

# Θερμοδυναμική II

Διδάσκων: Ευάγγελος Σακελλαρίου

Εισαγωγική διάλεξη\_1

**Το μάθημα έχει δύο πυλώνες, σχετικά με το γνωστικό αντικείμενο**



Την Εξέργεια

Το Χημικό δυναμικό και  
θερμοδυναμική των  
μειγμάτων ουσιών

Εξέργεια (Exergy)

Εξέργεια ενός συστήματος:  $E$   
Εξεργειακή ανάλυση για κλειστά συστήματα.

Ροή Εξέργειας:  $E_f$   
Εξεργειακή ανάλυση για τα ανοιχτά συστήματα

Εξεργειακή Απόδοση (Exergy Efficiency)

- Στρόβιλοι
- Συμπιεστές και αντλίες
- Εναλλάκτες Θερμότητας

Γνωρίζουμε από την θερμοδυναμική ότι η **ΕΝΕΡΓΕΙΑ** διατηρείται, δεν καταστρέφεται αλλά μετατρέπεται από μια μορφή σε άλλη.  
Ποιος είναι ο ορισμός της ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ;

«**Είναι η δυνατότητα να έχω αποτέλεσμα**»  
να θερμάνω νερό, να ανυψώσω ένα αντικείμενο κτλ.

Η **ΕΞΕΡΓΕΙΑ** δεν διατηρείται και μπορεί να καταστραφεί.  
Ποιος είναι ο ορισμός της ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ;

«**Είναι η δυνατότητα να παράγω έργο**»  
(παρακάτω θα την ορίσουμε με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια)

Παλαιότερα η εξέργεια ονομαζόταν ενεργειακή διαθεσιμότητα  
(energy availability)

**Αν είχα μία διαφάνεια για να εξηγήσω τί είναι η θερμοδυναμική.**

- **Η μάζα διατηρείται (mass is conserved)**

Μια εξαίρεση  $E=mc^2$

- **Η ενέργεια διατηρείται (energy is conserved)**

1<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό αξίωμα (1<sup>st</sup> Law)

Μορφές ενέργειας – θερμική και μηχανική

- **Η ενέργεια υποβιβάζεται (energy degrades)**

2<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό αξίωμα (2<sup>nd</sup> Law)

Μετατροπή της θερμική σε μηχανική ενέργεια (είναι δύσκολο και δεν μπορώ να καταφέρω 100% μετατροπή)

Μετατροπή της μηχανική σε θερμική ενέργεια (είναι εύκολο και μπορώ να καταφέρω 100% μετατροπή)

**Για τη θερμοδυναμική ανάλυση της εξέργειας, θεωρούμε το περιβάλλον σαν τμήμα του συστήματος. Με τον όρο περιβάλλον θεωρούμε ένα αρκετά μεγάλο υποσύστημα του φυσικού κόσμου, του οποίου τα καταστατικά μεγέθη ( $T$ ,  $P$ ,  $V$  κτλ.) του δεν επηρεάζονται από την λειτουργία του συστήματος.**



**Καλό είναι να γνωρίζουμε ότι, τα καταστατικά μεγέθη του περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία  $T$  και η πίεση  $P$ , διαφέρουν από μέρος σε μέρος (Αθήνα, Αλάσκα, Έβερεστ, Σελήνη, δωμάτιο, λέβητας πχ.)**

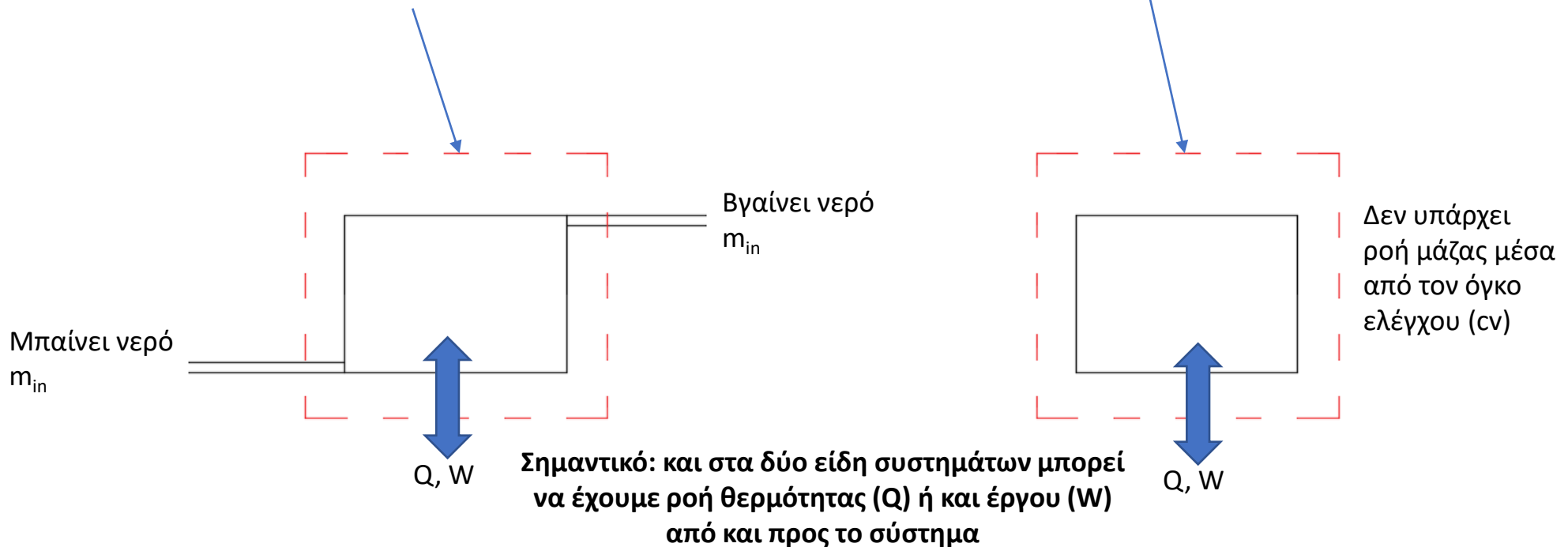
Στα θερμοδυναμικά συστήματα μπορούν να προσδιορισουν ως:

### Ανοιχτά (open)

Έχουν εισαγωγή και εξαγωγή μάζας από τον όγκο ελέγχου (control volume cv)

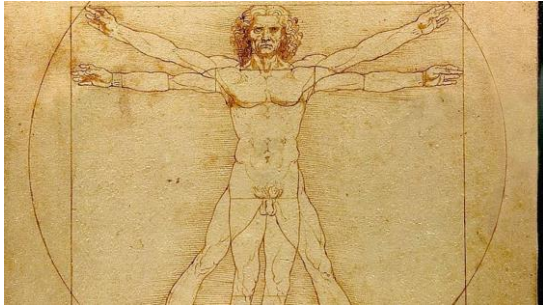
### Κλειστά (close)

Δεν έχουν εισαγωγή και εξαγωγή μάζας από τον όγκο ελέγχου (control volume cv)



# Ποια είναι τα κλειστά συστήματα

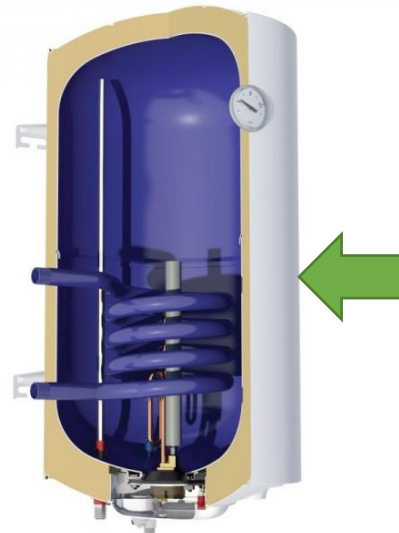
Ο άνθρωπος;



Το σπίτι ;



Η δεξαμενή νερού με εναλλάκτη;



Το λάστιχο ;



Η αντλία;

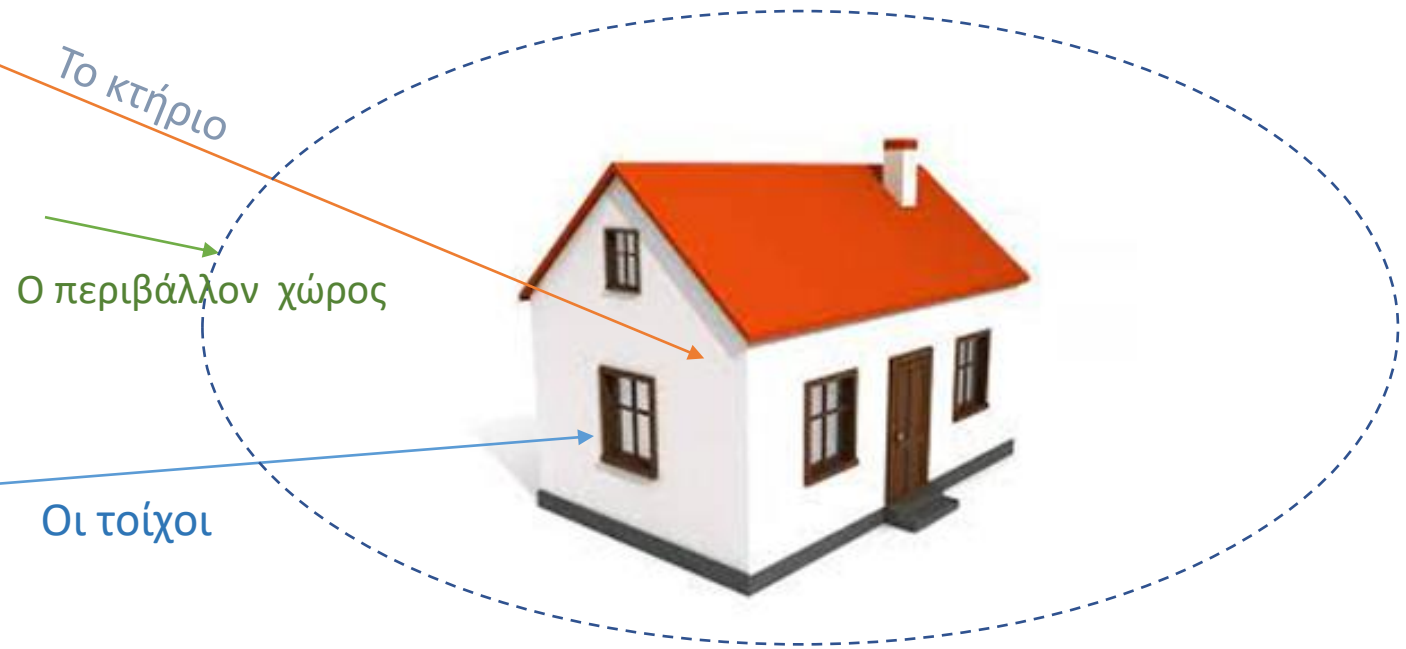




**Σύστημα:** είναι ένα μέρος του χώρου

**Περιβάλλον:** είναι ο γειτονικός χώρος έξω από τα σύστημα

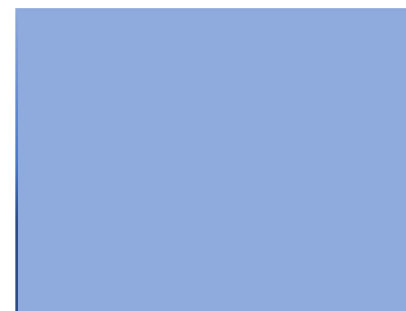
**Τοιχώματα τους συστήματος:** είναι οι επιφάνειες επαφής του συστήματος με το περιβάλλον



