



Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

# Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Σχολή Μηχανικών Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Γ' εξάμηνο

## Μάθημα Εφαρμ. Θερμοδυναμική Ι/ 4<sup>η</sup> Ενότητα μαθήματος: Ιδανικό αέριο- Διεργασίες αερίων

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. ΗΠΑ



### 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

**4<sup>η</sup> Ενότητα μαθήματος:** Ιδανικό αέριο- Διεργασίες αερίων



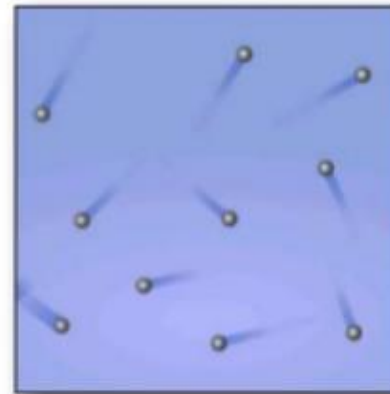
# Ιδανικό αέριο- Διεργασίες αερίων

- Νόμος Boyle, Charles, Gay-Lussac
- Καταστατική εξίσωση ιδανικού (τέλειου) αερίου
- Ειδική θερμότητα
- Διεργασίες αερίων- Κλειστά/ Ανοιχτά συστήματα



## Ιδανικό αέριο

- Τα μόρια του ιδανικού αερίου είναι σφαιρικά, κινούνται άτακτα και συγκρούονται ελαστικά
- Ανάμεσα στα μόρια ασκούνται δυνάμεις μόνο κατά τη στιγμή που συγκρούονται
- Ανάμεσα σε δύο διαδοχικές συγκρούσεις τα μόρια κινούνται ευθύγραμμα ομαλά



Τα ιδανικά αέρια υπακούουν στην καταστατική εξίσωση των αερίων.

## Νόμος του Boyle

■ Ο όγκος ορισμένης μάζας αερίου σε σταθερή θερμοκρασία είναι αντιστρόφως ανάλογος με την πίεση του αερίου.

Μαθηματική σχέση:

$$V \propto \frac{1}{P}$$

## Νόμος του Gay Lussac

■ Η πίεση ορισμένης μάζας αερίου σε σταθερό όγκο είναι ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία.

Μαθηματική σχέση:

$$P \propto T$$

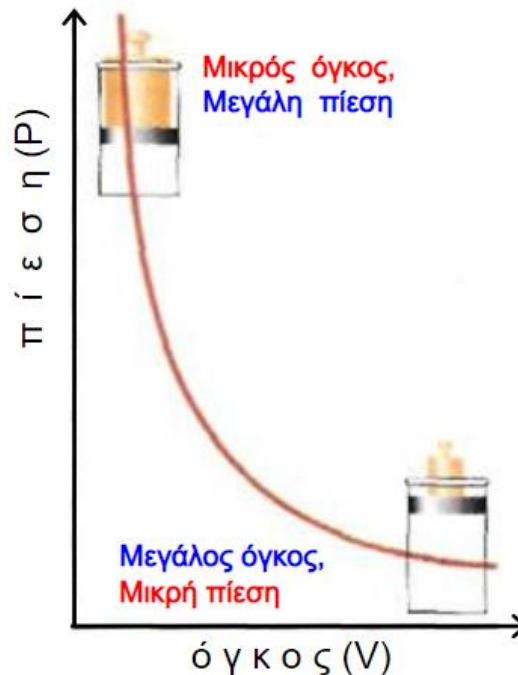
## Νόμος του Charles

■ Ο όγκος ορισμένης μάζας αερίου σε σταθερή πίεση είναι ανάλογος με την απόλυτη θερμοκρασία.

Μαθηματική σχέση:

$$V \propto T$$

## Νόμος Boyle



### Νόμος του Boyle

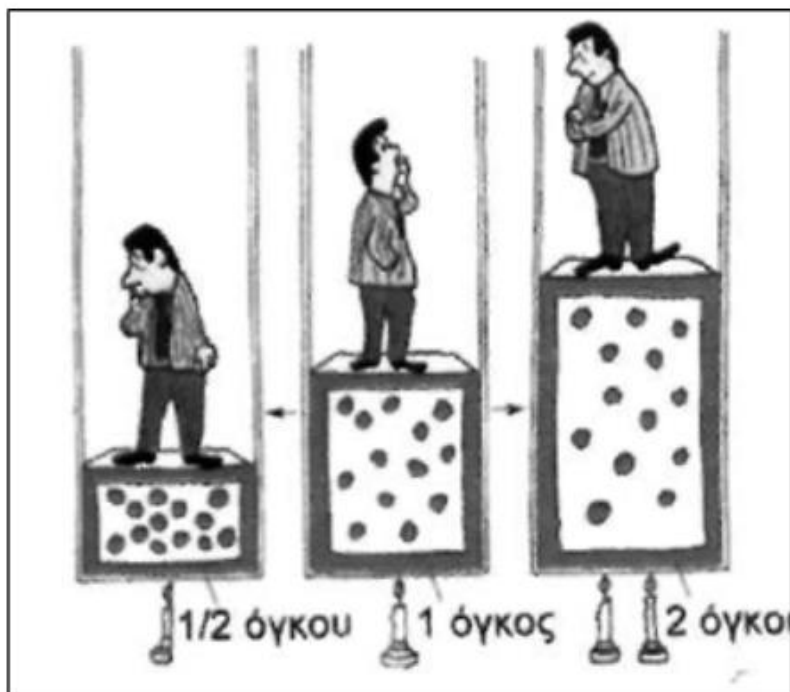
Ο όγκος ορισμένης μάζας αερίου σε σταθερή θερμοκρασία είναι αντιστρόφως ανάλογος με την πίεση του αερίου.

Μαθηματική σχέση:

$$V \propto \frac{1}{P}$$

(θερμοκρασία  
σταθερή)

## Νόμος Charles



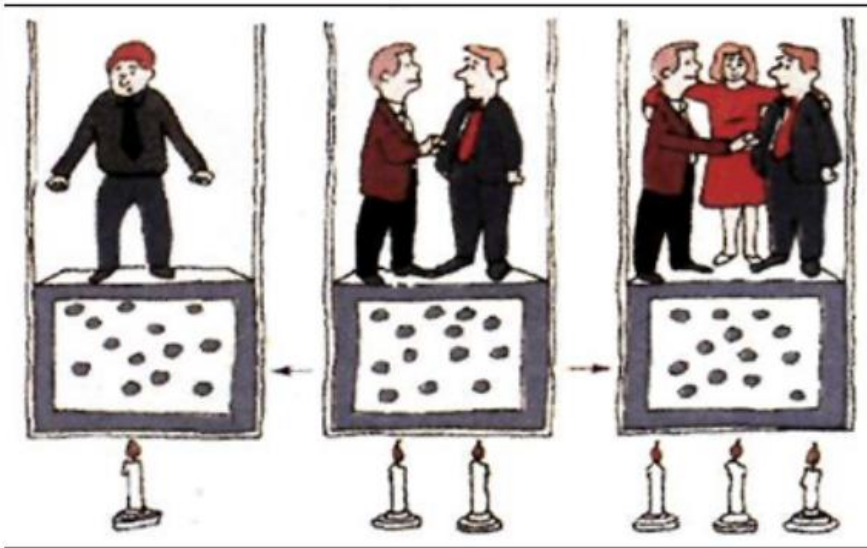
### Νόμος του Charles

■ Ο όγκος ορισμένης μάζας αερίου σε σταθερή πίεση είναι ανάλογος με την απόλυτη θερμοκρασία.  
Μαθηματική σχέση:

$$V \propto T$$



## Νόμος Gay-Lussac



### Νόμος του Gay Lussac

Η πίεση ορισμένης μάζας αερίου σε σταθερό όγκο είναι ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία.

