



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Βασικές αρχές της θερμοδυναμικής (ΜΗΧΟΠ)

Περίληψη τόμου Α' του
Cengel & Boles

Αλέξανδρος Δ. Γκότσης

10 Μαΐου, 2011

Περιεχόμενα

0.1	Ορισμοί	5
0.2	Οι εφαρμογές της θερμοδυναμικής	5
0.3	Περιεχόμενα	5
0.4	Διδακτικό βιβλίο	6
0.5	Άλλη μαθήματος	6
1	Θερμοδυναμική και Ενέργεια	11
1.1	Τι είναι η θερμοδυναμική;	11
1.1.1	Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής	12
1.1.2	Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής	12
1.1.3	Ο τρίτος νόμος της θερμοδυναμικής	12
1.2	Βασικά μεγέθη και μονάδες	12
1.3	Θερμοδυναμικό σύστημα	14
1.3.1	Είδη θερμοδυναμικών συστημάτων	14
1.4	Μορφές ενέργειας	16
1.4.1	Εξωτερική μορφή ενέργειας (μακροσκοπική)	17
1.4.2	Εξωτερική μορφή ενέργειας (μακροσκοπική)	17
1.4.3	Εσωτερική μορφή ενέργειας (μικροσκοπική)	18
1.4.4	Ολική ενέργεια συστήματος	18
1.4.5	Ενέργεια διεργασιών - μεταφερόμενη	19
1.4.6	Ιδιότητες συστήματος	19
1.5	ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	21
1.5.1	Θερμοδυναμική ισορροπία	21
1.5.2	Διεργασίες	22
1.6	Πυκνότητα και εξαρτώμενες ιδιότητες	22
1.6.1	Πυκνότητα	22
1.6.2	Πίεση	23
1.6.3	Θερμοκρασία	25
2	Ογκομετρικές ιδιότητες καθαρών ουσιών	27
2.1	Φάσεις	27
2.1.1	Καταστάσεις της ύλης και αλλαγές φάσης	27
2.1.2	ΚΑΝΟΝΑΣ ΦΑΣΕΩΝ ΤΟΥ GIBBS ΓΙΑ ΜΗ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ	28
2.1.3	Ερωτήσεις	28
2.2	Διαγράμματα ογκομετρικών ιδιοτήτων	29
2.3	Διεργασίες αλλαγής φάσης καθαρών ουσιών	29
2.3.1	Τριπλό σημείο	30
2.3.2	Κρίσιμο σημείο	30

2.3.3	Ρευστά (υγρό, αέριο)	32
2.4	Διαγράμματα ογκομετρικών ιδιοτήτων	33
2.4.1	Διάγραμμα Πίεσης – Ειδικού Όγκου (P, v)	33
2.4.2	Διάγραμμα Θερμοκρασίας – Ειδικού Όγκου (T, v)	34
2.4.3	Διάγραμμα Πίεσης - Ειδικού Όγκου - Θερμοκρασίας	34
2.4.4	Τριπλό σημείο	35
2.5	Πίνακες ιδιοτήτων	36
2.5.1	Κατάσταση κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού	37
2.5.2	Κατάσταση υπέρθερμου ατμού	38
2.5.3	Κατάσταση υπόψυκτου υγρού	38
2.5.4	Μεθοδολογία εύρεσης κατάστασης και ιδιοτήτων	39
2.6	ΠΙΕΣΗ ΑΤΜΩΝ ΚΑΙ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΦΑΣΕΩΝ	42
2.7	Καταστατικές εξισώσεις καθαρών ουσιών	42
2.7.1	Καταστατική εξίσωση ιδανικού αερίου	43
2.7.2	Γενικευμένες Καταστατικές Εξισώσεις	45
2.7.3	Παράγοντας συμπιεστότητας (compressibility factor):	45
2.7.4	Γενικευμένες Καταστατικές Εξισώσεις	46
2.7.5	Δυναμικές ή Ενεργές Καταστατικές Εξισώσεις (Virial EOS)	48
2.7.6	Εξίσωση van der Waals	49
2.7.7	Εξίσωση Redlich-Kwong (RK)	49
2.7.8	Εξίσωση Soave-Redlich-Kwong (SRK)	49
2.7.9	Εξίσωση Peng-Robinson (PR)	50
2.7.10	Μη κυβικές καταστατικές εξισώσεις (non-cubic EOS)	50
2.7.11	Καταστατικές Εξισώσεις για Υγρά	50
3	Πρώτος Νόμος	51
3.1	Μορφές ενέργειας	51
3.2	Θερμότητα, Q	51
3.3	Έργο	52
3.3.1	Έργο μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b	54
3.3.2	Έργο βαρύτητας, W_g	59
3.3.3	Έργο επιτάχυνσης, W_a	60
3.3.4	Έργο επιμήκυνσης ελαστικού ελαστηρίου, W_{spring}	60
3.3.5	Έργο Εφελκυσμού ελαστικής ράβδου, $W_{elastic}$	61
3.3.6	Έργο Αξονικό ή ατράχτου, W_{sh}	62
3.3.7	Ηλεκτρικό έργο, $W_{electric}$	62
3.4	Εξωτερικές μορφές ενέργειας	63
3.5	Εσωτερικές μορφές ενέργειας	63
3.6	Ενθαλπία, H	65
3.7	Ειδικές θερμότητες (θερμοχωρητικότητα), c_v και c_p	66
3.8	Ο πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής	69
3.8.1	Μεταβολή της ενέργειας του συστήματος	70
3.8.2	Ισοζύγιο ενέργειας	70
3.8.3	Διάφορες εκφράσεις του 1ου Θερμοδυναμικού νόμου	71
3.8.4	ΓΕΝΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ του 1ου Θερμοδυναμικού νόμου	72
3.8.5	ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ του 1ου Θερμοδυναμικού νόμου	73

4	Πρώτος νόμος-ανοικτά	75
4.1	Ορισμοί	75
4.1.1	Ανοικτό σύστημα	75
4.1.2	Όγκος ελέγχου	76
4.2	Αρχή διατήρησης της μάζας	76
4.2.1	Παροχή	77
4.2.2	Ροή μάζας	77
4.2.3	Διεργασίες μόνιμης ροής (steady state)	77
4.3	1ος νόμος της Θερμοδυναμικής - Ανοικτά συστήματα	79
4.3.1	Μεταβολή της ενέργειας του συστήματος	80
4.3.2	Διατάξεις ροών/διεργασιών σταθερής κατάστασης	83
5	Ο 2ος θερμοδυναμικός νόμος	91
5.1	Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος	92
5.1.1	Θερμική απόδοση	93
5.2	Αντιστρεπτές και μη-αντιστρεπτές διεργασίες	95
5.2.1	Ο κύκλος Carnot	95
5.2.2	Η θερμική μηχανή του Carnot	97
5.3	Η εντροπία	97
5.3.1	Η αρχή της αύξησης της εντροπίας	99
5.3.2	Εντροπία και ο 2ος νόμος	101
5.3.3	Εντροπία και μεταφορά θερμότητας	102
5.3.4	Ο ΤΡΙΤΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ	103
5.3.5	Η εντροπία ως ιδιότητα	103
5.4	Ανακεφαλαίωση	112
6	Εξέργεια	115
6.1	Ορισμοί	115
6.1.1	Εξέργεια σε μία ανεμογεννήτρια	115
6.2	Αντιστρεπτότητα	116
6.2.1	Ο ρυθμός αναντιστρεπτότητας μιας Θερμικής Μηχανής	116
6.3	Αρχή μείωσης της εξέργειας	117

Εισαγωγή

0.1 Ορισμοί

Η ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΙΝΑΙ Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΕΝΕΡΓΕΙΑ: Η ικανότητα (δυνατότητα) πραγματοποίησης αλλαγών

- Αρχή διατήρησης της ενέργειας:
 - ☐ Πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής
 - ☐ Η ενέργεια είναι θερμοδυναμική ιδιότητα
- Η ενέργεια έχει και ποιότητα:
 - ☐ Δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής
 - ☐ Οι διεργασίες οδηγούν σε ελάττωση της ποιότητας (υποβάθμιση) της ενέργειας

0.2 Οι εφαρμογές της θερμοδυναμικής

- ΠΑΝΤΟΥ
- Σε οποιαδήποτε διεργασία εναλλάσσεται ενέργεια!
- δηλαδή σε όλες τις διεργασίες που ενδιαφέρουν τον μηχανικό

0.3 Περιεχόμενα

- Εισαγωγή
- θερμοδυναμικά μεγέθη
- ανοικτά-κλειστά συστήματα
- ελεύθερη ενέργεια, ενθαλπία, εξ. Maxwell κ.λπ.
- Ιδιότητες καθαρών ουσιών
- PVT (μία φάση), ιδανικά αέρια
- 1ο θερμοδυναμικό αξίωμα
- 2ο θερμοδυναμικό αξίωμα, εντροπία, 3ο θερμο. αξίωμα

- Κύκλοι Carnot, Otto-Diesel, Atkinson, Brayton, Stirling
- Συστήματα 2 φάσεων, νερό - ατμός, διαγράμματα φάσεων
- Μη τέλεια αέρια
- Συντελεστής Joule-Thomson
- Κύκλος Clausius-Rankine
- Διαλύματα
- Στερεά (δεσμοί)
- Ρευστά

0.4 Διδακτικό βιβλίο

Cengel Y.A. & Boles M.A.: Θερμοδυναμική για μηχανικούς (Εκδόσεις Τζιόλα) τόμοι Α και Β

Άλλα διδακτικά βοηθήματα:

- Smith J.M., Van Ness H.C., Abbott M.M.: Εισαγωγή στη Θερμοδυναμική Α + Β τόμοι (Εκδόσεις Τζιόλα)
- eClass (www.eclass.tuc.gr): ασκήσεις, παλιά θέματα, διαφάνειες διαλέξεων, σημειώσεις

0.5 Ύλη μαθήματος

- Θερμοδυναμική και ενέργεια
- βασικά μεγέθη και μονάδες
- Θερμοδυναμικό σύστημα (ορισμός και είδη)
- μορφές ενέργειας
- ιδιότητες συστήματος
- Θερμοδυναμική κατάσταση συστήματος
- θερμοδυναμική ισορροπία
- διεργασίες
- πυκνότητα και εξαρτώμενες ιδιότητες
- πίεση & θερμοκρασία
- ογκομετρικές ιδιότητες καθαρών ουσιών
 - ορισμοί
 - Φάση, κατάσταση ύλης, καθαρή ουσία κανόνας φάσεων
 - Διεργασίες αλλαγής φάση

- ☐ Διαγράμματα ογκομετρικών ιδιοτήτων
PVT, τριπλό και κρίσιμο σημείο
- ☐ Πίνακες ιδιοτήτων
Μεθοδολογία εύρεσης κατάστασης και ιδιοτήτων
- ☐ πίεση ατμών και ισορροπία φάσεων
- Καταστατικές εξισώσεις καθαρών ουσιών
 - ☐ Ορισμός
 - ☐ Ταξινόμηση
 - ☐ Καταστατική εξίσωση ιδανικού αερίου
 - ☐ Γενικευμένες Κ.Σ.
 - ☐ Δυναμικές Κ.Σ.
van der Waals, etc.
 - ☐ Καταστατικές εξισώσεις για υγρά
- Μορφές ενέργειας
 - ☐ θερμότητα
 - ☐ έργο
 - ☐ Εξωτερικές και εσωτερικές μορφές ενέργειας
 - ☐ Ενθαλπία
 - ☐ Ειδικές ...
- Πρώτος νόμος
 - ☐ Γενική διατύπωση
Ισοζύγιο ενέργειας
 - ☐ Για κλειστά συστήματα
 - ☐ Για ανοικτά συστήματα
 - ☐ Όγκος ελέγχου
ισοζύγια μάζας και ενέργειας
 - ☐ Σταθερή και μεταβατική ροή
- Δεύτερος νόμος
 - ☐ Ορισμοί
Θερμοδοχεία, Θερμικές μηχανές, απόδοση, συντελεστές απόδοσης μετατροπής
ενέργειας
 - ☐ Γενική διατύπωση
 - ☐ Αεικίνητες μηχανές - διεργασίες αντιστρεπτές και μη
 - ☐ Κύκλος Carnot
 - ☐ Ψυγεία και αντλίες θερμότητας
 - ☐ θερμοκρασία Kelvin

- Εντροπία
 - ☐ Ανισότητα Clausius
 - ☐ εντροπία καθαρών ουσιών
 - ☐ διαγράμματα εντροπίας, εξισώσεις TdS
 - ☐ ΔS καθαρής ουσίας - ιδανικό αέριο, ασυμπίεστο
 - ☐ Ισοζύγιο εντροπίας
 - ☐ ισεντροπικές διεργασίες
 - ☐ ισεντροπικός βαθμός απόδοσης
- Κύκλοι ισχύος με αέρα
 - ☐ βασικές έννοιες
Ιδανικοί και μη κύκλοι, απόδοση, PV και TS, παλινδρομικές μηχανές
 - ☐ Carnot
 - ☐ Otto, Diesel, Ericson, Stirling
 - ☐ Brayton
με ή χωρίς προθέρμανση, ενδιάμεση ψύξη κ.λπ.
- Κύκλοι ισχύος με ατμό
 - ☐ Carnot
 - ☐ Rankine
με προθέρμανση και αναθέρμανση
 - ☐ συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού
 - ☐ δυαδικός κύκλος
 - ☐ σύνθετος κύκλοι ατμού - αέρα
- ψυκτικοί κύκλοι
- ψυγεία και αντλίες θερμότητας
- αντίστροφος κύκλος Carnot
- κύκλος ψύξης με ατμό
- κύκλος ψύξης με απορρόφηση
- σχέσεις θερμοδυναμικών ιδιοτήτων
 - ☐ Maxwell, Clapeyron, Joule-Thomson
 - ☐ γενικές σχέσεις για du, dh, ds, C_p , C_v
 - ☐ Helmholtz και Gibbs
- Θερμοδυναμική διαλύματων
 - ☐ Χημικό δυναμικό
 - ☐ Ιδανικά μίγματα αερίων
 - ☐ πτητικότητα

- ☐ συσχετίσεις συντελεστών πτητικότητας
- ☐ ιδανικό διάλυμα
- ☐ ιδιότητες υγρών μιγμάτων
- Ισορροπία ατμών-υγρού μιγμάτων
 - ☐ VLE
 - ☐ Σημείο δρόσου
 - ☐ Εκτόνωση
 - ☐ διαλύτης/διαλυμένη ουσία
- Ισορροπία φάσεων
 - ☐ Ισορροπία και σταθερότητα
 - ☐ Υγρό-υγρό
 - ☐ ατμός - υγρό - υγρό
 - ☐ στερεό - υγρό
 - ☐ στερεό - ατμός
 - ☐ στερεό - στερεό

Κεφάλαιο 1

Θερμοδυναμική και Ενέργεια

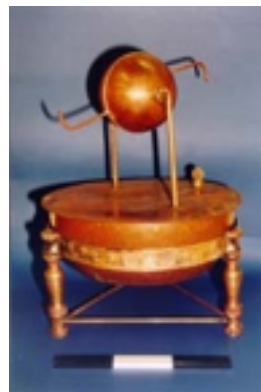
1.1 Τι είναι η θερμοδυναμική;

Η επιστήμη που εξετάζει τη μετατροπή της ενέργειας

ΕΝΕΡΓΕΙΑ = ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΛΛΑΓΩΝ

Η ετυμολογία του όρου ανάγεται στις πρώτες προσπάθειες μετατροπής της θερμότητας σε ισχύ.

Πρώτοι κινητήρες ατμού:
1697 Thomas Savery
1712 Thomas Newcomer



Οι πρωτεργάτες της θερμοδυναμικής: Rankine, Clausius, Kelvin



William Rankine

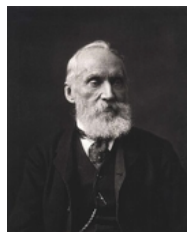
W. Rankine

1820 – 1872
Scottish Physicist
& engineer



R. Clausius

1822 – 1888
German physicist
& mathematician



W. Thomson
(Kelvin)
1824 – 1907
Scottish physicist
& engineer



Κ. Καραθεοδωρή
1873 – 1950
Greek
mathematician

1.1.1 Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής

- **Η αρχή της διατήρησης της ενέργειας**

Η Ενέργεια μπορεί να μεταβάλλεται από τη μια μορφή σε άλλη αλλά το συνολικό ποσό της παραμένει σταθερό

- **Η ενέργεια ΔΕΝ δημιουργείται ΟΥΤΕ καταστρέφεται**

Όταν ένα σύστημα μεταβεί αδιαβατικά από μια κατάσταση 1 σε μια κατάσταση 2 τότε η μόνη ενεργειακή εναλλαγή με το περιβάλλον θα είναι το έργο, το οποίο είναι ανεξάρτητο από τον τρόπο μεταβολής.

- **Η ενέργεια ΕΙΝΑΙ μια θερμοδυναμική ιδιότητα**

1.1.2 Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής

- Καμιά συσκευή δεν μπορεί να λειτουργήσει με τέτοιο τρόπο ώστε το μοναδικό της αποτέλεσμα (σε σύστημα & περιβάλλον) να είναι η πλήρης μετατροπή της θερμότητας που απορροφάται από το σύστημα σε έργο που παράγεται από το σύστημα (Kelvin, Planck)

- Κάθε διεργασία που συνίσταται στη μεταφορά θερμότητας από ένα θερμοκρασιακό επίπεδο σε άλλο υψηλότερο είναι αδύνατη (Clausius)

- Σε κάθε κατάσταση υπάρχουν μερικές απείρως γειτονικές καταστάσεις στις οποίες δεν μπορούμε να φτάσουμε με αδιαβατικές μεταβολές (Καραθεοδωρή)

- Η Ενέργεια εκτός από ΠΟΣΟΤΗΤΑ έχει και ΠΟΙΟΤΗΤΑ

1.1.3 Ο τρίτος νόμος της θερμοδυναμικής

Η απόλυτη εντροπία όλων των τέλειων κρυσταλλικών ουσιών στο απόλυτο μηδέν είναι ίση με το μηδέν (Nernst, Planck)

Αύξηση της εντροπίας → Αύξηση της αταξίας

Κλασσική
Θερμοδυναμική
Μακροσκοπική

Στατιστική
Θερμοδυναμική
Μικροσκοπική

1.2 Βασικά μεγέθη και μονάδες

- Τι σημαίνει «2025,3»;

Τίποτε! Εκτός κι αν έχουμε κάποιο μέγεθος να το συγκρίνουμε, π.χ. μονάδες cm, g, mol, K κ.λπ.)

- Ποια είναι τα θεμελιώδη μεγέθη;

Μήκος (με μονάδες m, in, ft ...)

Χρόνος (με μονάδες s, min, h, day ...)

Μάζα (με μονάδες kg, lbm, mol, ...)

Θερμοκρασία (με μονάδες °C, °F ...)

Ένταση ρεύματος (με μονάδες A)

- Ποιες είναι οι θεμελιώδεις μονάδες στο SI; m, s, kg, A (Ampere), K (Kelvin), mol
- Τι εννοούμε με την τάξη μεγέθους;

Πολλαπλάσια				Υποπολλαπλάσια		
Πρόθεμα	Σύμβολο	Συντελεστής	.	Πρόθεμα	Σύμβολο	Συντελεστής
deca	da	10^1		deci	d	10^{-1}
hecto	h	10^2		cent	c	10^{-2}
kilo	k	10^3		milli	m	10^{-3}
mega	M	10^6		micro	μ	10^{-6}
giga	G	10^9		nano	n	10^{-9}
tera	T	10^{12}		pico	p	10^{-12}
				femto	f	10^{-15}
				atto	a	10^{-18}

- Παραδείγματα τάξης μεγέθους

Η απόσταση της γης από τον ήλιο	149.597.890 km
Η απόσταση της γης από τη σελήνη	384.400 km
Η περίμετρος της γης στον Ισημερινό	40.066 km
Η απόσταση Αθήνας - Νέας Υόρκης	7.941 km
Η απόσταση Θεσσαλονίκης- Αθήνας	550 km
Το μήκος ενός γηπέδου ποδοσφαίρου	110 m
Το μέσο μήκος ενός αυτοκινήτου	4,5 m
Η μεγάλη διάσταση μιας σελίδας A4	29 cm
Το πάχος μιας μύτης (μηχ.) μολυβιού	5 mm
Το μέγεθος ενός ανθρώπινου κυττάρου	1-10 μm
Το μέγεθος ενός ιού (όχι στα PC!)	10-50 nm

- Ομοιογένεια διαστάσεων

- ☐ Οι εξισώσεις πρέπει να είναι διαστατικά ομοιογενείς
- ☐ Μια σχέση διαστατικά ανομοιογενής είναι εξ ορισμού λανθασμένη
- ☐ Μια σχέση διαστατικά ομοιογενής δεν είναι απαραίτητα σωστή!

- Παραδείγματα

- ☐ Ποιο είναι το σύνθηρες εμβαδόν διατομής ενός νεροπότηρου ($d=60\text{mm}$);
☐ 28 cm^3 ☐ 28 cm^2 ☐ $0,28\text{ m}$ ☐ 280 m^2 .
- ☐ Ποια είναι η πυκνότητα του νερού στους 4°C ;
☐ 1000 kg/m^3 ☐ 1 g/cm^3 ☐ 100 g/ml ☐ 1 kg/l .
- ☐ Μια μηχανή ισχύος 100 kW πόση ενέργεια παράγει σε 1 λεπτό ;
☐ 1.67 kWh ☐ 60 kJ ☐ 6000 kJ/s ☐ 6000 kJ .
- ☐ Δίνεται ένας συντελεστής $k = 2\text{ day}^{-1}$. Ποια είναι η τιμή του σε s^{-1} ;

- Η μέση θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα της γης, T_{atm} (σε K), σχετίζεται με το υψόμετρο, z (σε km) από την επιφάνεια της θάλασσας με τη βοήθεια της σχέσης:

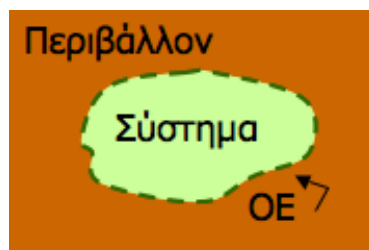
$$T_{atm} = \alpha - \beta z$$

Τι μονάδες έχουν οι συντελεστές α και β ; Αν οι τιμές των α και β είναι 288,15 και 6,5, αντίστοιχα, να υπολογιστεί η μέση θερμοκρασία της ατμόσφαιρας στο εξωτερικό αεροπλάνου που πετά σε ύψος 12000 m.

1.3 Θερμοδυναμικό σύστημα

Σύστημα: Μια ποσότητα ύλης ή μια περιοχή στο χώρο η οποία έχει επιλεγεί για μελέτη

Περιβάλλον: Ό,τι είναι έξω από το σύστημα



Οριακή επιφάνεια (ΟΕ) = Η επιφάνεια που διαχωρίζει το σύστημα από το περιβάλλον του. Μπορεί να είναι:

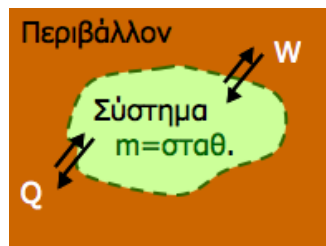
- πραγματική ή υποθετική
- σταθερή ή κινητή

Αλλά έχει μηδενικό πάχος!

1.3.1 Είδη θερμοδυναμικών συστημάτων

ΚΛΕΙΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

- Η ΟΕ είναι αδιαπέραστη από μάζα, $\Rightarrow$ η μάζα του συστήματος είναι σταθερή
- Η ΟΕ είναι περατή από ενέργεια, $\Rightarrow$ το σύστημα μπορεί να εναλλάσσει θερμότητα και έργο με το περιβάλλον.

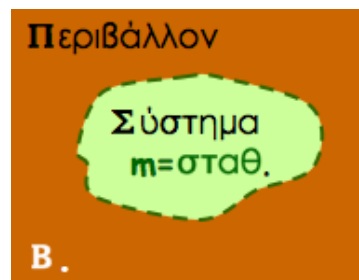
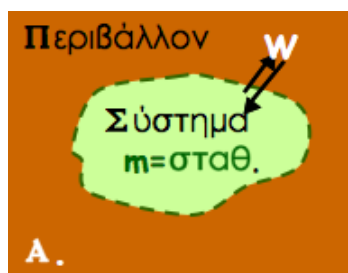


- Το σύστημα μπορεί να είναι :
 - ομογενές
 - ετερογενές

- Η σύσταση της ύλης του συστήματος μπορεί να :
 - παραμένει σταθερή
 - μεταβάλλεται με το χρόνο

Ειδικές περιπτώσεις:

- A. Αδιαβατική ΟΕ
Το σύστημα μπορεί να ανταλλάσσει μόνο έργο με το περιβάλλον
- B. Απομονωμένο σύστημα
Το σύστημα δεν μπορεί να ανταλλάσσει ούτε ενέργεια με το περιβάλλον

**ΑΝΟΙΚΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ**

Η ΟΕ διαπερνάται από μάζα σε ένα ή περισσότερα τμήματά της

- Η μάζα του συστήματος δεν είναι σταθερή
- Το σύστημα μπορεί να ανταλλάσσει θερμότητα & έργο με το περιβάλλον



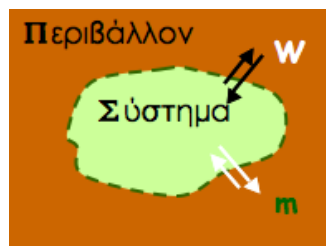
Η ποσότητα ύλης του συστήματος μπορεί να :

- παραμένει σταθερή
- αυξάνεται με τον χρόνο
- μειώνεται με τον χρόνο

αλλά σε κάθε χρονική στιγμή θα είναι διαφορετική μάζα.

Ειδικές περιπτώσεις

- A. Αδιαβατική ΟΕ



Το σύστημα μπορεί να ανταλλάσσει μόνο μάζα & έργο με το περιβάλλον. Θερμότητα μπορεί να μεταφέρεται από ή προς το σύστημα μόνο ως θερμικό περιεχόμενο της μάζας που εισρέει στο σύστημα ή εκρέει από το σύστημα.

Κλειστά και ανοικτά συστήματα: Σύγκριση

Για το ΚΛΕΙΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ χρησιμοποιείται και ο όρος ΜΑΖΑ ΕΛΕΓΧΟΥ.

Για το ΑΝΟΙΚΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ χρησιμοποιείται και ο όρος ΟΓΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ.

Ανάλογα με το είδος του συστήματος χρησιμοποιούμε διαφορετικές θερμοδυναμικές σχέσεις.

Παράδειγμα Κατατάξτε τα ακόλουθα συστήματα (το σύστημα είναι υπογραμμισμένο) σε Κλειστά (ΚΣ) και Ανοικτά (ΑΣ):

- (α) Μια σταγόνα υδροργύρου πάνω σε μια γυάλινη επιφάνεια
- (β) Ένα αναβράζον δισκίο Deppon σε ένα ποτήρι καθαρό νερό
- (γ) το ψυγείο ενός κινούμενου αυτοκινήτου
- (δ) ένα ψυγείο οικιακής χρήσης σε λειτουργία
- (ε) μια χύτρα ταχύτητας που περιέχει κρέας κοκκινιστό σε 85 °C
- (στ) ένας άνθρωπος που κοιμάται
- (ζ) ένα ποτήρι που περιέχει ασετόν
- (η) μια φιάλη οξυγόνου ενός δύτε σε βάθος 50 m
- (θ) ένα μπαλόνι με ήλιο που ξέφυγε από το χέρι του παιδιού κι ανεβαίνει στον ουρανό.

Παράδειγμα Όταν η ποσότητα ύλης ενός συστήματος δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο τότε μιλάμε για κλειστό σύστημα. Σωστό ή Λάθος;

Παγωμένο νερό σε κλειστό δοχείο Dewar μπορεί να θεωρηθεί απομονωμένο σύστημα. Σωστό ή Λάθος;

Το ενεργειακό περιεχόμενο ενός αδιαβατικού κλειστού συστήματος δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο. Σωστό ή Λάθος;

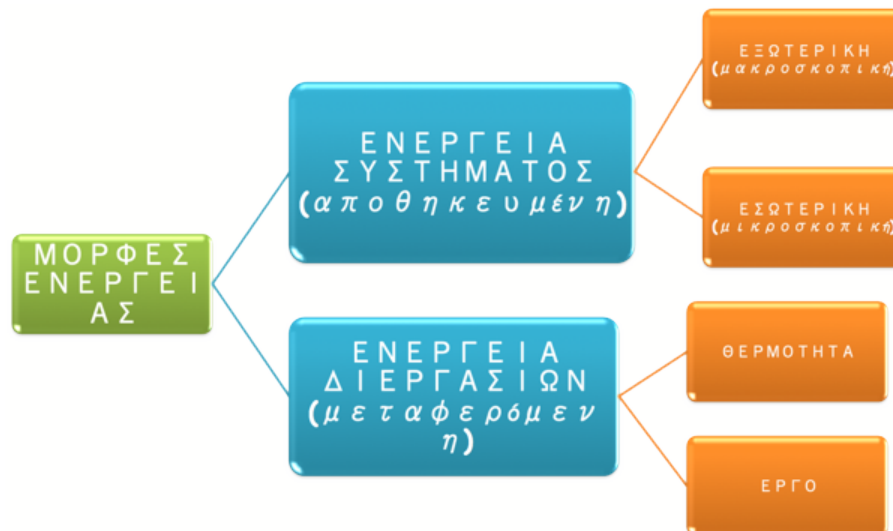
1.4 Μορφές ενέργειας

Θερμική	Ηλεκτρική
Μηχανική	Μαγνητική
Κινητική	Χημική
Δυναμική	Πυρηνική

Ολική Ενέργεια Συστήματος: E (J)

Ολική Ενέργεια ανά μονάδα μάζας : $e=E/m$ (J/kg)

Στη θερμοδυναμική ενδιαφερόμαστε για τις **ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ** της Ενέργειας του Συστήματος



1.4.1 Εξωτερική μορφή ενέργειας (μακροσκοπική)

Την κατέχει το σύστημα στο σύνολό του και σχετίζεται με ένα εξωτερικό σύστημα αναφοράς. Συνδέεται με την κίνηση και την επίδραση εξωτερικών πεδίων, όπως βαρυτικό, μαγνητικό, ηλεκτρικό και την επιφανειακή τάση.