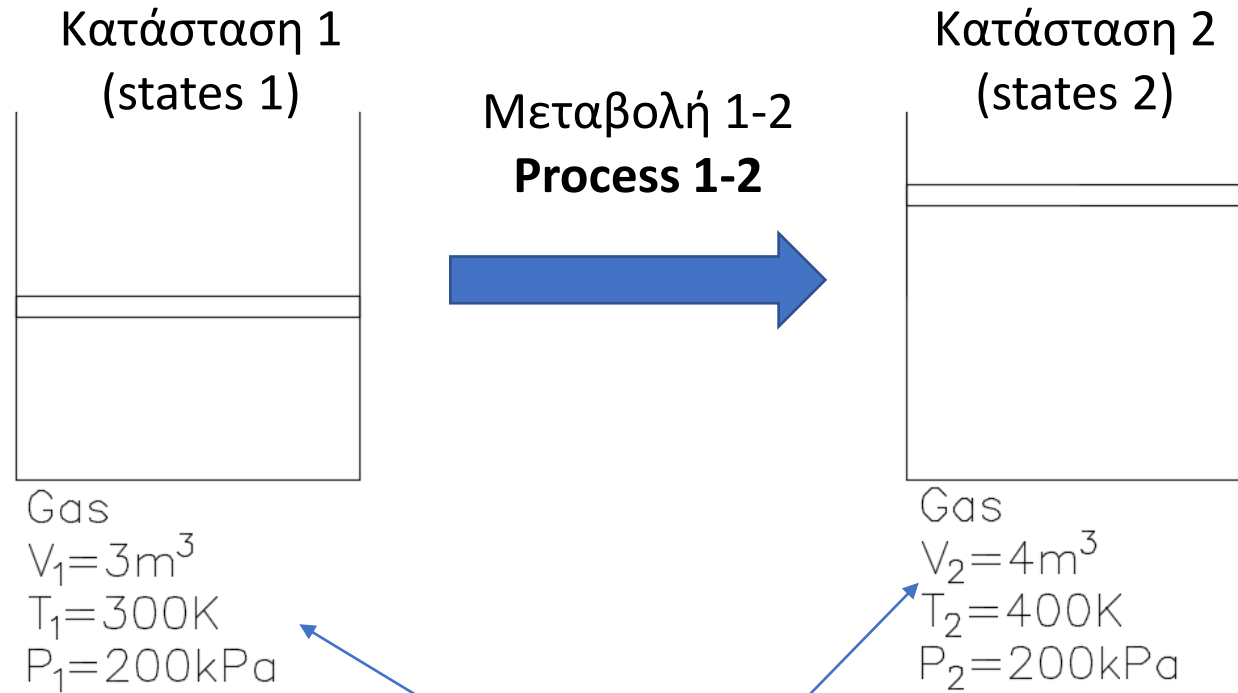
## Ιδιότητας των μεγεθών (properties)

Ιδιότητα (property)	Εντατικές (intensive) Ανεξάρτητες από το μέγεθος	Εκτατικές (extensive) Εξαρτώνται από το μέγεθος
Μάζα (mass)		✓
Όγκος (volume)		✓
Θερμοκρασία (temperature)	✓	
Πίεση (pressure)	✓	
Πηκτότητα (density)	✓	
Βάρος (weight)		✓

Έχουμε ένα δωμάτιο με θερμοκρασία 20 °C και ο όγκος του είναι 50 m<sup>3</sup>



## Καταστάσεις ενός συστήματος (states)



*Γιατί έχουμε  
αυτήν την  
μεταβολή στην  
κατάσταση του  
αερίου;*

Περιγράψουν την κατάσταση του συστήματος

## 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 1<sup>st</sup> law of thermodynamics

Μηχανική ενέργειας, είναι η δυνατότητα να:

1. Να μεταφέρω θερμότητα
2. Να παράγω έργο
3. Να ανυψώσω
4. Να αυξήσω την ορμή
5. Να αυξήσω την ταχύτητα

Με την θερμοδυναμική, έχω την δυνατότητάς να:

1. Να μεταφέρω θερμότητας
2. Να παράγω έργο
3. Να αυξήσω την θερμοκρασία
4. Να αυξήσω την πίεση
5. Να έχω αποτέλεσμα στο φυσικό περιβάλλον

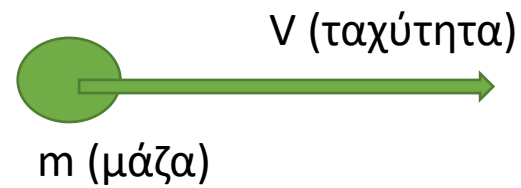
### Τι είναι το Έργο;

Το έργο εφαρμόζεται από το σύστημα στο περιβάλλον χώρο, και μπορεί να είναι η ανύψωση ενός φορτίου, η περιστροφή ενός άξονα κτλ.

1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 1<sup>st</sup> law of thermodynamics

Κινητική Ενέργεια:

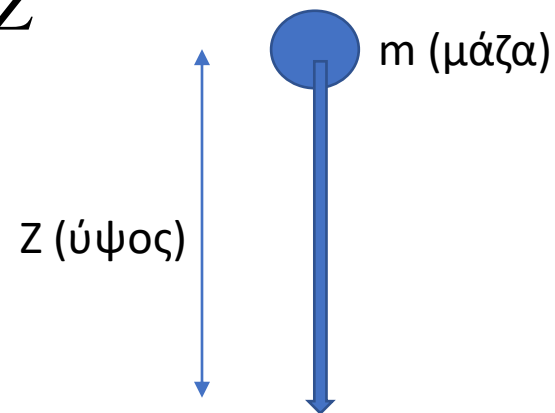
$$KE = \frac{1}{2} m \cdot V^2$$



Δυναμική Ενέργεια:

$$PE = m \cdot g \cdot Z$$

Η επιτάχυνση εξαιτίας της δύναμης της βαρύτητας στη γη



## 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 1<sup>st</sup> law of thermodynamics

Σημαντική σημείωση:

**Ισχύς (power) - μονάδες (W)**

power (electric power, thermal energy rate or heat rate, mechanical power)

**Ενέργεια (energy) - μονάδες (kJ ή kWh)**

Energy (electrical Energy, thermal Energy, heat, electricity, potential energy)

$$1 \text{ kW} = 3600 \text{ kJ} / 3600 \text{ s}$$

## 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 1<sup>st</sup> law of thermodynamics

Βασικές μορφές ενέργειας:

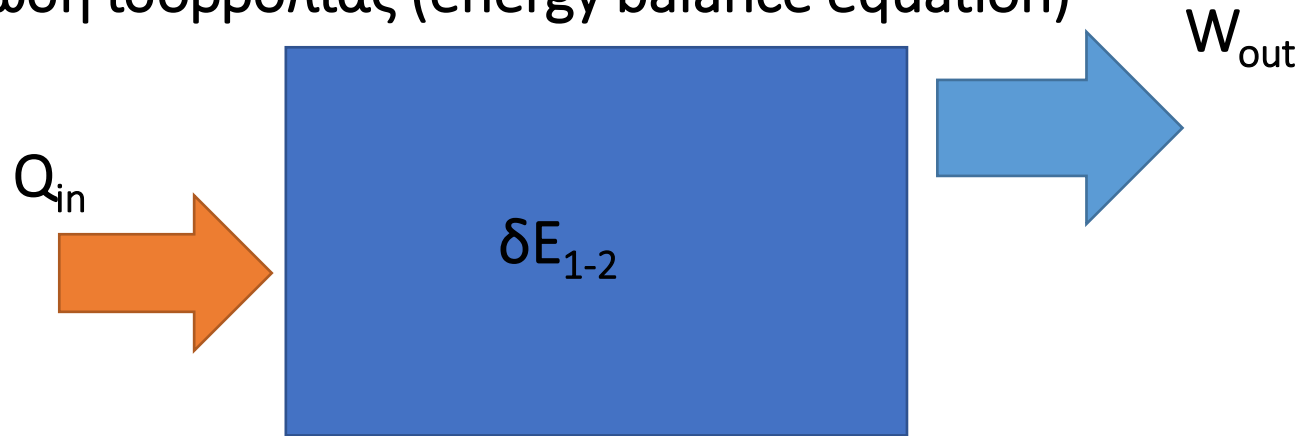
- ▶ Ακτινοβολία
- ▶ Πυρηνική
- ▶ Ηλεκτρική
- ▶ Χημική
- ▶ Κινητική
- ▶ Βαρυτική
- ▶ Θερμική

Έχουμε αναφέρει σχεδόν όλες τις χρήσιμες για την μελέτη μας μορφές ενέργειας και μας απομένει η θερμική.

## 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 1<sup>st</sup> law of thermodynamics

Κατανόηση του 1<sup>ου</sup> Θ.Α

Εξίσωση ισορροπίας (energy balance equation)



$$E_2 - E_1 = Q_{in} - W_{out}$$

$$\Delta U_{12} + PE_{12} + KE_{12} = Q_{in} - W_{out}$$

**Εσωτερική ενέργεια** (U) (Internal energy)

Είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας ή/και της πίεσης του σώματος.  $Q = c_p m \Delta T$



## 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 1<sup>st</sup> law of thermodynamics

Διαφορετικές μορφές της εξίσωση ισορροπίας  
(energy balance equation)

Μεταβολή - process:  $\Delta U + \Delta(PE) + \Delta(KE) = Q - W$

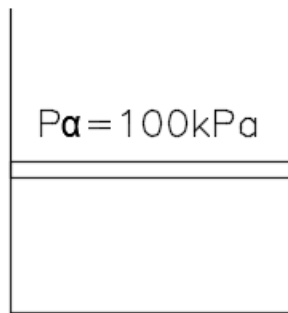
Διαφορικό:  $dU + d(PE) + d(KE) = \delta q - \delta w$

Σε ισχύεις:  $\frac{dU}{dt} + \frac{d(PE)}{dt} + \frac{d(KE)}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$

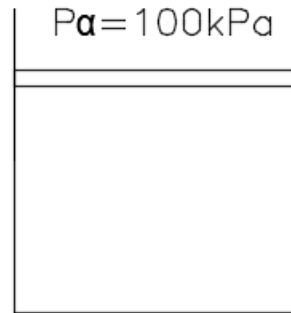
## 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 1<sup>st</sup> law of thermodynamics

### Παράδειγμα

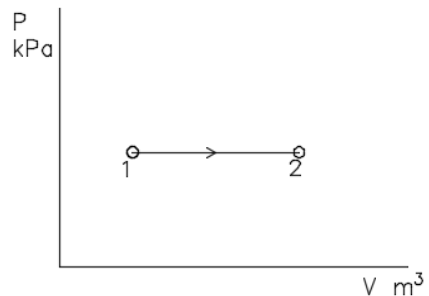
Σε έναν σύστημα «κύλινδρο- πιστόνι», το αέριο υφίσταται ισοβαρή διεργασία με 300 kPa καθώς θερμαίνεται. Η μεταβολή του όγκου του είναι από 0,6 m<sup>3</sup> στον τελικό όγκο των 0,66 m<sup>3</sup>. Η αλλαγή στην εσωτερική ενέργεια του αερίου είναι 63 kJ. Η ατμοσφαιρική πίεση του συστήματος είναι 100 kPa. Να υπολογιστεί το έργο και η μεταφερόμενη θερμότητα στο σύστημα.