Μαθηματική σχέση:

$$P \propto T$$

(όγκος σταθερός)



## Συμπέρασμα

Για ένα οποιοδήποτε αέριο :

- $P$  αντιστρόφως ανάλογη του  $V$  ή  $V$  ανάλογο του  $1/P$  (N. Boyle)
- $V$  ανάλογο του  $T$  ( N. Charles)
- $V$  ανάλογο του  $n$ , όταν  $P, T$  σταθερά ( Avogadro)

$$\text{Άρα: } V \propto \frac{n \cdot T}{P} \quad V = R \cdot \frac{n \cdot T}{P}$$

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$R = 0.082 \text{ L.atm/mol/K}$$

$P(\text{atm}), V(\text{L})$

$$v, \text{ ειδικός όγκος } \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) = \frac{V(\text{m}^3)}{m(\text{kg})}$$

$$p v = R' T$$

Καταστατική εξίσωση (ιδανικών) αερίων

ή

$$P \cdot V = m R' T$$

$R'$  (J/kg/K, Πίνακες Γ6 Αερίων)

$P$  (Pa),  $V$  (m<sup>3</sup>)

# Ιδανικό αέριο (3/11)

**ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.**

*Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.*

| ΑΕΡΙΟ                        | $M$<br>lbm/pmole | $c_p$<br>Btu/lbm-R | $c_p$<br>kJ/kg-K | $c_v$<br>Btu/lbm-R | $c_v$<br>kJ/kg-K | $k$   | $R$<br>ft·lbf/lbm-R | $R$<br>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          |
| 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         |
| 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         |

## Καταστατική εξίσωση των αερίων

■ Συνδυάζοντας τους νόμους των Boyle, Charles και του Avogadro καταλήγουμε στη σχέση:

$$V \propto \frac{nT}{p}$$

που μετατρέπεται στη σχέση:  $V = R \frac{nT}{p} \Leftrightarrow PV = nRT$

που λέγεται καταστατική εξίσωση των αερίων.

■ Με το γράμμα  $R$  συμβολίζεται μία σταθερά που λέγεται παγκόσμια σταθερά των αερίων, και η τιμή της μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

Θεωρούμε  $n$  mol αερίου σε stp συνθήκες που καταλαμβάνουν όγκο  $n \cdot 22,4$  L.

Από την καταστατική εξίσωση έχουμε:

$$PV = nRT \Leftrightarrow R = \frac{PV}{nT} \Rightarrow R = \frac{1 \text{ atm} \cdot n22,4 \text{ L}}{n \text{ mol} \cdot 273 \text{ K}} \Rightarrow R = 0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$\text{ή } 8.314 \text{ J/mol/K}$$



## Παράδειγμα 1

- \* Σε δοχείο όγκου  $V = 15 \text{ L}$  και θερμοκρασίας  $\Theta = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , εισάγονται  $4 \text{ mol}$  αερίου  $A$ . Να υπολογιστεί η πίεση που ασκεί το αέριο στο δοχείο.

Δίνεται η παγκόσμια σταθερά των αερίων:  $R = 0,082 \text{ L}\cdot\text{atm}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

$$T = 273 + 27 = 300 \text{ K}$$

Από την καταστατική εξίσωση έχουμε:

$$PV = nRT \Leftrightarrow P = \frac{nRT}{V} = \frac{4 \text{ mol} \cdot 0,082 \frac{\text{Latm}}{\text{molK}} \cdot 300 \text{ K}}{15 \text{ L}} = 6,56 \text{ atm}$$

## Παράδειγμα 2

\* Να βρεθεί η πυκνότητα ( $d$ ) του οξυγόνου ( $O_2$ ) σε πίεση  $P = 8 \text{ atm}$  και θερμοκρασία  $\theta = 273 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Δίνονται  $A_w(O) = 16 \text{ g/mol}$ ,  $R = 0,082 \text{ L.atm.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

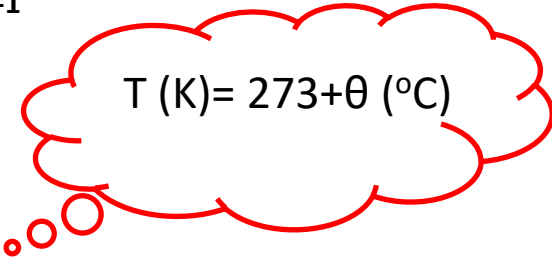
$$T = 273 + 273 = 546 \text{ K}$$

$$M_w(O_2) = 2 \cdot 16 = 32 \text{ g/mol}$$

Από την καταστατική εξίσωση έχουμε:

$$PV = nRT \Leftrightarrow PV = \frac{m}{M_w} RT \Leftrightarrow PM_w = \frac{m}{V} RT \Leftrightarrow PM_w = dRT$$

$$d = \frac{PM_w}{RT} = \frac{8 \text{ atm} \cdot 32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{0,082 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}} 546 \text{ K}} = 5,7 \text{ g/L}$$

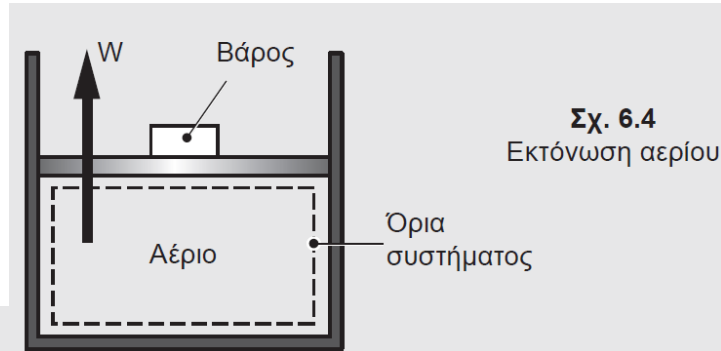

$$T (\text{K}) = 273 + \theta (\text{ }^\circ\text{C})$$

# Ιδανικό αέριο (7α/11)

## Παράδειγμα 1

Μέσα στον κύλινδρο του σχήματος 6.4 υπάρχει αέρας μάζας 2 kg, ο οποίος εκτονώνεται με **σταθερή πίεση** από θερμοκρασία 4°C και πίεση 20 bar σε θερμοκρασία 200°C.

Ζητείται το έργο που δίνει ο αέρας στο έμβολο.