Εδώ θα ασχοληθούμε κύρια με την κινητική ενέργεια (επίδραση κίνησης) και τη δυναμική ενέργεια (επίδραση ύψους του κέντρου βάρους του συστήματος)

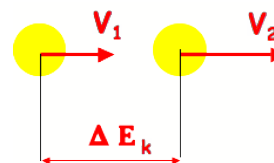
1.4.2 Εξωτερική μορφή ενέργειας (μακροσκοπική)

Κινητική ενέργεια

$$E_k = \frac{mV^2}{2} \quad \text{J} = \text{N m} = \text{kg m}^2 / \text{s}^2$$

$$e_k = \frac{V^2}{2} \quad \text{J / kg}$$

$$\Delta E_k = \Delta \left(\frac{mV^2}{2} \right)$$



Περιστρεφόμενο σώμα:

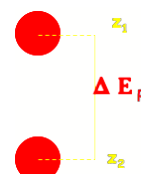
$E_k = I\omega^2/2$, όπου I ροπή αδράνειας (kg m^2) και ω γωνιακή ταχύτητα (rad/s)

Δυναμική ενέργεια

$$E_p = mgz \quad \text{J} = \text{N m} = \text{kg m}^2 / \text{s}^2$$

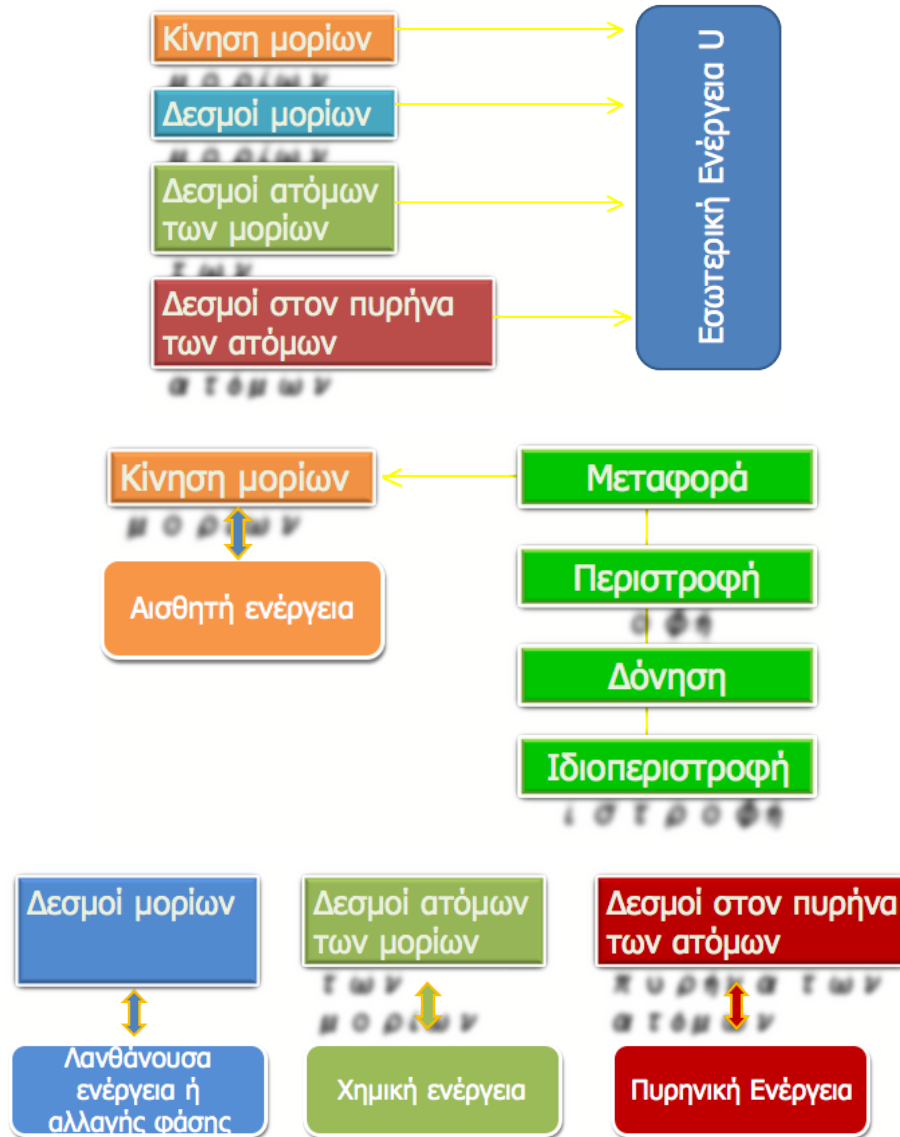
$$e_p = gz \quad \text{J / kg}$$

$$\Delta E_p = \Delta (mgz)$$



1.4.3 Εσωτερική μορφή ενέργειας (μικροσκοπική)

Άθροισμα των μικροσκοπικών μορφών ενέργειας του συστήματος: Συνδέεται με τη **μοριακή δομή** και την **κινητικότητα των μορίων**.



1.4.4 Ολική ενέργεια συστήματος

$$E = U + E_k + E_p = U + \frac{mV^2}{2} + mgz$$

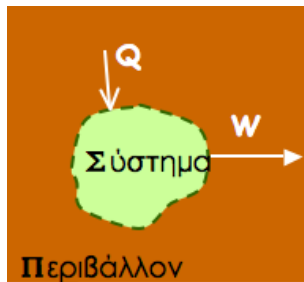
$$e = u + e_k + e_p = u + \frac{V^2}{2} + gz$$

$$\Delta = U + \Delta E_k + \Delta E_p = U + \Delta \left(\frac{mV^2}{2} \right) + \Delta(mgz)$$

1.4.5 Ενέργεια διεργασιών - μεταφερόμενη

Θερμότητα	Q	$J = N \cdot m = kg \cdot m^2 / s^2$
Έργο	W	$J = N \cdot m = kg \cdot m^2 / s^2$

Σύμβαση προσήμου : Θετική είναι η θερμότητα που προσδίδεται στο σύστημα ενώ θετικό είναι το έργο που παράγει το σύστημα!



Έτσι καταλήγουμε στην Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας, τον 1ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΝΟΜΟ :

Η μεταβολή της ενέργειας E του συστήματος ισούται με το ποσό θερμότητας που απορροφά το σύστημα μείον το έργο που παράγει το σύστημα

$$\Delta E = Q - W$$

$$\Delta U + \Delta \left(\frac{mV^2}{2} \right) + \Delta(mgz) = Q - W$$

- 1.10 Οι ετήσιες ανάγκες ενός σπιτιού σε ηλεκτρισμό είναι 8000 kWh, ενώ χρειάζονται 5 m³ πετρελαίου για τη θέρμανση κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Η μέση ποσότητα CO₂ που παράγεται είναι 3170 kg/m³ πετρελαίου και 0,7 kg/kWh ηλεκτρισμού. Αν μειωθεί η οικιακή κατανάλωση κατά 20% να υπολογιστεί η μείωση των εκπομπών CO₂.

1.4.6 Ιδιότητες συστήματος

Για κάθε μακροσκοπικό χαρακτηριστικό του συστήματος:
η τιμή μιας ιδιότητας μπορεί να είναι:

- Άμεσα μετρήσιμη (π.χ. T)
- Μαθηματικός συνδυασμός άλλων ιδιοτήτων (π.χ. $\rho = m/V$)
- Ορισμένη από τους νόμους της Θερμοδυναμικής (π.χ. $H = U + PV$)

Η τιμή κάθε ιδιότητας :

- Είναι Μοναδική
- Καθορίζεται από την κατάσταση του συστήματος τη δεδομένη χρονική στιγμή

Θερμοδυναμικές ιδιότητες: Εγγενείς ιδιότητες του συστήματος που εξαρτώνται από τη φυσική κατάσταση και χημική δομή της ύλης του.

Οι τιμές τους υπολογίζονται ανεξάρτητα από το περιβάλλον του συστήματος.

- **Μηχανικές ιδιότητες:** Ιδιότητες του συστήματος που εξαρτώνται από κάποιο εξωτερικό σύστημα αναφοράς (π.χ. ταχύτητα)

Οι τιμές τους υπολογίζονται με βάση κάποιο εξωτερικό σύστημα αναφοράς. Ως τέτοιες μπορούν θεωρηθούν η θέση του συστήματος στο χώρο (συντεταγμένες x, y, z) ο χρόνος (t) και κάθε συνδυασμός τους.

- **Εκτατικές ιδιότητες:** Θερμοδυναμικές ιδιότητες του συστήματος που είναι ανεξάρτητες από την έκταση ή τη μάζα του συστήματος.

Οι τιμές τους μπορεί να μεταβάλλονται όχι μόνο με τον χρόνο αλλά και με τη θέση εντός του συστήματος την ίδια χρονική στιγμή.

Δεν είναι αθροιστικές ιδιότητες. Αναφερόμενοι σε αυτές μιλάμε για «μέσες τιμές».

Όταν το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία και είναι ομοιογενές, οι τιμές των εντατικών ιδιοτήτων του είναι παντού οι ίδιες.

Παραδείγματα: Θερμοκρασία, T , Πίεση, P , Πυκνότητα, ρ .

- **Ειδικές ιδιότητες:** Ως ειδική ιδιότητα y ορίζεται ο λόγος

$$y = \frac{Y}{m}$$

όπου Y μια εκτατική ιδιότητα του συστήματος

Όταν το σύστημα είναι ομοιογενές, οι τιμές των ειδικών ιδιοτήτων για κάθε τμήμα του συστήματος αλλά και για το σύστημα ως σύνολο είναι παντού οι ίδιες. Δηλ. οι ειδικές ιδιότητες ανήκουν στην κατηγορία των εντατικών.

Παράδειγμα: Ειδικός όγκος: $v = \frac{V}{m}$

Γραμμομοριακές ιδιότητες: Ως γραμμομοριακή ιδιότητα ορίζεται ο λόγος

$$\bar{y} = \frac{Y}{n}$$

όπου Y μια εκτατική ιδιότητα του συστήματος και n ο αριθμός των mol στο σύστημα

Όταν το σύστημα είναι ομοιογενές, οι τιμές των γραμμομοριακών ιδιοτήτων για κάθε τμήμα του συστήματος αλλά και για το σύστημα ως σύνολο είναι παντού οι ίδιες. Δηλ. οι γραμμομοριακές ιδιότητες ανήκουν στην κατηγορία των εντατικών.

Παράδειγμα: Γραμμομοριακός όγκος: $\bar{v} = \frac{V}{n} = M_r y$

- 1.11. Να εντάξετε τις παρακάτω ιδιότητες στις τρεις κατηγορίες (i) εντατικές, (ii) εκτατικές και (iii) μηχανικές:
 - (a) ειδική θερμότητα, (b) ροπή αδράνειας, (c) ηλεκτρικό φορτίο, (d) στροφορμή, (e) κινηματικό ιξώδες, (f) δυναμική ενέργεια, (g) δείκτης διάθλασης, (h) γωνιακή επιτάχυνση.
- 1.12. Σε ένα δοχείο περιέχονται 1,5 kg O_2 ειδικού βάρους $\gamma=14 \text{ N/m}^3$ όπου $g=9,8 \text{ m/s}^2$. Να υπολογιστούν οι τιμές μιας εκτατικής, μιας εντατικής, μιας ειδικής και μιας γραμμομοριακής ιδιότητας του συστήματος

1.5 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Κατάσταση συστήματος Οι συνθήκες ύπαρξης του συστήματος μια δεδομένη χρονική στιγμή (π.χ. θέση, ενεργειακό περιεχόμενο, κλπ.)

Κατάσταση συστήματος σε ισορροπία: Η θερμοδυναμική κατάσταση του συστήματος που βρίσκεται σε ισορροπία και καθορίζεται από τις τιμές των ιδιοτήτων του.

Αρχή (ή Αξίωμα) των καταστάσεων: Κανόνας που προσδιορίζει τον ελάχιστο αριθμό και είδος των ιδιοτήτων του συστήματος που απαιτούνται για τον πλήρη προσδιορισμό όλων των ιδιοτήτων του συστήματος.

Παράδειγμα: Σύστημα σταθερής μάζας και σύστασης που δεν επηρεάζεται από την ολική κίνηση ή εξωτερικά πεδία ή φαινόμενα επιφανειακής τάσης, δηλ. απλό συμπιεστό σύστημα.

Με βάση την καταστατική αρχή, η κατάσταση ισορροπίας του συστήματος μπορεί να καθοριστεί πλήρως από **δύο** ανεξάρτητες εντατικές ιδιότητες. Όλες οι άλλες ιδιότητες του συστήματος είναι μονοσήμαντες συναρτήσεις αυτών των δύο ιδιοτήτων. Π.χ. πίεση P και ειδικός όγκος v καθορίζουν τις υπόλοιπες $\Phi = f(P, v)$.

- Όλες οι ιδιότητες του συστήματος, ανεξάρτητες και εξαρτημένες, είναι καταστατικές συναρτήσεις ή καταστατικές μεταβλητές κι εξαρτώνται από την κατάσταση του συστήματος τη δεδομένη χρονική στιγμή. Είναι δηλαδή Σημειακές συναρτήσεις.

1.5.1 Θερμοδυναμική ισορροπία

Ισορροπία: Στατική κατάσταση του συστήματος με απουσία κάθε τάσης για αυθόρμητη αλλαγή!

Δηλαδή: Στατική ισορροπία και Απουσία οποιασδήποτε δρώσας δύναμης (ή κινητήριας δύναμης)

Μια κατάσταση ισορροπίας είναι χρονικά αμετάβλητη και Αναπαραγωγίσιμη.

Μορφές ισορροπίας

- **Θερμική (ομοιομορφία θερμοκρασίας)** – Απουσία της προκαλεί μεταφορά θερμότητας λόγω διαφοράς θερμοκρασίας
- **Μηχανική (ισορροπία δυνάμεων)** – Απουσία της προκαλεί μεταφορά ρευστού, ορμής λόγω διαφοράς δυνάμεων, π.χ. πίεσης
- **Σύστασης (ομοιομορφία σύστασης όταν έχουμε πάνω απ' ένα συστατικά)** – Απουσία της προκαλεί μεταφορά μάζας με διάχυση λόγω διαφοράς συγκέντρωσης
- **Χημική (ομοιομορφία χημικού δυναμικού)** – Απουσία της προκαλεί χημική αντίδραση λόγω διαφοράς χημικού δυναμικού
- **Φάσεων (ομοιομορφία χημικού δυναμικού)** – Απουσία της προκαλεί μεταφορά μάζας μιας ή περισσοτέρων ουσιών από τη μια φάση στην άλλη λόγω χημικού δυναμικού της κάθε ουσίας σε δύο ή περισσότερες φάσεις.

Θερμοδυναμική ισορροπία υπάρχει όταν έχουμε:

- Θερμική
- Μηχανική
- Σύστασης
- Χημική
- Φάσεων

1.5.2 Διεργασίες

Διεργασία = μετάβαση του συστήματος από μια κατάσταση ισορροπίας σε μια άλλη.

Διαδρομή διεργασίας = η ακολουθία των καταστάσεων από τις οποίες διέρχεται το σύστημα κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας.

Αντιστρεπτή (ή Στατισιότροπη) Διεργασία = Μια υποθετική (ιδεατή) διεργασία καθ' όλη τη διαδρομή της οποίας το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας ή σε απειροελάχιστη απόσταση από αυτή. Δεν υπάρχουν τριβές. Οι ιδιότητες του συστήματος είναι ομοιόμορφες σε κάθε χρονική στιγμή (για Κλειστά συστήματα). Οι ιδιότητες του συστήματος μεταβάλλονται με τον ίδιο ρυθμό σε όλα τα σημεία του συστήματος (για Ανοικτά).

Παραδείγματα

- 1.13. Ένα απομονωμένο σύστημα βρίσκεται πάντοτε σε ισορροπία. Σωστό ή λάθος;
- 1.14. Τα σημεία διαδρομής μιας αντιστρεπτής διεργασίας παριστάνουν καταστάσεις ισορροπίας. Σωστό ή λάθος;
- 1.15. Μια κυκλική διεργασία είναι πάντα αντιστρεπτή. Σωστό ή λάθος;

1.6 Πυκνότητα και εξαρτώμενες ιδιότητες

1.6.1 Πυκνότητα

Πυκνότητα (ρ) = η μάζα μιας ουσίας m ανά μονάδα όγκου V

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{SI: } \rho [=] \text{ kg/m}^3$$

Σχετική Πυκνότητα (ρ_s) = ο λόγος της πυκνότητας μιας ουσίας ρ προς μια πρότυπη πυκνότητα ρ_0

$$\rho_s = \frac{\rho}{\rho_0} \quad \text{SI: } \rho_s [=] []$$

Για στερεά και υγρά, συνήθως το ρ_0 του H_2O σε 1 atm & 4 °C ($\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$)

Για αέρια, συνήθως το ρ_0 του αέρα σε Κ.Σ. 1 atm & 25 °C ($\rho_0 = 1.184 \text{ kg/m}^3$)

Ειδικός όγκος (v) = ο όγκος μιας ουσίας V ανά μονάδα μάζας

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

Ειδικό βάρος (γ) = ο λόγος του βάρους B μιας ουσίας προς τον όγκο της V

$$\gamma = \frac{B}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad \text{SI: } \gamma [=] \text{ N/m}^3$$

Ισόθερμος συντελεστής συμπίεστικότητας (k) = σχετική μεταβολή της πυκνότητας ρ μιας ουσίας λόγω μεταβολής της πίεσης P σε σταθερή θερμοκρασία T .

$$k = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T \quad \text{SI: } k [=] \text{ Pa}^{-1}$$

Συντελεστής κυβικής διαστολής (β) = σχετική μεταβολή της πυκνότητας ρ μιας ουσίας λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας T σε σταθερή πίεση P .

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \quad \text{SI: } \beta [=] \text{ K}^{-1}$$

- 1.16. Πόση είναι η σχετική πυκνότητα ενός υγρού το οποίο έχει ειδικό όγκο 1,25 L/kg;
- 1.17. Πόσος είναι ο ειδικός όγκος μιας ουσίας που έχει ειδικό βάρος 14,7 kN/m³ ($g=9,8 \text{ m/s}^2$);
- 1.18. Αν σε ένα δοχείο που περιέχει δύο μη αναμειγμένα υγρά Α (σχετικής πυκνότητας 1,45) και Β (πυκνότητας 800 kg/m³) βυθιστεί ένα σφαιρίδιο (ακτίνας 1 cm και μάζας 3,8 g) τι από τα τρία θα συμβεί: (α) το σφαιρίδιο θα επιπλέει στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού (Α ή Β) (β) Το σφαιρίδιο θα πλέει στη διεπιφάνεια που χωρίζει τα Α και Β (γ) το σφαιρίδιο θα σταματήσει στον πυθμένα του δοχείου.

1.6.2 Πίεση

Πίεση, P = ο λόγος της δύναμης F που ασκείται κάθετα πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια A δια το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής.

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{SI: } P [=] \text{ Pa} = \text{N/m}^2$$

Χρησιμοποιείται για υγρά και αέρια. Στα στερεά αντίστοιχα χρησιμοποιείται ο όρος **τάση**. Συνήθεις μονάδες: 1 bar = 10⁵ Pa = 100 kPa

Απόλυτη Πίεση, P = η πίεση που μετριέται σε σχέση με το απόλυτο κενό.

Σχετική ή βαρομετρική Πίεση, P = η πίεση που μετριέται σε σχέση με τη βαρομετρική πίεση, P_b .

$$\text{Όταν } P > P_b \quad \text{τότε: } P_g = P - P_b \quad [\text{Pa}]$$

Πίεση κενού, P_{vac} = η διαφορά της βαρομετρικής πίεσης P_b από την απόλυτη πίεση P .

$$\text{Όταν } P < P_b \quad \text{τότε: } P_{vac} = P_b - P \quad [\text{Pa}]$$

Η βαρομετρική ή ατμοσφαιρική πίεση δεν πρέπει να συγχέεται με την πρότυπη ή κανονική ατμόσφαιρα που έχει τιμή 1 atm = 101325 Pa = 760 mmHg. Η βαρομετρική πίεση μεταβάλλεται με τη θέση, το χρόνο και τις καιρικές συνθήκες.

Η υδροστατική πίεση αφορά στα υγρά και οφείλεται στο πεδίο βαρύτητας της γης. Από την ισορροπία δυνάμεων:

$$B = mg = \rho g Ah$$

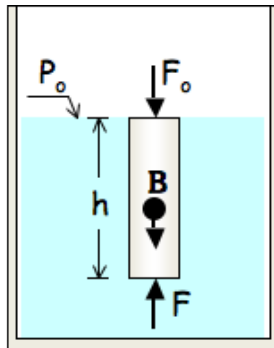
$$F_0 = P_0 A$$

$$F = PA$$

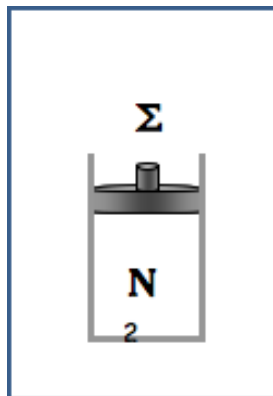
$$F - B - F_0 \Rightarrow PA - \rho g Ah - P_0 A = 0 \Rightarrow$$

$$P = \rho gh + P_0$$

Υδροστατική πίεση είναι η διαφορά: $P - P_0 = \rho gh$



- 1.19 Σε οριζόντιο πλακίδιο εμβαδού 1 cm^2 ασκείται μια δύναμη 40 N , η διεύθυνση της οποίας σχηματίζει με τον κατακόρυφο άξονα γωνία 30° . Ποια είναι η πίεση που ασκείται στο πλακίδιο;
- 1.20. Η πίεση κενού δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την τοπική ατμοσφαιρική (βαρομετρική) πίεση. Σωστό ή Λάθος;
- 1.21. Σε μια διάταξη εμβόλου κυλίνδρου περιέχονται $13,2 \text{ g}$ αζώτου. Το έμβολο έχει διάμετρο 12 cm και η βάση του απέχει από τον πυθμένα του κυλίνδρου 40 cm . Το σώμα Σ μαζί με το έμβολο έχουν μάζα 50 kg . Η τοπική ατμοσφαιρική πίεσης είναι 95 kPa . (α) Να υπολογιστούν η πυκνότητα ρ , ο ειδικός όγκος v και η απόλυτη πίεση του αερίου. (β) Αν ο όγκος του αζώτου διπλασιαστεί, ποιες θα είναι οι νέες τιμές των μεγεθών ρ , v και P ;



1.6.3 Θερμοκρασία

- **Θερμοκρασία** : η φυσική ιδιότητα που καθορίζει αν δυο συστήματα σε επαφή βρίσκονται σε θερμική ισορροπία.
- Διαθερμικό τοίχωμα : Επιτρέπει να μεταφορά θερμότητας
- Αδιαβατικό ή αδιάθερμο τοίχωμα : Δεν επιτρέπει τη μεταφορά θερμότητας (στην πραγματικότητα την επιβραδύνει).

Μηδενικός Νόμος της Θερμοδυναμικής

Όταν δυο συστήματα βρίσκονται, το καθένα χωριστά, σε θερμική ισορροπία με ένα τρίτο, τότε είναι και μεταξύ τους σε θερμική ισορροπία

Sir Ralph Howard Fowler, Physicist (1931)

$$\left. \begin{array}{l} T_A = T_\Gamma \\ T_B = T_\Gamma \end{array} \right\} \rightarrow T_A = T_B$$



Κλίμακες Θερμοκρασίας

Βασίζονται σε καταστάσεις που μπορούν να αναπαραχθούν, π.χ. Σημείο βρασμού και σημείο τήξης του νερού σε 1 atm.



Κλίμακες θερμοκρασίας 2 σημείων

Celsius (1701-1744)

Σ.Τ = 0 °C και Σ.Β = 100 °C

Fahrenheit (1686-1736) Σ.Τ = 32 °F και Σ.Β = 212 °F

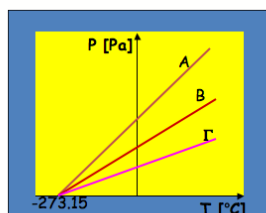


$$T [^\circ\text{F}] = 1.8 T [^\circ\text{C}] + 32$$

Απόλυτη ή Θερμοδυναμική Κλίμακα Θερμοκρασίας

Κλίμακα θερμοκρασίας ιδανικού αερίου – θερμόμετρο αερίου σταθερού όγκου.

Απόλυτο μηδέν όταν P=0



Ισχύει:

Κλίμακα Kelvin

$$T[\text{K}] = T[^\circ\text{C}] + 273.15$$

Κλίμακα Rankine

$$T[\text{R}] = T[^\circ\text{F}] + 459.67$$

$$T[\text{R}] = 1.8 T[\text{K}]$$

$$\Delta T[\text{R}] = \Delta T[^\circ\text{F}]$$

$$\Delta T[\text{K}] = \Delta T[^\circ\text{C}]$$

- 1.22. Ένα θερμόμετρο είναι βαθμονομημένο σε βαθμούς Fahrenheit και ένα άλλο σε Celsius. Τα δύο θερμόμετρα βυθίζονται στο ίδιο υγρό, το οποίο έχει παντού την ίδια θερμοκρασία. Να υπολογιστεί η θερμοκρασία του υγρού εκφρασμένη σε Kelvin και Rankine : (α) αν τα δύο θερμόμετρα έχουν την ίδια αριθμητική ένδειξη και (β) αν η αριθμητική ένδειξη του θερμομέτρου Fahrenheit είναι διπλάσια εκείνης του Celsius.
- 1.23. Ας υποθέσουμε ότι ορίζουμε μια νέα κλίμακα θερμοκρασίας έστω $^{\circ}\text{N}$, στην οποία τα σημεία πήξης και βρασμού του νερού χαρακτηρίζονται αυθαίρετα με τις τιμές 20°N και 60°N , αντίστοιχα. Ποια θερμοκρασία στην κλίμακα αυτή αντιστοιχεί στο απόλυτο μηδέν;

Κεφάλαιο 2

Ογκομετρικές ιδιότητες καθαρών ουσιών

2.1 Φάσεις

ΦΑΣΗ : Ορισμένη περιοχή του χώρου όπου κάθε εντατική ιδιότητα έχει παντού την ίδια τιμή, σε κάθε χρονική στιγμή

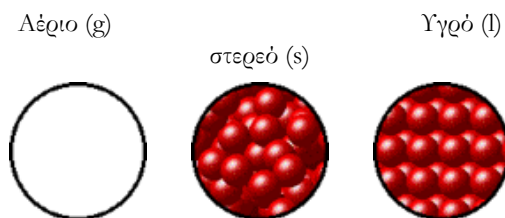
Ομοιογενής ή ομοιόμορφη φάση :

Ομοιογενές σύστημα

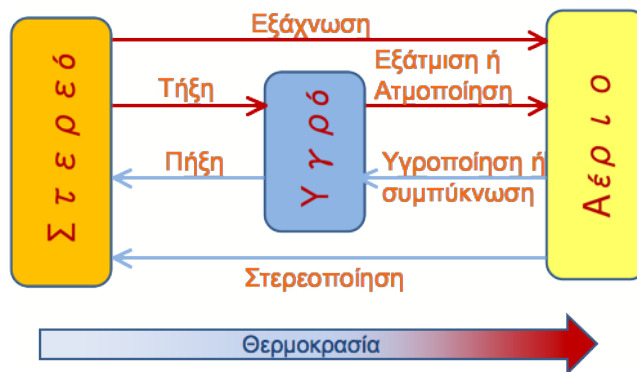
Πολλές Ομοιογενείς φάσεις :

Ετερογενές σύστημα

Καταστάσεις της ύλης :



2.1.1 Καταστάσεις της ύλης και αλλαγές φάσης



Έννοια καθαρής ουσίας

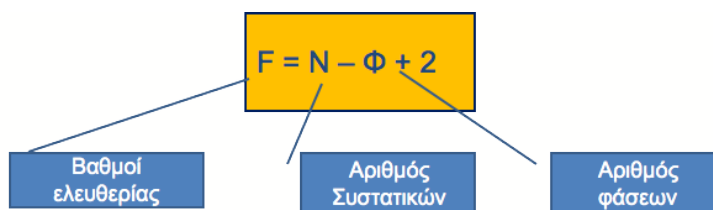
Ένα σύστημα που είναι :

1. Ομοιογενές στη σύσταση
2. Χημικά ομοιογενές
3. Χημικά αμετάβλητο

Πάγος Νερό	(α)	☒	$H_2 + 1/2 O_2$ (Αέριο) Νερό	(α)	☒	$H_2 + O_2$ (Αέριο) Νερό	(α)	☐
	(β)	☒		(β)	☐		(β)	☐
	(γ)	☒		(γ)	☒		(γ)	☒

2.1.2 ΚΑΝΟΝΑΣ ΦΑΣΕΩΝ ΤΟΥ GIBBS ΓΙΑ ΜΗ ΑΝΤΙΔΡΩΝΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΕ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ

Η εντατική κατάσταση ενός τέτοιου συστήματος που αποτελείται από **N** συστατικά κατανεμημένα σε **Φ** φάσεις μπορεί να καθοριστεί πλήρως από έναν αριθμό **F** ανεξάρτητων εντατικών ιδιοτήτων, αυθαίρετα επιλεγμένων.



Οι ανεξάρτητες εντατικές ιδιότητες δεν καθορίζουν όμως και την εκτατική κατάσταση του συστήματος, δηλ. την αναλογία των συστατικών στις διαφορετικές φάσεις και κατά συνέπεια και τις εκτατικές ιδιότητες του συστήματος

2.1.3 Ερωτήσεις

1. Ο μέγιστος αριθμός φάσεων σε ισορροπία για μη αντιδρώντα συστήματα 3 συστατικών είναι 5. Σωστό ή Λάθος;
2. Ο μέγιστος αριθμός φάσεων σε ισορροπία για μη αντιδρώντα συστήματα 3 συστατικών είναι 5. Σωστό ή Λάθος;
3. Το άθροισμα $F + \Phi$ για τα μη αντιδρώντα συστήματα είναι πάντα $N + 2$. Σωστό ή Λάθος;
4. Ο μέγιστος αριθμός φάσεων σε ισορροπία για μη αντιδρώντα συστήματα 3 συστατικών είναι 5. Σωστό ή Λάθος;
5. Το άθροισμα $F + \Phi$ για τα μη αντιδρώντα συστήματα είναι πάντα $N + 2$. Σωστό ή Λάθος;

6. Να βρεθούν οι βαθμοί ελευθερίας για τα παρακάτω αντιδρώντα συστήματα σε ισορροπία:
- Υδράργυρος, νερό (l) και υδρατμοί
 - Άζωτο και οξυγόνο σε αέρια φάση
 - Ακόρεστο υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου, αιθυλική αλκοόλη και αέριο μείγμα αποτελούμενο από αιθανόλη και υδρατμό.
 - Δύο μορφές στερεού θείου (μονοκλινές και τρικλινές) και υγρό θείο
 - Μια συνεχής φάση νερού σε υγρή κατάσταση και λάδι σε κηλίδες διαφορετικού μεγέθους αλλά της ίδιας εντατικής κατάστασης.