Gas  
 $V_1 = 0.6 \text{ m}^3$   
 $P_1 = 300 \text{ kPa}$



Gas  
 $V_2 = 0.66 \text{ m}^3$   
 $P_2 = 300 \text{ kPa}$



$$\Delta U + \cancel{\Delta(PE)} + \cancel{\Delta(KE)} = Q - W$$

$$W = \int_1^2 P dV = P(V_2 - V_1) = 300 \text{ kPa} \cdot (0.66 - 0.6) \text{ m}^3 = 18 \text{ kJ}$$

$$\Delta U = Q - W$$

$$Q - 18 \text{ kJ} = 63 \text{ kJ}$$

$$Q = 81 \text{ kJ}$$

## 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 1<sup>st</sup> law of thermodynamics

### Ενθαλπία (enthalpy )

Από την ανάγκη να έχουμε ένα για ένα θερμοδυναμικό μέγεθος που θα περιγράφει την ενέργεια που περιέχει μία ουσία, **κατασκευάσαμε την ενθαλπία (H kJ)**. Είναι ένα καταστατικό μέγεθος.

Πώς η ενέργεια εγκλωβίζεται σε μια ουσία;

$$H = U + pV$$

Είναι η εσωτερική ενέργεια και η πίεση επί τον όγκο που καταλαμβάνει το ρευστό.

Αυτό που είναι αρκετά βολικό, είναι να διαιρούμε την ενθαλπία, τη εσωτερική ενέργεια, το έργο και την θερμότητα με την μάζα, και έτσι κατασκευάζουμε ένα εντατικό μέγεθος:

Ειδική ενθαλπία **h kJ/kg (specific enthalpy)**

Ειδική θερμότητα **q kJ/kg** και ειδικό έργο **w kJ/kg**. (specific heat, specific work)

## 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 1<sup>st</sup> law of thermodynamics

Ως συνέχεια του 1<sup>ου</sup> παραδείγματος.

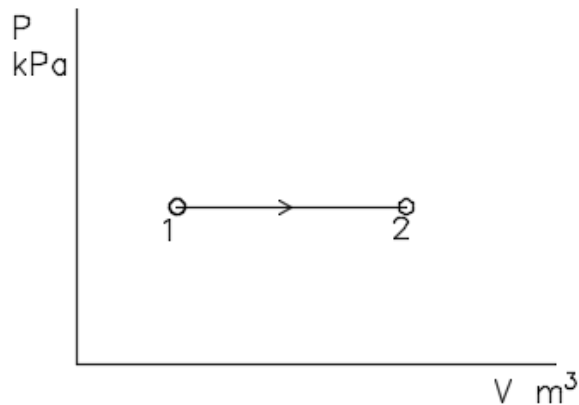
$$\Delta U = Q - W$$

$$\Delta U = Q - p(V_2 - V_1)$$

$$(U_2 + pV_2) - (U_1 + pV_1) = Q$$

$$H_2 - H_1 = Q$$

Συμπέρασμα: όταν μια διεργασία είναι ισοβαρής (σταθερή πίεση), η θερμότητα που απορροφάτε ή αποδίδεται από το σύστημα ισούται με την διαφορά των ενθαλπιών.



# 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 1<sup>st</sup> law of thermodynamics

## Παράδειγμα

Να βρεθούν τα  $T$ ,  $v$  και  $h$  για νερό 0,10 MPa και  $u = 2537,3 \text{ kJ / kg}$ .

-Από τον πίνακα A3  $u_g < u$  (2506,1 kJ/kg),  
 όταν η κατάσταση του υγρού είναι  
 υπέρθερμος ατμός. Έτσι από τον πίνακα  
 A4 έχουμε  $T = 120 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $v = 1,793 \text{ m}^3 / \text{kg}$   
 Και ενθαλπία  $h = 2716,6 \text{ kJ / kg}$ .

Επαλήθευση:  $h=u+pv$

Pressure Conversions:  
 1 bar = 0.1 MPa  
 = 10<sup>2</sup> kPa

**Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor): Pressure Table**

Press. bar	Temp. °C	Specific Volume m <sup>3</sup> /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bar
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor $v_g$	Sat. Liquid $u_f$	Sat. Vapor $u_g$	Sat. Liquid $h_f$	Evap. $h_{fg}$	Sat. Vapor $h_g$	Sat. Liquid $s_f$	Sat. Vapor $s_g$	
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746	0.04
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304	0.06
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287	0.08
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502	0.10
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085	0.20
0.30	69.10	1.0223	5.229	289.20	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686	0.30
0.40	75.87	1.0265	3.993	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700	0.40
0.50	81.33	1.0300	3.240	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939	0.50
0.60	85.94	1.0331	2.732	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320	0.60
0.70	89.95	1.0360	2.365	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797	0.70
0.80	93.50	1.0380	2.087	391.58	2498.8	391.66	2274.1	2665.8	1.2329	7.4346	0.80
0.90	96.71	1.0410	1.869	405.06	2502.6	405.15	2265.7	2670.9	1.2695	7.3949	0.90
1.00	99.63	1.0432	1.694	417.36	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	7.3594	1.00
1.50	111.4	1.0528	1.159	466.94	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	7.2233	1.50
2.00	120.2	1.0605	0.8857	504.49	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	7.1271	2.00

## 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 1<sup>st</sup> law of thermodynamics

Η εσωτερική ενέργεια στα ρευστά μπορεί να εκφραστεί με σταθερή πίεση:

$$c_p = \frac{dh}{dT} \text{ (kJ / kgK) } \text{ Υπό σταθερή πίεση } \mathbf{Q=H}$$

και με σταθερό όγκο

$$c_v = \frac{du}{dT} \text{ (kJ / kgK) } \text{ Υπό σταθερό όγκο } \mathbf{Q=U}$$

Στα στερεά και στα υγρά (ασυμπίεστα) το  $c_p$  και  $c_v$  είναι ίσα.

λόγος ειδικών θερμοτήτων

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} > 1$$

και

$$R = C_p - C_v$$

## 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 2<sup>nd</sup> law of thermodynamics

The **Clausius statement** of the second law asserts that:

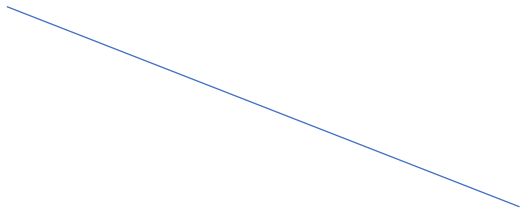
*It is impossible for any system to operate in such a way that the sole result would be an energy transfer by heat from a cooler to a hotter body.*

The **Kelvin–Planck statement** of the second law:

*It is impossible for any system to operate in a thermodynamic cycle and deliver a net amount of energy by work to its surroundings while receiving energy by heat transfer from a single thermal reservoir.*

## 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 2<sup>nd</sup> law of thermodynamics

Η εντροπία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ερμηνεύσει την φυσική ροή της ενέργειας

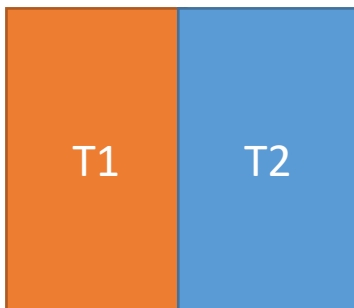


*Η μπάλα θα κατεβεί την ράμπα, δεν μπορεί χωρίς εξωτερική βοήθεια να ανέβει την μπάρα.*

**entropy statement of the second law** states:

*It is impossible for any system to operate in a way that entropy is destroyed.*

$T_1 > T_2$

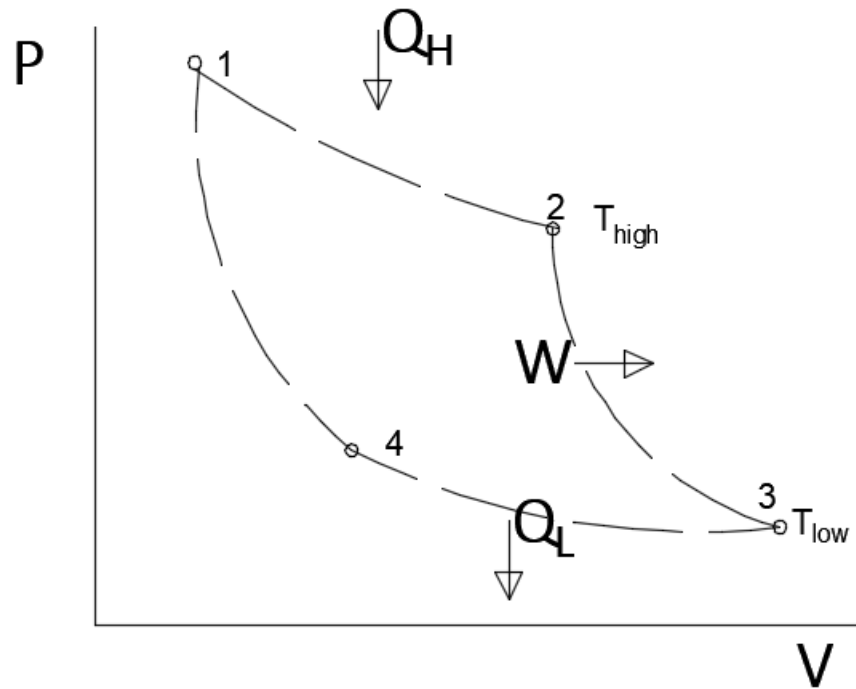


*Η θερμότητα από το σώμα 1 θα μεταφερθεί στο σώμα 2, δεν μπορεί από το σώμα με χαμηλότερη θερμοκρασία να πάει στο σώμα με την υψηλότερη.*



## 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 2<sup>nd</sup> law of thermodynamics

Carnot cycle / Carnot Machine  
Ο κύκλος εργάζεται με ιδανικό αέριο



Όταν μια μηχανή δουλεύει με αντιστρεπτό τρόπο η εντροπία που παράγει είναι 0, όπως ο ιδεατός κύκλος Carnot.

Ο Clausius εμπνεύστηκε την εντροπία για να εξηγήσει φυσικά την μηχανή του Carnot.

## 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 2<sup>nd</sup> law of thermodynamics

Η ανισότητα του Clausius

Για κάθε σύστημα – θερμοδυναμικό κύκλο:

$$\oint \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_b \geq 0$$

ή

$$\oint \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_b \leq \sigma_{cycle}$$

Q = θερμότητα που μεταφέρθηκε

T = απόλυτη θερμοκρασία που έλαβε χώρα η μεταβολή της θερμότητας

$\sigma$  = δημιουργία εντροπίας

**«ΠΟΤΕ δεν μπορεί να είναι αρνητική η δημιουργία εντροπίας ενός συστήματος»**

## 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 2<sup>nd</sup> law of thermodynamics

Για την ανάλυση της θερμικής λειτουργίας ενός συστήματος, η μεταβολή της Εντροπίας ορίζεται ως την μεταβολή της θερμότητας δια την θερμοκρασία όπου διενεργείται η μεταβολή.