Σχ. 6.4  
Εκτόνωση αερίου

## Λύση

Η **εκτόνωση του αερίου** μέσα στο κλειστό σύστημα του σχήματος 6.4 είναι μία διεργασία **σταθερής πίεσης**. Γνωρίζουμε ότι το έργο ενός τέτοιου συστήματος δίνεται από την εξίσωση (3.5):

$$W = \int_1^2 p dV \quad (1)$$

Αφού  $p$  = σταθερή, τότε η εξίσωση (1) γίνεται:

$$W = p \int_1^2 dV = p (V_2 - V_1) \quad (2)$$

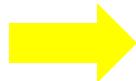
$$P \cdot V = m R' T \quad R' \text{ (kJ/kg/K, Πίνακες Γ6 Αερίων)}$$

Έχουμε ότι:  $m = 2 \text{ kg}$ ,  $R = 0,287 \text{ kJ/kgK}$  από τον Πίνακα Γ6,

$$T_1 = 273 + 4 = 277 \text{ K}, \quad T_2 = 273 + 200 = 473 \text{ K}$$

$$V_1 = \frac{2 \times 0,287 \times 10^3 \times 277}{20 \times 10^5} = 7,95 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$V_2 = \frac{2 \times 0,287 \times 10^3 \times 473}{20 \times 10^5} = 13,58 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$



Με τις τιμές του  $V_1$  και  $V_2$ , από την εξίσωση (2) έχουμε το έργο του εμβόλου.

$$W = 20 \times 10^5 \times (13,58 - 7,95) \times 10^{-2} = 112,6 \text{ kJ}$$

Το έργο είναι θετικό, γιατί κατευθύνεται **από** το σύστημα **προς** το περιβάλλον.

# Ιδανικό αέριο (7β/11)

**ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.**

*Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.*

| ΑΕΡΙΟ                        | $M$<br>lbm/pmole | $c_p$<br>Btu/lbm-R | $c_p$<br>kJ/kg-K | $c_v$<br>Btu/lbm-R | $c_v$<br>kJ/kg-K | $k$   | $R$<br>ft·lbf/lbm-R | $R$<br>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         |
| 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         |

# Ιδανικό αέριο (8/11)

## Παράδειγμα 2

Ο αέρας θεωρείται τέλειο αέριο που έχει σταθερά  $R = 0,287 \text{ kJ/kgK}$ . Εάν μέσα στον κύλινδρο του σχήματος 6.5 υπάρχει αέρας με θερμοκρασία  $80^\circ\text{C}$  και όγκο  $2 \text{ m}^3$ , ζητείται να βρεθεί η πίεση του αέρα, εάν η μάζα του είναι  $20 \text{ kg}$ .

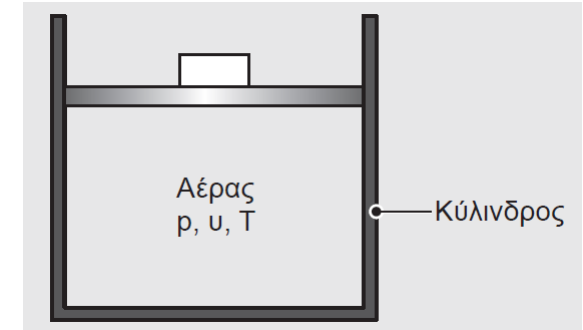
### Λύση

$$1\text{kPa} = 10^3 \text{ Pa}$$

$$1\text{bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^2 \text{ kPa}$$

$$P \cdot V = mR' T$$

$$T = 273 + 80 = 353\text{K}$$



**Σχ. 6.5**  
Διάταξη εμβόλου - κυλίνδρου  
(κλειστό σύστημα)

$$p = \frac{20 \times 0,287 \times 353}{2} = 1013 \text{ kN/m}^2 \quad \text{ή} \quad 10,13 \text{ bar}$$

$$\frac{(kg) \cdot \left( \frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot K}{m^3} = \frac{kJ}{m^3} = \frac{kN}{m^2}$$

$$1\text{bar} = 10^5 \text{ Pa (N/m}^2\text{)}$$

$$1\text{kPa} = 10^3 \text{ Pa}$$

## Ειδική θερμότητα

Ο όρος **ειδική θερμότητα** ή **θερμοχωρητικότητα** μάζας είναι γνωστός από τη Φυσική, όπου ορίζεται ότι: «*Η ειδική θερμότητα ενός σώματος είναι το ποσό της θερμότητας που απαιτείται να δοθεί στη μονάδα μάζας του σώματος για να ανέλθει η θερμοκρασία του κατά έναν βαθμό*».

**Η ειδική θερμότητα με σταθερή πίεση  $c_p$  είναι η μεταβολή της ειδικής ενθαλπίας του αερίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, όταν η πίεση παραμένει σταθερή.**

Με σύμβολα, αυτό γράφεται ως:

$$c_p = \frac{dh}{dt} \quad \text{ή} \quad c_p = \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} \quad (6.8)$$

όπου:  $h_1, h_2$ , η ειδική ενθαλπία του αερίου στην αρχή και στο τέλος της διεργασίας με σταθερή πίεση σε  $\text{kJ/kg}$

$t_1, t_2$ , η θερμοκρασία του αερίου στην αρχή και το τέλος της διεργασίας σε **K**

# Ιδανικό αέριο (9β/11)

**Η ειδική θερμότητα με σταθερό όγκο  $c_v$  είναι η μεταβολή της ειδικής εσωτερικής ενέργειας του αερίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, όταν ο όγκος παραμένει σταθερός.**

Με σύμβολα, αυτό γράφεται ως:

$$c_v = \frac{du}{dt} \quad \text{ή} \quad c_v = \frac{u_2 - u_1}{t_2 - t_1} \quad (6.9)$$

όπου:  $u_1, u_2$  η ειδική εσωτερική ενέργεια του αερίου στην αρχή και στο τέλος της διεργασίας με σταθερό όγκο σε  $\text{kJ/kg}$   
 $t_1, t_2$  η θερμοκρασία του αερίου στην αρχή και στο τέλος της διεργασίας σε **K**

# Ιδανικό αέριο (10α/11)

Μεταξύ της ειδικής θερμότητας  $c_p$  και  $c_v$  υπάρχει η σχέση:

$$c_p - c_v = R \quad (6.10)$$

δηλαδή η διαφορά μεταξύ  $c_p$  και  $c_v$  είναι πάντα σταθερή και ίση με τη σταθερά του αερίου  $R$ .

Επίσης πολλές φορές δίνεται ο λόγος του  $c_p$  και  $c_v$ , που ορίζεται ως:

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (6.11)$$

Τιμές του  $k$  δίνονται επίσης και στον Πίνακα Γ6.



# Ιδανικό αέριο (10β/11)

**ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.**

**Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.**

| ΑΕΡΙΟ                        | $M$<br>lbm/pmole | $c_p$<br>Btu/lbm-R | $c_p$<br>kJ/kg-K | $c_v$<br>Btu/lbm-R | $c_v$<br>kJ/kg-K | $k$   | $R$<br>ft/lbf/lbm-R | $R$<br>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         |

# Ιδανικό αέριο (11/11)

## Παράδειγμα

Για ένα αέριο η σταθερά  $R$  είναι  $0,4615 \text{ kJ/kgK}$  και ο συντελεστής  $k$  είναι  $1,329$ . Ζητείται να υπολογιστεί το  $c_p$  και  $c_v$  του αερίου.