2.2 Διαγράμματα ογκομετρικών ιδιοτήτων

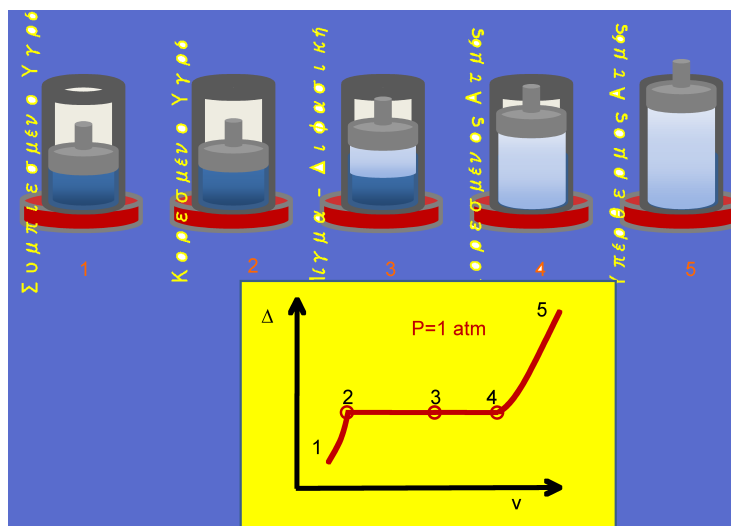
ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ: Η πίεση (P), ο όγκος (V) και η θερμοκρασία (T)

Οι ιδιότητες αυτές είναι άμεσα μετρήσιμες (μετρήσιμες πειραματικά).

- **Διάγραμμα φάσεων: Πίεση – Θερμοκρασία**
- **Διάγραμμα Θερμοκρασίας – Ειδικού όγκου**
- **Διάγραμμα Πίεσης – Ειδικού όγκου**

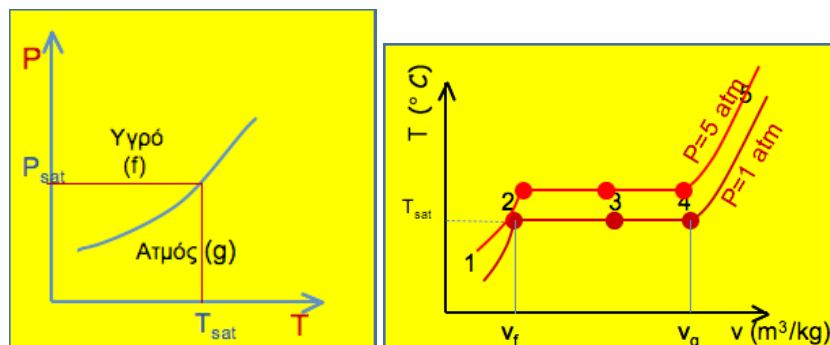
και ο συνδυασμός τους: **Διάγραμμα πίεσης – θερμοκρασίας – ειδικού όγκου**

2.3 Διεργασίες αλλαγής φάσης καθαρών ουσιών



Τι θα συμβεί αν αλλάξουμε την πίεση P στο έμβολο;

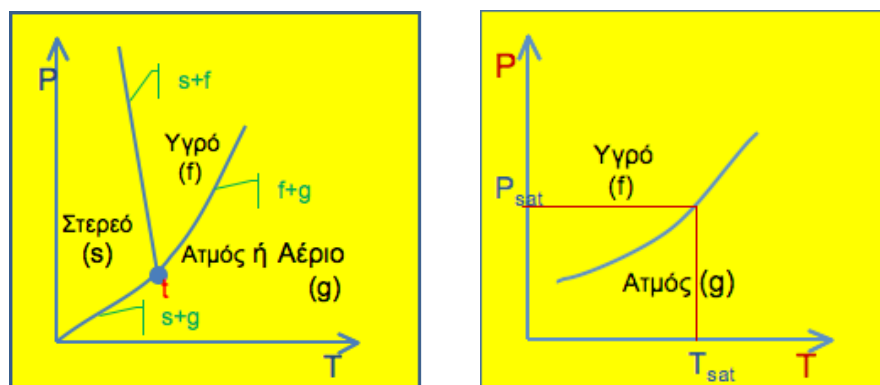
Αύξηση της P συνεπάγεται: αύξηση της θερμοκρασίας βρασμού ή κορεσμού T_{sat} , μείωση της ενέργειας που χρειάζεται για την αλλαγή από την υγρή στην αέρια φάση, δηλ. της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης ΔH_{fg} , μείωση του ειδικού όγκου κορεσμένου ατμού v_g και ελάχιστη αύξηση του ειδικού όγκου κορεσμένου υγρού v_f .



2.3.1 Τριπλό σημείο

Μέχρι ποια τιμή μπορούμε να μειώσουμε την πίεση P στο έμβολο ώστε να έχουμε συνύπαρξη φάσεων υγρού και ατμού;

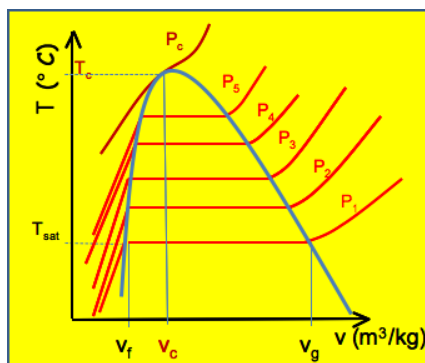
Μέχρι το τριπλό σημείο t , δηλαδή τις συνθήκες στις οποίες έχουμε συνύπαρξη των τριών φάσεων στερεάς-υγρής και αέριας!



2.3.2 Κρίσιμο σημείο

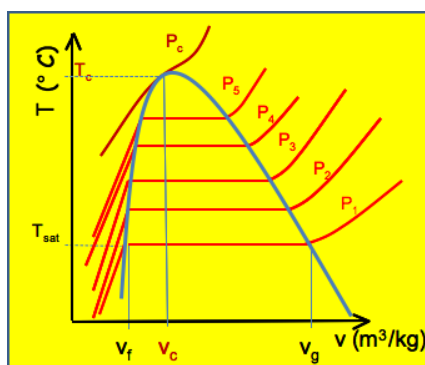
Μέχρι ποια τιμή μπορούμε να αυξήσουμε την πίεση P στο έμβολο ώστε να έχουμε διακριτές φάσεις υγρού και ατμού; Μέχρι την κρίσιμη πίεση, P_c .

Για $P < P_c$ βλέπουμε πάντα έναν μηνίσκο μεταξύ της υγρής και αέριας φάσης κατά τη θέρμανση του κορεσμένου υγρού μέχρι να γίνει κορεσμένος ατμός. Για $P > P_c$ δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ υγρής και αέριας φάσης.



Στην κρίσιμη πίεση P_c η αντίστοιχη θερμοκρασία λέγεται Κρίσιμη Θερμοκρασία T_c και το σημείο (T_c, P_c) κρίσιμο σημείο.

Στο κρίσιμο σημείο $P = P_c$ και $T = T_c$ οι ιδιότητες του κορεσμένου υγρού και του κορεσμένου ατμού είναι ταυτόσημες, δηλ. $v_f = v_g = v_c$. Δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ υγρής και αέριας φάσης.



Παραδείγματα:

2.4. Μία νοικοκυρά μαγειρεύει βοδινό για την οικογένειά της σε μια χύτρα, η οποία είναι: (α) ακάλυπτη, (β) καλυμμένη με ελαφρύ καπάκι και (γ) με βαρύ καπάκι. Σε ποια περίπτωση ο χρόνος μαγειρέματος θα είναι ο μικρότερος και γιατί;

2.5. Η θερμότητα που απορροφάται κατά το βρασμό 1 kg νερού σε θερμοκρασία 100 °C είναι μικρότερη από τη θερμότητα που εκλύεται κατά τη συμπύκνωση του ατμού του νερού στην ίδια θερμοκρασία. Σωστό ή Λάθος;

2.6. Σε τι είδους δοχείο θα βράσει ένας δεδομένος όγκος νερού σε υψηλότερη θερμοκρασία, σε ψηλό και στενό ή πλατύ και ρηχό δοχείο; Γιατί;

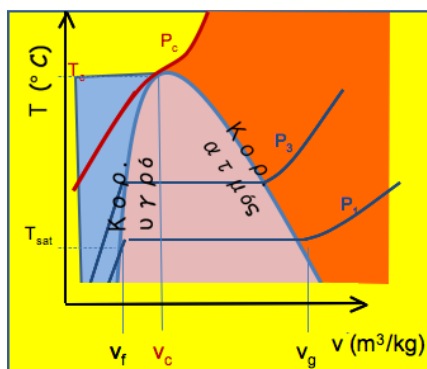
2.7. Ποια διεργασία απαιτεί περισσότερη ενέργεια: η πλήρης εξάτμιση 1 kg κορεσμένου νερού σε πίεση 1 atm ή η πλήρης εξάτμιση 1 kg κορεσμένου νερού σε πίεση 8 atm και γιατί;

2.8. Για την εξάτμιση 1 kg κορεσμένου νερού απαιτείται περισσότερη ενέργεια στους 100 °C ή στους 120 °C;

2.3.3 Ρευστά (υγρό, αέριο)

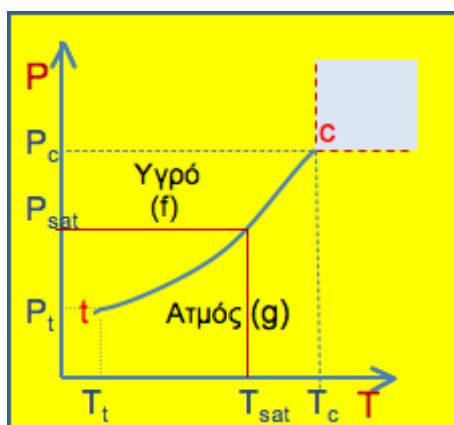
Υπάρχουν στην

- Περιοχή μίγματος κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού ή διφασική περιοχή
- Περιοχή συμπιεσμένου ή υπόψυκτου υγρού
- Περιοχή υπέρθερμου ατμού
- Γραμμή κεκορεσμένου υγρού
- Γραμμή κεκορεσμένου ατμού



Η περιοχή συνθηκών (P, T) που αντιστοιχεί σε υγρό διαχωρίζεται από αυτήν του ατμού με την καμπύλη εξάτμισης ή ατμοποίησης που ξεκινά από το τριπλό σημείο t (T_t, P_t) και καταλήγει στο κρίσιμο σημείο c (T_c, P_c).

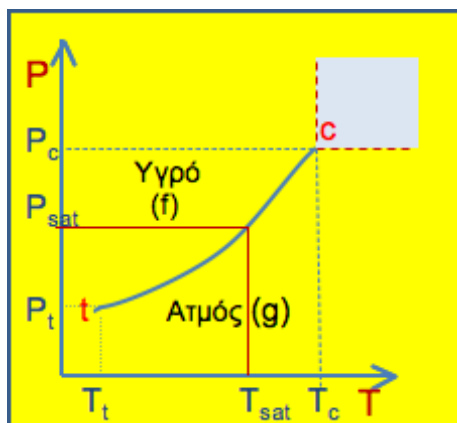
Για δεδομένη T αντιστοιχεί μια μόνο τιμή της πίεσης, η πίεση κορεσμού ή τάση ατμών P_{sat} στην οποία συνυπάρχουν οι δύο φάσεις. Η συνάρτηση $P_{sat} = f(T)$ δίνει την καμπύλη τάσης ατμών.



Για δεδομένη P αντιστοιχεί μια μόνο τιμή της θερμοκρασίας, η θερμοκρασία κορεσμού ή σημείο βρασμού T_{sat} στην οποία συνυπάρχουν οι δύο φάσεις. Η συνάρτηση $T_{sat} = f(P)$ δίνει την καμπύλη βρασμού.

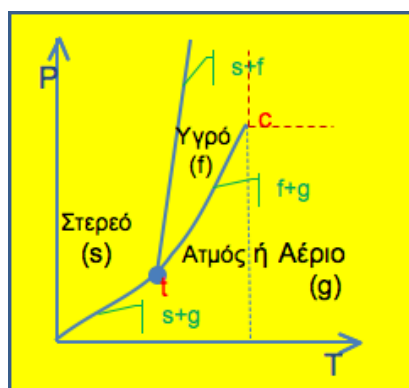
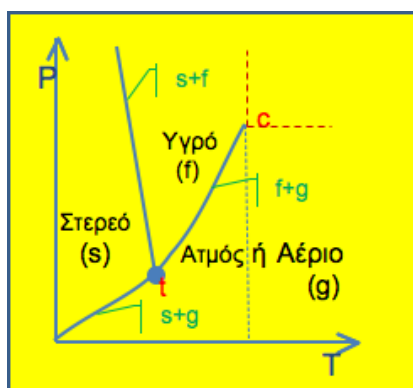
Κανονικό σημείο βρασμού ονομάζεται η θερμοκρασία κορεσμού της καθαρής ουσίας που αντιστοιχεί σε $P = 1 \text{ atm}$.

Υπερκρίσιμο ρευστό ονομάζεται η φάση του ρευστού όταν τόσο η πίεση όσο και η θερμοκρασία του ρευστού είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές της κρίσιμης πίεσής του και θερμοκρασίας του.



2.4 Διαγράμματα ογκομετρικών ιδιοτήτων

Το **Διάγραμμα Πίεσης – Θερμοκρασίας** ή **Διάγραμμα Φάσεων** δείχνει τις συνθήκες (P, T) κάτω από τις οποίες μια καθαρή ουσία μπορεί να υπάρχει σε μια, δύο ή τρεις ευσταθείς φάσεις σε ισορροπία.

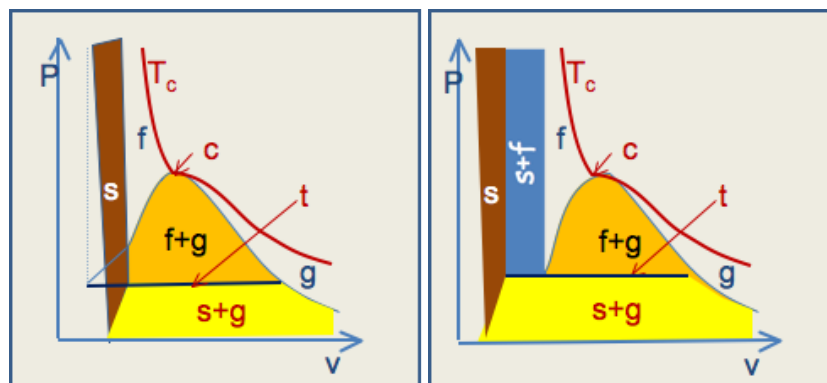


Διαστολή κατά την πήξη (νερό) Συστολή κατά την πήξη

c: κρίσιμο σημείο, t: τριπλό σημείο, s+f, s+g, f+g: καμπύλες κορεσμού, s+f: καμπύλη τήξης, s+g: καμπύλη εξαχνωσης, f+g: καμπύλη εξατμησης

2.4.1 Διάγραμμα Πίεσης – Ειδικού Όγκου (P, v)

Τα όρια των τριών μονοφασικών περιοχών είναι επιφάνειες τα σημεία των οποίων παριστάνουν τις συνθήκες όπου δύο φάσεις συνυπάρχουν σε ισορροπία. Οι καταστάσεις τριών φάσεων απεικονίζονται με μια ευθεία γραμμή παράλληλη του άξονα v, την τριπλή γραμμή.

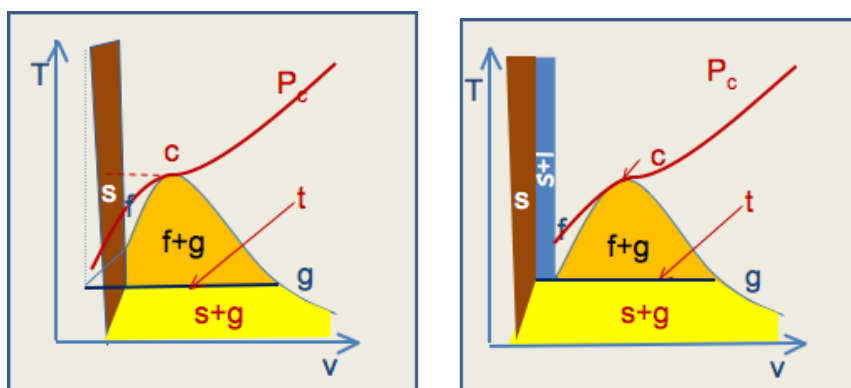


Διαστολή κατά την πήξη (νερό) Συστολή κατά την πήξη

c: κρίσιμο σημείο, t: τριπλή γραμμή, s+f: περιοχή στερεού υγρού, s+g: Περιοχή στερεού-ατμού f+g: Περιοχή υγρού-ατμού

2.4.2 Διάγραμμα Θερμοκρασίας – Ειδικού Όγκου (T, v)

Αντίστοιχα με τα διαγράμματα P-v, με τη διαφορά ότι οι καμπύλες σταθερής P έχουν φορά προς τα άνω.

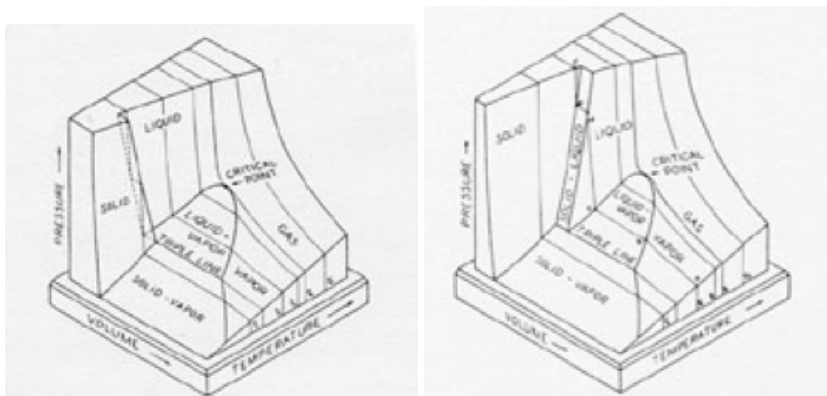


Διαστολή κατά την πήξη (νερό) Συστολή κατά την πήξη

c: κρίσιμο σημείο, t: τριπλή γραμμή, s+f: περιοχή στερεού υγρού, s+g: Περιοχή στερεού-ατμού f+g: Περιοχή υγρού-ατμού

2.4.3 Διάγραμμα Πίεσης - Ειδικού Όγκου - Θερμοκρασίας

Τρισδιάστατο διάγραμμα: το επίπεδο τομής κάθετα σε έναν άξονα δίνει ένα από τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως



Διαστολή κατά την πήξη (νερό) Συστολή κατά την πήξη

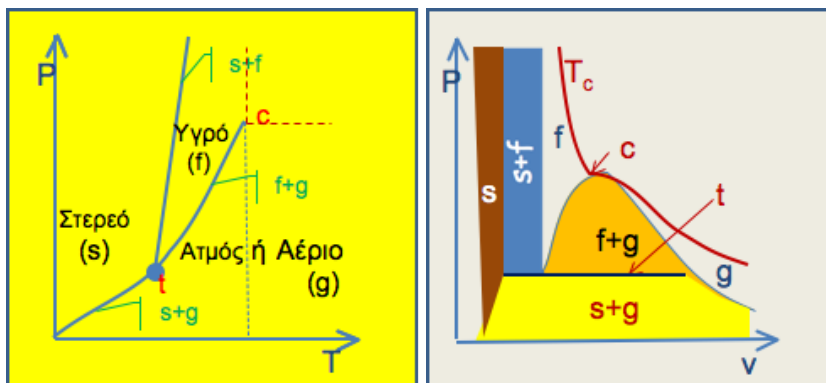
2.4.4 Τριπλό σημείο

Τριπλό σημείο (t) ορίζεται η κατάσταση μιας καθαρής ουσίας στην οποία συνυπάρχουν τρεις φάσεις (π.χ. στερεά, υγρή και αέρια) σε ισορροπία.

Οι βαθμοί ελευθερίας (F) για το τριπλό σημείο ($\Phi = 3$ φάσεις) μιας καθαρής ουσίας (επομένως $N=1$) είναι μηδέν. $F = N - \Phi + 2 = 1 - 3 + 2 = 0$

Μηδέν βαθμοί ελευθερίας συνεπάγεται ότι το τριπλό σημείο της καθαρής ουσίας καθορίζεται από τη φύση, δηλ. ουσιαστικά προσδιορίζεται από το είδος της ουσίας. Έτσι για κάθε καθαρή ουσία αντιστοιχεί ένα τριπλό σημείο (P_t, T_t). Π.χ. για το νερό το τριπλό σημείο είναι (611 Pa, 0,01 °C) (εξαιρούνται τα αλλότροπα συστατικά, δηλ. αυτά με περισσότερες της μίας στερεής φάσης όπου τα τριπλά σημεία είναι περισσότερα του ενός).

- Στο Δ. P-T το τριπλό σημείο εμφανίζεται ως το σημείο τομής t των τριών καμπυλών, δηλ. των κ . τήξης, εξάχνωσης και ατμοποίησης, επειδή οι P και T είναι εξαρτημένες μεταβλητές.
- Στο Δ. P-v (και αντίστοιχα στο Δ. T-v) το τριπλό σημείο εμφανίζεται ως γραμμή t επειδή, για τη συγκεκριμένη πίεση (ή θερμοκρασία αντίστοιχα), ο ειδικός όγκος εξαρτάται από την αναλογία των τριών φάσεων.



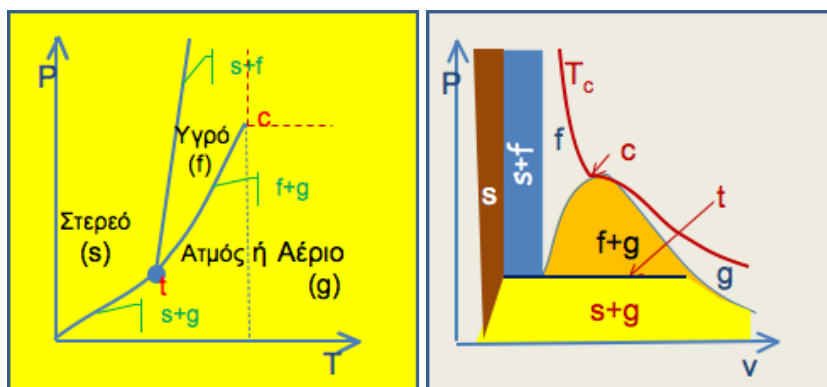
- Στο κρίσιμο σημείο (c) οι ιδιότητες του κορεσμένου υγρού και του κορεσμένου ατμού συμπίπτουν

- Μαθηματικά εκφράζεται ως σημείο καμπής της κρίσιμης ισόθερμης στο Δ. Pν

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{T=T_c} \quad \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_{T=T_c}$$

- Σημείο καμπής της κρίσιμης ισοβαρούς στο Δ. Tν.

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{P=P_c} \quad \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_{P=P_c}$$



2.9. Ποια είναι η διαφορά μεταξύ των εννοιών «αέριο» και «ατμός»;

2.10. Σε τι μπορεί να μετατραπεί νερό υπερκρίσιμη κατάστασης με ισόθερμη συμπίεση;

2.11. Να σχεδιαστεί η ακόλουθη διεργασία σε διαγράμματα T-v, και P-T: (α) Ισοθερμολοκρασιακή συμπίεση κορεσμένου υγρού πίεσης P1 και θερμοκρασίας T1 σε πίεση P2 (β) ισοβαρής θέρμανση μέχρι τη δημιουργία μίγματος ποιότητας 0,5 (γ) ισόχωρη ψύξη σε θερμοκρασία T1 (δ) Ισοβαρής θέρμανση ως τη θερμοκρασία κορεσμού που αντιστοιχεί στην πίεση P2;

2.5 Πίνακες ιδιοτήτων

Στις διεργασίες παραγωγής ενέργειας και τις διεργασίες παραγωγής ψύξης χρησιμοποιούνται ευρύτατα οι ιδιότητες κορεσμένου υγρού ή ατμού, υπέρθερμου ατμού ή συμπιεσμένου/υπόψυκτου υγρού. Για το νερό οι ιδιότητες αυτές βρίσκονται στα διαγράμματα Mollier. ΑΛΛΑ υπάρχουν και Πίνακες....

Στην πράξη για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος, όπως υπέρθερμος ατμός, συμπιεσμένο υγρό και κορεσμένες περιοχές (μίγματος) κατασκευάζεται ξεχωριστός πίνακας.

Σε κάθε πίνακα (βλ. Παράρτημα Β' Τόμου Α - 4, 5, 6) παρατίθενται τα ακόλουθα:

T Θερμοκρασία [°C]

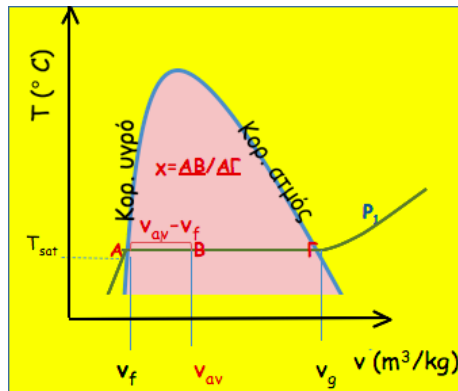
P Πίεση [Pa]

v Ειδικός όγκος [m³/kg]

u Ειδική εσωτερική ενέργεια [kJ/kg]

h Ειδική ενθαλπία [kJ/kg]

s Ειδική εντροπία [kJ/(kg K)]



2.5.2 Κατάσταση υπέρθερμου ατμού

Πίνακας A-6 (ως προς T και P)

Για δεδομένη T και P βρίσκουμε:

Ειδικό όγκο, v Ειδική εσωτερική ενέργεια, u Ειδική ενθαλπία, h Ειδική εντροπία, s_f

Ισχύει:

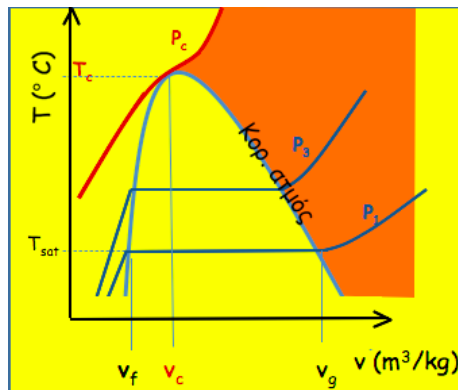
$P < P_{sat}$ για δεδομένη T

$T > T_{sat}$ για δεδομένη P

$v > v_g$ για δεδομένη T ή P

$u > u_g$ για δεδομένη T ή P

$h > h_g$ για δεδομένη T ή P



2.5.3 Κατάσταση υπόψυχτου υγρού

Πίνακας A-7 (ως προς T και P)

Για δεδομένη T και P βρίσκουμε:

Ειδικό όγκο, v, Ειδική εσωτερική ενέργεια, u, Ειδική ενθαλπία, h και Ειδική εντροπία, s_f

$P > P_{sat}$ για δεδομένη T

$T < T_{sat}$ για δεδομένη P,

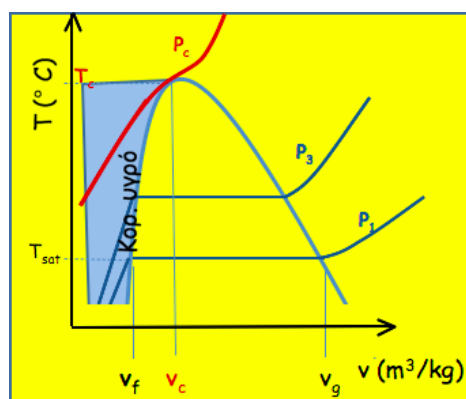
$v < v_f$ για δεδομένη T ή P ,

$u < u_f$ για δεδομένη T ή P και

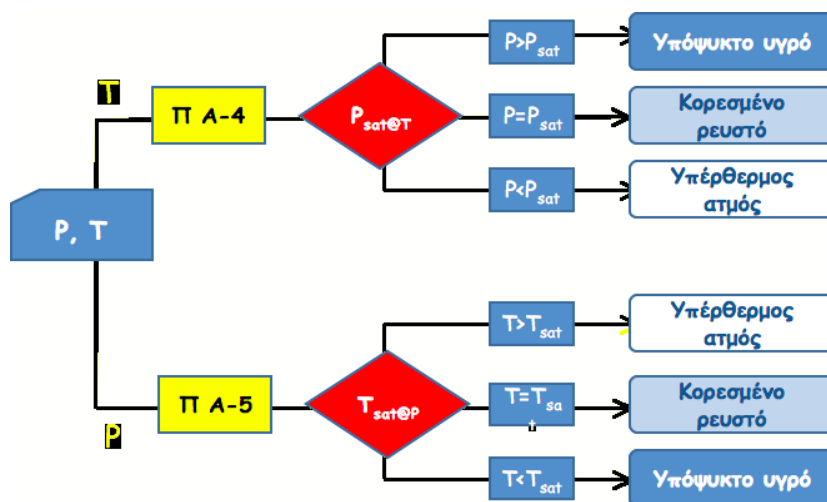
$h < h_f$ για δεδομένη T ή P

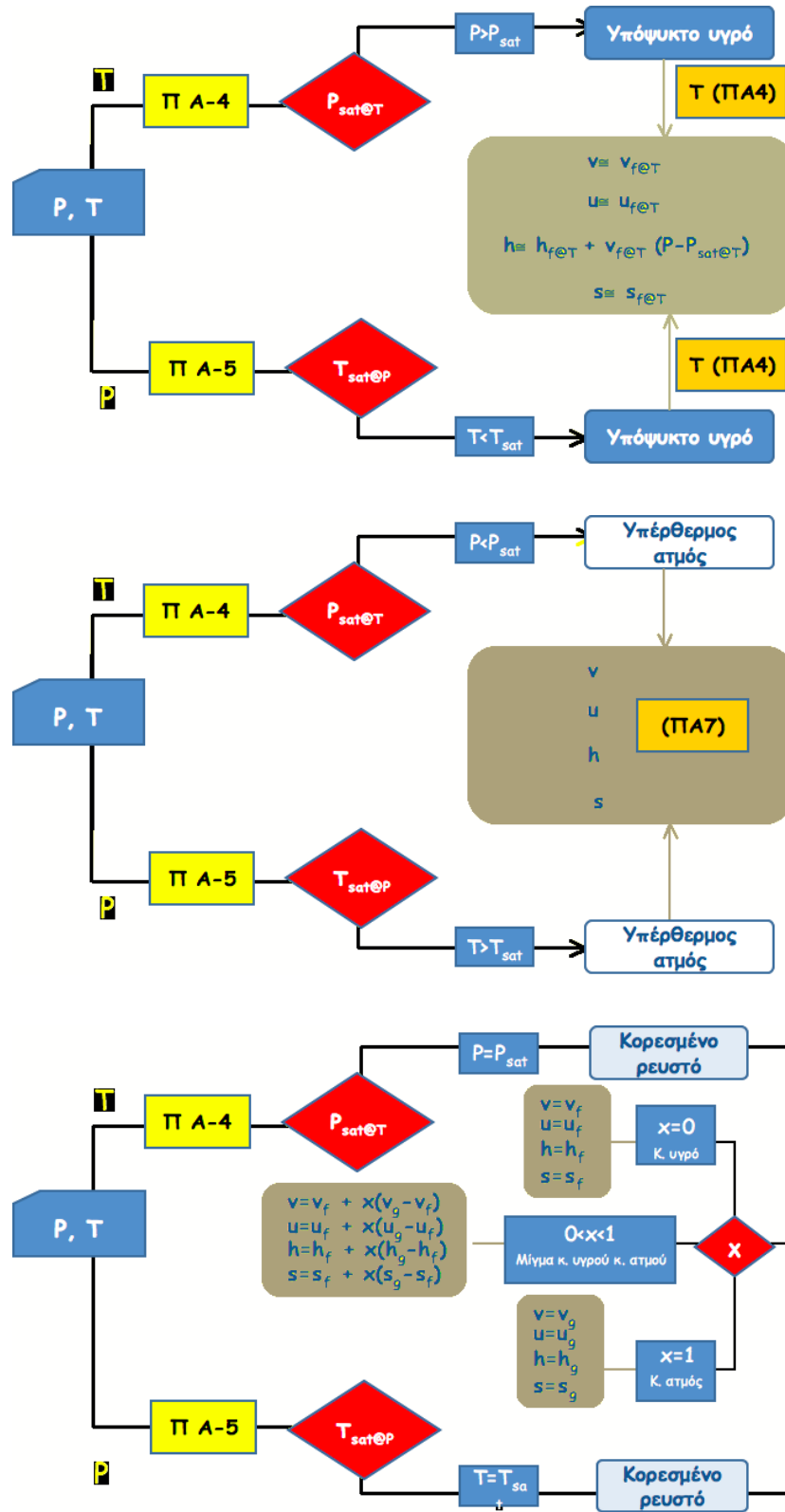
Μια καλή προσέγγιση για τις ιδιότητες του υπόψυκτου υγρού είναι αυτές του κορεσμένου υγρού στη συγκεκριμένη θερμοκρασία T :

