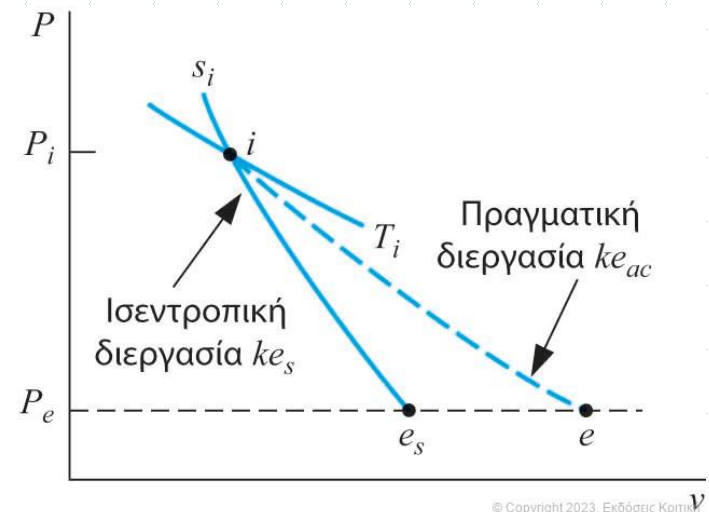
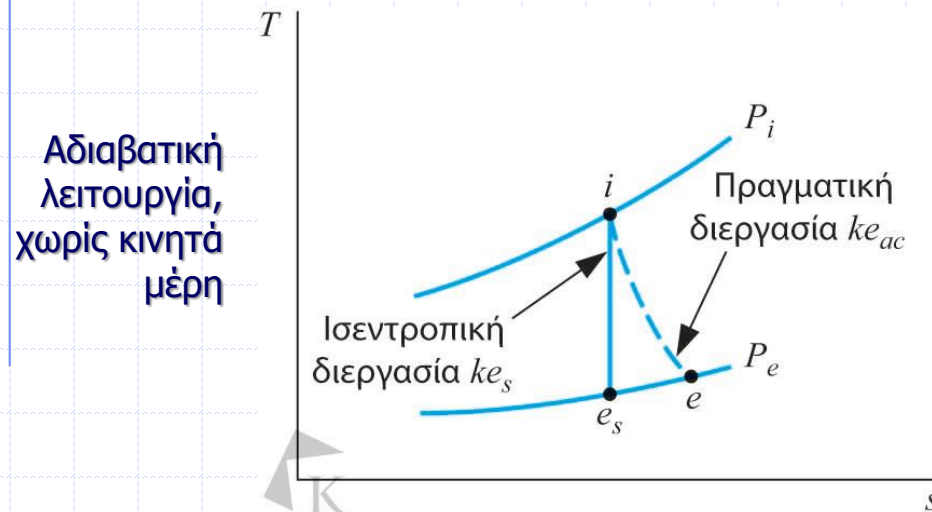
Όγκος ελέγχου: Υπερσυμπιεστής (συμπιεστής) σε σταθεροποιημένη κατάσταση και έστω αδιαβατικός

Κατάσταση εισόδου:  $P_i, T_i$  γνωστές· κατάσταση καθορισμένη

Κατάσταση εξόδου:  $P_e$  γνωστή

# Εφαρμογές μηχανικής – Διατήρηση της ενέργειας και απόδοση διάταξης...

## □ Ακροφύσιο:



- Η πραγματική διεργασία είναι μη αντιστρεπτή, με την κατάσταση εξόδου  $e$  να έχει μεγαλύτερη εντροπία και μικρότερη ταχύτητα εξόδου  $V_e$

$$\eta_{\text{nozzle}} = \frac{V_e^2 / 2}{V_i^2 / 2}$$

# Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Εξίσωση εντροπίας  
σε μορφή ρυθμού:

ρυθμός μεταβολής = + εισερχόμενη εντροπία – εξερχόμενη εντροπία  
+ παραγωγή

$$\dot{S}_{c.v.} = \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \sum \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

Μονή ροή  
σταθεροποιημένης  
κατάστασης:

$$s_e = s_i + \int_i^e \frac{dq}{T} + s_{gen}$$

Αντιστρεπτό αξονικό  
έργο:

$$w = - \int_i^e v dP + \frac{1}{2} V_i^2 - \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_i - gZ_e$$

Αντιστρεπτή μεταφορά  
θερμότητας:

$$q = \int_i^e T ds = h_e - h_i - \int_i^e v dP$$

(από τη σχέση Gibbs)

Εξίσωση Bernoulli  
( $v = \text{σταθερός}$ ):

$$v(P_i - P_e) + \frac{1}{2} V_i^2 - \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_i - gZ_e = 0$$

# Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Έργο πολυτροπικής διεργασίας:

$$n \neq 1: w = -\frac{n}{n-1} (P_e v_e - P_i v_i) = -\frac{nR}{n-1} (T_e - T_i)$$

$$n = 1: w = -P_i v_i \ln \frac{P_e}{P_i} = -RT_i \ln \frac{P_e}{P_i} = RT_i \ln \frac{v_e}{v_i}$$

Το έργο είναι αξονικό  $w = -\int_i^e v dP$  και για ένα ιδανικό αέριο

$$w_C = -w = \frac{nR}{n-1} (T_e - T_i) = \frac{nR}{n-1} T_i [(P_e/P_i)^{(n-1)/n} - 1]$$

το  $w_C$  είναι θετικό προς τα μέσα

Ισεντροπικές αποδόσεις:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{turbine}} &= w_{T,ac} / w_{T,s} & w_{T,ac} &\text{προς τα έξω} \\ \eta_{\text{compressor}} &= w_{C,s} / w_{C,ac} & w_{C,ac} &\text{προς τα μέσα} \\ \eta_{\text{pump}} &= w_{P,s} / w_{P,ac} & w_{P,ac} &\text{προς τα μέσα} \\ \eta_{\text{nozzle}} &= \Delta \frac{1}{2} V_{ac}^2 / \Delta \frac{1}{2} V_s^2 & \Delta \frac{1}{2} V_{ac}^2 &\text{προς τα έξω} \end{aligned}$$

# Θερμοδυναμική

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!