## Λύση

$$c_p - c_v = R = 0,4615$$

$$\frac{c_p}{c_v} = k = 1,329$$

Έχουμε ένα σύστημα δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους,  $c_p$  και  $c_v$ . Από τη λύση του προκύπτει ότι:

$$c_p = 1,8642 \text{ kJ/kgK} \text{ και } c_v = 1,4027 \text{ kJ/kgK}$$

## Κλειστά συστήματα

### Διεργασία υπό σταθερή πίεση

Ο Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος για το κλειστό σύστημα μάς δίνει, εξίσωση (4.10):

$$Q = (U_f - U_i) + W \quad (6.12)$$

Η μεταβολή της ενθαλπίας του αερίου οφείλεται στη θερμότητα που δώσαμε στο σύστημα και είναι ίση με:

$$H_2 - H_1 = Q_{12} \quad (6.13)$$

Για τέλεια αέρια η θερμότητα αυτή προσδιορίζεται από την εξίσωση (6.8):

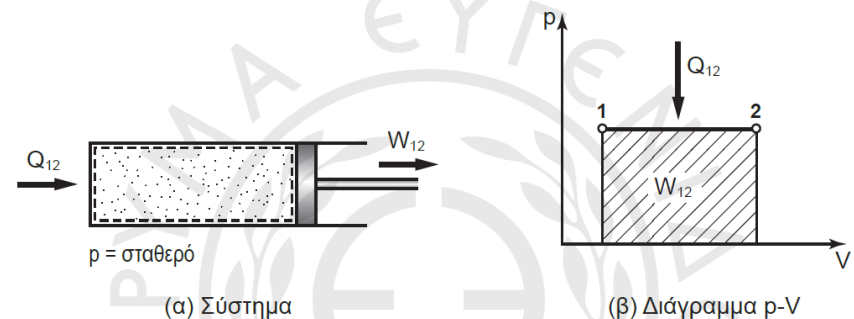
$$Q_{12} = H_2 - H_1 = mc_p (T_2 - T_1) \quad (6.13\alpha)$$

Επίσης, το έργο  $W_{12}$  που παράγεται, ισούται με:

$$W_{12} = p(V_2 - V_1) \quad (6.14)$$

και στο διάγραμμα  $p - V$  παριστάνεται από την επιφάνεια κάτω από τη γραμμή 1-2 [σχ. 6.6(β)]. Με βάση τη χαρακτηριστική εξίσωση του τέλει αερίου, εξίσωση (6.6), η πιο πάνω σχέση γράφεται επίσης ως:

$$W_{12} = mR (T_2 - T_1) \quad (6.14\alpha)$$



**Σχ. 6.6**  
Διεργασία με σταθερή πίεση

# Διεργασίες αερίων (2/14)

## Παράδειγμα 1

Σε ένα σύστημα κυλίνδρου - εμβόλου έχουμε 1 kg αέρα, τον οποίο θερμαίνουμε με **σταθερή πίεση** 350 kPa. Η εσωτερική ενέργεια και η θερμοκρασία αυξάνονται κατά 200 kJ και 70 K αντίστοιχα. Εάν το έργο που παράγεται είναι 100 kJ, να προσδιοριστεί: α) Η μεταβολή του όγκου και β) το  $c_p$ .

## Λύση

α) Για το κλειστό αυτό σύστημα ο Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος είναι:

$$Q_{12} = \Delta U + W_{12} \quad (1)$$

Από την εξίσωση (6.14) έχουμε ότι η μεταβολή του όγκου  $\Delta V$  που ζητάμε είναι:

$$\Delta V = \frac{W}{p} = \frac{100}{350} = 0,286 \text{ m}^3$$

μονάδες

$$\begin{aligned} \frac{W}{P} &= \frac{J}{Pa} = \frac{J}{N/m^2} = \frac{J}{N} \cdot m^2 \\ &= \frac{N \cdot m}{N} \cdot m^2 = m^3 \end{aligned}$$

$$Q_{12} = mc_p (T_2 - T_1) \quad \text{ή} \quad c_p = \frac{Q_{12}}{m (T_2 - T_1)}$$

ΟΠΟΤΕ

$$c_p = \frac{300}{1 \times 70} = 4,286 \text{ kJ/kgK}$$

$$\frac{kJ}{kg \cdot K}$$

## Παράδειγμα 2

Σε έναν κύλινδρο με έμβολο υπάρχουν 0,5 kg **αέρα**, ο οποίος, καθώς θερμαίνεται, εκτονώνεται με **σταθερή πίεση** 2,5 bar από αρχική θερμοκρασία 10°C σε τελική θερμοκρασία 300°C. Ζητείται να βρεθεί: α) Το ποσό της θερμότητας που δόθηκε στη διάρκεια της θέρμανσης του αερίου, β) το έργο που έδωσε το έμβολο και γ) η αλλαγή της ενθαλπίας και της εσωτερικής ενέργειας.

### Λύση

Από την εξίσωση (6.13α):

α)  $Q_{12} = H_2 - H_1 = mc_p (T_2 - T_1) = 0,5 \times 1,0047 \times (573 - 283) = 145,68 \text{ kJ}$

β)  $W_{12} = mR (T_2 - T_1) = 0,5 \times 0,287 \times (573 - 283) = 41,62 \text{ kJ}$

γ)

$$U_2 - U_1 = Q_{12} - W_{12} = 145,68 - 41,62 = 104,06 \text{ kJ}$$

Από το πρόσημο της θερμότητας  $Q$  και του έργου  $W$  βλέπουμε ότι στο σύστημα δώσαμε θερμότητα και από αυτό πήραμε μηχανικό έργο.

$$T_1 = 10 + 273 = 283 \text{ K}$$

$$T_2 = 300 + 273 = 573 \text{ K}$$

# Διεργασίες αερίων (3β/14)

**ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.**

Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.

| ΑΕΡΙΟ                        | $M$<br>lbm/pmole | $c_p$<br>Btu/lbm-R | $c_p$<br>kJ/kg-K | $c_v$<br>Btu/lbm-R | $c_v$<br>kJ/kg-K | $k$   | $R$<br>ft·lbf/lbm-R | $R$<br>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         |

## Κλειστά συστήματα

### Διεργασία υπό σταθερό όγκο

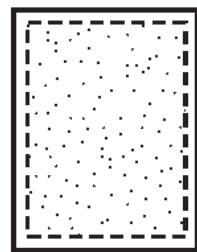
Η διεργασία με σταθερό όγκο φαίνεται στο σχήμα 6.7. Εδώ δεν έχουμε μεταβολή του όγκου, οπότε το έργο  $W = 0$  [σχ. 6.7(β)], αφού η επιφάνεια κάτω από τη γραμμή

1-2 είναι σημείο, δηλαδή μηδέν. Έτσι ο πρώτος νόμος, εξίσωση (6.12), για το σύστημα αυτό γίνεται:

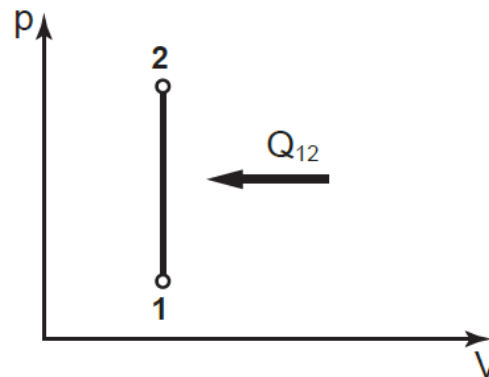
$$Q_{12} = \Delta U \quad (6.15)$$

και για τέλειο αέριο:

$$Q_{12} = m c_v (T_2 - T_1)$$



$V = \text{σταθερό}$   
(α) Σύστημα



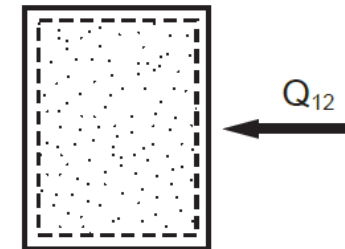
(β) Διάγραμμα p-V

**Σχ. 6.7**  
Διεργασία με σταθερό όγκο

# Διεργασίες αερίων (5α/14)

## Παράδειγμα 3

Ένα κλειστό δοχείο έχει όγκο  $1 \text{ m}^3$  και περιέχει αέρα υπό πίεση  $3.45 \text{ kN/m}^2$  και θερμοκρασία  $0^\circ\text{C}$ . Δίνεται θερμότητα στον αέρα μέχρι να φτάσει η θερμοκρασία στους  $327^\circ\text{C}$ . Ζητείται να βρεθεί το ποσό της θερμότητας που δόθηκε στον αέρα σε  $\text{kJ}$ .



$V = \text{σταθερό}$

## Λύση

Το σύστημα είναι κλειστό και ο πρώτος νόμος, εξίσωση (6.15), μας λέει ότι:

$$Q_{12} = \Delta U = mc_v (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Από τη χαρακτηριστική εξίσωση των τέλειων αερίων για  $t_1 = 0^\circ\text{C}$  ή  $T_1 = 273 \text{ K}$ :

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{3.45 \times 1}{0.287 \times 273} = 0.044 \text{ kg}$$

Από τον Πίνακα Γ6  $c_v = 0.7176 \text{ kJ/kgK}$ ,  $T_2 = 327 + 273 = 600 \text{ K}$ . Οπότε, από την εξίσωση (1) το ποσό της θερμότητας  $Q_{12}$  που δόθηκε στον αέρα είναι:

$$Q_{12} = 0.044 \times 0.7176 \times (600 - 273) = 10324 \text{ kJ}$$



# Διεργασίες αερίων (5β/14)

**ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.**

*Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.*

| ΑΕΡΙΟ                        | $M$<br>lbm/pmole | $c_p$<br>Btu/lbm-R | $c_p$<br>kJ/kg-K | $c_v$<br>Btu/lbm-R | $c_v$<br>kJ/kg-K | $k$   | $R$<br>ft·lbf/lbm-R | $R$<br>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         |

## Κλειστά συστήματα

### Διεργασία υπό σταθερή θερμοκρασία

Στην ιδανική αυτή διεργασία δίνουμε θερμότητα  $Q_{12}$  και το έμβολο μετακινείται από το σημείο 1 στο σημείο 2, δίνοντας έργο  $W_{12}$ .

Δεδομένου ότι  $T_1 = T_2$ , τότε από την εξίσωση (6.9) έχουμε ότι:

$$c_v = \frac{du}{dt} \quad \text{ή} \quad c_v = \frac{u_2 - u_1}{t_2 - t_1} \quad (6.9)$$

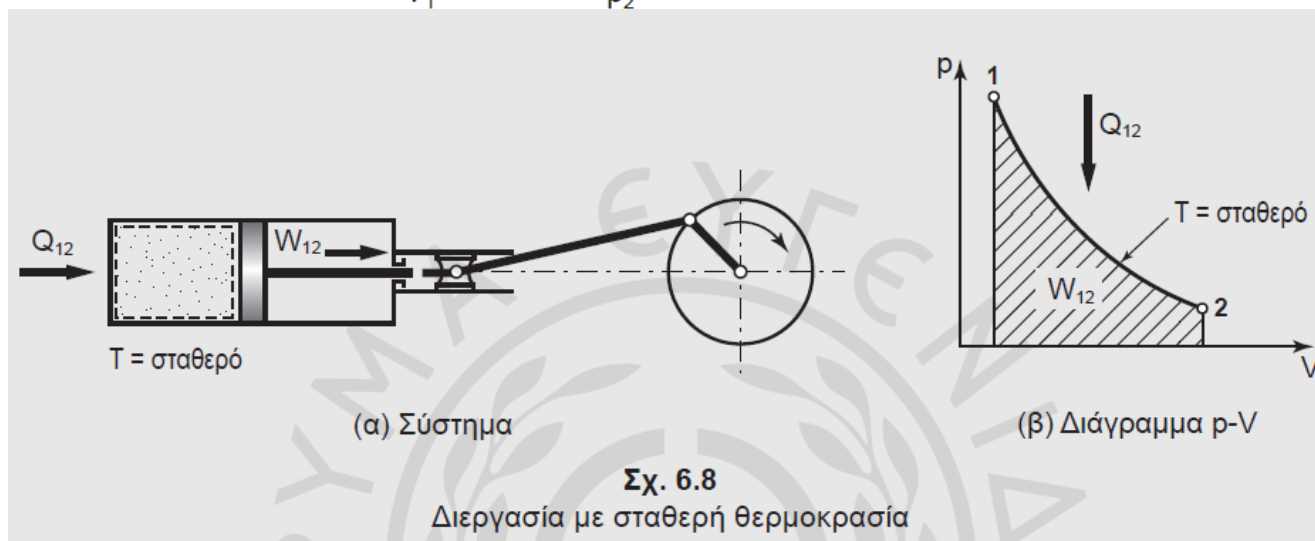
$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0$$

οπότε ο πρώτος νόμος, εξίσωση (6.12), μας δίνει ότι:

$$Q_{12} = W_{12} \quad (6.16)$$

όπου αποδεικνύεται ότι:

$$W_{12} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (6.17)$$



## Κλειστά συστήματα

## Διεργασία υπό σταθερή θερμοκρασία

Απόδειξη..

$$W_{12} = \int_1^2 p dV = \int_1^2 \frac{nRT}{V} dV = nRT \int_1^2 \frac{1}{V} dV = nRT [\ln V_2 - \ln V_1]$$

$$W_{12} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1 V_1 \ln \frac{nRT/p_2}{nRT/p_1} = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$p_1 V_1 = nRT$$

$$p_2 V_2 = nRT$$

# Διεργασίες αερίων (7/14)

## Παράδειγμα 4

Ο κύλινδρος του σχήματος 6.8 λαμβάνει θερμότητα με **σταθερή θερμοκρασία** 500 K και αρχική πίεση 200 kPa. Ο αρχικός όγκος είναι 0,01 m<sup>3</sup> και ο τελικός 0,07 m<sup>3</sup>. Να βρεθεί η θερμότητα που δόθηκε στον κύλινδρο και το έργο που έδωσε.