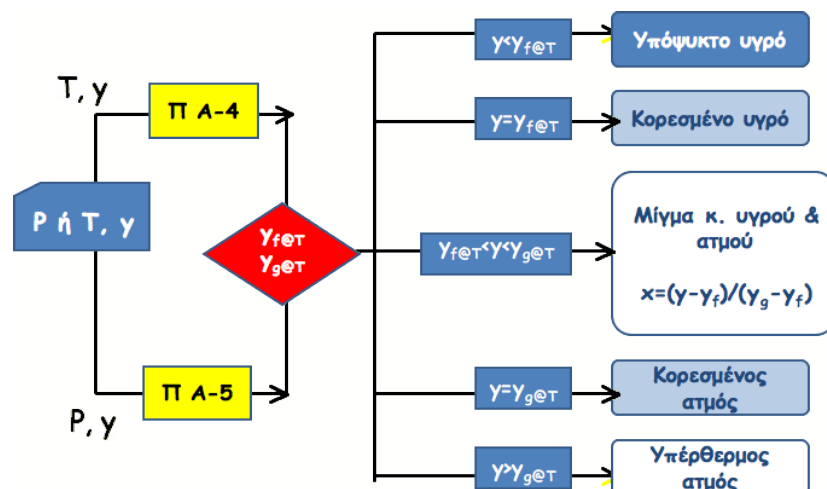
$$y \approx y_{f@T} \quad h \approx h_{f@T} + v_{f@T}(P - P_{sat@T})$$



2.5.4 Μεθοδολογία εύρεσης κατάστασης και ιδιοτήτων







Παραδείγματα:

2.12. Η ποιότητα x δεν ορίζεται στο κρίσιμο σημείο. Σωστό ή Λάθος;

2.13. Νερό πίεσης 1 bar και θερμοκρασίας 200 °C έχει ποιότητα $x > 1$. Σωστό ή Λάθος;

2.14. Πώς υπολογίζονται οι τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών μιας καθαρής χημικής ουσίας όταν η ακριβής κατάσταση αυτής δεν υπάρχει στο διαθέσιμο πίνακα ιδιοτήτων;

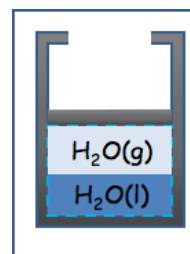
2.16. Σε ένα κλειστό δοχείο περιέχονται 1,37 kg ψυκτικού R-134a σε κατάσταση κορεσμένου ατμού. Η μανομετρική πίεση στο δοχείο είναι 600 kPa και η τοπική βαρομετρική πίεση είναι 100 kPa.

- Ποια είναι η θερμοκρασία του ψυκτικού;
- Ποιος είναι ο όγκος του δοχείου;

2.17. Ένας λέβητας τροφοδοτείται με νερό θερμοκρασίας 180 °C και πίεσης 100 bar. Ο ρυθμός εισροής μάζας νερού στο λέβητα είναι 37,5 kg/s. Να υπολογιστούν:

- Η ογκομετρική παροχή εισροής του νερού στο λέβητα.
- Το επί τοις εκατό σφάλμα στην ογκομετρική παροχή αν για τον υπολογισμό της λαμβάνονταν οι ιδιότητες κορεσμένου υγρού σε (i) 180 °C και σε (ii) 100 bar.

2.18 Στη διάταξη κυλίνδρου εμβόλου που φαίνεται στο σχήμα περιέχεται 0,5 μίγματος νερού σε ισορροπία με τον ατμό του σε θερμοκρασία 150 °C. Το κλάσμα μάζας του υγρού στο αρχικό μίγμα είναι 0,85. Το νερό θερμαίνεται μέχρι να μετατραπεί σε κορεσμένο ατμό. Όταν το έμβολο ακουμπά στα στηρίγματα που βρίσκονται στην κορυφή του κυλίνδρου ο ολικός όγκος του νερού στον κύλινδρο είναι 0,13m³. Να υπολογιστεί η θερμοκρασία και η πίεση στην τελική κατάσταση.



2.19. Σε ένα κλειστό δοχείο σταθερού όγκου περιέχεται ορισμένη ποσότητα ψυκτικού R-134a σε κατάσταση μίγματος κορεσμένου υγρού και ατμού πίεσης 800 kPa. Το δοχείο θερμαίνεται έως ότου το ψυκτικό φτάσει την κρίσιμη κατάσταση. Να υπολογιστεί η κατ' όγκο σύσταση του αρχικού μίγματος σε υγρό και ατμό.

2.20. Ένα κλειστό δοχείο περιέχει υδρατμό πίεσης 200 kPa και θερμοκρασίας 350 °C. Το δοχείο αφήνεται να ψυχθεί σε περιβάλλον θερμοκρασίας 80 °C. Σε ποια θερμοκρασία θα αρχίσει η υγροποίηση του υδρατμού; Ποιο θα είναι το κλάσμα μάζας του κορεσμένου υγρού στην τελική κατάσταση.

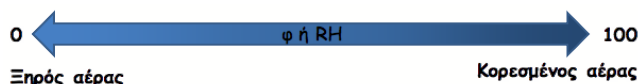
2.6 ΠΙΕΣΗ ΑΤΜΩΝ ΚΑΙ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΦΑΣΕΩΝ

Ατμοσφαιρικός Αέρας = Ξηρός αέρας + Ατμοί νερού, δηλ. υδρατμοί

Ατμοσφαιρική Πίεση = Πίεση Ξηρού αέρα + Πίεση ατμών νερού

$$P_{atm} = P_a + P_v$$

Σχετική υγρασία, ϕ (ή %RH) = Ποσοστό της ποσότητας υδρατμών ως προς τη μέγιστη ποσότητα υδρατμών που μπορεί να συγκρατήσει ο αέρας στη συγκεκριμένη θερμοκρασία.



Η πίεση ατμών του νερού συνδέεται με την σχετική υγρασία, ϕ , και την πίεση κορεσμού $P_{sat@T}$ του νερού στη συγκεκριμένη θερμοκρασία T του αέρα: $P_v = \phi P_{sat@T}$

Παραδείγματα:

2.21 Σε ένα κλειστό δοχείο σταθερού όγκου περιέχεται ορισμένη ποσότητα νερού σε επαφή με αέρα 20 °C και 1 atm. Το δοχείο θερμαίνεται με μια ηλεκτρική αντίσταση και το νερό αρχίζει να βράζει. Κατά τη διάρκεια του βρασμού, η θερμοκρασία θα παραμείνει σταθερή;

2.22 Σε τι διαφέρει ο μηχανισμός σχηματισμού της ομίχλης από εκείνον της πρωινής δροσιάς;

2.23. Ένα ποτήρι με νερό βρίσκεται μέσα σε ένα δωμάτιο με θερμοκρασία 20 °C και σχετική υγρασία 60%. Αν η θερμοκρασία του νερού είναι 15 °C, να υπολογιστεί η πίεση των ατμών (α) στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού και (β) σε μια θέση μέσα στο δωμάτιο μακριά από το ποτήρι.

2.7 Καταστατικές εξισώσεις καθαρών ουσιών

ΟΡΙΣΜΟΣ (Καταστατική εξίσωση: Equation of State, EoS)

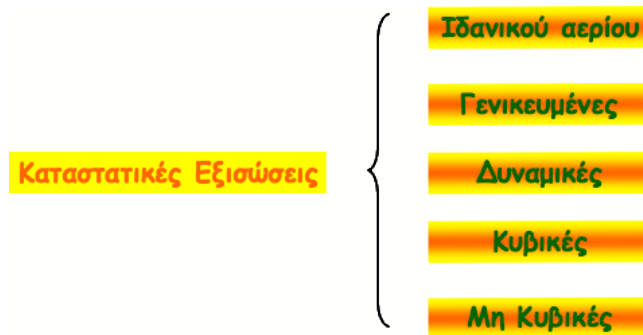
Καταστατική Εξίσωση είναι η σχέση που συνδέει την πίεση P , τον γραμμομοριακό όγκο v (ή τον ειδικό όγκο v) και τη θερμοκρασία T μιας καθαρής ουσίας σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.

$$f(P, v, T) = 0$$

Η ΚΕ εξαρτάται μόνο από τη φύση της ουσίας και όχι την ποσότητά της.

$$f(P, v, T) = \begin{cases} P = f_1(v, T) \\ v = f_2(P, T) \\ T = f_3(P, v) \end{cases}$$

Δύο ανεξάρτητες μεταβλητές.



2.7.1 Καταστατική εξίσωση ιδανικού αερίου

$$PV = nR_u T$$

Βασικές παραδοχές:

Το μέγεθος των μορίων του αερίου είναι αμελητέο σε σύγκριση με τη μέση απόσταση αυτών. Τα μόρια θεωρούνται σημεία χωρίς όγκο. Τα μόρια δεν εξασκούν μεταξύ τους δυνάμεις παρ'ότι μόνο τη στιγμή της σύγκρουσής μεταξύ τους καθώς και με τα τοιχώματα του δοχείου. Οι κρούσεις αυτές θεωρούνται ελαστικές.

P απόλυτη πίεση [Pa]

V όγκος [m^3]

n αριθμός γραμμομορίων [mol]

T απόλυτη θερμοκρασία [K]

R_u Παγκόσμια Σταθερά Αερίων [$\text{Pa m}^3/(\text{mol K})$]

$R_u = 8.314 \text{ Pa m}^3/(\text{mol K}) = 8.314 \text{ J}/(\text{mol K}) = 0.08206 \text{ atm L}/(\text{mol K})$

Ειδική σταθερά αερίου, $R = R_u/M_r$

- **Νόμος Boyle** το γινόμενο της πίεσης επί τον όγκο του αερίου διατηρείται σταθερό όταν η θερμοκρασία και η μάζα του αερίου διατηρούνται σταθερές
- **Νόμος Charles & Gay-Lussac:** ο όγκος συγκεκριμένης ποσότητας αερίου σε σταθερή πίεση είναι ανάλογος της απόλυτης θερμοκρασίας του.

$$PV = ct \qquad \frac{V}{T} = ct$$

Διάφορες μορφές της Κ.Ε. του ιδανικού αερίου

$$PV = nR_u T \quad \Rightarrow \quad Pv = R_u T$$

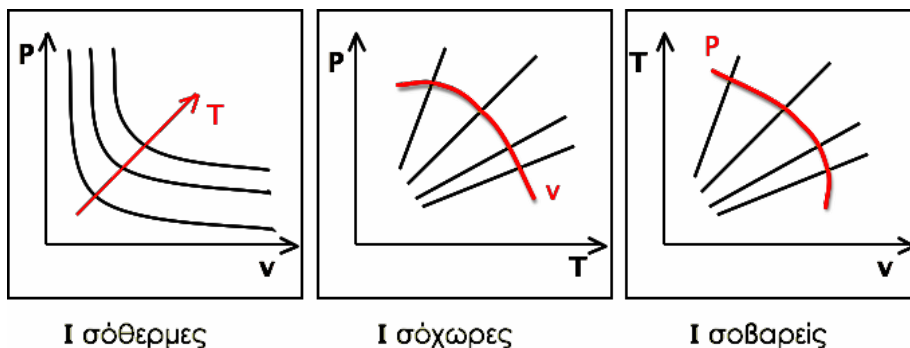
$$PV = mRT \quad \Rightarrow \quad PV = RT \quad \Rightarrow \quad P = \rho RT$$

V : όγκος [m^3], v : γραμμομοριακός όγκος [m^3/mol], v : ειδικός όγκος [m^3/kg], n : αριθμός γραμμομορίων [mol], m : μάζα [kg], ρ : πυκνότητα [kg/m^3], M_r : μοριακή μάζα αερίου, R_u : Παγκόσμια Σταθερά Αερίων [$\text{Pa m}^3/(\text{mol K})$], R : Ειδική σταθερά αερίου [$\text{kPa m}^3/(\text{kg K})$]

Η Κ.Ε. του ιδανικού αερίου ισχύει επακριβώς μόνο για ΙΔΑΝΙΚΑ ΑΕΡΙΑ. Ιδανικό μπορεί να θεωρηθεί ένα αέριο όταν **οι διαμοριακές δυνάμεις είναι ασθενείς**.

Αδρανή αέρια (He, Ne, Ar, Kr), Διατομικά αέρια (N_2 , O_2 , CO) σε χαμηλές P & υψηλές T και Τριατομικά αέρια (CO_2 , SO_2 , H_2O , H_2S) σε πολύ χαμηλές P & υψηλές T.

Διαγράμματα P-vT ιδανικού αερίου

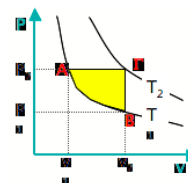


Παραδείγματα

2.24. Για $P \rightarrow 0$, η οριακή τιμή του λόγου Pv/T εξαρτάται από τη φύση του αερίου. Σωστό ή Λάθος;

2.25. Ποια από τα παρακάτω αέρια έχουν πυκνότητα 1.13 kg/m^3 σε $P = 100 \text{ kPa}$ και 25°C (κατάσταση ιδανικού αερίου): (α) N_2 , (β) O_2 , (γ) CO , (δ) NO ;

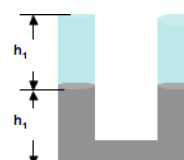
2.26. Ένα σύστημα αποτελούμενο από ιδανικό αέριο υφίσταται την κυκλική διεργασία που φαίνεται στο Σχήμα παραπλεύρως. Να σχεδιαστεί η ίδια διεργασία σε διάγραμμα P-T και T-v.



2.27. Μια δεξαμενή περιέχει ήλιο, πίεσης 800 kPa και θερμοκρασίας 50°C . Από τη δεξαμενή αφαιρείται 1 kg ηλίου, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πίεσης στα 530 kPa και της θερμοκρασίας στους 40°C . Να υπολογιστεί ο όγκος της δεξαμενής.

2.28. Δυο δεξαμενές A και B, συνδέονται μέσω ενός αγωγού στον οποίο είναι τοποθετημένη μια βαλβίδα, η οποία αρχικά είναι κλειστή. Η δεξαμενή A περιέχει αρχικά $0,5 \text{ m}^3$ αζώτου σε πίεση 850 kPa και θερμοκρασία 60°C , ενώ η δεξαμενή B είναι κενή. Κάποια στιγμή η βαλβίδα ανοίγει, με αποτέλεσμα την εισροή του αζώτου στη δεξαμενή B. Η βαλβίδα ξανακλείνει όταν η πίεση στη δεξαμενή B γίνει 620 kPa και η θερμοκρασία 20°C . Οι αντίστοιχες τελικές συνθήκες στη δεξαμενή A είναι 550 kPa και 50°C . Να υπολογιστεί ο όγκος της δεξαμενής B.

2.29 Σε ένα υσιδρή ισοδιαμετρικό σωλήνα που φαίνεται στο σχήμα περιέχεται υδραργύρος μέχρι ύψος $h_1 = 25 \text{ cm}$. Το αριστερό σκέλος του σωλήνα είναι κλειστό και περιέχει αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος (27°C και 750 mmHg), ενώ το δεξιό σκέλος είναι ανοιχτό στην ατμόσφαιρα. (α) Μέχρι ποια θερμοκρασία θα πρέπει να θερμανθεί ο αέρας ώστε η στάθμη του υδραργύρου να φτάσει την κορυφή του δεξιού σκέλους του σωλήνα; (β) Μέχρι ποια θερμοκρασία πρέπει να ψυχθεί ο αέρας, ώστε το μήκος του υδραργύρου στο αριστερό σκέλος να αυξηθεί κατά $2,5\%$; Η τοπική ατμοσφαιρική πίεση και στις δυο περιπτώσεις θεωρείται ότι παραμένει σταθερή.



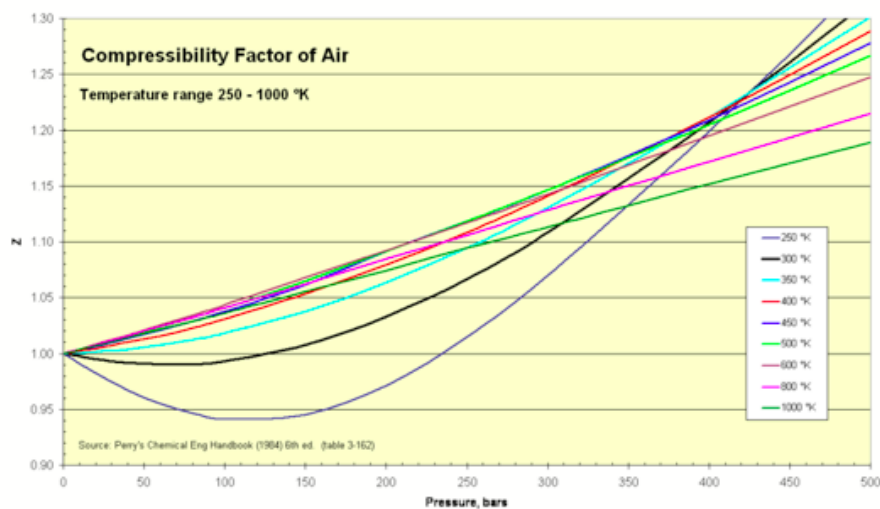
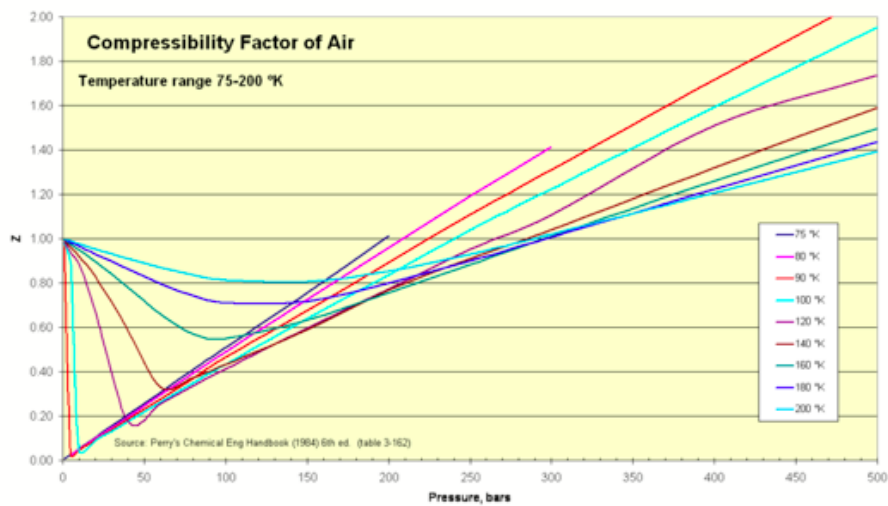
2.7.2 Γενικευμένες Καταστατικές Εξισώσεις

- Παράγοντας συμπιεστότητας (compressibility factor):

$$z = \frac{Pv}{RT} = \frac{P\bar{v}}{R_u T}$$

- Ο παράγοντας συμπιεστότητας είναι αδιάστατος αριθμός.
- Για ιδανικά αέρια: $z = 1$
- Ο παράγοντας z αποτελεί μέτρο της απόκλισης ενός πραγματικού αερίου από την ιδανική συμπεριφορά στις ίδιες συνθήκες P & T.
- Για πραγματικά αέρια (P,T σταθερά): $z = \frac{\rho_{id}}{\rho_{real}} = \frac{v_{real}}{v_{id}}$

2.7.3 Παράγοντας συμπιεστότητας (compressibility factor):



- Για $P \rightarrow 0$ και για κάθε T , $\Rightarrow z=1$
- Όταν $z < 1 \Rightarrow \rho_{real} > \rho_{id}$ υπερισχύουν οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων
- Όταν $z > 1 \Rightarrow \rho_{real} < \rho_{id}$ υπερισχύουν οι απωστικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων
- Στο κρίσιμο σημείο ο κρίσιμος παράγοντας συμπιεστότητας είναι : $z_c = \frac{P_c \bar{v}_c}{R_u T_c}$, με τιμές που κυμαίνονται για τις περισσότερες ουσίες μεταξύ του 0,2 και του 0,3

Παραδείγματα:

2.30. Ο παράγοντας συμπιεστότητας ενός πραγματικού αερίου σε δεδομένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι 0,8. Αν στις ίδιες συνθήκες η πυκνότητα αντίστοιχα ιδανικού αερίου είναι 50 kg/m³ ποια είναι η πυκνότητα του πραγματικού αερίου.

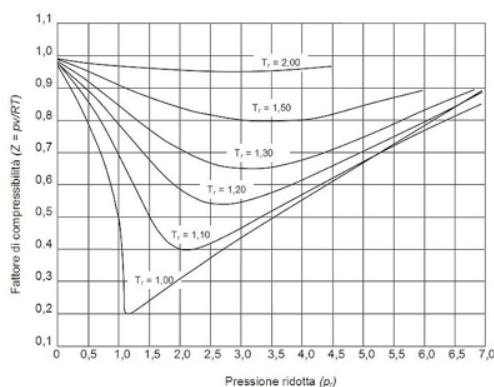
2.31. Να υπολογιστεί ο παράγοντας συμπιεστότητας του υδρατμού (α) στο κανονικό σημείο βρασμού και (β) στο τριπλό σημείο βρασμού του νερού.

Αρχή αντίστοιχων καταστάσεων:

- Ανηγμένη πίεση (reduced pressure): $P_r = \frac{P}{P_c}$
- Ανηγμένη θερμοκρασία (reduced temperature): $T_r = \frac{T}{T_c}$
- Αν δυο ρευστά Α και Β βρίσκονται στην ίδια ανηγμένη πίεση $P_{r,A} = P_{r,B}$ και την ίδια ανηγμένη θερμοκρασία $T_{r,A} = T_{r,B}$, τότε ο ανηγμένος ειδικός τους όγκος είναι ίδιος, δηλ. $v_{r,A} = v_{r,B}$.

$$v_r = f(P_r, T_r)$$

$$y_r = f(P_r, T_r)$$



2.7.4 Γενικευμένες Καταστατικές Εξισώσεις

Εξισώσεις που εκφράζουν τον παράγοντα συμπιεστότητας z ως συνάρτηση της ανηγμένης πίεσης P_r και της ανηγμένης θερμοκρασίας T_r του ρευστού. ($\Rightarrow$ χρειάζεται η κρίσιμη πίεση P_c και η κρίσιμη θερμοκρασία T_c) Μερικές ισχύουν και για υγρά και για αέρια.

1. Διαπαραμετρικό μοντέλο

$$z = f(P_r, T_r)$$

Δεν ισχύει κοντά στο κρίσιμο σημείο γιατί τότε όλα τα ρευστά θα είχαν τον ίδιο κρίσιμο συντελεστή συμπίεστικότητας z_c .

2. Τριπαπαμετρικά μοντέλα

Δηλώνουν ότι ο συντελεστής συμπίεστικότητας εξαρτάται και από τη φύση του ρευστού, οπότε υπεισέρχεται στη σχέση κι άλλη μια παράμετρος.

$$\text{Lydersen et. al (1955)} \quad z = f(P_r, T_r, z_c)$$

$$\text{Pitzer (1955 - 58)} \quad z = f(P_r, T_r, \omega)$$

3. Τετραπαπαμετρικά μοντέλα

Δηλώνουν ότι ο z εξαρτάται και από την πολικότητα της χημικής ουσίας (διπολική ροπή M).

$$z = f(P_r, T_r, \omega, M)$$

Εξ. Pitzer & ο Ακεντρικός παράγοντας ω , (acentric factor)

Ο ακεντρικός παράγοντας είναι φυσική σταθερά με συγκεκριμένη τιμή για κάθε χημική ουσία.

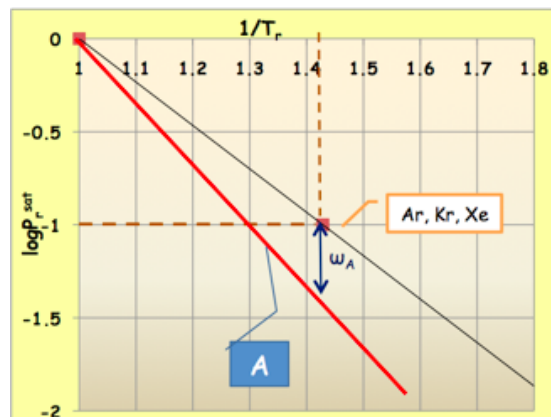
$$\omega = -1 - \log_{10} P_r^{sat} \quad \text{για } T = 0.7$$

Υπολογίζεται πειραματικά από την καμπύλη $\log_{10} P_r^{sat} = f(1/T_r)$

Μια άλλη εξίσωση για τον υπολογισμό του ω προτάθηκε από τον Edminster

$$\omega = \frac{3}{7} \left(\frac{T_b^0}{T_c - T_B^0} \right) \log_{10} P_c - 1$$

όπου T_b^0 το κανονικό σημείο βρασμού σε K, T_c η κρίσιμη θερμοκρασία σε K, P_c η κρίσιμη πίεση σε atm.



Η εξίσωση του Pitzer είναι: $z = z^0 + \omega z^1$

Όπου z^0 και z^1 συναρτήσεις της ανηγμένης πίεσης P_r και της ανηγμένης θερμοκρασίας T_r του ρευστού (βλ. Πίνακες με τιμές των Lee & Kesler). Ισχύει για υγρά και αέρια. Είναι πιο ακριβής για μη πολικά ή ελαφρώς πολικά αέρια μακριά από το κρίσιμο σημείο (συνήθεις υδρογονάνθρακες)

2.7.5 Δυναμικές ή Ενεργές Καταστατικές Εξισώσεις (Virial EOS)

1. Ανάπτυγμα του παράγοντα συμπίεστικότητας σε σειρά δυνάμεων του αντίστροφου γραμμομοριακού όγκου, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία.

$$z = 1 + \frac{B}{\bar{v}} + \frac{C}{\bar{v}^2} + \frac{D}{\bar{v}^3} + \dots$$

Οι συντελεστές B, C, D, ... :

- ονομάζονται δυναμικοί συντελεστές (virial coefficients)
- Οι τιμές τους εξαρτώνται από την εκάστοτε χημική ουσία.
- Για καθαρές χημικές ουσίες, οι τιμές τους εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία.
- Συσχετίζονται με τη διαμοριακή δυναμική ενέργεια (ο B εκφράζει την αλληλεπίδραση μεταξύ 2 μορίων, ο C μεταξύ 3 μορίων, ο D 4 μορίων κ.ο.κ).

2. Ανάπτυγμα του παράγοντα συμπίεστικότητας σε σειρά δυνάμεων της πίεσης, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία.

$$z = 1 + B'P + C'P^2 + D'P^3 + \dots$$

Οι συντελεστές B, C, D, ... και B', C', D', ... συσχετίζονται :

$$B' = \frac{B}{R_u T} \quad C' = \frac{C - B^2}{(R_u T)^2} \quad D' = \frac{D - 3BC - 2B^3}{(R_u T)^3}$$

Και τα δυο αναπτύγματα ισχύουν για αέρια με $\rho < 0,5\rho_c$.

Όταν $P \rightarrow 0$ τότε $z \rightarrow 1$ (ιδανικό αέριο)

Για $P < 15 \text{ bar}$ & $T < T_c$ έχουμε καλή ακρίβεια με 2 όρους

Για $P < 50 \text{ bar}$ έχουμε καλή ακρίβεια με 3 όρους.

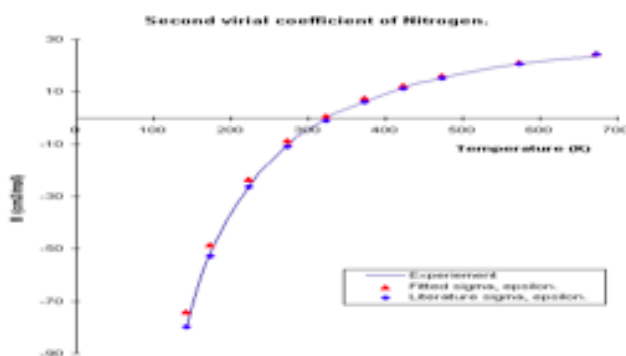
Ο συντελεστής B Θεωρούμε την περικομμένη μορφή της Κ.Ε. : $z = 1 + \frac{B}{\bar{v}} = 1 + \frac{BP}{R_u T}$
 $= f(T)$ για καθαρή ουσία και : διαμοριακές δυνάμεις 2 μορίων.