Η μονάδες της εντροπίας είναι **kJ/ K** και της ειδικής εντροπίας **kJ/kg K**

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

## 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 2<sup>nd</sup> law of thermodynamics

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Δεν μπορούμε να έχουμε μηχανή με 100 % βαθμό απόδοσης  
[θεωρητικά στο απόλυτο μηδέν θα μπορούσαμε]

Η εντροπία  $S$  του σύμπαντος πάντα αυξάνει ή μένει σταθερή

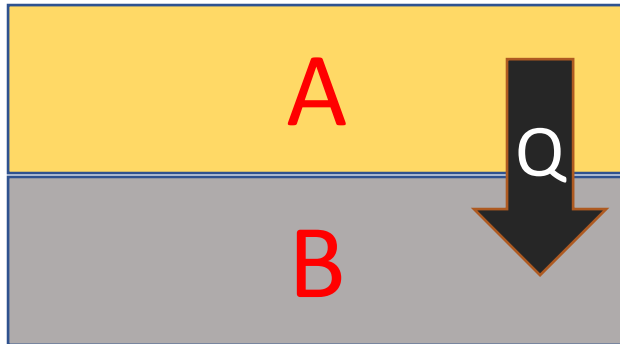
$$\rightarrow \Delta S_{\text{univ}} \geq 0$$

Η εντροπία είναι ένας δείκτης «ποιότητας» της θερμότητας.

Θερμότητα σε συγκεκριμένη θερμοκρασία (kJ / T)

## 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 2<sup>nd</sup> law of thermodynamics

Αν υπάρχουν δυο σώματα, με το σώμα A να έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από το σώμα B, τότε η θερμότητα Q μεταφέρεται από το A στο B.



$$T_A > T_B$$

$$\Delta S_{\text{univ}} = -\frac{Q}{T_A} + \frac{Q}{T_B} = -(\text{lower}) + (\text{higher})$$

**Για τον λόγο αυτό η εντροπία στο σύμπαν πάντα αυξάνει.**

Αντιστρέψιμη μεταβολή  
(reversible process)



Δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας κατά την μεταβολή, αλλά, ούτε και δημιουργία εντροπίας. Το σύστημα μπορεί να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση. Είναι μία ιδεατή-ιδανική κατάσταση.

Μη αντιστρεπτή μεταβολή  
Irreversible process

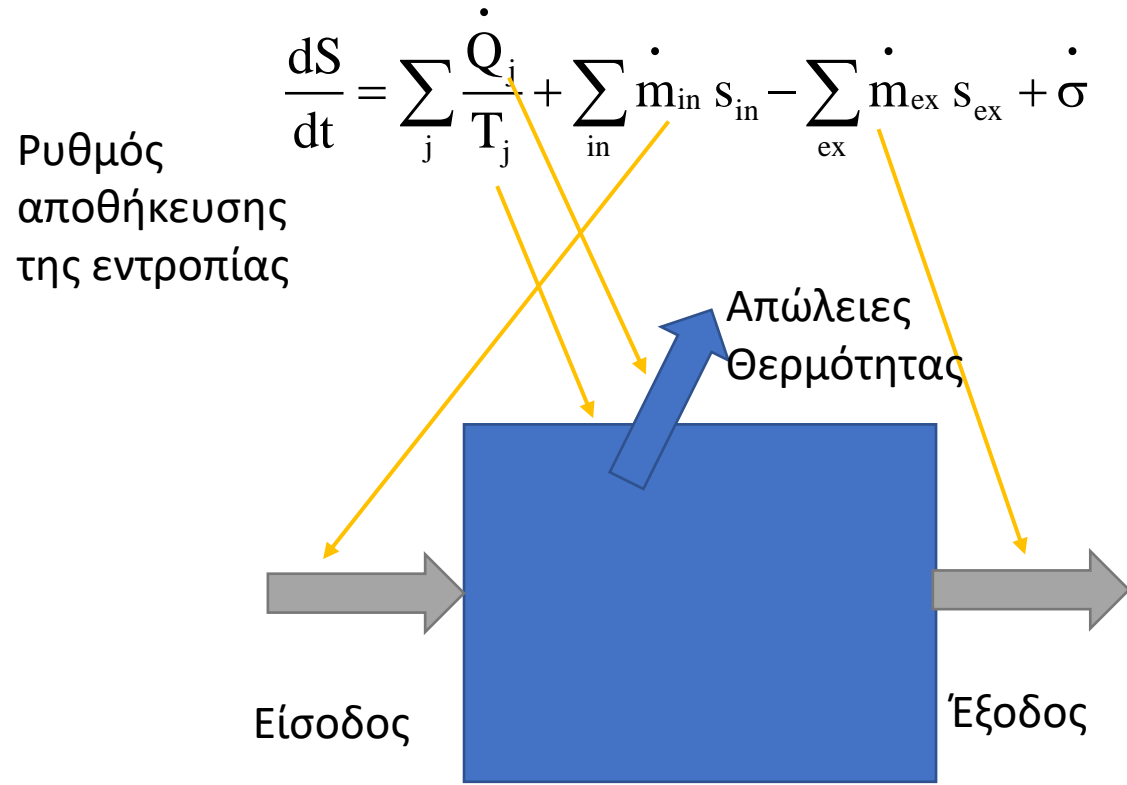


Κατά την μεταβολή, ενεργειακές απώλειες εφαρμόζονται ή/και η εντροπία του συστήματος αυξάνει. Το σύστημα δεν μπορεί να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση χωρίς εξωτερική από αυτό ενέργεια. Είναι ο πραγματικός κόστος που ζούμε

*Τότε γιατί αντιστρεπτές μεταβολές;*

## 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα, 2<sup>nd</sup> law of thermodynamics

Ανάλυση εντροπίας στο σύστημα, 2<sup>nd</sup> Law analysis (χωρίς μηχανικό έργο)



- Ρυθμός δημιουργίας  $\dot{\sigma}$  της εντροπίας

## Καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων Ideal gas equation

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει την μεταβολή ως προς τα μεγέθη ( $p, T, V$ ) του αερίου:

$$pV = n\bar{R}T$$

Καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων  
(ideal gas equation / model)

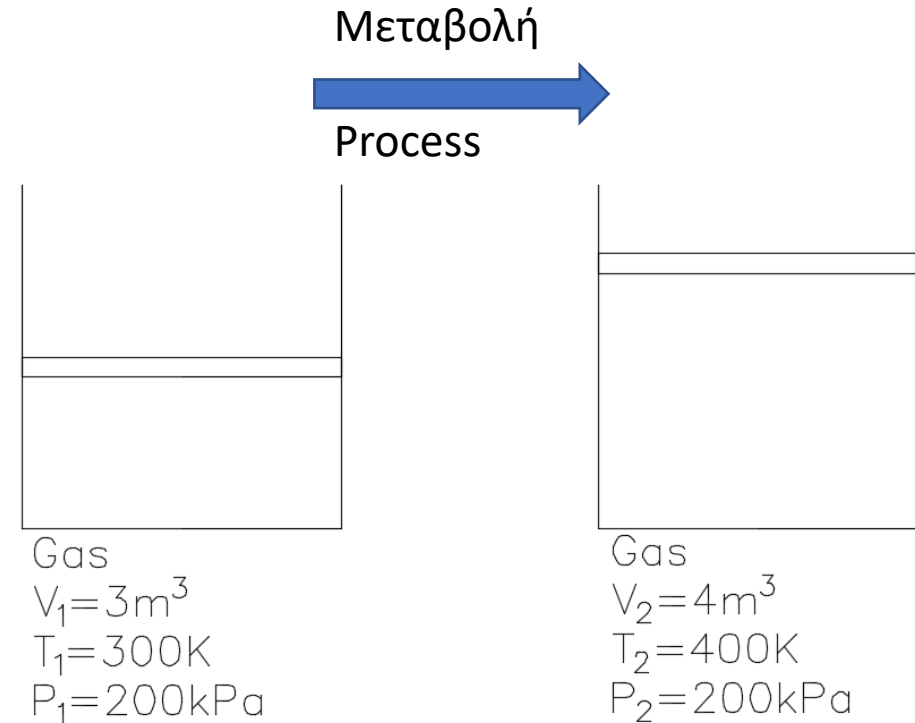
$T$ : θερμοκρασία πάντα σε K

$R$ : παγκόσμια σταθερά των αερίων (8.314 kJ/ kmol K). Universal gas constant

$n$ : αριθμός των kmol

$V$ : όγκος ( $m^3$ )

$p$ : απόλυτη πίεση (kPa)





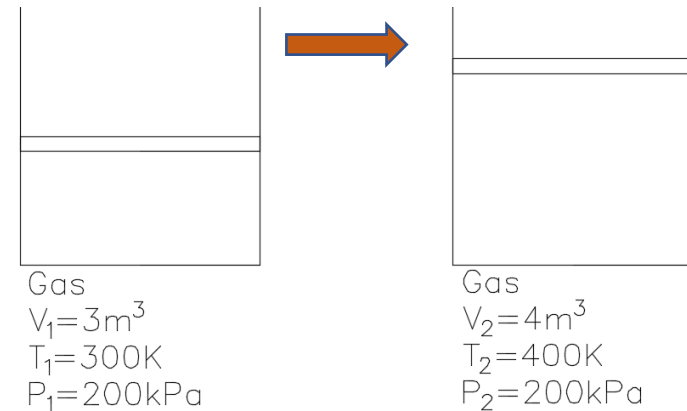
## Καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων Ideal gas equation

- ▶ Από τους νόμους των Gay-Lussac, Boyle-Marriotte

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_1 V_1}{T_1}$$

- ▶ Προκύπτει ότι για τα ιδανικά αέρια:

$$\frac{PV}{T} = \text{σταθερή\_τιμή} = R \cdot n$$



**n:** η μάζα του αερίου σε **kmol**  
**R:** Παγκόσμια σταθερά των αερίων  
(8.314 kJ/kmol K)

## Καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων Ideal gas equation

Εναλλακτικές μορφές της καταστατικής εξίσωσης των ιδανικών αερίων.

$$pV = n\bar{R}T$$

$$pV = Mn \frac{\bar{R}}{M} T = mR_i T$$

$$pv = R_i T$$

$$pV = MR_i T$$

$$p = \rho R_i T$$

T: θερμοκρασία πάντα σε K

R: παγκόσμια σταθερά των αερίων (8.314 kJ/ kmol K)

Universal gas constant

n: αριθμός των kmol

V: όγκος (m<sup>3</sup>)

p: απόλυτη πίεση (kPa)

M: μοριακό βάρος του αερίου (kg /kmol )

R<sub>i</sub> :σταθερά του συγκεκριμένου αερίου (kJ/ kg K)

ρ: πυκνότητα (kg/m<sup>3</sup>)

m= μάζα (kg)

$$m = n \cdot M$$

## Καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων Ideal gas equation

Τιμές του  $R_i$  για επιλεγμένα ρευστά.