### Λύση

Από την εξίσωση (6.16) έχουμε ότι:

$$Q_{12} = W_{12}$$

Από την εξίσωση (6.17) έχουμε ότι:

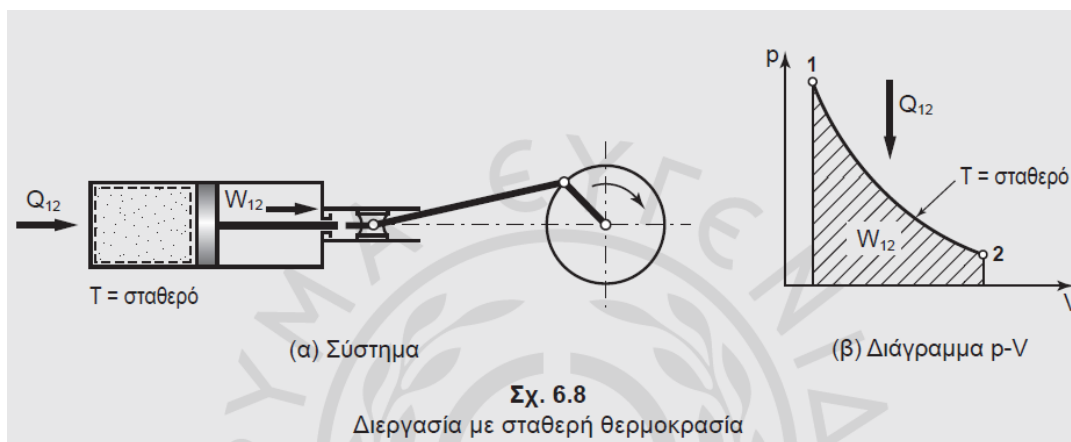
$$W_{12} = p_1 V_1 / n \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Αντικαθιστούμε τις τιμές και έχουμε ότι:

$$W_{12} = 200 \times 0,01 \times / n \frac{0,07}{0,01} = 3,892 \text{ kJ}$$

και

$$Q_{12} = W_{12} = 3,892 \text{ kJ}$$



## Κλειστά συστήματα

## Αδιαβατική διεργασία

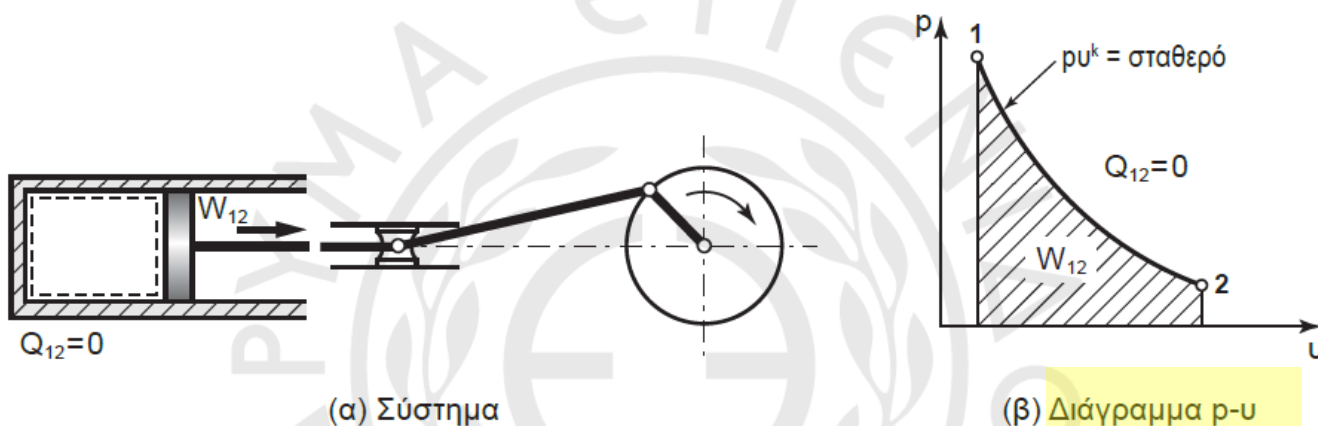
Στην αδιαβατική διεργασία, όπως είπαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 3 παράγρ. 3.3.2), η μεταφορά θερμότητας είναι αμελητέα και πρακτικά θεωρούμε ότι  $Q = 0$ .

Μαθηματικά η αδιαβατική διεργασία χαρακτηρίζεται από τη σχέση:

$$p u^k = C = \text{σταθ.}$$

Ο εκθέτης  $k$  είναι

μία ιδιότητα του εργαζόμενου μέσου και δίνεται από την εξίσωση (6.11) ή τον Πίνακα Γ6 του Παραρτήματος Γ.



Σχ. 6.9  
Αδιαβατική διεργασία

## Κλειστά συστήματα

## Αδιαβατική διεργασία

Γενικά για μία αδιαβατική διεργασία έχουμε ότι:

$$p_1 u_1^k = p_2 u_2^k$$

Αποδεικνύονται..

$$\frac{u_2}{u_1} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{1/(k-1)} \quad \text{ή}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{1/k-1} \quad \text{ή}$$

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

$$c_p - c_v = R$$

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

$$\frac{k-1}{k} = \frac{R}{c_p} \quad \text{ή}$$

$$\frac{1}{k-1} = \frac{c_p}{R} - 1$$

$$v, \text{ ειδικός όγκος } \left( \frac{m^3}{kg} \right) = \frac{V(m^3)}{m(kg)}$$

$$pv = RT \text{ or } pV = mRT$$

$$W_{12} = m \frac{p_2 u_2 - p_1 u_1}{1 - k} \quad \text{ή}$$

$$W_{12} = mR \frac{T_2 - T_1}{1 - k} \quad \text{ή}$$

$$W = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1 - k}$$

Απόδειξη-υπολογισμός έργου Αδιαβατικής διεργασίας ( $Q=0$ )..

$$Q = \Delta U + W \Rightarrow W = -\Delta U = -mc_v \Delta T = -mc_v (T_2 - T_1) = -mc_v \left( \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{R} \right)$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_v + R}{c_v} = 1 + \frac{R}{c_v} \Rightarrow \frac{R}{c_v} = k - 1 \Rightarrow \frac{c_v}{R} = \frac{1}{k-1} \Rightarrow -\frac{c_v}{R} = \frac{1}{1-k}$$

### ΑΟΡΙΣΤΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑΤΑ ΑΠΛΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ

Για τον υπολογισμό των αορίστων ολοκληρωμάτων μπορούμε να θεωρούμε ως γνωστά τα παρακάτω στοιχειώδη αόριστα ολοκληρώματα.