Για $B < 1 \rightarrow z < 1$ υπερισχύουν οι ελκτικές δυνάμεις

Για $B > 1 \rightarrow z > 1$ υπερισχύουν οι απωστικές δυνάμεις

Για $B=0 \rightarrow z=1$ εξισορρόπηση ελκτικών & απωστικών δυνάμεων (ιδανική συμπεριφορά)

Θερμοκρασία Boyle, T_B : όταν $B = 0$. Για μεγάλη περιοχή P το αέριο συμπεριφέρεται ιδανικά.



2.7.6 Εξίσωση van der Waals

$$\left(P + \frac{a}{\bar{v}^2}\right)(\bar{v} - b) = R_u T$$

Ισχύει προσεγγιστικά για υγρά & αέρια (μη πολικά). Δεν ισχύει κοντά στο κρίσιμο σημείο. Όταν $\rho \rightarrow 0$ η εξίσωση συμπίπτει με την εξίσωση των ιδανικών αερίων

a: θετική σταθερά, εξαρτάται από τη φύση της ουσίας και ο αντίστοιχος όρος a/v^2 παριστάνει τη συνεισφορά των ελκτικών δυνάμεων του αερίου.

b: θετική σταθερά, εξαρτάται από τη φύση της ουσίας και παριστάνει τον όγκο που καταλαμβάνουν τα μόρια

Οι δυο σταθερές είναι συναρτήσεις των κρίσιμων παραμέτρων:

$$a = \frac{27R_u^2 T_c^2}{64P_c} \quad b = \frac{R_u T_c}{8P_c}$$

Η εξ. van der Waals μπορεί να γραφεί και ως:

$$P = \frac{R_u T}{\bar{v} - b} - \frac{a}{\bar{v}^2} \Rightarrow P\bar{v}^3 - (bP - R_u T)\bar{v}^2 + a\bar{v}^2 - ab = 0$$

$$\left(P_r + \frac{3}{\bar{v}_r^2}\right)\left(\bar{v}_r - \frac{1}{3}\right) = \frac{8}{3}T_r$$

$$z = 1 + \left(b - \frac{a}{R_u T}\right)\frac{1}{\bar{v}} + \frac{b^2}{\bar{v}^2} + \frac{b^3}{\bar{v}^3} + \dots$$

2.7.7 Εξίσωση Redlich-Kwong (RK)

$$P = \frac{R_u T}{(\bar{v}) - b} - \frac{a}{\bar{v}(\bar{v} + b)\sqrt{T}}$$

Οι δυο σταθερές είναι συναρτήσεις των κρίσιμων παραμέτρων:

$$a = 0.42748 \frac{R_u^2 T_c^{2.5}}{P_c} \quad b = 0.08664 \frac{R_u T_c}{P_c}$$

Ισχύει για μη πολικά υγρά & αέρια. Δεν ισχύει κοντά στο κρίσιμο σημείο. Αποτελεί τροποποίηση της εξ. Van der Waals ο όρος της συνεισφοράς των ελκτικών δυνάμεων είναι και συνάρτηση της θερμοκρασίας.

2.7.8 Εξίσωση Soave-Redlich-Kwong (SRK)

$$P = \frac{R_u T}{(\bar{v}) - b} - \frac{a(T_r, \omega)}{\bar{v}(\bar{v} + b)\sqrt{T}}$$

$$a = a_c[1 + m(1 - \sqrt{T_r})^2] \quad m = 0.48 + 0.1754\omega - 0.176\omega^2$$

Οι δυο σταθερές είναι συναρτήσεις των κρίσιμων παραμέτρων:

$$a_c = 0.42748 \frac{R_u^2 T_c^2}{P_c} \quad b = 0.08664 \frac{R_u T_c}{P_c}$$

Ιδανική για υπολογισμούς ισορροπίας φάσεων μη πολικών ουσιών (βλ. υδρογονάνθρακες). Δεν ισχύει κοντά στο κρίσιμο σημείο

2.7.9 Εξίσωση Peng-Robinson (PR)

$$P = \frac{R_u T}{(\bar{v}) - b} - \frac{a(T_r, \omega)}{\bar{v}(\bar{v} + b) + b(\bar{v} - b)}$$

$$a = a_c[1 + m(1 - \sqrt{T_r})^2] \quad m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$$

Οι δυο σταθερές είναι συναρτήσεις των κρίσιμων παραμέτρων:

$$a_c = 0.45724 \frac{R_u^2 T_c^2}{P_c} \quad b = 0.07780 \frac{R_u T_c}{P_c}$$

Αντίστοιχη της SRK.

2.7.10 Μη κυβικές καταστατικές εξισώσεις (non-cubic EOS)

Εξίσωση Beattie-Bridgeman (BB) - 5 παράμετροι

$$P = \frac{R_u T}{\bar{v}^2} \left(1 - \frac{c}{\bar{v} T^3}\right) (\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2}$$

$$A = A_0 \left(1 - \frac{a}{\bar{v}}\right) \quad B = B_0 \left(1 - \frac{b}{\bar{v}}\right)$$

Για πολικά και μη, υγρά & αέρια. Για $\rho < 0,8\rho_c$

Εξίσωση Benedict-Webb-Rubin (BWR) - 8 παράμετροι

$$P = \frac{R_u T}{\bar{v}^2} + \left(B_0 R_u T - A_0 - \frac{C_0}{T^2}\right) \frac{1}{\bar{v}^2} + \frac{b R_u T - \alpha}{\bar{v}^3} + \frac{\alpha \beta}{\bar{v}^6} + \frac{c}{\bar{v}^3 T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{\bar{v}^2}\right) \exp\{-\gamma/\bar{v}^2\}$$

Για πολικά και μη, υγρά & αέρια. Για $\rho < 2,5\rho_c$

2.7.11 Καταστατικές Εξισώσεις για Υγρά

Συσχέτιση ογκομετρικών ιδιοτήτων με συντελεστές β και k .

$$v = v_0[1 + \beta(T - T_0) - k(P - P_0)]$$

Για περιοχή όπου ο συντελεστής κυβικής διαστολής, β , και ο ισόθερμος συντελεστής συμπίεστικότητας, k , είναι σταθεροί.

Η σχέση δηλώνει ότι ο όγκος των υγρών αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας και μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της πίεσης.

Εξίσωση Daubert & Danner: $\rho = ab^{-[1+(1-T/c)^n]}$

Εξίσωση Rackett: $v_1 = \frac{RT_c}{P_c} z_R^{[1+(1-T/c)^{2/7}]}$

$$z_R = 0.29056 - 0.0877\omega$$

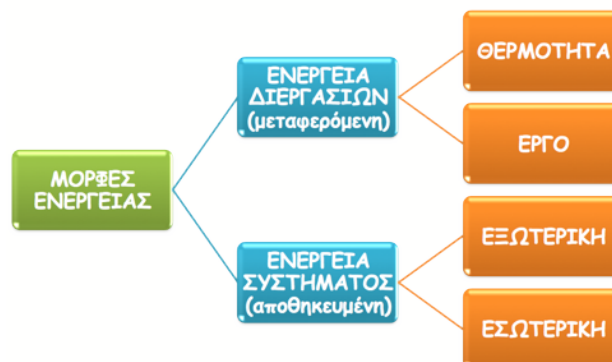
Για τον υπολογισμό του ειδικού όγκου του κορεσμένου υγρού

Κεφάλαιο 3

1ος νόμος της Θερμοδυναμικής - Κλειστά συστήματα

3.1 Μορφές ενέργειας

Ενέργεια: Η ικανότητα εξάσκησης δύναμης για την επίτευξη ενός αποτελέσματος ή την μεταβολή της κατάστασης του συστήματος



3.2 Θερμότητα, Q

ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ Q: Η μορφή ενέργειας που ανταλλάσσει το σύστημα με το περιβάλλον του λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.

- Μεταφερόμενη ενέργεια (όχι ενέργεια του συστήματος)
- Μη καταστατικό μέγεθος, δηλ. συνάρτηση διαδρομής

Συμβολισμός:

Θερμότητα	$Q = \int_1^2 \delta Q = Q_{1 \rightarrow 2} \quad [=] \quad \text{J}$
Θερμότητα ανά μονάδα μάζας	$q = \frac{Q}{m} \dots \quad [=] \quad \text{J/kg}$
Ρυθμός ροής θερμότητας	$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt} \dots \quad [=] \quad \text{W}$
Σύμβαση προσήμου:	



$$Q_{\text{net}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} = Q$$

3.3 Έργο

ΕΡΓΟ W: Η μορφή ενέργειας που ανταλλάσσει το σύστημα με το περιβάλλον κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, αν η μοναδική επίδραση σε καθετί εξωτερικό του συστήματος θα μπορούσε να είναι η ανύψωση βάρους.

- Μεταφερόμενη ενέργεια (όχι ενέργεια του συστήματος)
- Μη καταστατικό μέγεθος, δηλ. συνάρτηση διαδρομής

Συμβολισμός:

Έργο	$W = \int_1^2 \delta W = W_{1 \rightarrow 2} \quad [=] \quad \text{J}$
Έργο ανά μονάδα μάζας	$w = \frac{W}{m} \dots \quad [=] \quad \text{J/kg}$
Ρυθμός ροής έργου	$\dot{W} = \frac{\delta W}{dt} \dots \quad [=] \quad \text{W}$

Σύμβαση προσήμου:



$$W_{\text{net}} = W_{\text{out}} - W_{\text{in}} = W$$

Θερμότητα και έργο

- Η ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ και το ΕΡΓΟ δεν είναι ιδιότητες του συστήματος!

- Θερμότητα και έργο εμφανίζονται στα όρια του συστήματος καθώς το διαπερνούν, γιατί είναι Μηχανισμοί Μεταφοράς Ενέργειας
- Θερμότητα και έργο συνδέονται με διεργασίες και όχι καταστάσεις
- Θερμότητα και έργο δεν είναι σημειακές συναρτήσεις αλλά συναρτήσεις του τρόπου μετάβασης από τη μια κατάσταση στην άλλη.
- Θερμότητα και έργο δεν έχουν τέλεια διαφορικά.

$$\int_1^2 \delta Q = Q_{1 \rightarrow 2} \qquad \int_1^2 \delta W = W_{1 \rightarrow 2}$$

- Δηλ. τα ολοκληρώματα δεν ισούνται με $Q_2 - Q_1$ και $W_2 - W_1$ αντίστοιχα

Είδη έργου

- Μηχανικές μορφές έργου
 - ☐ Μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b
 - ☐ Βαρύτητας, W_g , Επιτάχυνσης, W_a
 - ☐ Αξονικό, ή ατράκτου, W_{sh}
 - ☐ Επιμήκυνσης ελατηρίου, W_{spring}
 - ☐ Ελαστικού εφελκυσμού, $W_{elastic}$
 - ☐ Επιφανειακής τάσης, $W_{surface}$
- Μη μηχανικές μορφές έργου
 - ☐ Ηλεκτρικό, W_e , Μαγνητικό, W_m
 - ☐ Ηλεκτρικής πόλωσης, W_{ep}

Γενικά $\delta W = F dl$, όπου F δύναμη και u μετατόπιση

Για αντιστρεπτές διεργασίες (διαδοχικές καταστάσεις ψευδοϊσορροπίας):

- F : γενικευμένη δύναμη - εντατική ιδιότητα
- l : γενικευμένη μετατόπιση - εκτατική ιδιότητα
- Η τιμή της F εξαρτάται μόνο από την κατάσταση του συστήματος και είναι ανεξάρτητη της l , η οποία μπορεί να είναι θετική ή αρνητική.
- Θεωρητικά το σύστημα μπορεί να επανέλθει στην αρχική κατάσταση με αντιστροφή της κατεύθυνσης της αρχικής διεργασίας.
- Σε ένα διάγραμμα $F - l$, το έργο είναι ανάλογο της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη της διεργασίας. Για τα PvT συστήματα το έργο είναι θετικό όταν $dl > 0$ και αρνητικό όταν $dl < 0$. Το αντίστροφο ισχύει για τα υπόλοιπα συστήματα.

Για μη αντιστρεπτές διεργασίες :

- Η τιμή της F εξαρτάται από το ρυθμό μεταβολής της κατάστασης του συστήματος και $F \rightarrow 0$ όταν ο ρυθμός μεταβολής τείνει στο μηδέν (άρα και το $W \rightarrow 0$)
- Το έργο δεν εξαρτάται από την κατεύθυνση της διεργασίας και το σύστημα δεν μπορεί να επανέλθει στην αρχική κατάσταση με αντιστροφή της κατεύθυνσης της αρχικής διεργασίας
- Ο υπολογισμός του έργου δε σχετίζεται με τις ιδιότητες του συστήματος αλλά βασίζεται σε μεγέθη που μετρικούνται στις ΟΕ του συστήματος.

3.3.1 Έργο μετατόπισης ΟΕ ή ογκομεταβολής, W_b

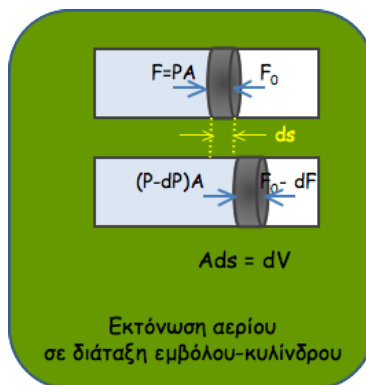
Το έργο που εκτελείται κατά τη μεταβολή του όγκου του συστήματος (αέριο ή υγρό), λόγω εκτόνωσης ή συμπίεσης.

$$\delta W_b = Fdl = P(Adl) = PdV$$

P η απόλυτη πίεση εντός του συστήματος, A η επιφάνεια του εμβόλου και V ο όγκος του συστήματος

Ισχύει για:

- (α) κλειστό σύστημα
- (β) απλό συμπίεστο
- (γ) αντιστρεπτή διεργασία



Εκτόνωση: $V_2 > V_1 \Rightarrow dV > 0$ άρα $W_{1 \rightarrow 2} > 0$

Το σύστημα **παράγει** έργο

Συμπίεση: $V_2 < V_1 \Rightarrow dV < 0$ άρα $W_{1 \rightarrow 2} < 0$

Το σύστημα **καταναλώνει** έργο

Το έργο ισούται με το εμβαδό της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη PV

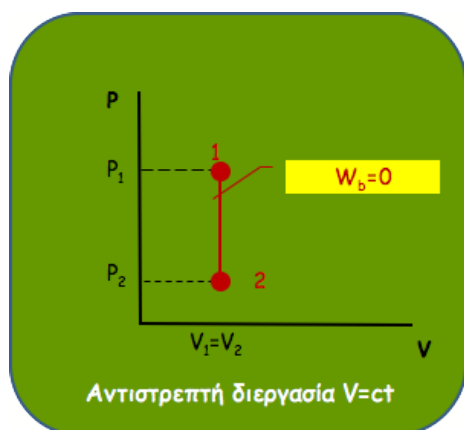
Μονάδες: $W_b [=] \text{ kJ} = \text{ kPa} \cdot \text{m}^3$



Ειδικές περιπτώσεις:

Α. Αντιστρεπτή διεργασία σταθερού όγκου (ισόχωρη): $dV = 0$

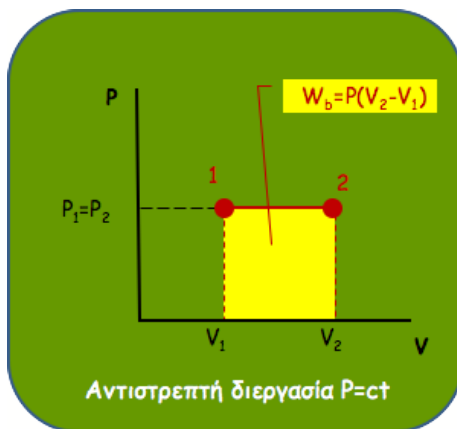
$$W_b = W_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 P dV = 0$$



Β. Αντιστρεπτή διεργασία σταθερής πίεσης (ισοβαρής) : $P = ct$

$$W_b = W_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 P dV = P \int_1^2 dV = P(V_2 - V_1)$$

$$\text{Ανά μονάδα μάζας (εφόσον } V = mv) \quad w_b = \frac{P(V_2 - V_1)}{m} = P(v_2 - v_1)$$



Γ. Αντιστρεπτή διεργασία σταθερής θερμοκρασίας (ισόθερμη) ιδανικών αερίων

$$PV = mRT = C \Rightarrow P = mRT/V \quad P_1 V_1 = P_2 V_2 \Rightarrow P_1/P_2 = V_2/V_1$$

$$W_b = W_{1-2} = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{mRT}{V} dV$$

$$W_b = mRT \int_1^2 \frac{dV}{V} = mRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \Rightarrow W_b = P_1 V_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = P_1 V_1 \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$



Δ. Αντιστρεπτή πολυτροπική διεργασία

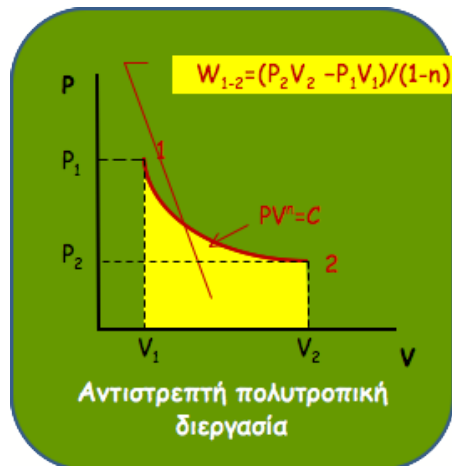
$$PV^n = C \Rightarrow P = C/V^n \text{ όπου } n \neq 1$$

$$W_b = W_{1-2} = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{C}{V^n} dV$$

$$W_b = C \int_1^2 \frac{dV}{V^n} = C \frac{V_2^{n-1} - V_1^{n-1}}{n-1} = \frac{P_1 V_2 - P_1 V_1}{1-n}$$

Για ιδανικό αέριο: $PV = mRT$

$$W_b = mR \frac{T_2 - T_1}{1 - n}$$



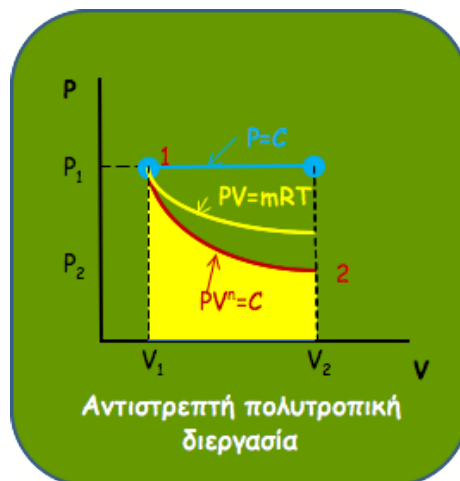
Ε. Σύγκριση διεργασιών (Β,Γ,Δ) για ιδανικά αέρια $PV^n = C$:

Για $n=0$, $P=C$ (ισοβαρή) : $W^\beta = P_1(V_2 - V_1)$

Για $n=1$, $PV=mRT=C$ (ισόθερμη) : $W^\gamma = P_1 V_1 \ln(V_2/V_1)$

Για $n>1$, $PV^n = C$: $W^\delta = (P_2 V_2 - P_1 V_1)/(1 - n)$

Προκύπτει ότι: $W^\beta > W^\gamma > W^\delta$



Παραδείγματα

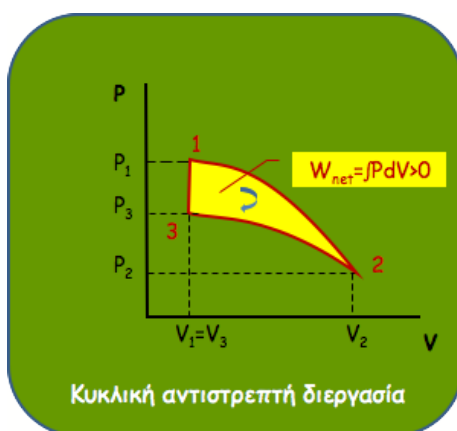
3.1. Αέριο περιέχεται σε μια διάταξη εμβόλου-κυλίνδρου και εκτονώνεται αντιστρεπτά έτσι ώστε να ισχύει η σχέση $PV^n = C$. Η αρχική πίεση είναι $P_1=600$ kPa, ο αρχικός όγκος $V_1 = 0,04$ m³ και ο τελικός όγκος $V_2 = 0,12$ m³. Να υπολογιστεί το έργο που εκτελεί το αέριο κατά την εκτόνωσή του από την κατάσταση 1 ως την κατάσταση 2 αν ο εκθέτης n πάρει τις τιμές (α) 0, (β) 1 και (γ) 1,5.

ΣΤ. Κυκλική αντιστρεπτή διεργασία:

$$W_{net} = W_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1} = W_{1 \rightarrow 2} + W_{2 \rightarrow 3} + W_{3 \rightarrow 1}$$

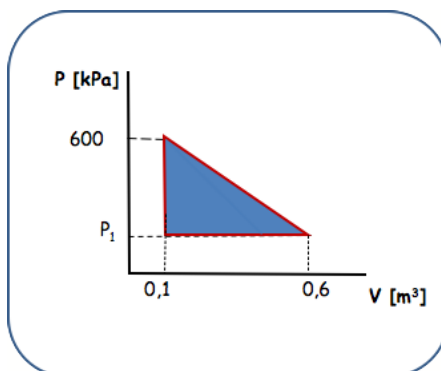
$$W_{net} = \oint P dV$$

1. Το καθαρό έργο ενός κύκλου παριστάνεται από το εμβαδό της επιφάνειας που περι-
κλείεται από τις καμπύλες των διεργασιών.
2. Δεξιόστροφη φορά διαγραφής κύκλου σημαίνει θετικό καθαρό έργο (παραγωγή) κι
αριστερόστροφη αρνητικό καθαρό έργο (κατανάλωση)
3. Το καθαρό έργο δεν είναι μηδέν.



3.2 Ένα κλειστό σύστημα υφίσταται την κυκλική διεργασία που φαίνεται στο σχήμα. Το καθαρό έργο στο σύστημα κατά τη διάρκεια 5 κύκλων είναι 500 kJ.

- (α) Ποια είναι η φορά διαγραφής του κύκλου;
- (β) Ποια είναι η τιμή της πίεσης P_1 ;



Ζ. Μη κυκλική αντιστρεπτή διεργασία: $\delta W = F_0 dl = P_0 Adl = P_0 dV$

1. Αντί της πίεσης του συστήματος P θεωρείται η πίεση $P_0 = F_0/A$ στην ΟΕ λόγω της
εξωτερικής δύναμης F_0
2. Απαιτείται η γνώση της μεταβολής της P_0 ή της F_0 κατά τη διεργασία
3. Το εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη δεν έχει φυσική σημασία



3.3.2 Έργο βαρύτητας, W_g

Έργο βαρύτητας, W_g , καλείται το έργο που εκτελείται από ή ενάντια στη δύναμη του πεδίου βαρύτητας.

m : η μάζα του συστήματος, g : η επιτάχυνση της βαρύτητας, dz : η κατακόρυφη απόσταση που διανύθηκε.

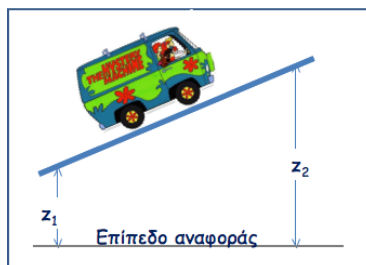
$$W_g = W_{1-2} = \int_1^2 mgdz = mg(z_2 - z_1)$$

Το W_g εξαρτάται μόνο από την τελική και αρχική κατάσταση (ανεξάρτητο της διαδρομής) και είναι ίσο με τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας του συστήματος.

$$\delta W_g = Fdu = mgdz$$

3.3. Ένας γερανός Α χρειάζεται 20 δευτερόλεπτα για την ανύψωση βάρους 100 kg σε ύψος 20 m ενώ ο γερανός Β χρειάζεται 15 δευτερόλεπτα για την ίδια ακριβώς εργασία. Το έργο που παράγει ο γερανός Α, W_A , σε σύγκριση με το έργο που παράγει ο γερανός Β, W_B , είναι:

- (α) $W_A < W_B$
- (β) $W_A > W_B$
- (γ) $W_A = W_B$



3.4. Ένα αυτοκίνητο μάζας 900 kg κινείται σε επίπεδο δρόμο με σταθερή ταχύτητα 80 km/h. Στη συνέχεια, το αυτοκίνητο αρχίζει να ανεβαίνει σε λόφο με κλίση 30° . Ποια είναι η επιπλέον ισχύς που θα πρέπει να αποδώσει η μηχανή του αυτοκινήτου για να διατηρηθεί σταθερή η ταχύτητά του;

3.3.3 Έργο επιτάχυνσης, W_a

Έργο επιτάχυνσης, W_a , καλείται το έργο που συνδέεται με τη μεταβολή της ταχύτητας του συστήματος.

$$\delta W_a = F du = ma du$$

m : η μάζα του συστήματος

$a = dV/dt$: η επιτάχυνση του συστήματος

$du = V/dt$: η απόσταση που διανύθηκε

V η ταχύτητα του συστήματος

$$W_a = W_{1-2} = \int_1^2 ma du = \int_1^2 m \frac{dV}{dt} V dt = m \int_1^2 V dV = \frac{1}{2} m (V_2^2 - V_1^2)$$

Το W_a εξαρτάται μόνο από την τελική και αρχική κατάσταση (ανεξάρτητο της διαδρομής) και είναι ίσο με τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας του συστήματος.

3.5. Ένα αυτοκίνητο Α μάζας 900 kg χρειάζεται 10 δευτερόλεπτα για την επιτάχυνσή του από πλήρη ηρεμία σε ταχύτητα 80 km/h. Αν η επιτάχυνση συνέβαινε σε 5 δευτερόλεπτα, ποια θα ήταν η επίπτωση στο έργο που απαιτείται;

(α) Θα ήταν μεγαλύτερο

(β) Θα ήταν μικρότερο

(γ) Θα ήταν ίδιο.

3.6. Να υπολογιστεί η ισχύς που απαιτείται για την επιτάχυνση ενός αυτοκινήτου μάζας 900 kg από την πλήρη ηρεμία σε ταχύτητα 80 km/h σε 10 δευτερόλεπτα, όταν κινείται σε επίπεδο δρόμο.

3.3.4 Έργο επιμήκυνσης ελαστικού ελατηρίου, W_{spring}

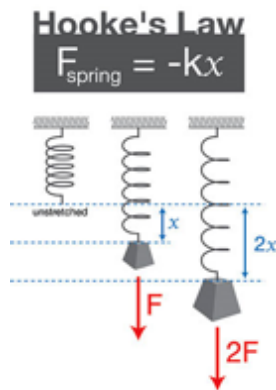
Έργο επιμήκυνσης ελαστικού ελατηρίου, W_{spring} καλείται το έργο που απαιτείται για την επιμήκυνση του ελατηρίου.

$$\delta W_{spring} = F dx$$

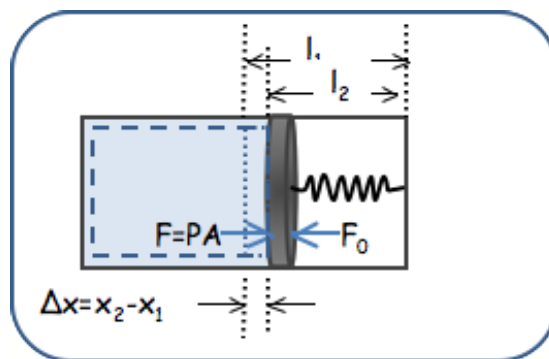
$F = -kx$ (νόμος του Hooke) η δύναμη που εφαρμόζεται στο ελατήριο με k τη σταθερά του ελατηρίου [N.m] και x τη μετατόπιση του ελατηρίου από τη θέση ηρεμίας [m].

$$W_{spring} = \int_1^2 F dx = -k \int_1^2 x dx = -\frac{k}{2} (x_2^2 - x_1^2)$$

Το αρνητικό πρόσημο χρησιμοποιείται γιατί το έργο που εκτελεί το περιβάλλον στο ελατήριο (σύστημα) είναι αρνητικό όταν το dx είναι θετικό (επιμήκυνση).



3.7. Ένα κλειστό κυλινδρικό δοχείο χωρίζεται σε δύο ίσα μέρη από ένα έμβολο αμελητέου βάρους και διατομής $A=0,03 \text{ m}^2$. Το αριστερό τμήμα περιέχει άζωτο σε πίεση $P_1=200 \text{ kPa}$, ενώ το δεξιό τμήμα περιέχει ένα ελαστικό ελατήριο σε κενό. Η σταθερά του ελατηρίου είναι $k=40 \text{ kN/m}$. Το άζωτο θερμαίνεται με αργό ρυθμό έως ότου η πίεσή του ανέλθει σε $P_2= 600 \text{ kPa}$. Να υπολογιστούν: (α) η μεταβολή του όγκου του αζώτου και (β) το έργο ογκομεταβολής που εκτελείται από το άζωτο.



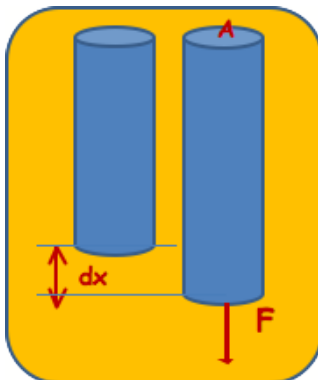
3.3.5 Έργο Εφελκυσμού ελαστικής ράβδου, $W_{elastic}$

Έργο εφελκυσμού ελαστικής ράβδου, $W_{elastic}$, καλείται το έργο που απαιτείται για την επιμήκυνση ράβδου διατομής A .

$$\delta W_{elastic} = \sigma_n dV = \sigma_n A dx$$

$\sigma_n = F/A$ η τάση κάθετη στη διατομή της ράβδου που εφαρμόζεται (αντίστοιχη της πίεσης στα αέρια) [Pa]

$$W_{elastic} = \int_1^2 \sigma_n dV = \int_1^2 \sigma_n A dx$$



3.3.6 Έργο Αξονικό ή ατράκτου, W_{sh}

Έργο ατράκτου, W_{sh} , καλείται το έργο που μεταφέρεται με την περιστροφή μιας ατράκτου (άξονα).

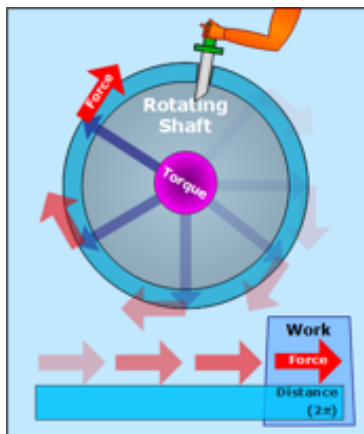
$$\delta W_{sh} = F du = \frac{\tau}{R} R d\theta = \tau d\theta$$

τ η ροπή που εφαρμόζεται στην άτρακτο, R ο βραχίονας ροπής της ατράκτου, θ η γωνία που περιστράφηκε ο άξονας.