Substance	Chemical Formula	$R$ (kJ/kg · K)
Air	—	0.2870
Ammonia	NH <sub>3</sub>	0.4882
Argon	Ar	0.2082
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	0.1889
Carbon monoxide	CO	0.2968
Helium	He	2.0769
Hydrogen	H <sub>2</sub>	4.1240
Methane	CH <sub>4</sub>	0.5183
Nitrogen	N <sub>2</sub>	0.2968
Oxygen	O <sub>2</sub>	0.2598
Water	H <sub>2</sub> O	0.4614

**R**: παγκόσμια σταθερά των αερίων (8.314 kJ/kmol K)

Universal gas constant

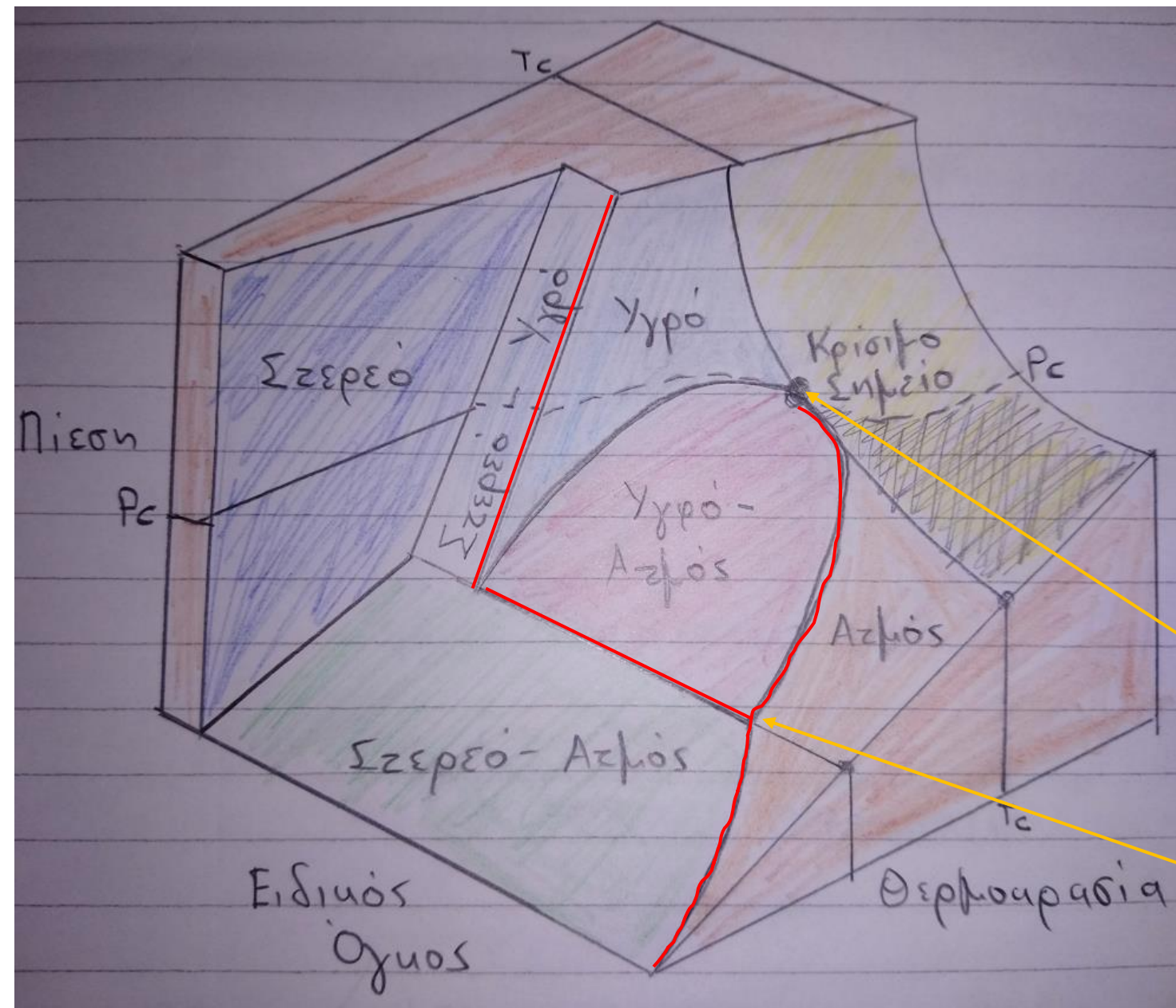
**R<sub>i</sub>**: σταθερά του συγκεκριμένου αερίου (kJ/kg K)

## Πίνακες ιδιοτήτων του νερού, property tables of water

Διάγραμμα φάσεων

Καθαρή ουσία είναι η ύλη όπου:

- Έχει ομογενή σύσταση σε όλη τη μάζα της (πχ. νερό, αέρας! Κτλ.)
- Μια καθαρή ουσία μπορεί να βρεθεί σε μείγμα δυο ή και περισσότερων φάσεων (στέρεο - υγρό) και να συνεχίσει να είναι καθαρή ουσία.



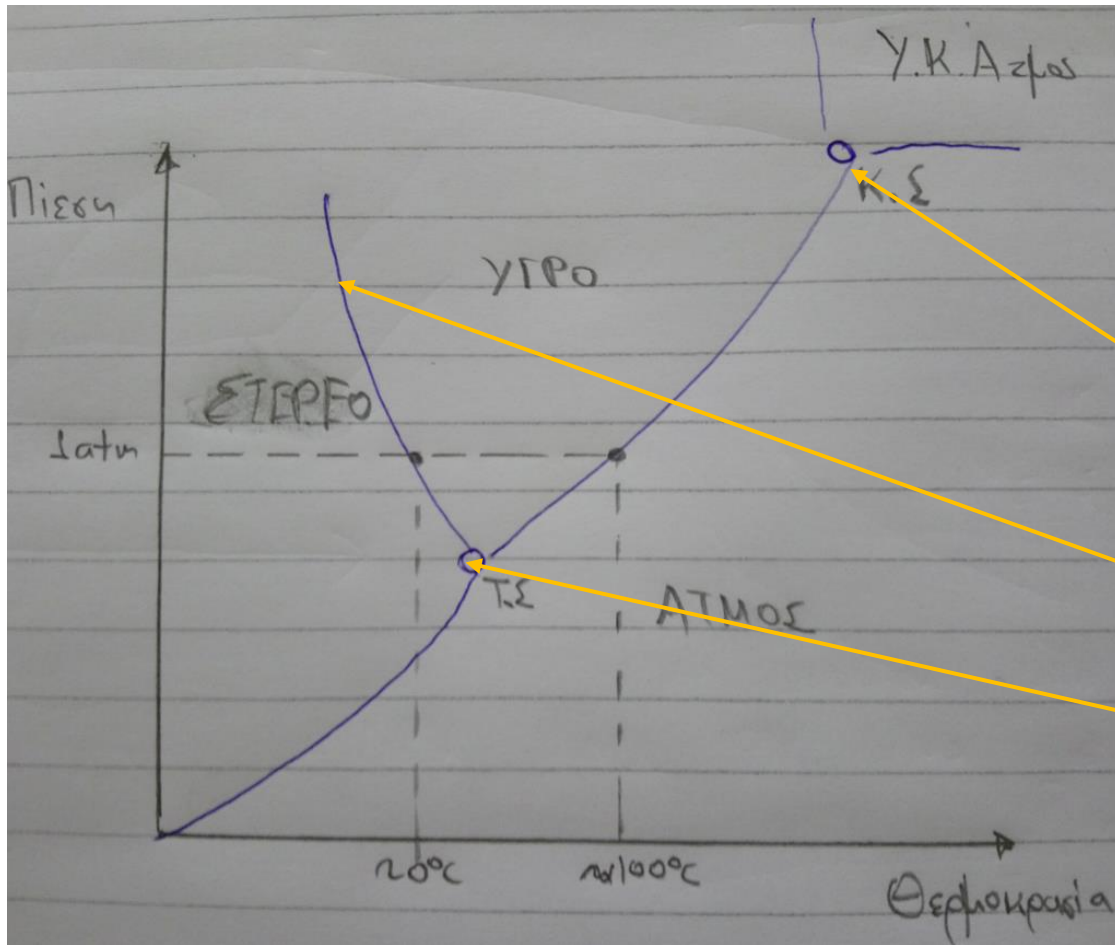
Βάσει των μεταβολών που μπορούν να εκφραστούν μέσω της καταστατικής εξίσωσης των αερίων και πειράματων, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα  $(v,T,p)$ . Το διάγραμμα, μας πληροφορεί σχετικά με την κατάσταση της ύλης (στερεό, υγρό, αέριο, υπερκρίσιμο). Το παρόν διάγραμμα είναι για το νερό  $H_2O$ .

**Κρίσιμο σημείο, πάνω από την  $T_c$  και την  $P_c$  υπάρχει το ρευστό σε υπερκρίσιμη κατάσταση.**

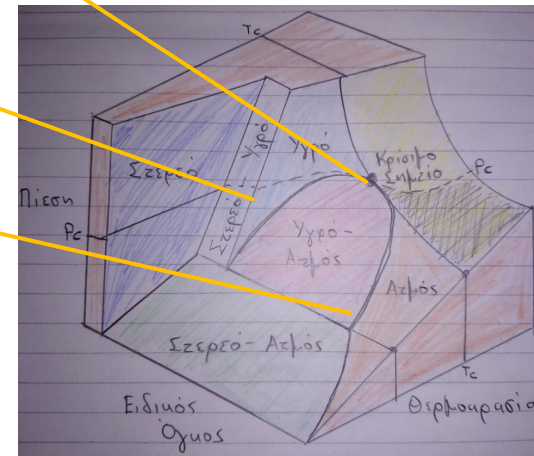
**Τριπλό σημείο και τριπλή γραμμή. Το ρευστό υπάρχει σε όλες τις φάσεις της ύλης εκτός της υπερκρίσιμης.**

# Πίνακες ιδιοτήτων του νερού, property tables of water

## Διάγραμμα φάσεων νερού

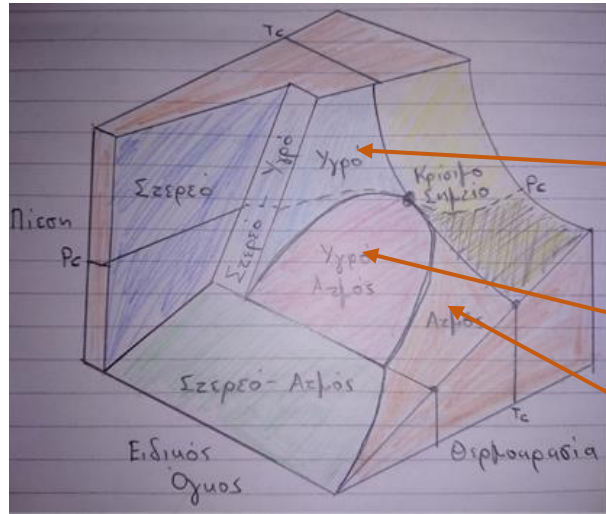


**Το νερό** σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των  $374\text{ }^{\circ}\text{C}$  και πίεση  $220,9\text{ atm}$  εισέρχεται στη κατάσταση του υπερκρίσιμου ρευστού.