**Πρόταση.** Ισχύουν τα εξής:

$$1. \int x^\lambda dx = \frac{x^{\lambda+1}}{\lambda+1} + c \quad (\lambda \neq -1 \text{ με } x > 0 \text{ ή } \lambda \in \mathbb{N})$$

$$2. \int \frac{1}{x} dx = \ln|x| + c, \quad (x < 0 \text{ ή } x > 0).$$

$$3. \int e^x dx = e^x + c.$$

$$4. \int \sin x dx = -\cos x + c.$$

$$5. \int \cos x dx = \sin x + c.$$

$$6. \int \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx = \sin^{-1} x + c, \quad (-1 < x < 1).$$

$$7. \int \frac{1}{1+x^2} dx = \tan^{-1} x + c.$$

Απόδειξη..

$$W = \int p dV = \int \frac{C}{V^k} dV = C \int \frac{1}{V^k} dV = C \int V^{-k} dV = C \frac{V^{-k+1}}{-k+1} = C \frac{V^{1-k}}{1-k}$$

$${}^H W_{12} = C \frac{V_2^{1-k} - V_1^{1-k}}{1-k} = \frac{C V_2^{1-k} - C V_1^{1-k}}{1-k} = \frac{P_2 V_2^k V_2^{1-k} - P_1 V_1^k V_1^{1-k}}{1-k} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-k}$$

$${}^H W_{12} = \frac{mRT_2 - mRT_1}{1-k} = mR \frac{T_2 - T_1}{1-k}$$



# Διεργασίες αερίων (9α/14)

## Παράδειγμα 6

Ένα χιλιόγραμμα αέρα εκτονώνεται αδιαβατικά από πίεση 10 bar και θερμοκρασία 200°C μέχρι πίεση 2 bar. Να βρεθεί: α) Ο ειδικός όγκος και η θερμοκρασία στο τέλος της εκτόνωσης και β) το έργο που έδωσε ο αέρας.

## Λύση

α) Εφόσον έχουμε αδιαβατική εκτόνωση, από την εξίσωση (6.19) έχουμε:

$$p_1 u_1^k = p_2 u_2^k \quad (1)$$

όπου  $k = 1,4$  για τον αέρα από τον Πίνακα Γ6.

$$R = 0.2874 \text{ kJ/kg.K} = 287.4 \text{ J/kg.K}$$

$$\text{αλλά } p_1 u_1 = RT_1 \quad \text{και} \quad u_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \times (273 + 200)}{10 \times 10^5} = 0,136 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{μονάδες } \frac{(J/kg \cdot K) \cdot K}{Pa} = \frac{J/kg}{N/m^2} = \frac{J}{N} \cdot \frac{m^2}{kg} = \frac{N \cdot m}{N} \cdot \frac{m^2}{kg} = \frac{m^3}{kg}$$

$$u_2 = u_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{1/k} = 0,136 \left( \frac{10}{2} \right)^{1/1,4} = 0,429 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} = 473 \times \left( \frac{2}{10} \right)^{0,4/1,4} = 299 \text{ K}$$

ή  $t_2 = 299 - 273 = 26^\circ\text{C}$

$$T_1 = 200 + 273 = 473 \text{ K}$$

## Διεργασίες αερίων (9β/14)

β) Το έργο δίνεται από την εξίσωση (6.23)

$$W_{12} = m \frac{p_2 u_2 - p_1 u_1}{1 - k} = 1 \times \frac{(2 \times 10^5 \times 0,429) - (10 \times 10^5 \times 0,136)}{1 - 1,4} = 125,5 \text{ kJ}$$

Έχουμε λοιπόν ότι για 1 kg αέρα ο στρόβιλος μάς δίνει 125,5 kJ. Φυσικά αφού έχουμε αδιαβατική εκτόνωση, η μεταφορά της θερμότητας είναι μηδέν.

# Διεργασίες αερίων (9γ/14)

**ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.**

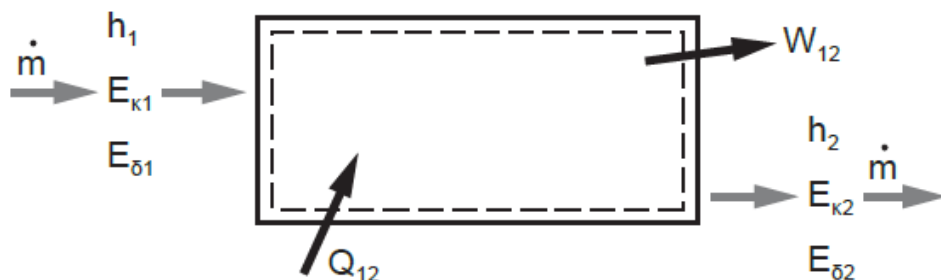
*Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.*

| ΑΕΡΙΟ                        | $M$<br>lbm/pmole | $c_p$<br>Btu/lbm-R | $c_p$<br>kJ/kg-K | $c_v$<br>Btu/lbm-R | $c_v$<br>kJ/kg-K | $k$   | $R$<br>ft/lbf/lbm-R | $R$<br>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         |

## Ανοιχτά συστήματα

Ο Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος για ένα ανοικτό σύστημα

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m} \left( h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \right) - \dot{m} \left( h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 \right) + \dot{W}$$

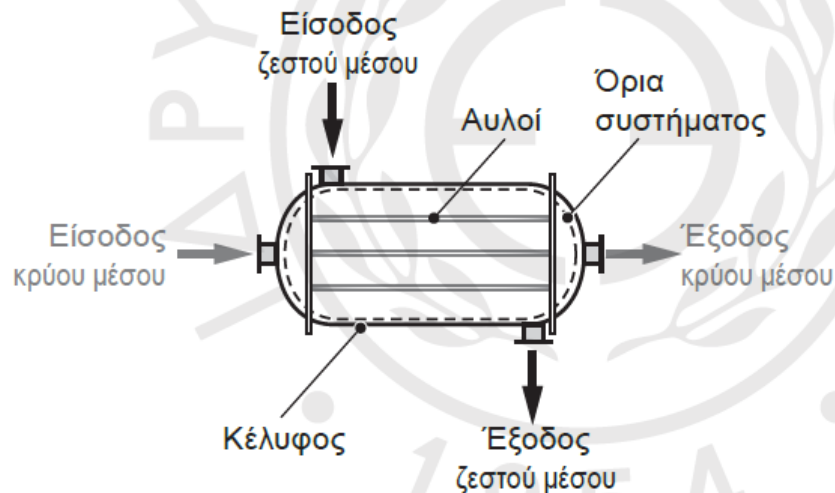


**Σχ. 6.11**  
Ένα ανοικτό σύστημα με διάφορες μορφές ενέργειες

## Ανοιχτά συστήματα Διεργασία υπό σταθερή πίεση

Κατά τη διεργασία αυτή συνήθως **δεν έχουμε παραγωγή έργου**. Το πιο γνωστό ανοικτό σύστημα όπου συναντούμε διεργασία με σταθερή πίεση είναι ο εναλλάκτης θερμότητας (ψυγεία, προθερμαντήρες κ.λπ.)

Στους εναλλάκτες θερμότητας το  $\dot{Q}$  έχει αρνητικό σημείο, γιατί έχουμε απώλεια θερμότητας από το κέλυφος προς το περιβάλλον.