Έστω dt το χρονικό διάστημα στο οποίο πραγματοποιείται η περιστροφή κατά γωνία θ . Διαιρώντας το έργο με dt προκύπτει η ισχύς που μεταφέρεται δια μέσω της ατράκτου:

$$\dot{W}_{sh} = \tau \omega = 2\pi n \tau$$

$\omega = d\theta/dt$ είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και n η συχνότητα περιστροφής (αριθμός στροφών του άξονα ανά λεπτό, rpm)



3.3.7 Ηλεκτρικό έργο, $W_{electric}$

Ηλεκτρικό έργο ονομάζεται το έργο που απαιτείται για να κινήσει ένα μικρό ποσό ηλεκτρικού φορτίου δQ_e , μεταξύ δύο σημείων σε ένα ηλεκτρικό πεδίο.

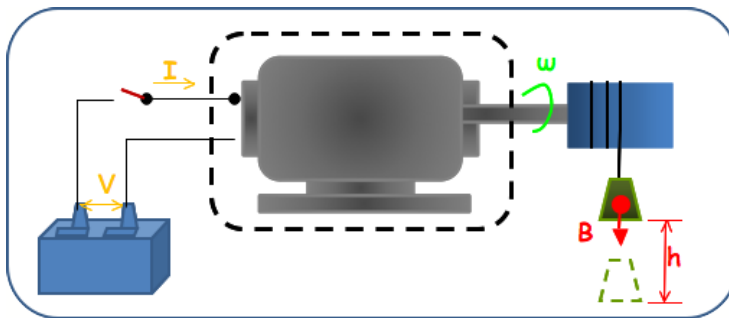
$$\delta W = V dQ_e$$

Διαίρεση με dt δίνει την ηλεκτρική ισχύ:

$$\dot{W} = \frac{\delta W}{dt} = V \frac{dQ_e}{dt} = VI$$

με I την ένταση του ρεύματος [σε Ampere].

3.8. Μια μπαταρία τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια τον κινητήρα, στον άξονα του οποίου είναι προσαρμωμένο ένα βαρούλκο, το οποίο χρησιμοποιείται για την ανύψωση σώματος μάζας 40 kg. Η τάση της μπαταρίας είναι 12 V και η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το ηλεκτρικό κύκλωμα 7 A. Ο άξονας του κινητήρα περιστρέφεται με ταχύτητα 180 rpm υπό την επίδραση σταθερής ροπής 4 N.m. Να υπολογιστούν: (α) η καθαρή ισχύς που εισέρχεται στον κινητήρα και (β) το ύψος h στο οποίο ανυψώνεται το σώμα, αν η λειτουργία του κινητήρα διαρκεί 20 s.



3.4 Εξωτερικές μορφές ενέργειας

- Μακροσκοπική μορφή ενέργειας που κατέχει το σύστημα ως σύνολο.
- Ανεξάρτητη από τη μοριακή δομή του συστήματος (μηχανικές, εκτατικές ιδιότητες)
- Η τιμή της καθορίζεται από εξωτερικό σύστημα αναφοράς (αυθαίρετη επιλογή).

Κινητική μορφή ενέργειας, E_k (kinetic energy)

Έργο Επιτάχυνσης, W_a

Δυναμική μορφή ενέργειας, E_p (potential energy)

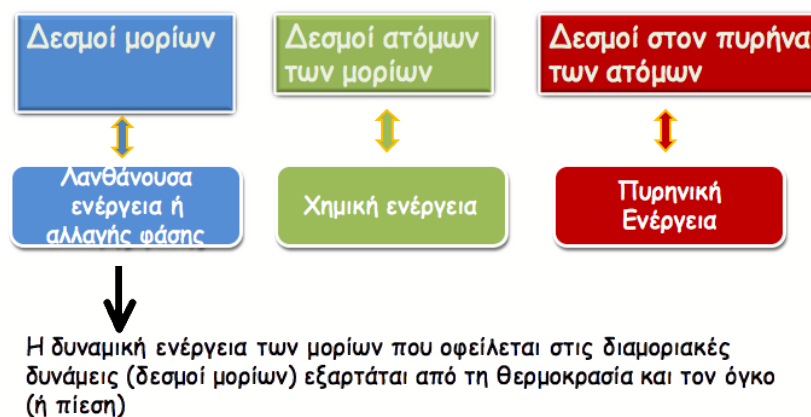
Έργο Βαρύτητας, W_g

3.5 Εσωτερικές μορφές ενέργειας

Εσωτερική ενέργεια (μικροσκοπική, U): Άθροισμα των μικροσκοπικών μορφών ενέργειας του συστήματος. Συνδέεται με τη μοριακή δομή και την κινητικότητα των μορίων.



Η κινητική ενέργεια των μορίων εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και αυξάνεται με την αύξηση αυτής



Απουσία χημικών και πυρηνικών αντιδράσεων :

$$U = (E_{\text{κινητική}} + E_{\text{δυναμική}})_{\text{μορίων}} = f(T, P)$$

Συμβολισμός:

Εσωτερική ενέργεια: U [=] J

Ειδική εσωτερική ενέργεια: $u = \frac{U}{m}$ [=] J/kg

Γραμμομοριακή εσωτερική ενέργεια: $\bar{u} = \frac{U}{n}$ [=] J/mol

Εσωτερική ενέργεια: Ειδικές περιπτώσεις

Εσωτερική ενέργεια ιδανικού αερίου

Οι διαμοριακές δυνάμεις στην περίπτωση ιδανικού αερίου είναι μηδενικές και επομένως η εσωτερική ενέργειά του εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία.

$$u^{ig} = e_{\text{κινητική μορίων}} = f(T)$$

Άρα και η μεταβολή της ειδικής εσωτερικής ενέργειας I.A. που προέρχεται είτε από μεταβολή όγκου ή πίεσης υπό σταθερή θερμοκρασία είναι μηδενική.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial V}\right)_T = 0 \quad \left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_T = 0$$

Εσωτερική ενέργεια ασυμπίεστης ουσίας

Ασυμπίεστη ουσία θεωρείται αυτή που ο όγκος της (ή πυκνότητα) είναι σταθερός (συνήθως αναφερόμαστε σε υγρά και στερεά ως ασυμπίεστες ουσίες). Επομένως, η εσωτερική ενέργειά της εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία.

$$u = f(T)$$

3.6 Ενθαλπία, H

Η ενθαλπία ορίζεται ως άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας U και του γινομένου της πίεσης P επί τον όγκο V:

$$H = U + PV = f(P, T)$$

Η ενθαλπία είναι εκτατική ιδιότητα του συστήματος, αλλά δεν είναι αποθηκευμένη μορφή ενέργειας μια και το γινόμενο PV παριστά ενέργεια μόνο στις διεργασίες ροής!

Συμβολισμός:

Ενθαλπία: H [=] J

Ειδική ενθαλπία: $h = \frac{H}{m}$ [=] J/kg

Γραμμομοριακή ενθαλπία: $\bar{h} = \frac{H}{n}$ [=] J/mol

Ενθαλπία: Ειδικές περιπτώσεις

Ενθαλπία ιδανικού αερίου

Η εσωτερική ενέργεια **ιδανικού αερίου** εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία αλλά και το γινόμενο $PV = nRT$ οπότε και η ενθαλπία ιδανικού αερίου εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία.

$$h^{ig} = f(T)$$

Άρα και : Η μεταβολή της ειδικής ενθαλπίας I.A. που προέρχεται είτε από μεταβολή όγκου ή πίεσης υπό σταθερή θερμοκρασία είναι μηδενική.

$$\left(\frac{\partial h}{\partial V}\right)_T = 0 \quad \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T = 0$$

Ενθαλπία ασυμπίεστης ουσίας

Παρ' ότι ο ειδικός όγκος της ουσίας παραμένει σταθερός και η εσωτερική ενέργειά της εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία, η ενθαλπία της ασυμπίεστης ουσίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία αλλά και από την πίεση.

$$h = f(T, P) = u(T) + Pv$$

3.7 Ειδικές θερμότητες (θερμοχωρητικότητα), c_V και c_P

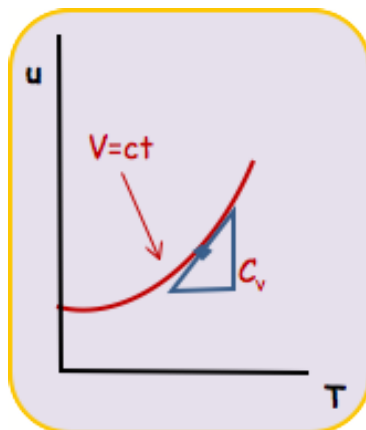
Η ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο εκφράζει τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας της μονάδας μάζας της ουσίας που προέρχεται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας της υπό σταθερό όγκο και ορίζεται από τη σχέση:

$$c_V = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_V \quad [=] \quad \text{J}/(\text{kg.K})$$

Αντίστοιχα, η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{c}_V = \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial T} \right)_V \quad [=] \quad \text{J}/(\text{mol.K})$$

Η ειδική και η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο σχετίζονται βάσει :

$$\bar{c}_V = M_r c_V$$


Η ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση εκφράζει τη μεταβολή της ενθαλπίας της μονάδας μάζας της ουσίας που προέρχεται από τη μεταβολή της πίεσης της υπό σταθερό όγκο και ορίζεται από τη σχέση:

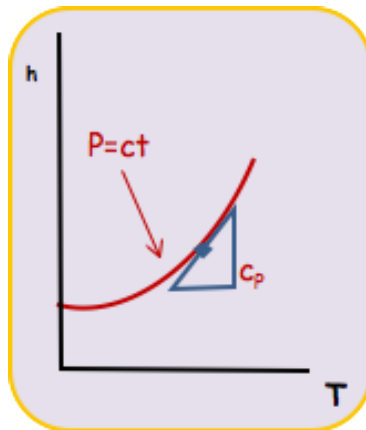
$$c_P = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P \quad [=] \quad \text{J}/(\text{kg.K})$$

Αντίστοιχα, η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{c}_P = \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial T} \right)_P \quad [=] \quad \text{J}/(\text{mol.K})$$

Η ειδική και η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο σχετίζονται βάσει :

$$\bar{c}_P = M_r c_P$$

**Ειδικές περιπτώσεις, c_P , c_V**

Οι ειδικές θερμότητες ιδανικού αερίου εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία

$$c_V^{ig} = f(T) \quad c_P^{ig} = f(T)$$

$$c_V^{ig} = \frac{du}{dT} \quad c_P^{ig} = \frac{dh}{dT}$$

Επίσης για ιδανικό αέριο:

$$h = u + Pv = u + RT \Rightarrow dh = du + RdT \Rightarrow c_P - c_V = R$$

$$\gamma = \frac{c_P}{c_V} > 1 \Rightarrow c_V = \frac{R}{\gamma - 1} \quad c_P = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$$

Οι ειδικές θερμότητες πραγματικού αερίου σε κατάσταση τελείου αερίου

Κατάσταση τελείου αερίου: Πραγματικό αέριο σε χαμηλή πίεση και οποιαδήποτε θερμοκρασία:

$$c_V = f(T) \quad c_P = f(T)$$

συνήθως: $\bar{c}_P = a + bT + cT^2 + dT^3$

3.9. Ποια είναι η μεταβολή της ενθαλπίας 10 mol προπανίου κατά τη θέρμανσή του από τους 200 °C στους 1200 °C σε ατμοσφαιρική πίεση; Για το προπάνιο δίνεται $c_P = a + bT + cT^2 + dT^3$, όπου T σε K και c_P σε kJ/kmol K, και οι τιμές των συντελεστών είναι $a = -4.04$ kJ/kmol K, $b = 30.48 \cdot 10^{-2}$ kJ/kmol K², $c = -15.72 \cdot 10^{-5}$ kJ/kmol K³, $d = 31.74 \cdot 10^{-9}$ kJ/kmol K⁴ (Πίνακας A-2, σελ. 1241).

Οι ειδικές θερμότητες πραγματικού αερίου σε κατάσταση τελείου αερίου

(Μέσες Ειδικές θερμότητες $c_{P,av}$, $c_{V,av}$)

Για μεγάλη $\Delta T = T_2 - T_1$:

$$c_{V,av} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_1^2 c_V dT \quad c_{P,av} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_1^2 c_P dT$$

Για μικρή $\Delta T = T_2 - T_1$:

$$T_{av} = \frac{T_2 + T_1}{2} \Rightarrow c_{V,av} = c_V(T_{av}) \quad c_{P,av} = c_P(T_{av})$$

3.10. Ένα κλειστό δοχείο σταθερού όγκου $0,35 \text{ m}^3$ περιέχει $0,9 \text{ kg}$ ενός αερίου σε πίεση 150 kPa και θερμοκρασία 280 K . Το αέριο θερμαίνεται έως ότου η θερμοκρασία του φτάσει στους 330 K . Η διεργασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενθαλπίας του αερίου κατά $23,4 \text{ kJ}$. Το αέριο μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρεται ως ιδανικό. Να υπολογιστούν οι ειδικές θερμότητες του αερίου αν η μεταβολή τους στη δοθείσα θερμοκρασιακή περιοχή είναι αμελητέα και το μοριακό βάρος του αερίου.

Ειδικές θερμότητες Ασυμπίεστης ουσίας (υγρό, στερεά)

Επειδή η εσωτερική ενέργεια της ασυμπίεστης ουσίας εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία, συνάγεται ότι:

$$c_V = \frac{du}{dT}$$

Σύμφωνα με τον ορισμό της ειδικής θερμότητας υπό σταθερή πίεση, για ασυμπίεστη ουσία, ήτοι $v = \text{σταθερό}$, προκύπτει ότι:

$$c_P = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P = \frac{\partial}{\partial T} [u(T) + PV]_P = \frac{du}{dT}$$

$$\Rightarrow c_V = c_P = c(T)$$

Ειδικές θερμότητες ασυμπίεστης ουσίας (υγρό, στερεά) και μεταβολές εσωτερικής ενέργειας και ενθαλπίας.

$$\text{Εφόσον} \quad c_V = c_P = c(T) = \frac{du}{dT}$$

$$\Rightarrow du = c(T)dT \Rightarrow \Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c(T)dT$$

Σε μικρά θερμοκρασιακά διαστήματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή της C στη μέση θερμοκρασία T_{av} και να θεωρηθεί σταθερή σε όλο το θερμοκρασιακό διάστημα:

$$\Delta u = u_2 - u_1 \approx c_{av}(T_2 - T_1)$$

Εφόσον

$$h = u + Pv \Rightarrow dh = du + Pdv + v dP \quad \text{και για} \quad v = ct \Rightarrow dv = 0$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \Delta u + v \Delta P \approx c_{av}(T) \Delta T + v \Delta P$$

Για στερεά συνήθως: $v \Delta P \approx 0$, οπότε: $\Delta h = \Delta u \approx c_{av}(T_2 - T_1)$

Για υγρά, αν $P = \text{σταθερή}$, τότε: $v = 0$, οπότε: $\Delta h = \Delta u \approx c_{av}(T_2 - T_1)$

Για υγρά, αν $T = \text{σταθερή}$, τότε: $c_{av} \Delta T = 0$ οπότε: $\Delta h = v \Delta P$

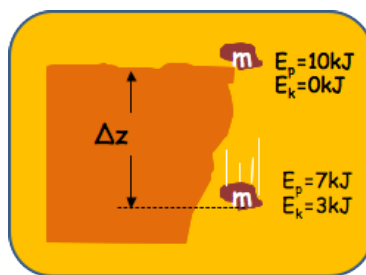
3.8 Ο πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής

ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ – Αρχή διατήρησης της ενέργειας :

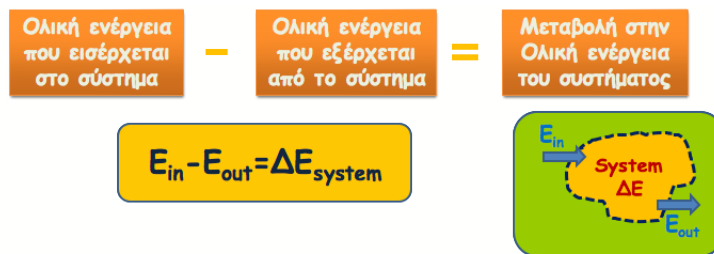
Η Ενέργεια μπορεί να μεταβάλλεται από τη μια μορφή σε άλλη αλλά το συνολικό ποσό της παραμένει σταθερό

Η Ενέργεια ΔΕΝ δημιουργείται ΟΥΤΕ καταστρέφεται!!!!

Όταν ένα κλειστό σύστημα μεταβεί αδιαβατικά από μια κατάσταση 1 σε μια κατάσταση 2 τότε η μόνη ενεργειακή εναλλαγή με το περιβάλλον θα είναι το έργο, το οποίο είναι ανεξάρτητο από τον τρόπο μεταβολής και τη φύση του συστήματος.

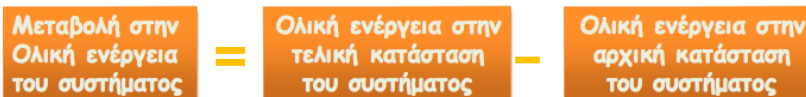


Η συνολική (καθαρή) μεταβολή (αύξηση ή μείωση) της ολικής ενέργειας ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας είναι ίση με τη διαφορά ανάμεσα στην ολική ενέργεια που εισέρχεται και στην ολική ενέργεια που εξέρχεται από αυτό.



Μακροσκοπική μορφή 1ου Θ.Ν. που ισχύει για όλα τα συστήματα.

Ισοζύγιο Ενέργειας: α) Μεταβολή της ενέργειας του συστήματος



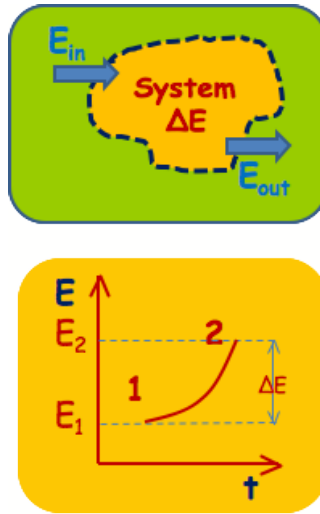
Μακροσκοπική μορφή 1ου Θ.Ν. που ισχύει για όλα τα συστήματα.

$$\Delta E_{system} = E_{final} - E_{initial} = E_2 - E_1$$

Ισχύει απουσία ηλεκτροστατικής, μαγνητικής και επιφανειακής ενέργειας του συστήματος:

$$\Delta E_{system} = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$dE_{system} = dU + dE_k + dE_p$$



3.8.1 Μεταβολή της ενέργειας του συστήματος

$$\Delta E_{system} = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$\Delta E_{system} = \Delta(mu) + \frac{1}{2}\Delta(mV^2) + \Delta(mgz)$$

Και για σταθερή μάζα (κλειστά συστήματα ή ανοικτά σταθεροποιημένης ροής, δηλ. σε μόνιμη κατάσταση):

$$\Delta E_{system} = m [\Delta u + \Delta V^2 + \Delta(gz)] = m \left[(u_2 - u_1) + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1) \right]$$

β) Μηχανισμοί μεταφοράς ενέργειας στο σύστημα

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system}$$

Τα E_{in} και E_{out} αντιπροσωπεύουν τις μορφές ενέργειας που περνούν από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος, και μπορεί να είναι:

Θερμότητα (Q_{in} & Q_{out})

Έργο (W_{in} & W_{out})

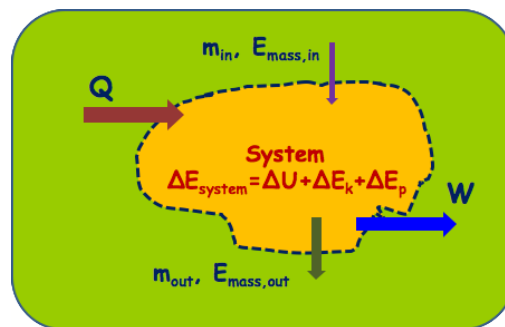
Ενέργεια μάζας ($E_{mass,in}$ & $E_{mass,out}$)

$$E_{in} - E_{out} = (Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) + (E_{mass,in} - E_{mass,out}) = \Delta E_{system}$$

Αυτή είναι η μακροσκοπική μορφή 1ου Θ.Ν. που ισχύει για όλα τα συστήματα.

3.8.2 Ισοζύγιο ενέργειας

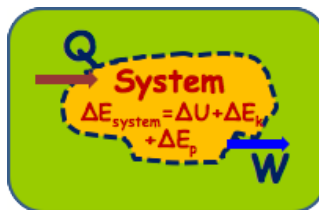
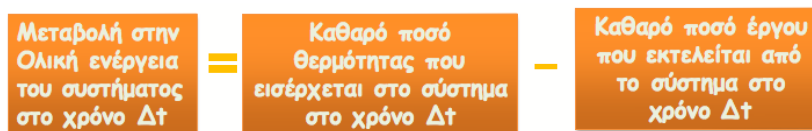
$$E_{in} - E_{out} = Q - W + (E_{mass,in} - E_{mass,out}) = \Delta E_{system}$$



Κλειστά συστήματα $\Delta E_{system} = Q - W$

Στα κλειστά συστήματα δεν γίνεται ανταλλαγή μάζας με το περιβάλλον, άρα $m_{in} = m_{out} = 0$ και συνεπώς $E_{mass,in} = E_{mass,out} = 0$

Η θερμότητα και το έργο είναι οι μόνες μορφές ενέργειας που μεταφέρονται διαμέσου των ορίων του κλειστού συστήματος.



3.8.3 Διάφορες εκφράσεις του 1ου Θερμοδυναμικού νόμου

- Διαφορική μορφή $dE_{system} = \delta Q - \delta W$

Παρότι η θερμότητα και το έργο είναι μη τέλεια διαφορικά, η διαφορά τους, δηλ. το dE είναι τέλει διαφορικό κι άρα εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση

- Ως προς ρυθμούς μεταφοράς ή μεταβολής ενέργειας:

$$\text{Για } dt \rightarrow 0 \quad \left(\frac{dE}{dt} \right)_{system} = \dot{E}_{system} = \dot{Q} - \dot{W}$$

- Ως προς τη μάζα του συστήματος:

$$de_{system} = \delta q - \delta w \Rightarrow \Delta e_{system} = q - w$$

$$e = E/m, q = Q/m, w = W/m$$

3.8.4 ΓΕΝΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ του 1ου Θερμοδυναμικού νόμου

- Απουσία ηλεκτροστατικής, μαγνητικής και επιφανειακής ενέργειας του συστήματος :

$$dE_{system} = dU + dE_k + dE_p = \delta Q - \delta W$$

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q - W$$

$$(U_2 - U_1) + 0.5m(V_2^2 - V_1^2) + mg(z_2 - z_1) = Q - W$$

- Ακίνητο σύστημα ή κινούμενο με αμελητέες μεταβολές κινητικής και δυναμικής ενέργειας:

$$dE_k = dE_p = 0$$

$$dE_{system} = dU = \delta Q - \delta W$$

$$\Delta U_{system} = U_2 - U_1 = Q - W$$

Κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας που υφίσταται ένα ακίνητο κλειστό σύστημα, η μεταβολή της ολικής ενέργειας του συστήματος λόγω μεταφοράς θερμότητας και έργου ισούται με τη μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας.

- Ακίνητο σύστημα ή κινούμενο με αμελητέες μεταβολές κινητικής και δυναμικής ενέργειας:

$$\Delta U_{system} = U_2 - U_1 = Q - W$$

Αντιστρεπτές διεργασίες και $W = W_b$:

Όταν $V = ct$ άρα $W = 0 \Rightarrow \Delta U_{system} = U_2 - U_1 = Q$

Όταν $P = ct$ άρα $W = P\Delta V \Rightarrow \Delta U_{system} = Q - P\Delta V$

$$\Rightarrow \Delta U_{system} + P\Delta V = Q \Rightarrow \Delta H_{system} = H_2 - H_1 = Q$$

3.11 Κάθε γραμμή του παρακάτω πίνακα δίνει μέρος των πληροφοριών για μια διεργασία κλειστού, στατικού συστήματος Σ από την αρχική κατάσταση 1 στην τελική κατάσταση 2. Να συμπληρωθούν τα κενά του πίνακα.

	Q (kJ)	W (kJ)	U1 (kJ)	U2 (kJ)	ΔU (kJ)
a	Το Σ δίνει 15			20	10
b		Το Σ δίνει 60	30		-40
c	Το Σ παίρνει 50		60	35	

3.12 Αέριο παγιδευμένο σε μια διάταξη εμβόλου-κυλίνδρου υπόκειται στις ακόλουθες ενεργειακές ανταλλαγές για 30 s: μιας ηλεκτρικής αντίστασης την οποία διαρρέει ρεύμα 0,1 A από μια πηγή 100 V, ενός αναδευτήρα που στρέφεται με 60 rpm όταν η ροπή είναι 5 N.m και ενός κεριού που του δίνει 1 kJ θερμότητας. Ο όγκος του αερίου αυξάνεται κατά 6L στη διάρκεια της διεργασίας. Αν η ατμοσφαιρική πίεση είναι 100 kPa και το βάρος του εμβόλου θεωρηθεί αμελητέο να υπολογιστεί η καθαρή μεταφορά ενέργειας στο σύστημα.

3.8.5 ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ του 1ου Θερμοδυναμικού νόμου

1. Κυκλικές διεργασίες : $\oint \delta Q = \oint \delta W$

Κατά τη διάρκεια μιας κυκλικής διεργασίας που υφίσταται ένα κλειστό σύστημα, το καθαρό ποσό θερμότητας που εισέρχεται ή εξέρχεται από το σύστημα είναι ίσο με το καθαρό ποσό έργου που εκτελείται από ή στο σύστημα.

$$dE_{system} = \delta Q - \delta W = 0 \quad \Delta E_{system} = Q - W = 0$$

3.13 Ένα kmol μονοατομικού ιδανικού αερίου περιέχεται σε μια διάταξη εμβόλου-κυλίνδρου και υφίσταται την ακόλουθη σειρά αντιστρεπτών διεργασιών: ισόθερμη συμπίεση στους 500 K από 100 kPa στα 800 kPa, ισοβαρή ψύξη από 500 K σε 300 K, αδιαβατική εκτόνωση από 800 kPa σε 100 kPa και τέλος ισοβαρή θέρμανση μέχρι την αρχική κατάσταση. Να υπολογιστούν οι τιμές των μεγεθών Q, W, ΔU και ΔH για τις επιμέρους διεργασίες και για τη συνολική διεργασία που υφίσταται το αέριο.

2. Απομονωμένο σύστημα :

Κατά τη διάρκεια μιας οποιασδήποτε διεργασίας που υφίσταται ένα απομονωμένο σύστημα, η μεταφορά μάζας και ενέργειας (είτε θερμότητας είτε έργου) από ή προς το σύστημα είναι μηδενικές. Επομένως η ενέργειά του παραμένει σταθερή.

$$dE_{system} = \delta Q = \delta W = 0 \quad \Delta E_{system} = Q = W = 0$$

3.14 Νερό πέφτει από καταρράκτη ύψους 100 m. Θεωρείστε 1 kg νερού ως σύστημα με την παραδοχή ότι το σύστημα δεν ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον του. (α) Ποια είναι η δυναμική ενέργεια του νερού στην κορυφή του καταρράκτη σε σχέση με τη βάση του; (β) Ποια είναι η κινητική ενέργεια του νερού λίγο πριν φτάσει τη βάση του καταρράκτη; (γ) Ποια μεταβολή στην κατάσταση του νερού επιφέρεται μετά την είσοδο του νερού-συστήματος στο ποτάμι στη βάση του καταρράκτη;

Κεφάλαιο 4

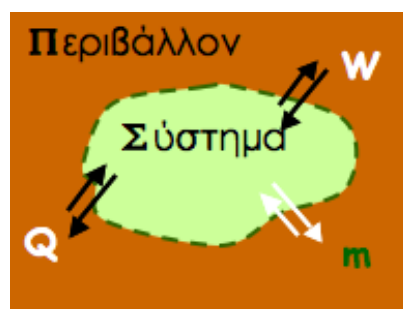
1ος θερμοδυναμικός νόμος: ανοικτά συστήματα

4.1 Ορισμοί

- ΟΓΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ
- ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ
- ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΕΡΓΟ ΡΟΗΣ
- ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΡΟΗΣ – Ακροφύσιο, διαχυτήρας, Αντλία, Συμπιεστής, Στρόβιλος, Θάλαμος ανάμιξης, Εναλλάκτης Θερμότητας, Βαλβίδα στραγγαλισμού.
- ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ (ΜΗ ΜΟΝΙΜΗΣ) ΡΟΗΣ

4.1.1 Ανοικτό σύστημα

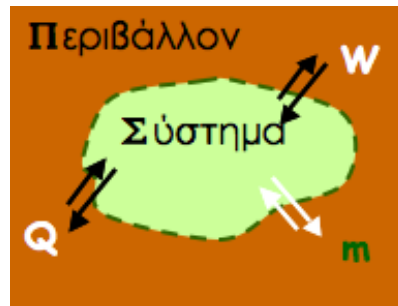
Οριακή Επιφάνεια (ΟΕ) = Διαχωρισμός συστήματος από το περιβάλλον του



Η Οριακή Επιφάνεια μπορεί να:

- Είναι πραγματική ή υποθετική
- Είναι σταθερή ή κινητή
- Έχει Μηδενικό πάχος (δηλ. μηδενική μάζα)

Η ΟΕ διαπερνάται από μάζα σε ένα ή περισσότερα τμήματά της. Η μάζα του συστήματος δεν είναι σταθερή. Το σύστημα μπορεί να ανταλλάσσει θερμότητα & έργο με το περιβάλλον



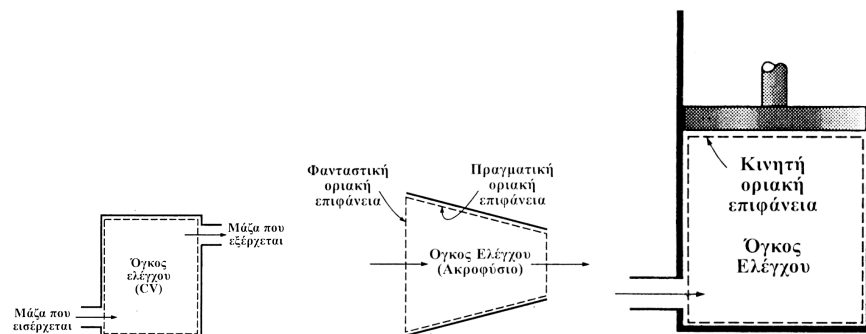
Η ποσότητα ύλης του συστήματος μπορεί να :

- παραμένει σταθερή
- αυξάνεται με τον χρόνο
- μειώνεται με τον χρόνο

αλλά σε κάθε χρονική στιγμή θα είναι διαφορετική ύλη.