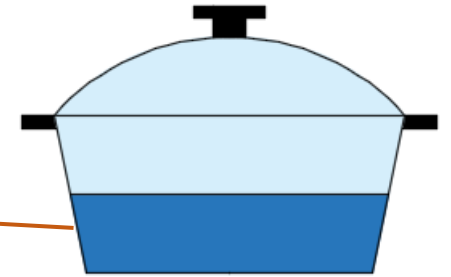


# Πίνακες ιδιοτήτων του νερού, property tables of water

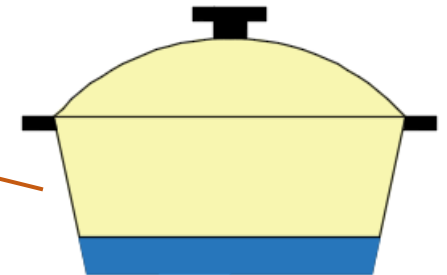
Βαθμός ποιότητας ή βαθμός ξηρότητας (x) (quality)



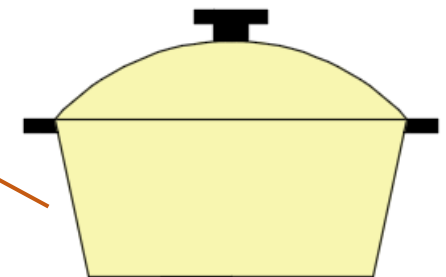
Αρχική κατάσταση  
Υγρό νερό και αέρας



**+ Θερμότητα**  
Νερό σε υγρή και αέρια  
κατάσταση



**++ Θερμότητα**  
Νερό σε αέρια  
κατάσταση (υδρατμοί)



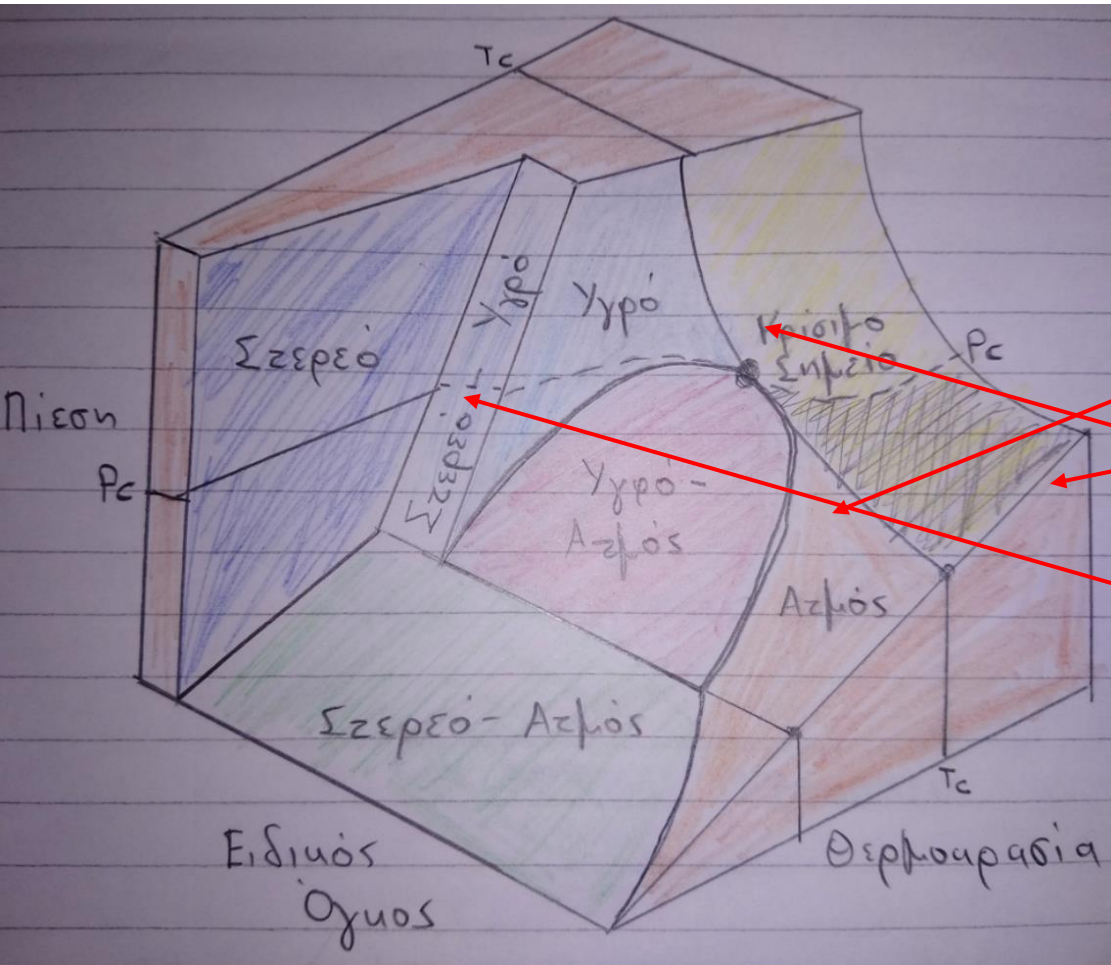
**Βαθμός ποιότητας ή βαθμός ξηρότητας (x)**  
Μας δίνει το ποσοστό του μείγματος που είναι σε αέρια κατάσταση.

$$x = \frac{m_{\text{αέριο}}}{m_{\text{υγρό}} + m_{\text{αέριο}}}$$



# Πίνακες ιδιοτήτων του νερού, property tables of water

Οι ιδιότητες του νερού έχουν αποτυπωθεί σε πίνακες



ΠΙΝΑΚΕΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΤΜΟΥ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΟΡΕΣΜΟΥ A2 (Θερμοκρασίας) & A3 (Πίεσης) \*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΠΕΡΘΕΡΜΟΥ ΑΤΜΟΥ A4\*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΝΕΡΟΥ A5\*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΕΡΕΟΥ ΝΕΡΟΥ A6\*



### Λανθάνουσα θερμότητα

Το ποσό της ενέργειας που απορροφάται ή απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της μετάβασης μιας ουσίας από μια φάση στην άλλη (σε μια δεδομένη θερμοκρασία ή πίεση).

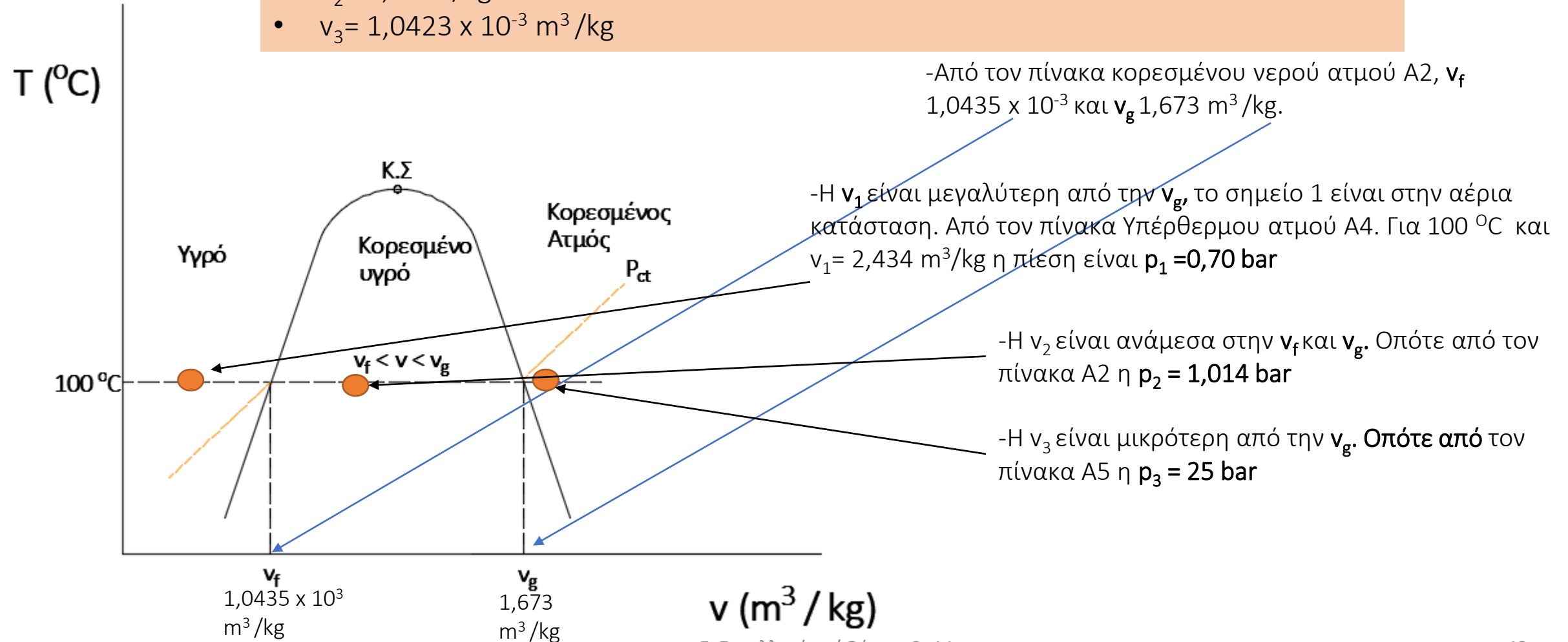
- Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, πχ από υγρό σε αέριο.
- Λανθάνουσα θερμότητα τήξης, πχ από υγρό σε στέρεο.

# Πίνακες ιδιοτήτων του νερού, property tables of water

## Παράδειγμα

Για νερό στους 100 °C να βρεθεί η πίεση για τρεις ειδικούς όγκους:

- $v_1 = 2,434 \text{ m}^3/\text{kg}$
- $v_2 = 1,0 \text{ m}^3/\text{kg}$
- $v_3 = 1,0423 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$

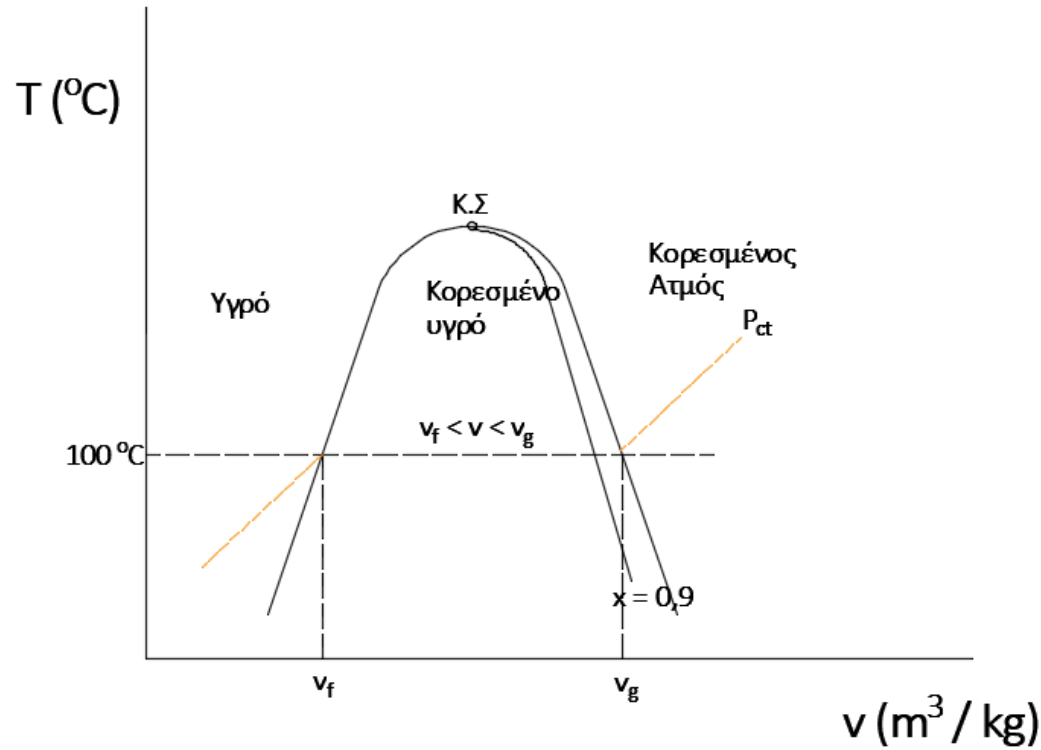


# Πίνακες ιδιοτήτων του νερού, property tables of water

## Παράδειγμα

Σύστημα με νερό δυο φάσεων υγρού – ατμού στους 100 °C και βαθμό ξηρότητας  $x = 0,9$ . Να υπολογιστεί ο ειδικός όγκος του νερού.