**Σχ. 6.12**  
Εναλλάκτης  
θερμότητας

# Διεργασίες αερίων (12α/14)

## Παράδειγμα 1

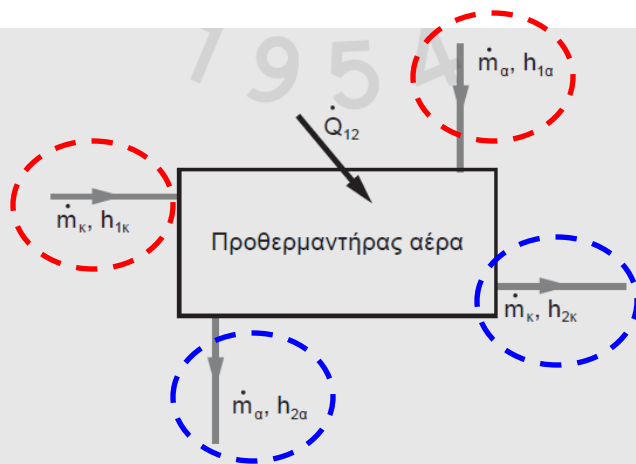
Σε έναν προθερμαντήρα **αέρα** εισέρχεται αέρας  $5^{\circ}\text{C}$  με παροχή  $100 \text{ kg/min}$  και εξέρχεται με θερμοκρασία  $90^{\circ}\text{C}$ . Στον προθερμαντήρα εισέρχεται επίσης χωρίς να αναμιχθεί με τον αέρα, ζεστό καυσάεριο θερμοκρασίας  $70^{\circ}\text{C}$  με παροχή  $450 \text{ kg/min}$  και εξέρχεται με θερμοκρασία  $50^{\circ}\text{C}$ . Εάν θεωρήσουμε το **καυσάεριο** ως **τέλειο αέριο** με  $c_p = 1,05 \text{ kJ/kgK}$ , ζητείται να βρεθεί η απώλεια της θερμότητας από το κέλυφος του προθερμαντήρα.

$$\begin{aligned}\theta_{1\alpha} &= 5^{\circ}\text{C} \\ \dot{m}_a &= 100 \text{ kg/min} \\ \theta_{2\alpha} &= 90^{\circ}\text{C} \\ \theta_{1\kappa} &= 70^{\circ}\text{C} \\ \dot{m}_\kappa &= 450 \text{ kg/min} \\ \theta_{2\kappa} &= 50^{\circ}\text{C} \\ c_{p,\kappa} &= 1.05 \text{ kJ/kgK} \\ \dot{Q} &?\end{aligned}$$

θεωρώντας ότι η δυναμική και κινητική ενέργεια είναι ποσότητες **αμελητέες**.

Οι δείκτες α και κ αναφέρονται στον **αέρα** και στα **καυσάερια** αντίστοιχα.

$$\begin{aligned}T_{1\alpha} &= 5 + 273 = 278\text{K} \\ T_{2\alpha} &= 90 + 273 = 363\text{K} \\ T_{1\kappa} &= 70 + 273 = 343\text{K} \\ T_{2\kappa} &= 50 + 273 = 323\text{K}\end{aligned}$$



Σχ. 6.13

Σχηματική παράσταση προθερμαντήρα αέρα με τα χαρακτηριστικά μεγέθη του αέρα ( $m_a, h_a$ ) και του καυσαιρίου ( $m_\kappa, h_\kappa$ )

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_a (h_{2\alpha} - h_{1\alpha}) + \dot{m}_\kappa (h_{2\kappa} - h_{1\kappa})$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_a (h_{2\alpha} - h_{1\alpha}) &= \dot{m}_a c_{pa} (T_{2\alpha} - T_{1\alpha}) = \\ &= \frac{100}{60} \times 1,0047 \times (363 - 278) = 142,3 \text{ kJ/s} \\ \dot{m}_\kappa (h_{2\kappa} - h_{1\kappa}) &= \frac{450}{60} \times 1,05 \times (323 - 343) = -157,5 \text{ kJ/s}\end{aligned}$$

# Διεργασίες αερίων (12β/14)

**ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.**

*Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.*

| ΑΕΡΙΟ                        | $M$<br>lbm/pmole | $c_p$<br>Btu/lbm-R | $c_p$<br>kJ/kg-K | $c_v$<br>Btu/lbm-R | $c_v$<br>kJ/kg-K | $k$   | $R$<br>ft·lbf/lbm-R | $R$<br>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         |
| Αζωτο ( $N_2$ )              | 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         |

# Διεργασίες αερίων (12γ/14)

$$\dot{Q}_{12} = 142,3 - 157,5 = -15,2 \text{ kJ/s}$$

Άρα η απώλεια της θερμότητας από το κέλυφος του ψυγείου είναι 15,2 kJ/s ή 15,2 kW.



## Ανοιχτά συστήματα

### Διεργασία υπό σταθερή θερμοκρασία

Η διεργασία με **σταθερή θερμοκρασία** ή ισοθερμοκρασιακή στην πράξη θεωρείται ως μία πολύ προσεγγιστική διεργασία. Γι' αυτήν ισχύει η εξίσωση (6.5), δηλαδή:

$$p v = R T = \text{σταθ.}$$

Αν θεωρήσουμε ότι η κινητική και δυναμική ενέργεια είναι αμελητέες ποσότητες, τότε το έργο του συστήματος μεταξύ της κατάστασης 1 και της κατάστασης 2 ισούται με:

$$\dot{W}_{12} = \dot{m} p_1 v_1 \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right) \quad \text{ή} \quad \dot{W} = \dot{m} p_2 v_2 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

ειδικός όγκος ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

Απόδειξη..

$$W = \int p dV = \int \frac{\dot{m}RT}{V} dV = \dot{m}RT \int \frac{1}{V} dV = \dot{m}RT \ln V$$

$$W_{12} = \dot{m}RT [\ln V_2 - \ln V_1] = \dot{m}RT \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = P_2 V_2 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$W_{12} = P_2 V_2 \ln \frac{mRT/P_2}{mRT/P_1} = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = P_2 V_2 \ln \frac{P_1}{P_2}$$

# Διεργασίες αερίων (14α/14)

## Παράδειγμα 2

Σε μία **μηχανή** έχουμε ροή **αέρα** με **σταθερή θερμοκρασία** 400 K. Να βρεθεί το **έργο ανά μονάδα μάζας**, εάν η πίεση στην έξοδο είναι το ένα τρίτο της πίεσης στην είσοδο και η πίεση εισόδου είναι 207 kPa.

$$\begin{aligned}p_2 &= p_1/3 \\ T &= 400\text{K} \\ p_1 &= 207\text{ kPa}\end{aligned}$$

## Λύση

Για το έργο ανά μονάδα μάζας η εξίσωση (6.32) γίνεται:

$$W_{12} = p_1 u_1 \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{3} \quad \text{και} \quad p_1 = 207\text{ kPa}$$

Από τη χαρακτηριστική εξίσωση του τέλει αερίου:

$$u_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{0,287 \times 400}{207} = 0,5546\text{ m}^3/\text{kg}$$

οπότε 
$$W_{12} = 207 \times 0,5546 \times \ln 3 = 126,1\text{ kJ/kg}$$

# Διεργασίες αερίων (14β/14)

**ΠΙΝΑΚΑΣ Γ6.**

*Σταθερές αερίων και ειδικές θερμότητες για χαμηλές πιέσεις.*

| ΑΕΡΙΟ                        | $M$<br>lbm/pmole | $c_p$<br>Btu/lbm-R | $c_p$<br>kJ/kg-K | $c_v$<br>Btu/lbm-R | $c_v$<br>kJ/kg-K | $k$   | $R$<br>ft/lbf/lbm-R | $R$<br>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         |