4.1.2 Όγκος ελέγχου

- **Όγκος ελέγχου** είναι ο όγκος που περικλείει το (ανοικτό) σύστημα. Η μάζα μπορεί να εισέρχεται και να εξέρχεται σε αυτόν.
- Η ΟΕ του όγκου ελέγχου λέγεται **επιφάνεια ελέγχου**
- Επιφάνειες μέσα από τις οποίες εισέρχεται ή εξέρχεται μάζα είναι «φανταστικές».
- Μία ΟΕ μπορεί να είναι κινητή



4.2 Αρχή διατήρησης της μάζας

- Η μάζα δεν παράγεται ούτε εξαφανίζεται
- (εκτός από Einstein : $E = mc^2$!)
- «Ότι μπαίνει πρέπει να βγει, αλλιώς συσσωρεύεται» $m_{in} - m_{out} = \Delta m_{system}$
- Το ίδιο και οι «ρυθμοί»

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} \quad , \quad \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \Delta \dot{m}_{system}$$

Ολική μάζα ρευστού στον όγκο ελέγχου (CV) τη χρονική στιγμή t :

$$\Delta m_{system} = \int \int \int_V \rho dV$$

Γενική μορφή της εξίσωσης συνέχειας:

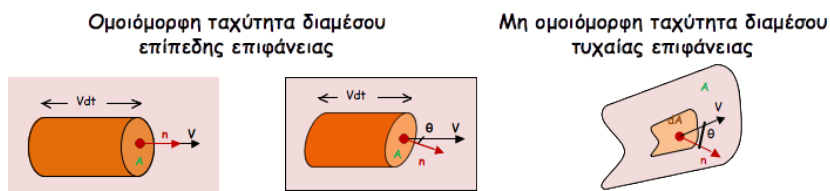
$$\frac{d}{dt} \int \int \int_V \rho dV = \sum_i \int \int_{A_i} \rho dA - \sum_j \int \int_{A_j} \rho dA$$

4.2.1 Παροχή

Ορισμός της παροχής μάζας, $\dot{m}$ [kg/s]:

ποσό μάζας που διαρρέει διαμέσου μιας επιφάνειας στη μονάδα του χρόνου

$$d\dot{m} = \rho V_n dA \Rightarrow \dot{m} = \int_A \rho V_n dA$$



$$\dot{m} = \frac{\rho A V dt}{dt} = \rho A V \quad \dot{m} = \rho (\bar{V} \cdot n) = \rho V_n A \quad \dot{m} = \int \int_A (\bar{V} \cdot n) dA = \int \int_A V_n dA$$

Ορισμός της ογκομετρικής παροχής, $\dot{V}$ [m³/s]:

ο όγκος του ρευστού που ρέει διαμέσου μιας εγκάρσιας διατομής στη μονάδα του χρόνου:

$$\dot{V} = \int_A V_n dA \Rightarrow \dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{v}$$

V_n : η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας στην επιφάνεια A . Δεν υπάρχει αρχή διατήρησης της ογκομετρικής παροχής!

4.2.2 Ροή μάζας

- Ορισμός ροής: Η κίνηση ενός ρευστού (υγρό ή αέριο) στο χώρο.

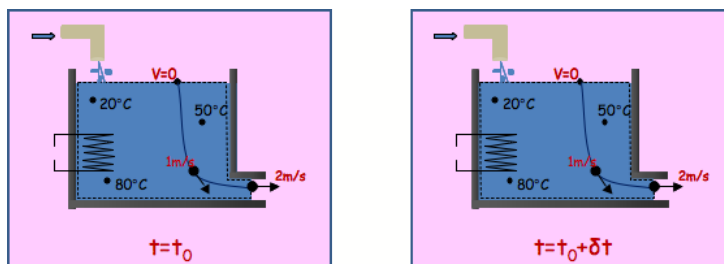
- Πεδίο ροής:

Η περιοχή του χώρου όπου έχουμε κίνηση του ρευστού. Καθορίζεται πλήρως όταν καθορίζεται κάθε μεταβλητή Θ (π.χ. V, ρ, P, T) στον χώρο (x, y, z) και στον χρόνο t .

- Για συνεχή μέσα όπως τα ρευστά: $\Theta = \Theta(x, y, z, t)$

4.2.3 Διεργασίες μόνιμης ροής (steady state)

Διεργασία μόνιμης ροής : οι ιδιότητες του ρευστού ενδέχεται να αλλάζουν από σημείο σε σημείο στο χώρο αλλά δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο σε κάποιο σημείο.



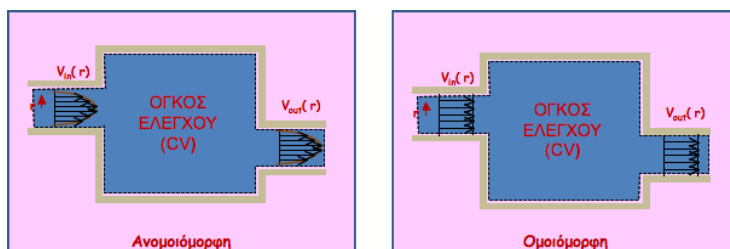
$$\Theta = \Theta(x, y, z) \quad \left(\frac{\partial \Theta}{\partial t} \right)_{(x, y, z)} = 0$$

- Στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου οι ιδιότητες είναι σταθερές με τον χρόνο
- Στα όρια του όγκου ελέγχου οι ιδιότητες δεν μεταβάλλονται με το χρόνο
- Η θερμότητα και το έργο που δίνει/παίρνει το σύστημα είναι σταθερά με το χρόνο.

Ομοιόμορφη ροή

Κάθε μεταβλητή Θ είναι ίδια σε όλα τα σημεία μια ορισμένης περιοχής του πεδίου ροής

$$\Theta(x, y, z) = \Theta_{average}$$



Διατήρηση της μάζας (steady state)

Η ποσότητα της μάζας του υλικού μέσα στον όγκο ελέγχου παραμένει αμετάβλητη με το χρόνο.

$$\text{Μάζα}_{in} = \text{Μάζα}_{out}$$

$$\sum_i \dot{m}_{in,i} = \sum_j \dot{m}_{out,j}$$

$$\sum_i \left[\frac{V_i A_i}{v_i} \right]_{in} = \sum_j \left[\frac{V_j A_j}{v_j} \right]_{out}$$

(Μόνο για τις μάζες!)

Ασυμπίεστη ροή

Η πυκνότητα έχει παντού την ίδια τιμή, άρα και η ποσότητα μάζας στον όγκο ελέγχου παραμένει σταθερή.

$$\left(\frac{dm}{dt} \right)_{CV} = 0 \Rightarrow \sum_{i,in} \bar{V} A = \sum_{j,out} \bar{V} A$$

Μία είσοδος - μία έξοδος:

$$\dot{V} = \bar{V}_{in} A_{in} = \bar{V}_{out} A_{out}$$

Για σταθερή πυκνότητα ρ (αντίστοιχα ειδικό όγκο v) και μέση ταχύτητα V , η ογκομετρική παροχή και η παροχή μάζας συνδέονται με τη σχέση:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{v}$$

4.1 Νερό εισέρχεται σε κυλινδρική δεξαμενή μέσα από δύο εισόδους (1,2) και εξέρχεται από μια μοναδική έξοδο (3). Οι συνθήκες στις εισόδους και στην έξοδο είναι: Ρεύμα-1: $V_1=10$ m/s, $A_1=50$ cm², Ρεύμα-2: $V_2=300$ m/min, $A_2=0.011$ m², Ρεύμα-3: $P_3=500$ kPa, $T_3=20$ °C, $V_3=7$ m/s, $d_3=14$ cm. Να υπολογιστεί (α) η παροχή μάζας και στις τρεις πύλες σε kg/s και (β) ο ρυθμός ανύψωσης της στάθμης σε mm/min αν η δεξαμενή έχει εσωτερική διάμετρο 5 m. Η πυκνότητα του νερού θεωρείται σταθερή και ίση με 997 kg/m³.

$$1ο \text{ ρεύμα} : 997 \text{ kg/m}^3 * 10 \text{ m/s} * 0.0050 \text{ m}^2 \approx 50 \text{ kg/s}$$

$$2ο \text{ ρεύμα} : 997 \text{ kg/m}^3 * 50 \text{ m/s} * 0.0110 \text{ m}^2 \approx 550 \text{ kg/s}$$

$$3ο \text{ ρεύμα} : 997 \text{ kg/m}^3 * 7 \text{ m/s} * 0.0154 \text{ m}^2 \approx 107.5 \text{ kg/s}$$

$$\text{Αύξηση όγκου} = 50 + 550 - 107.5 = 492.5 \text{ kg/s}$$

$$\text{Ανύψωση} = 492.5 \text{ kg/s} / (997 \text{ kg/m}^3) / (19.63 \text{ m}^2) = 330 \text{ mm/min}$$

4.2 Νερό εισρέει σε κυλινδρική κατακόρυφη δεξαμενή διατομής 0,01 m² με σταθερή παροχή 5 kg/s. Εκρέει από τη δεξαμενή διαμέσου εξόδου κοντά στον πυθμένα της με παροχή που δίνεται από τη σχέση $0,2 \cdot h$ kg/s, όπου h είναι το στιγμιαίο ύψος της στάθμης σε m. Αν αρχικά η δεξαμενή ήταν κενή, να προσδιοριστεί η σχέση της στάθμης h και του χρόνου t . Θεωρείται ότι η πυκνότητα του νερού διατηρείται σταθερή και ίση με 1000 kg/m³.

Ο όγκος του νερού σε χρόνο t είναι :

$$VAh = \frac{(\dot{m} - 0.2h)t}{\rho}$$

Άρα το ύψος $h(t)$ είναι:

$$h(t) = \frac{\dot{m}t}{0.2t + \rho A}$$

4.3 1ος νόμος της Θερμοδυναμικής - Ανοικτά συστήματα

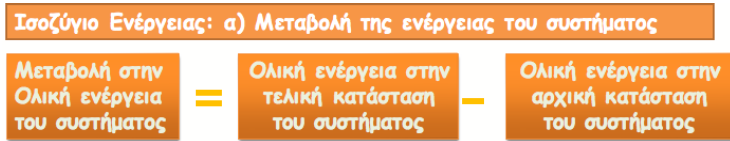
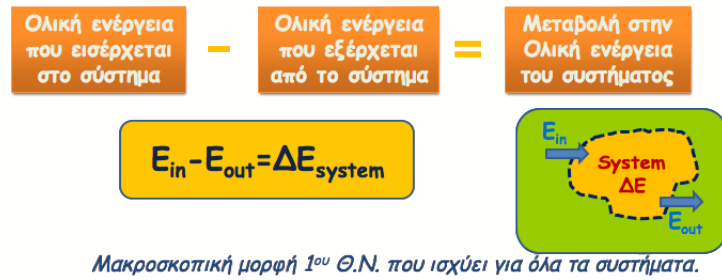
ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ – Αρχή διατήρησης της ενέργειας

Η Ενέργεια μπορεί να μεταβάλλεται από τη μια μορφή σε άλλη αλλά το συνολικό ποσό της παραμένει σταθερό.

Η Ενέργεια ΔΕΝ δημιουργείται ΟΥΤΕ καταστρέφεται!!!!

Όταν ένα κλειστό σύστημα μεταβεί αδιαβατικά από μια κατάσταση 1 σε μια κατάσταση 2 τότε η μόνη ενεργειακή εναλλαγή με το περιβάλλον θα είναι το έργο, το οποίο είναι ανεξάρτητο από τον τρόπο μεταβολής και τη φύση του συστήματος.

Η συνολική (καθαρή) μεταβολή (αύξηση ή μείωση) της ολικής ενέργειας ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας είναι ίση με τη διαφορά ανάμεσα στην ολική ενέργεια που εισέρχεται και στην ολική ενέργεια που εξέρχεται από αυτό.



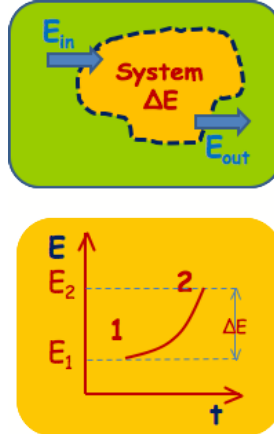
Μακροσκοπική μορφή 1ου Θ.Ν. που ισχύει για όλα τα συστήματα.

$$\Delta E_{system} = E_{final} - E_{initial} = E_2 - E_1$$

Ισχύει απουσία ηλεκτροστατικής, μαγνητικής και επιφανειακής ενέργειας του συστήματος:

$$\Delta E_{system} = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$dE_{system} = dU + dE_k + dE_p$$



4.3.1 Μεταβολή της ενέργειας του συστήματος

$$\Delta E_{system} = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$\Delta E_{system} = \Delta(mu) + \frac{1}{2}\Delta(mV^2) + \Delta(mgz)$$

Και για σταθερή μάζα (κλειστά συστήματα ή ανοικτά σταθεροποιημένης ροής, δηλ. σε μόνιμη κατάσταση):

$$\Delta E_{system} = m [\Delta u + \Delta V^2 + \Delta(gz)] = m \left[(u_2 - u_1) + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1) \right]$$

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system}$$

Τα E_{in} και E_{out} αντιπροσωπεύουν τις μορφές ενέργειας που περνούν από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος, και μπορεί να είναι:

Θερμότητα (Q_{in} & Q_{out})

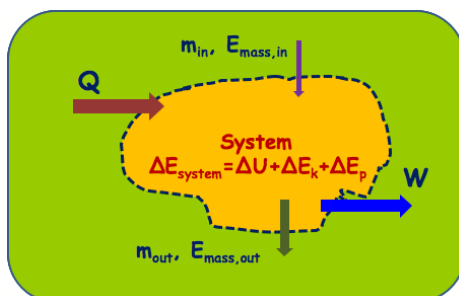
Έργο (W_{in} & W_{out})

Ενέργεια μάζας ($E_{mass,in}$ & $E_{mass,out}$)

$$E_{in} - E_{out} = (Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) + (E_{mass,in} - E_{mass,out}) = \Delta E_{system}$$

Μακροσκοπική μορφή 1ου Θ.Ν. που ισχύει για όλα τα συστήματα.

$$E_{in} - E_{out} = Q - W + (E_{mass,in} - E_{mass,out}) = \Delta E_{system}$$



Ισοζύγιο ενέργειας σε ανοικτά συστήματα

- Το ισοζύγιο ενέργειας σε ανοικτό σύστημα, δηλ. σε όγκο ελέγχου είναι:

$$\Delta E_{\text{συστήματος}} = E_{in} - E_{out} \quad [\text{kJ}]$$

$$\Delta \dot{E}_{\text{συστήματος}} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \quad [\text{kW}]$$

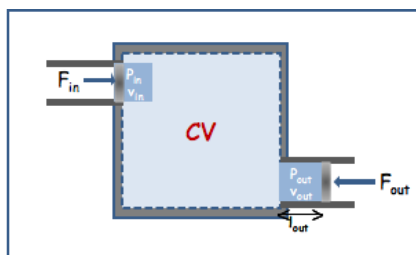
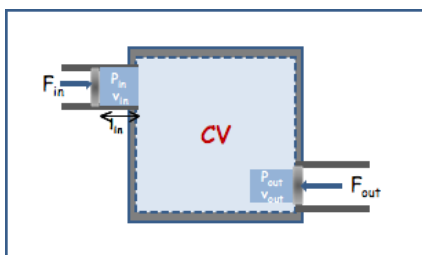
- Η μάζα που μεταφέρεται εντός και εκτός του συστήματος (όγκου ελέγχου) περιέχει ενέργεια.

Έργο ροής

Η ενέργεια που απαιτείται για να σπρώξει ένα ρευστό μέσα ή έξω από τον όγκο ελέγχου ονομάζεται έργο ή ενέργεια ροής

$$W_{flow} = FL = PAL = PV \quad [\text{kJ}]$$

$$w_{flow} = Pv \quad [\text{kJ/kg}]$$



Ενέργεια ρέοντος μέσου

Το έργο ροής είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων (πίεσης P και όγκου V) και δεν εξαρτάται από τη διεργασία.

$$W_{flow} = mPv$$

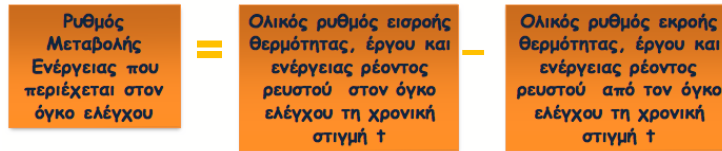
Η ενέργεια του ρέοντος μέσου είναι:

$$e_{fl} = w_{flow} + u + e_{zin} + e_{δυν} = Pv + u + \frac{1}{2}V^2 + gz = h + \frac{1}{2}V^2 + gz$$

Το ρευστό που εισέρχεται ή εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου έχει επιπλέον και την ενέργεια ροής $w_{flow} = Pv$.

Υπενθυμίζεται ότι για κλειστό σύστημα (χωρίς ροή);

$$e = u + e_{zin} + e_{δυν}$$

Ισοζύγιο ενέργειας

$$\dot{E}_{CV} = \frac{d}{dt} \iiint_V e \rho dV = \dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{i,in} \iint_{A_i} e_{fk} \rho V_n dA - \dot{Q}_{out} - \dot{W}_{out} - \sum_{j,out} \iint_{A_j} e_{fl} \rho V_n dA$$

$$\dot{E}_{CV} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{i,in} \iint_{A_i} e_{fl} \rho V_n dA - \sum_{j,out} \iint_{A_j} e_{fl} \rho V_n dA$$

Ισοζύγιο ενέργειας (ανοικτό σύστημα, steady state)

Η συνολική ενέργεια στον όγκο ελέγχου παραμένει αμετάβλητη με το χρόνο

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_i^{in} \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_i^{out} \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right)$$

(ενέργεια ρέοντος ρευστού : $\theta = h + E_k + E_p$)

Μόνιμη ροή: Μία είσοδος & μία έξοδος

$$\dot{m} = \dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(\Delta h + 0.5\Delta(V^2) + g\Delta z)$$

με $\Delta() = ()_{out} - ()_{in}$. Διαιρώντας με $\dot{m}$:

$$q - w = \Delta h + 0.5\Delta(V^2) + g\Delta z$$

Παράδειγμα: Συνεχής ηλεκτρικός θερμαντήρας νερού

- Μία είσοδος κρύου νερού, $\dot{m}_1$

- Μία έξοδος ζεστού νερού, $\dot{m}_2 = \dot{m}_1$
- Η ηλεκτρική αντίσταση παρέχει ηλεκτρικό έργο, $\dot{W}_{in}$
- Απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον, $\dot{Q}_{out}$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] \quad [kW]$$

$$q - w = h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad [kJ/kg]$$

- Αν οι διατομές εισόδου και εξόδου είναι ίσες και στο ίδιο ύψος, z :

$$q - w = h_2 - h_1 = \Delta h$$

Ισοζύγια σε συστήματα σε σταθερή κατάσταση

$\dot{Q}$ ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ όγκου ελέγχου / περιβάλλοντος.

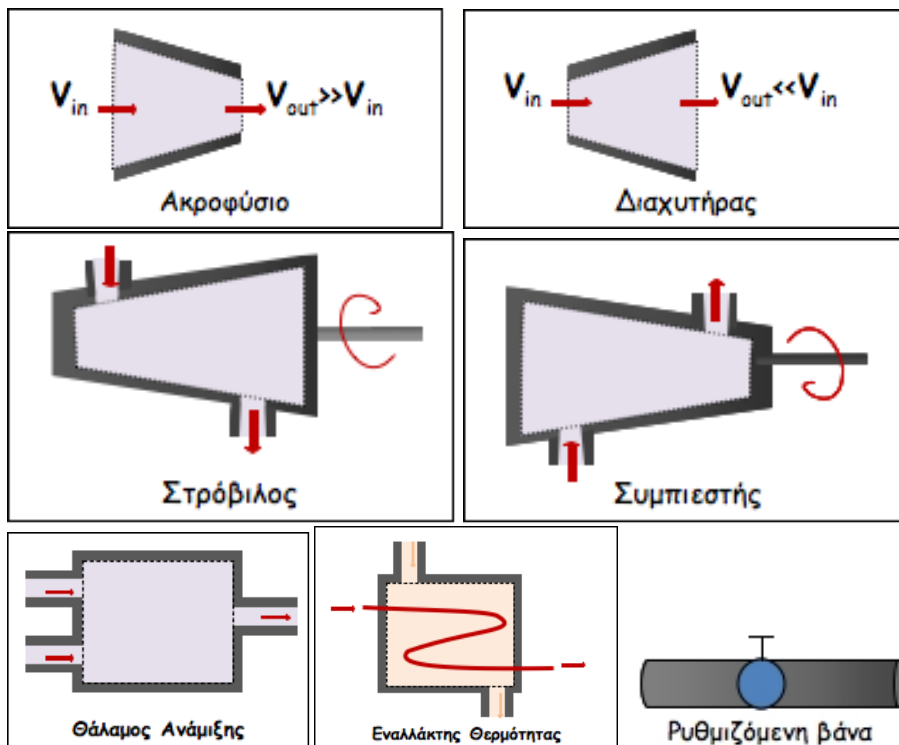
$\dot{W}$ ισχύς

$\Delta h = h_2 - h_1$ διαφορά ενθαλπίας του εξερχόμενου ρεύματος από το εισερχόμενο

$\Delta e_k = (V_2^2 - V_1^2)/2$ διαφορά κινητικής ενέργειας του εξερχόμενου ρεύματος από το εισερχόμενο

$\Delta e_p = g(z_2 - z_1)$ διαφορά δυναμικής ενέργειας του εξερχόμενου ρεύματος από το εισερχόμενο

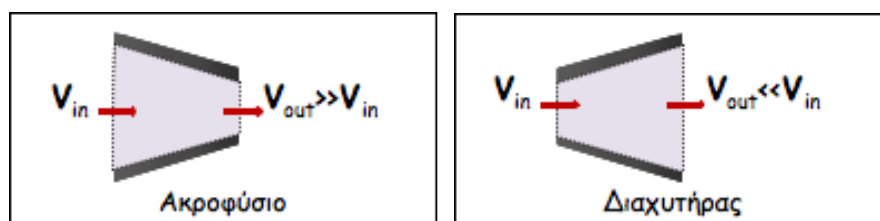
4.3.2 Διατάξεις ροών/διεργασιών σταθερής κατάστασης



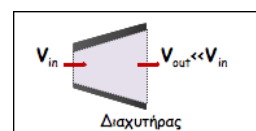
Ακροφύσια και διαχυτήρες

- Ακροφύσιο : αυξάνει την ταχύτητα του ρευστού και μειώνει την πίεση
- Διαχυτήρας : μειώνει την ταχύτητα του ρευστού και αυξάνει την πίεση

$$\dot{Q} \approx 0 \quad \dot{W} = 0 \quad \Delta e_k \neq 0 \quad \Delta e_p \approx 0$$



Παράδειγμα 4.1. Επιβράδυνση αέρα σε διαχυτήρα
Αέρας σε πίεση 80 kPa και θερμοκρασία 10 °C εισέρχεται με ταχύτητα 200 m/s στον διαχυτήρα μιας μηχανής jet και εξέρχεται με ταχύτητα ≈ 0 . Το εμβαδόν της εισόδου είναι 0.4 m². Υπολογίστε την παροχή μάζας και την θερμοκρασία εξόδου του αέρα.



$$\text{Ιδανικά αέρια : } v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = 1.015 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\dot{m} = \frac{V_1 A_1}{v_1} = 78.8 \text{ kg/s}$$

$$\text{Ισοζύγιο ενέργειας : } \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

$$\text{Ενθαλπία εισόδου από πίνακες : } h_1(283 \text{ K}) = 283.14 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 303.14 \text{ kJ/kg}$$

4.2 Επιτάχυνση ατμού σε ακροφύσιο

Σε ένα ακροφύσιο με εμβαδόν εισόδου 0.02 m² εισέρχεται υδρατμός σε πίεση 2 MPa θερμοκρασία 370 °C με ρυθμό 5 kg/s. Ο ατμός εγκαταλείπει το ακροφύσιο με πίεση 1.5 MPa και ταχύτητα 333 m/s. ΟΙ θερμικές απώλειες είναι 2.5 kJ/kg. Ποια είναι η ταχύτητα στην είσοδο και η θερμοκρασία στην έξοδο;

$$\dot{W} = 0 \quad \Delta \dot{E}_p = 0$$

$$\text{Ο ειδικός όγκος } v_1 = 0.142 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ και } h_1 = 3187 \text{ kJ/kg. Έτσι, } \dot{m} = \frac{1}{v_1} V_1 A_1 \Rightarrow V_1 = 35.5 \text{ m/s. Ισοζύγιο ενέργειας : } \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

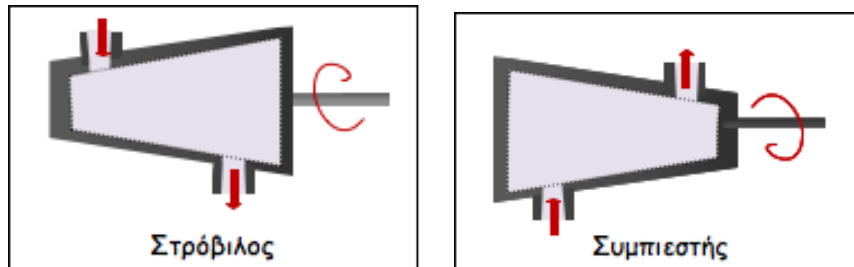
$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) = \dot{Q}_{out} + \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right)$$

$$h_2 = h_1 - q_{out} - \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = 3130 \text{ kJ/kg}$$

Άρα από τους πίνακες T = 325 °C.

Στροβίλοι και συμπιεστές

Καθώς το ρευστό περνάει μέσα από το στροβίλο δίνει έργο στα πτερύγια. Ο άξονας περιστρέφεται και έτσι παράγεται έργο από τον στροβίλο.



$$\dot{Q} \approx 0 \quad \dot{W} \neq 0 \quad \Delta e_k \approx 0 \quad \Delta e_p \approx 0$$

Συμπιεστές, αντλίες, ανεμιστήρες: Αύξηση της πίεσης του ρευστού. Αρνητικό το έργο γιατί το καταναλώνει το ρευστό.

Συμπιεστές: υψηλή αύξηση πίεσης αερίων. Αντλίες: υψηλή αύξηση πίεσης υγρών. Ανεμιστήρες: χαμηλή αύξηση πίεσης αερίων για την επίτευξη της κίνησής τους στο χώρο.

Παράδειγμα 4.3 Συμπύεση αέρα με συμπιεστή

Αέρας σε 100 kPa και 280 K συμπιέζεται σε συνθήκες σταθερής ροής σε πίεση 600 kPa και θερμοκρασία 400 K. Η παροχή μάζας είναι 0.02 kg/s. Υπάρχει απώλεια θερμότητας στο περιβάλλον ίση με 16 kJ/kg. Οι μεταβολές στη δυναμική και κινητική ενέργεια είναι αμελητέες. Ποια είναι η ισχύς του συμπιεστή;

$$\dot{W}_{in} = \dot{W} \quad \dot{Q}_{out} = \dot{Q}$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{W} + \dot{m}h_1 = \dot{Q}_{out} + \dot{m}h_2$$

$$\dot{w} = \dot{m}(q + h_2 - h_1)$$

$$\dot{w} = 0.02(16 + 400.98 - 280.13) = 2.74 \text{ kJ/s [kW]}$$

h_1 και h_2 από τους πίνακες

4.4 Παραγωγή ισχύος με στροβίλο υδρατμών

Η ισχύς του αδιαβατικού στροβίλου υδρατμών του σχήματος είναι 5 MW. Να υπολογισθεί η παροχή μάζας του υδρατμού.

Στην είσοδο ο ατμός είναι υπέρθερμος: $h_1 = 3247.6 \text{ kJ/kg}$

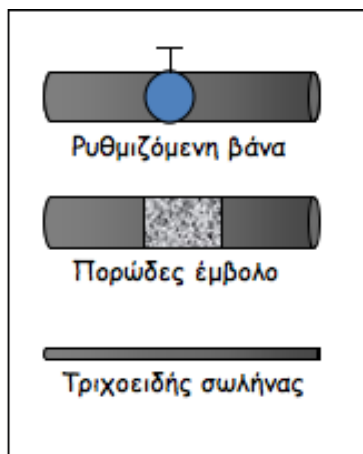
Στην έξοδο υπάρχει μείγμα υγρού και ατμού με $x = 0.9$:

$$\Rightarrow h_2 = h_f + x_2 h_{fg} = 2361.73 \text{ kJ/kg}$$

Ισοζύγιο ενέργειας: $\dot{m}(h_1 + V_1^2/2 + gz_1) = \dot{W} + \dot{m}(h_2 + V_2^2/2 + gz_2)$

$$w = -[(h_2 - h_1) + (V_2^2 - V_1^2)/2 + g(z_2 - z_1)] = 870.96 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m} = 5/w = 5.74 \text{ kg/s}$$

Βαλβίδες στραγγαλισμού και θάλαμοι ανάμιξης

- Βαλβίδα στραγγαλισμού: πτώση της πίεσης (και της θερμοκρασίας)

$$\dot{Q} \approx 0 \quad \dot{W} = 0 \quad \Delta e_k \approx 0 \quad \Delta e_p \approx 0$$

$$h_2 = h_1 \quad (u_1 + P_1 v_1 = u_2 + P_2 v_2)$$

- Θάλαμος ανάμιξης (μονωμένος)

$$\dot{Q} \approx 0 \quad \dot{W} = 0 \quad \Delta e_k \approx 0 \quad \Delta e_p \approx 0$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3$$

$$h_3 = \frac{\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}$$

Βαλβίδα στραγγαλισμού**ΙΣΕΝΘΑΛΠΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ**

$$h_{in} = h_{out} \Rightarrow u_{in} + P_{in} u_{in} = u_{out} + P_{out} u_{out}$$

Εσωτερική ενέργεια + Ενέργεια Ροής = σταθερή!!!

Αύξηση Ενέργειας Ροής (Pv) $\Rightarrow$ μείωση εσωτερικής ενέργειας, άρα μείωση θερμοκρασίας

Μείωση Ενέργειας Ροής (Pv) $\Rightarrow$ αύξηση εσωτ. ενέργειας, άρα αύξηση θερμοκρασίας

Ιδανικά αέρια: $h = h(T)$ θερμοκρασία θα πρέπει να παραμένει σταθερή

4.5. Ψυκτικό 134a υφίσταται στραγγαλισμό από την κατάσταση κορεσμένου υγρού σε πίεση 800 kPa στα 120 kPa. Να υπολογιστούν:

(α) η ποιότητα του ψυκτικού υγρού στην τελική κατάσταση και

(β) η πτώση θερμοκρασίας κατά τη διεργασία.