-Από τον πίνακα κορεσμένου νερού ατμού A2,  $v_f 1,0435 \times 10^{-3}$  και  $v_g 1,673 \text{ m}^3/\text{kg}$ .  
 $v = v_f + x (v_g - v_f)^* = 1,0435 \times 10^{-3} + 0,9 (1,673 - 1,0435 \times 10^{-3}) = v = 1,506 \text{ m}^3/\text{kg}$



Temp. °C	Press. bar	m <sup>3</sup> /kg		kJ/kg		kJ/kg		kJ/kg · K		Temp. °C	
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor $v_g$	Sat. Liquid $u_f$	Sat. Vapor $u_g$	Sat. Liquid $h_f$	Evap. $h_{fg}$	Sat. Vapor $h_g$	Sat. Liquid $s_f$		Sat. Vapor $s_g$
50	.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	8.0763	50
55	.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.9913	55
60	.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.9096	60
65	.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	7.8310	65
70	.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	7.7553	70
75	.3858	1.0259	4.131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824	75
80	.4739	1.0291	3.407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122	80
85	.5783	1.0325	2.828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445	85
90	.7014	1.0360	2.361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791	90
95	.8455	1.0397	1.982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159	95
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387	110
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296	120

\* Προκύπτει από την ανάλυση:

$$v = \left( \frac{m_{\text{υγρό}}}{m} \right) \cdot v_f + \left( \frac{m_{\text{αέριο}}}{m} \right) \cdot v_g$$

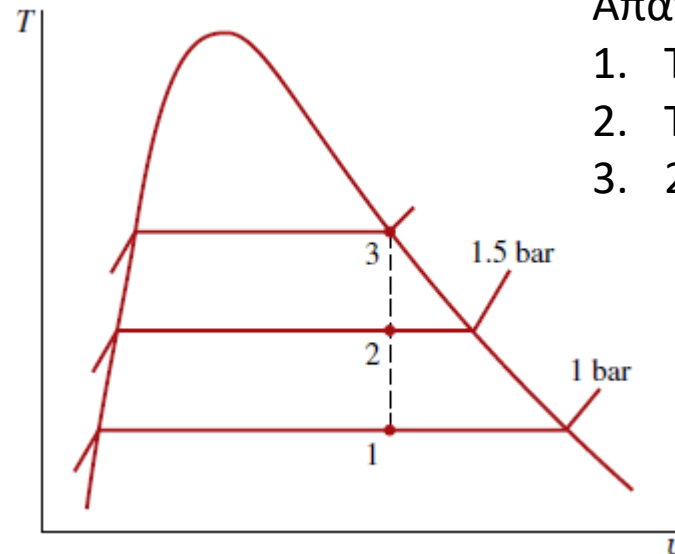
$$v = (1 - x)v_f + xv_g = v_f + x(v_g - v_f)$$

## Πίνακες ιδιοτήτων του νερού, property tables of water

### Παράδειγμα

Κλειστό ατσάλινο δοχείο με όγκο  $0.5 \text{ m}^3$  θερμαίνεται μέσω κεραμικής εστίας. Αρχικά, το δοχείο περιέχει κεκορεσμένο νερό με ξηρότητα  $x=0.5$  και πίεση  $1 \text{ bar}$ . Μέσω της απόδοσης της θερμότητάς από την κεραμική εστία η πίεση στο δοχείο αυξήθηκε στα  $1.5 \text{ bar}$ . Κατασκευάστε διάγραμμα  $T-v$  που δείχνει τις μεταβολές του συστήματος.

1. Να βρεθούν η θερμοκρασία στο σημείο 1 και 2 ( $^{\circ}\text{C}$ )
2. Η μάζα του νερού σε υγρή και αέρια μορφή στο σημείο 1 (kg)
3. Αν η θέρμανση συνεχιστεί, να υπολογιστεί η πίεση (bar) στο δοχείο όταν θα περιέχει μόνο ατμό



Απαντήσεις:

1.  $T_1 = 99.63 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $T_2 = 111.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$
2. Total mass  $0.59 \text{ kg}$  and  $\frac{1}{2}$  at each state (water – vapor )
3.  $2.11 \text{ bar}$

## Καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων

### Ideal gas equation

#### Παράδειγμα

Δυο καλά μονωμένες δεξαμενές συνδέονται μέσω μιας βαλβίδας. Η δεξαμενή **A** έχει όγκο  $1 \text{ m}^3$  και είναι γεμάτη με άζωτο ( $\text{N}_2$ ) στους  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $150 \text{ kPa}$ . Η δεξαμενή **B** περιέχει  $3 \text{ kg}$  οξυγόνο σε θερμοκρασία  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  και πίεση  $300 \text{ kPa}$ . Η βαλβίδα ανοίγει και το δύο αέρια αναμειγνύονται. Το μοριακό βάρος του αζώτου είναι  $28.01 \text{ kg/kmol}$  και του οξυγόνου  $32.00 \text{ kg/kmol}$ .

Να υπολογιστεί:

1. Το ποσοστό των δυο στοιχείων στο μείγμα με βάση τα  $\text{kmol}$ .
2. Η τελική θερμοκρασία του μείγματος ( $^\circ\text{C}$ )
3. Η τελική πίεση του μείγματος ( $\text{kPa}$ )

$\text{O}_2$   $c_p=0.925 \text{ kJ/kg K}$ ,  $c_v=0.664 \text{ kJ/kg K}$

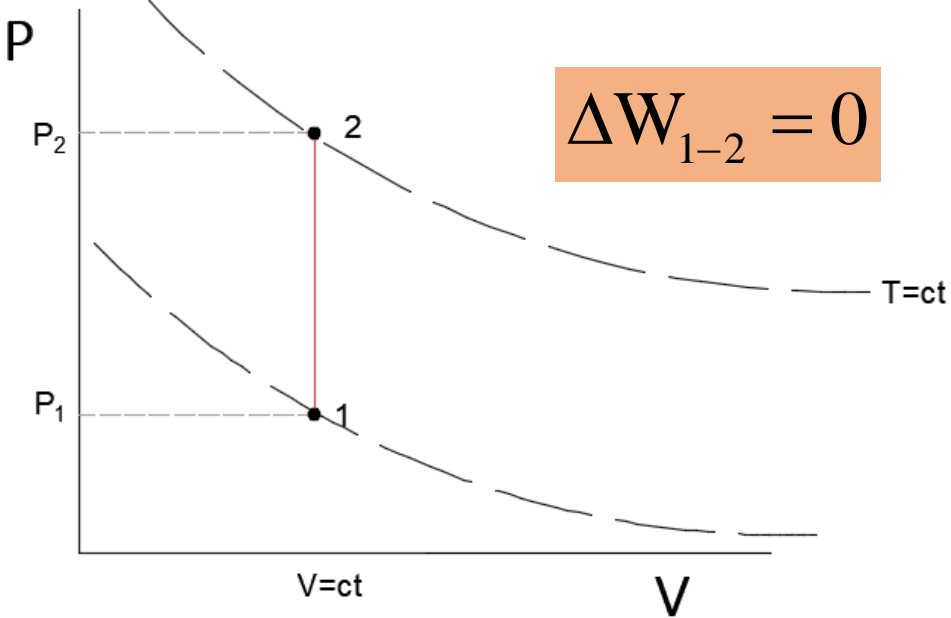
$\text{N}_2$   $c_p=0.925 \text{ kJ/kg K}$ ,  $c_v=0.664 \text{ kJ/kg K}$

Απαντήσεις:

1.  $\text{N}_2=38,1\%$  και  $\text{O}_2=61,9\%$
2.  $T_2=63.9 \text{ }^\circ\text{C}$
3.  $p_2=223 \text{ kPa}$

Είδη θερμοδυναμικών μεταβολών, thermodynamic processes

Ισόχωρη μεταβολή – διεργασία  
Isochoric



Έργο = δύναμη x ταχύτητα  
 $W \text{ (watt)} = F \text{ (N)} \times \text{speed (m/s)}$   
ή  
Σε ένα έμβολο  $\Delta W \text{ (J)} = p \text{ (N/m}^2) * \Delta V \text{ (m}^3\text{/s)}$   
 $[\Delta W \text{ (J)} = p \text{ N/m}^2 \times A \text{ (m}^2) \times \Delta x \text{ (m)/s}]$

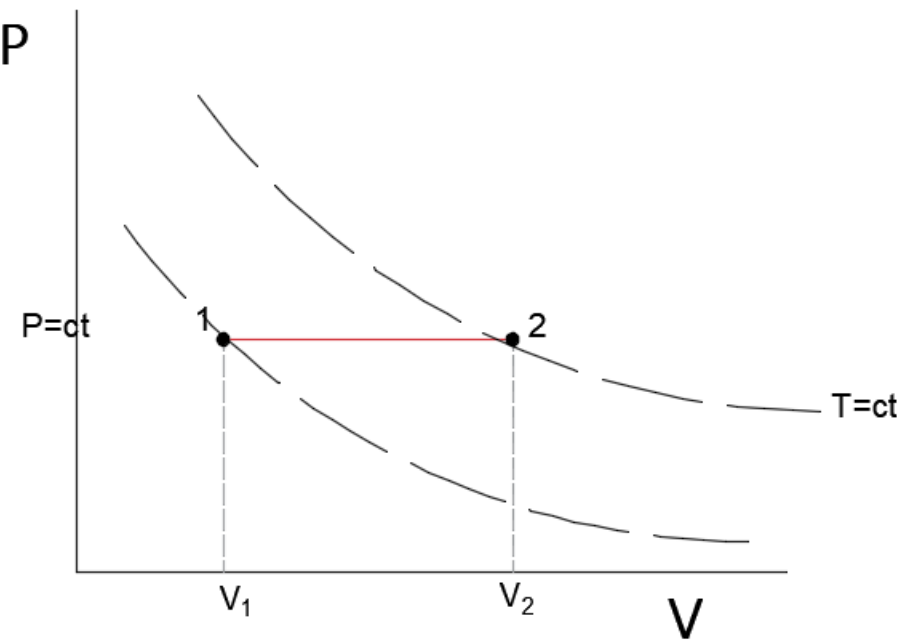
Το σύνολο της ενέργειας αποδίδεται ή προσδίδεται μέσω της θερμοκρασία και την πίεση του αερίου.

Από την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων για  $V_1 = V_2$

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1}$$

Είδη θερμοδυναμικών μεταβολών, thermodynamic processes

Ισοβαρής- ισόθλιπτη μεταβολή – διεργασία  
Isobaric



$$\Delta W_{1-2} = p(V_2 - V_1)$$

ή

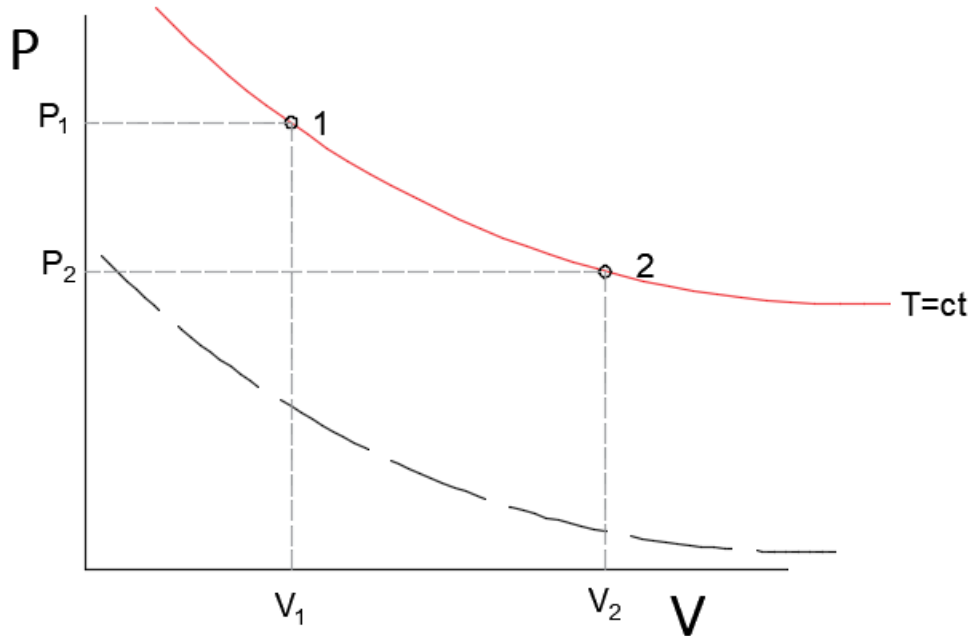
$$\Delta W_{1-2} = nR(T_2 - T_1)$$

$$\Delta Q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + p(V_2 - V_1)$$

ή

$$\Delta Q_{1-2} = \Delta h_{1-2}$$

Ισόθερμη μεταβολή – διεργασία  
Isothermal

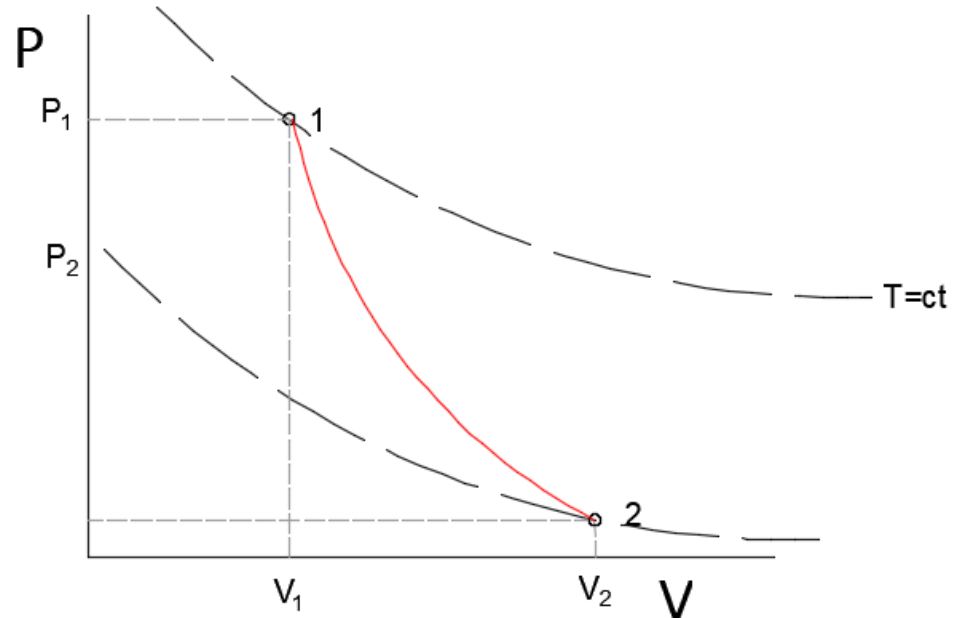


$$\Delta W_{1-2} = \Delta Q_{1-2}$$

Το γινόμενο  $nRT$  είναι σταθερό, οπότε και το γινόμενο  $pV$  είναι σταθερό.



Αδιαβατική μεταβολή – διεργασία  
Adiabatic



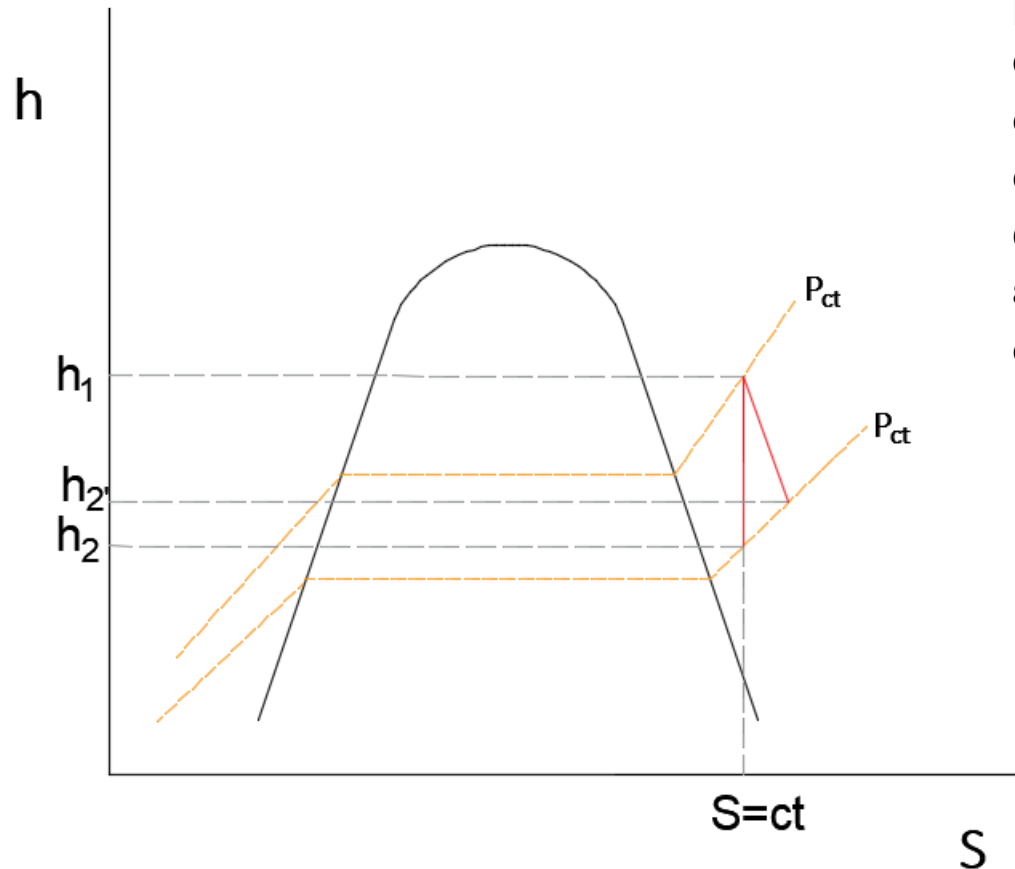
$$\Delta Q_{1-2} = 0$$

και

$$pV^\gamma = \text{σταθερό}$$

Δεν απάγεται ούτε προσάγεται θερμότητα  
από ή στο αέριο.

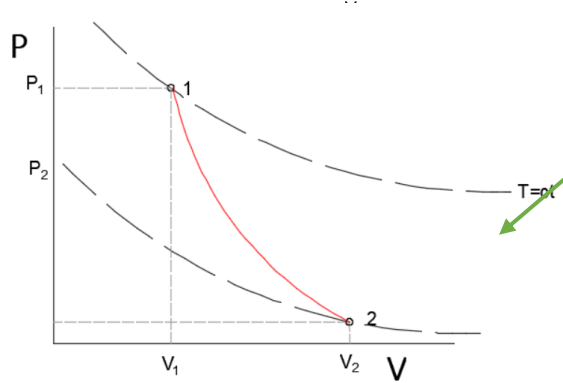
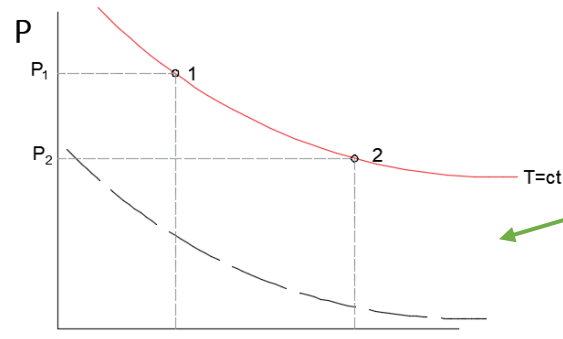
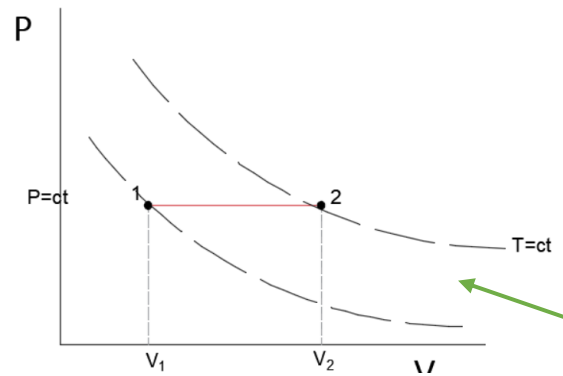
## Ισεντροπική μεταβολή – διεργασία Isentropic



Ισεντροπική μεταβολή είναι μια ιδανική - ιδεατή μεταβολή. Στην πραγματικότητα όλες οι συσκευές όπως είναι οι στρόβιλοι και οι αντλίες δουλεύουν με απώλειες και οι μεταβολές τους δεν είναι αντιστρέψιμες. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ( $\eta$ ) δηλώνει το πόσο η συσκευή που εξετάζουμε πλησιάζει την ιδανική κατάσταση (να δουλεύει ισεντροπικά).

$$\eta = \frac{h_1 - h_{2'}}{h_1 - h_2}$$

# Είδη θερμοδυναμικών μεταβολών, thermodynamic processes



$\rho V^n = \text{σταθερό (ct)}$

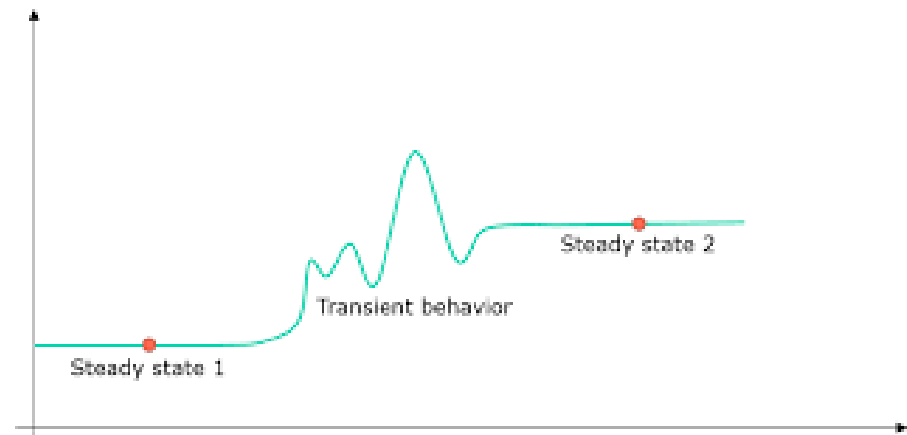
$n = 0$  Ισόθλιπτη

$n = 1$  Ισόθερμη

$n = 1,4$  Αβιαβατική

**Οι θερμοδυναμικοί κύκλοι** αποτελούνται από μια **αλληλουχία** θερμοδυναμικών **μεταβολών** που σχετίζονται με το έργο και την θερμότητα που εναλλάσσει ένα σύστημα με το περιβάλλον (ή και άλλα υποσυστήματα). Στους θερμοδυναμικούς κύκλους μεταβάλλονται η θερμοκρασία, η πίεση και άλλες μεταβλητές του συστήματος. **Σκοπός των μεταβολών** που απαρτίζουν τον κύκλο είναι να επαναφέρουν το ρευστό λειτουργίας στην **αρχική κατάσταση**.

Έχουμε να κάνουμε με συστήματα σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας (steady state) και όχι δυναμικά μεταβαλλόμενα ως προς τον χρόνο (transient state). **Οι μεταβολές από σημείο σε σημείο διενεργούνται ήπια ή σχεδόν ήπια σε κατάσταση ισορροπίας (quasistatic).**



Καλή Αρχή