Ισχύει $h_2 = h_1$. Από πίνακες:

$$P_1 = 0.8 \text{ MPa}, T_{sat} = 31.33 \text{ }^\circ\text{C} \text{ και } h_1 = h_{f@0.8 \text{ MPa}} = 93.42 \text{ kJ/kg}$$

$$P_2 = 0.12 \text{ MPa}, T_{sat} = -22.36 \text{ }^\circ\text{C} \text{ και } h_f = 21.32 \text{ kJ/kg}, h_g = 233.86 \text{ kJ/kg}, T_{sat} = -22.36 \text{ }^\circ\text{C}.$$

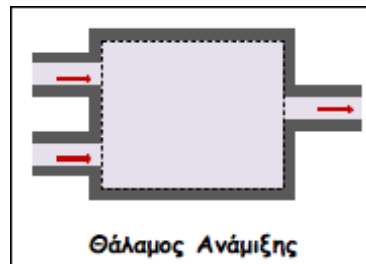
$$\text{Καθώς } h_f < h_2 = h_1 < h_g \quad \text{η ποιότητα είναι } x_2 = \frac{h_2 - h_f}{h_{fg}} = 0.339$$

$$\text{Η πτώση της θερμοκρασίας είναι } 31.33 - (-22.36) = 53.69 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Θάλαμος ανάμιξης

Ανάμιξη πολλαπλών ρευσμάτων, π.χ. μπαταρία μπάνιου

$$\dot{Q} \approx 0 \quad \dot{W} = 0 \quad \Delta e_k \approx 0 \quad \Delta e_p \approx 0$$



4.8 Σε έναν θάλαμο ανάμιξης, νερό με πίεση 300 kPa και θερμοκρασία 20 °C αναμιγνύεται με υπέρθερμο υδρατμό πίεσης 300 kPa και θερμοκρασίας 300 °C. Στο θάλαμο εισέρχεται το κρύο νερό με παροχή 1,8 kg/s. Αν το μείγμα εγκαταλείπει το θάλαμο ανάμιξης στους 60 °C, να υπολογιστεί η παροχή μάζας του υπέρθερμου υδρατμού.

Από πίνακες στους 300 kPa : $h_{1(20)} = 83.96$, $h_{2(300)} = 3069.3$, $h_{3(60)} = 251.13$ kJ/kg

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3$$

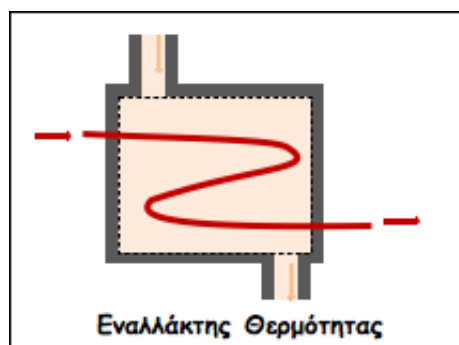
Άρα $\dot{m}_2 = 0.107$ kg/s

Εναλλάκτες θερμότητας

Δύο ρεύματα εισόδου/εξόδου. Ανταλλαγή θερμότητας χωρίς ανάμιξη ρευσμάτων.

$$\text{Συνολικά: } \dot{Q} \approx 0 \quad \dot{W} = 0 \quad \Delta e_k \approx 0 \quad \Delta e_p \approx 0$$

$$\text{Αλλά για κάθε ρεύμα ξεχωριστά } \dot{Q} \neq 0$$



4.9. Ρεύμα υδρατμού εισέρχεται στο συμπυκνωτή μιας εγκατάστασης παραγωγής ισχύος με υδρατμό με πίεση 20 kPa, με ποιότητα 95% και παροχή μάζας 20000 kg/h. Το ρεύμα αυτό πρόκειται να ψυχθεί με νερό από διπλανό ποτάμι. Το νερό ψύξης από το ποτάμι κυκλοφορεί στους σωλήνες του συμπυκνωτή και μετά απορρίπτεται ξανά στο ποτάμι. Για να αποφευχθεί η θερμική ρύπανση του ποταμού, το νερό ψύξης δεν επιτρέπεται να θερμανθεί πάνω από 10 °C. Αν ο υδρατμός πρέπει να εγκαταλείψει τον συμπυκνωτή ως κορεσμένο υγρό

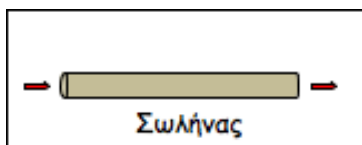
πίεσης 20 kPa, να υπολογιστεί η παροχή μάζας του νερού ψύξης.

Για το νερό ψύξης, $C_p = 4.18 \text{ kJ/kg}$. Ο ατμός στην είσοδο έχει ενθαλπία $h_3 = h_f + x_3 h_{fg} = 2491.8 \text{ kJ/kg}$ και στην έξοδο (κορ. υγρό) $h_4 = 251.4 \text{ kJ/kg}$.

Ισοζύγιο ενέργειας: $\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$ $\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_s \frac{h_3 - h_4}{h_2 - h_1} = \dot{m}_s \frac{h_3 - h_4}{C_p(T_2 - T_1)} = 298 \text{ kg/s}$$

Ροή ρευστού σε Σωλήνες ή Αγωγούς



$\dot{Q}$ Μηδενίζεται μόνο στην περίπτωση που οι σωλήνες είναι καλά μονωμένοι

$\dot{W}$ Μηδενίζεται όταν δεν υπάρχει αντλία, ανεμιστήρας ή σύστημα θέρμανσης π.χ. θερμαντικές σπείρες στο εσωτερικό του

$\Delta \dot{E}_k$ Μηδενίζεται όταν έχουμε πολύ χαμηλές ταχύτητες ή αγωγούς σταθερής διαμέτρου και αμελητέων θερμικών φαινομένων

$\Delta \dot{E}_p$ Μηδενίζεται όταν οι υψομετρικές μεταβολές είναι αμελητέες.

4.10. Θεωρείται σύστημα ηλεκτρικής θέρμανσης 15 kW. Ο αέρας εισέρχεται στο τμήμα θέρμανσης με πίεση 100 kPa και θερμοκρασία 17 °C. Η ογκομετρική παροχή του είναι 150 m³/min. Αν κατά τη ροή του αέρα μέσα στον αγωγό οι απώλειες θερμότητας είναι 200 W, να υπολογιστεί η θερμοκρασία εξόδου του αέρα.

Ισοζύγιο ενέργειας : $\dot{W}_{in} + \dot{m}h_1 = \dot{Q}_{out} + \dot{m}h_2$

$$\dot{W}_{in} - \dot{Q}_{out} = \dot{m}C_p(T_2 - T_1)$$

$$\text{Η ροή μάζας είναι } \dot{m} = \frac{\dot{V}}{v} = \frac{\dot{V}}{RT/P_1} \quad \text{kg/s}$$

4.11. Θεωρείται υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας του οποίου η επιφάνεια βρίσκεται 60 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το νερό πρέπει να αντληθεί σε ύψος 5 m πάνω από το έδαφος. Η διάμετρος του σωλήνα είναι 15 cm πριν την είσοδο της αντλίας και 20 cm στην έξοδο της αντλίας. Να υπολογιστεί η ισχύς της αντλίας που απαιτείται για μόνιμη ροή νερού ίση με 15 L/s, θεωρώντας αμελητέα οποιαδήποτε θερμική αλληλεπίδραση με το περιβάλλον και τη θερμότητα τριβής.

Μη - Μόνιμη (μη σταθεροποιημένη) ή μεταβατική ροή για ομοιόμορφη διεργασία ροής

Σε κάθε χρονική στιγμή η κατάσταση στον όγκο ελέγχου είναι ομοιόμορφη $\Rightarrow$ η κατάσταση της μάζας ελέγχου στην έξοδο είναι ίδια με αυτήν του όγκου ελέγχου.

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q - W + \sum_{i,in} m e_{fi} - \sum_{j,out} m e_{fj}$$

4.12. Ένα μονωμένο δοχείο είναι αρχικά κενό και συνδέεται μέσω μιας βαλβίδας με έναν αγωγό, ο οποίος μεταφέρει υδρατμό σε πίεση 1 MPa και θερμοκρασία 30 °C. Η βαλβίδα ανοίγει επιτρέποντας στον υδρατμό να εισέλθει με αργό ρυθμό στο δοχείο μέχρι η πίεση στο εσωτερικό του να φθάσει στο 1 MPa, οπότε κλείνει και η βαλβίδα. Να υπολογιστεί η τελική θερμοκρασία του υδρατμού στο δοχείο.

4.13. Μια χύτρα ταχύτητας έχει όγκο 6 L και σχετική πίεση λειτουργίας 75 kPa. Αρχικά περιέχει 1 kg νερού. Μετά την επίτευξη της πίεσης λειτουργίας, στη χύτρα παρέχεται θερμότητα με ρυθμό 500W για 30min. Κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος εξέρχεται υδρατμός σε κατάσταση κορεσμένου ατμού στην πίεση λειτουργίας. Θεωρώντας την ατμοσφαιρική πίεση ίση με 100 kPa, να υπολογιστούν: (α) η θερμοκρασία μαγειρέματος και (β) το ποσό του νερού που βρίσκεται στην χύτρα μετά το τέλος της διεργασίας.

4.14. Ατμός από το δίκτυο παροχής εισέρχεται σε κλειστή δεξαμενή μέσω μιας βάνας. Κατά τη διάρκεια πλήρωσης της δεξαμενής, ο ρυθμός απωλειών θερμότητας στο περιβάλλον είναι 1 kW ενώ ένας αναδευτήρας αναδεύει τον ατμό εντός της δεξαμενής με συχνότητα 500 στροφών ανά λεπτό και η ροπή που εφαρμόζεται είναι 0,01 kN.m. Οι συνθήκες στην είσοδο της βάνας είναι $\dot{m} = 0,1143 \text{ kg/s}$ και $h_1 = 3069,26 \text{ kJ/kg}$. Αν η μάζα και η ειδική εσωτερική ενέργεια του ατμού εντός της δεξαμενής σε κάποια στιγμή είναι 2 kg και 2510 kJ/kg αντίστοιχα, να υπολογιστεί ο ρυθμός μεταβολής (α) της ολικής εσωτερικής ενέργειας και (β) της ειδικής εσωτερικής ενέργειας του συστήματος. Να αγνοήσετε την κινητική και δυναμική ενέργεια στην είσοδο.

Κεφάλαιο 5

Ο 2ος θερμοδυναμικός νόμος

Η 1η και η 2η αρχές της θερμοδυναμικής

- Καμία διεργασία δεν παραβιάζει τον πρώτο νόμο
Αλλά,
- Ένα ζεστό φλυτζάνι καφέ δεν μπορεί να ζεσταθεί αντλώντας θερμότητα από κρύο περιβάλλον!
- Δεν μπορούμε να αντλήσουμε ενέργεια από ένα κρύο δωμάτιο για να δημιουργήσουμε ηλεκτρική ενέργεια μέσα από μια αντίσταση
- Οι διεργασίες αυτές είναι μονόδρομες!
π.χ. η θερμότητα «πηγαίνει» από το ζεστό προς το κρύο και όχι ανάποδα
Έτσι :
- Η 2η αρχή της θερμοδυναμικής καλύπτει αυτές τις περιπτώσεις
- Η 2η αρχή της θερμοδυναμικής μας λέει ότι η ενέργεια έχει «ποιότητα»
- Η ισχύς του 1ου Θ.Ν. είναι αναγκαία συνθήκη για την πραγματοποίηση μιας διεργασίας
- Ο 1ος Θ.Ν. δεν θέτει περιορισμούς ως προς την κατεύθυνση της διεργασίας
- Η Ενέργεια εκτός από ΠΟΣΟΤΗΤΑ έχει και ΠΟΙΟΤΗΤΑ
- 1ος νόμος: Δεν μπορείς να κερδίσεις!
- 2ος νόμος: Δεν μπορείς ούτε να ισοφαρίσεις!

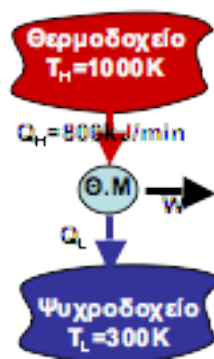
Θερμοδοχεία και ψυχροδοχεία

- Θερμοδοχείο : Υποθετικό σώμα με μεγάλη θερμοχωρητικότητα που παρέχει ενέργεια
π.χ. φούρνος, καυστήρας
- Ψυχροδοχείο : Υποθετικό σώμα με μεγάλη θερμοχωρητικότητα που μπορεί να απορροφήσει ενέργεια
π.χ. ατμόσφαιρα, θάλασσα (περιβάλλον)



Θερμικές μηχανές

- Διατάξεις που μετατρέπουν την θερμότητα σε έργο
- Απορροφούν θερμότητα από ένα θερμοδοχείο
- Μετατρέπουν ένα μέρος της θερμότητας σε έργο
- Αποβάλλουν την υπόλοιπη θερμότητα σε ένα ψυχροδοχείο
- Λειτουργούν σε **κύκλο**

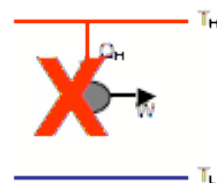


5.1 Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος

Η διατύπωση των Kelvin και Planck

Μια διάταξη που λειτουργεί σε κύκλο είναι αδύνατο να παίρνει θερμότητα από μια μόνο δεξαμενή και να παράγει έργο

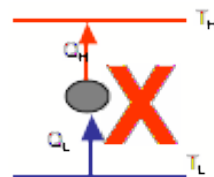
Καμιά θερμική μηχανή δεν μπορεί να έχει απόδοση 100%! Προκειμένου να λειτουργήσει μια διάταξη παραγωγής ισχύος, το ρευστό λειτουργίας πρέπει να ανταλλάσσει θερμότητα με ένα θερμοδοχείο (φούρνο) και ένα ψυχροδοχείο (περιβάλλον).



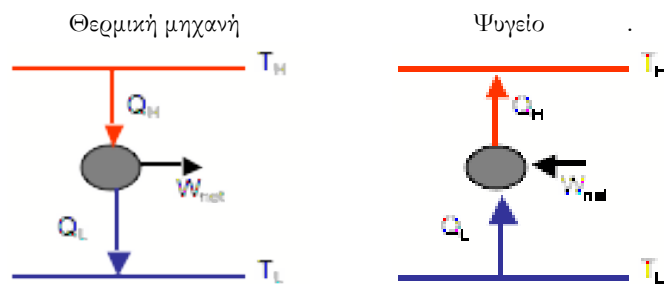
Η διατύπωση του Clausius

Δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστεί μια διάταξη η οποία να λειτουργεί σε κύκλο με μοναδικό στόχο τη μεταφορά θερμότητας από ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας προς ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας.

π.χ. ένα ψυγείο πρέπει να προσλάβει (καταναλώσει) έργο από μια εξωτερική πηγή ενέργειας· την ενέργεια αυτή την αποδίδει τελικά στο περιβάλλον.

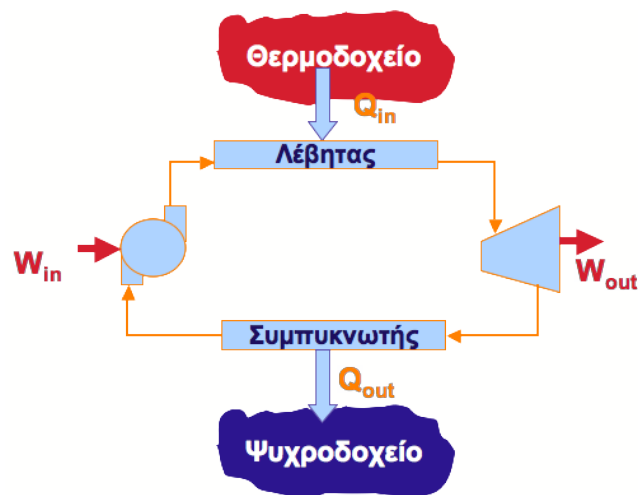


Στην πράξη:



Θερμικές μηχανές

- Οι θερμικές μηχανές χρησιμοποιούν συνήθως ένα ρευστό
- Σε κάποια σημεία το ρευστό απορροφά ενέργεια (θερμότητα και έργο)
- Σε άλλα σημεία αποδίδει ενέργεια (θερμότητα και έργο)



$$W_{net,out} = Q_{in} - Q_{out}$$

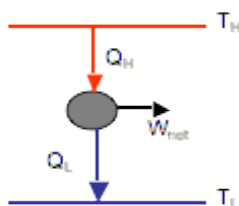
5.1.1 Θερμική απόδοση

Σε μια θερμική μηχανή το κλάσμα της θερμότητας που μετατρέπεται σε έργο είναι η θερμική απόδοση της μηχανής

$$\text{Απόδοση} = \frac{\text{Επιθυμητή Έξοδος}}{\text{Απαιτούμενη Είσοδος}}$$

$$\text{Θερμική Απόδοση} = \frac{\text{Καθαρό έργο}}{\text{Απαιτούμενη Θερμότητα}}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$



$$Q_H = Q_{in}, Q_L = Q_{out}, W_{net,out} = Q_H - Q_L, \eta = \frac{W_{net,out}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Η απόδοση των κινητήρων εσωτερικής καύσης είναι συνήθως κάτω από 50% :
βενζινοκινητήρας : 25% και diesel : 35%.

Χωρίς τη διαδικασία ψύξης (αποβολής θερμότητας) στον συμπυκνωτή δεν μπορεί να ολοκληρωθεί η κυκλική διεργασία!

5.1 Παραγωγή ισχύος από θερμική μηχανή: Μια θερμική μηχανή αντλεί θερμότητα από ένα φούρνο με ρυθμό 80 MW και αποβάλλει στο ποτάμι 50 MW. Πόση ισχύ παράγει και ποια είναι η απόδοσή της;

$$\dot{W}_{net,out} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = 80 - 50 = 30 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{Q}_H} = 30/80 = 0.375 \text{ (ή } 35.7\%)$$

5.2 Κατανάλωση αυτοκινήτου : Ένας κινητήρας αυτοκινήτου έχει ισχύ 65 hp και απόδοση 24%. Να βρεθεί η κατανάλωση σε καύσιμο με θερμογόνο δύναμη 40000 kJ/kg.

Το αυτοκίνητο αποβάλλει την $\dot{Q}_L$ στην ατμόσφαιρα.

$$\dot{Q} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\eta} = \frac{65 * 746}{0.24} = 200 \text{ kW}$$

$$\text{Κατανάλωση : } 200/40000 = 5 \text{ g/s} = 18 \text{ kg/h}$$

Συντελεστές απόδοσης μετατροπών ενέργειας

- Η απόδοση ενός θερμαντήρα είναι ο λόγος της ενέργειας που παρέχεται ως προς την ενέργεια που καταναλώνεται
- Θερμογόνος δύναμη καυσίμου είναι θερμότητα που απελευθερώνεται από την πλήρη καύση της μονάδας μάζας του καυσίμου (σε θερμοκρασία δωματίου).

$$\text{Απόδοση καύσης : } \eta_{comb} = \frac{\text{θερμότητα που απελευθερώνεται}}{\text{θερμογόνος δύναμη καυσίμου}}$$

Θερμογόνος δύναμη υδρογονανθράκων

- Ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) :
το νερό (H_2O) από την καύση είναι κορεσμένο υγρό
- Κατώτερη θερμογόνος δύναμη (LHV) :
το νερό (H_2O) από την καύση είναι σε κατάσταση ατμού
- Βενζίνη : HHV = 47300 kJ/kg LHV = 44000 kJ/kg

- Ολική Απόδοση : ο λόγος της συνολικής ηλεκτρικής ισχύος που εξέρχεται προς το ρυθμό με τον οποίο εισέρχεται η ενέργεια του καυσίμου στο σύστημα.

π.χ. για θερμοηλεκτρική μονάδα:

$$\eta_{overall} = \eta_{comb}\eta_{thermal}\eta_{gen} = \frac{\dot{W}_{newt,electr}}{HHV\dot{m}_{fuel}}$$

5.2 Αντιστρεπτές και μη-αντιστρεπτές διεργασίες

Αντιστρεπτή διεργασία ονομάζεται η διεργασία εκείνη η οποία μπορεί να λάβει χώρα και κατά την αντίθετη κατεύθυνση χωρίς να αφήσει κανένα ίχνος στο περιβάλλον (ΕΞΙΔΑΝΙ-ΚΕΥΜΕΝΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ !!)

Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί μόνο αν το καθαρό ποσό θερμότητας και έργου που εναλλάσσεται μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος είναι μηδέν.

Αιτίες μη αντιστρεψιμότητας

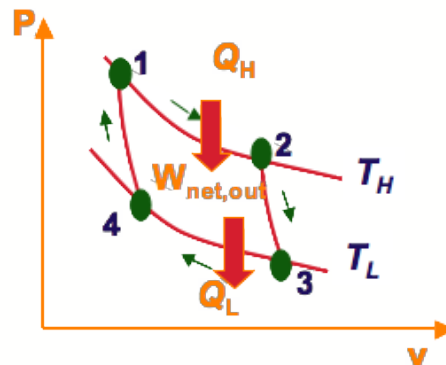
- Τριβή
Στερεό - στερεό, Αέριο-στερεό, Ιξώδες υγρού κ.λπ.
- Εκτόνωση και συμπίεση εκτός «οιωνεί» ισορροπίας
- Μεταφορά θερμότητας
- Εσωτερικά αντιστρεπτή διεργασία
Όχι αναντιστρεπτότητες εντός του όγκου ελέγχου.
- Εξωτερικά αντιστρεπτή διεργασία Όχι αναντιστρεπτότητες στις αλληλεπιδράσεις μέσα και έξω από τις οριακές επιφάνειες.
- Ολικά αντιστρεπτή

5.2.1 Ο κύκλος Carnot

Ιδεατός αντιστρεπτός κύκλος. Το ρευστό λειτουργίας στο τέλος του κύκλου επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση.

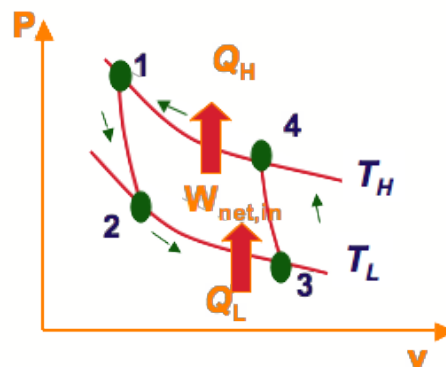
Ένα αέριο σε ένα πιστόνι/έμβολο που υφίσταται τις ακόλουθες διεργασίες:

- 1-2: Αντιστρεπτή ισόθερμη εκτόνωση (T)
- 2-3: Αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση
- 3-4: Αντιστρεπτή ισόθερμη συμπίεση (T_L)
- 4-1: Αντιστρεπτή αδιαβατική συμπίεση



Ο αντίστροφος κύκλος Carnot

- 1-2: Αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση (T_H)
- 2-3: Αντιστρεπτή ισόθερμη εκτόνωση
- 3-4: Αντιστρεπτή αδιαβατική συμπίεση (T_L)
- 4-1: Αντιστρεπτή ισόθερμη συμπίεση



Τα αξιώματα του Carnot

- 1: Η απόδοση μιας μη αντιστρεπτής θερμικής μηχανής είναι πάντα μικρότερη από την απόδοση μιας αντιστρεπτής, όταν και οι δύο λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμικών δεξαμενών

$$\eta_{th,irrev} < \eta_{th,rev} \quad \text{για ίδιες } T_H \text{ και } T_L$$

- 2: Οι αποδόσεις όλων των αντιστρεπτών θερμικών μηχανών που λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμικών δεξαμενών είναι μεταξύ τους ίσες.

$$\eta_{rev(1)} = \eta_{rev(2)} \quad \text{για ίδιες } T_H \text{ και } T_L$$

Η θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασιών

Από τα αξιώματα του Carnot συνεπάγεται ότι η απόδοση μιας αντιστρεπτής μηχανής είναι ανεξάρτητη:

- από το ρευστό λειτουργίας
- από τον τρόπο που χρησιμοποιείται ο κύκλος
- από τον τύπο της αντιστρεπτής μηχανής

και εξαρτάται μόνο από τις θερμοκρασίες T_H και T_L .

$$\eta_{th,rev} = \eta(T_H, T_L)$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_H}{Q_L} \Rightarrow \frac{Q_H}{Q_L} = f(T_H, T_L)$$

$$\frac{Q_H}{Q_L} = f(T_H, T_L) \Rightarrow \frac{Q_H}{Q_L} = \frac{\phi(T_H)}{\phi(T_L)}$$

$$\text{π.χ.} \quad \frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L} \quad \text{κ.α.}$$

Σε αυτό βασίζεται η θερμοδυναμική κλίμακα του Kelvin. Το τριπλό σημείο του νερού σε αυτήν την κλίμακα είναι 273.16 K ενώ 1K = 1 °C (μονάδες)

5.2.2 Η θερμική μηχανή του Carnot

Απόδοση Carnot:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Αυτή είναι η μέγιστη απόδοση μιας θερμικής μηχανής η οποία λειτουργεί ανάμεσα σε θερμοκρασία θερμοδοχείου T_H και ψυχροδοχείου T_L .

Αποδόσεις μηχανών και ψυγείων

$$\text{Θερμική μηχανή Carnot: } \eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$\text{Αντιστρεπτό ψυγείο: } \eta_{th} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$$

$$\text{Αντιστρεπτή αντλία θερμότητας: } \eta_{th} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}}$$

5.3 Η εντροπία

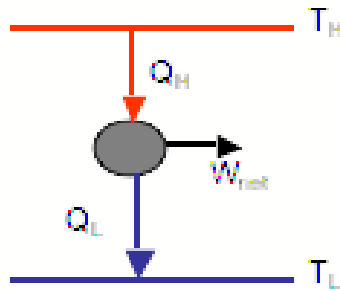
Η Εντροπία, S είναι ένα ποσοτικό μέτρο της αταξίας ενός συστήματος:

- Η Εντροπία είναι μια θερμοδυναμική ιδιότητα (καταστατική συνάρτηση)
- Αρχή της αύξησης της εντροπίας
- Ισεντροπικές διεργασίες

- Ισεντροπικές αποδόσεις
- Ισοζύγιο εντροπίας
- Μηχανή Carnot (αντιστρεπτή)

$$\frac{Q_H}{-Q_L} = \frac{T_H}{T_L} \Rightarrow \frac{Q_H}{T_H} = -\frac{Q_L}{T_L} \Rightarrow \frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

Δηλαδή, υπάρχει μια ιδιότητα που οι μεταβολές της δίνονται από τις ποσότητες $\frac{Q}{T}$!



$$\frac{\delta Q_H}{T_H} + \frac{\delta Q_L}{T_L} = 0 \Rightarrow \oint_A \frac{\delta Q}{T} = 0$$

Ορισμός εντροπίας :

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} \quad [\text{kJ/K}]$$

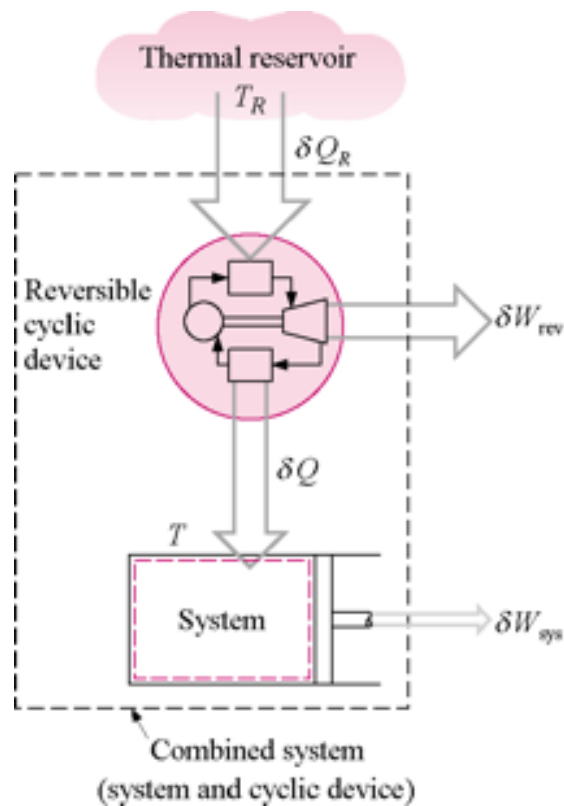
- Εκτατική ιδιότητα
- Ειδική εντροπία $s = S / m \quad [\text{kJ/kgK}]$
- Η εντροπία είναι ένα μέτρο της ενέργειας που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή έργου στο παρόν περιβάλλον
- **Προσοχή!! η θερμοκρασία πρέπει να είναι σε Kelvin!**

Η ανισότητα του Clausius

- Θεωρήστε ένα θερμοδοχείο που δίνει θερμότητα σε μια αντιστρεπτή θερμική μηχανή, η οποία και αυτή δίνει θερμότητα σε μία συσκευή εμβόλου-κυλίνδρου (σύστημα).
- Για όλα αυτά: $\delta Q_R - (\delta W_{rev} + \delta W_{cyl}) = dE_c$
- Αν η θερμ. μηχανή είναι αντιστρεπτή:

$$\frac{\delta Q_R}{T_R} = \frac{\delta Q}{T} \Rightarrow \delta Q_R = T_R \frac{\delta Q}{T}$$

$$\delta W_{rev} + \delta W_{cyl} = T_R \frac{\delta Q}{T} - dE_c$$



- Για κυκλική λειτουργία:

$$W_c = T_R \oint \frac{\delta Q}{T} - \oint dE_c$$

- όπου $\oint dE_c = 0$
- Αν $W_c > 0$ έχουμε μια θερμική μηχανή που παίρνει ενέργεια από ένα θερμοδοχείο και τη μετατρέπει όλη σε έργο και η αρχή των Kelvin-Planck (2ος νόμος) παραβιάζεται. Αν $W_c \leq 0$, τότε η αρχή των Kelvin-Planck δεν παραβιάζεται. Άρα :

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

όπου Q η θερμότητα που προσδίδεται στο σύστημα.

5.3.1 Η αρχή της αύξησης της εντροπίας

Το κυκλικό ολοκλήρωμα του $\delta Q/T$ στην ανισότητα του Clausius: $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$ είναι :

- ίσο με 0 για αντιστρεπτές διεργασίες
- αρνητικό για μη αντιστρεπτές διεργασίες

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{rev} = 0 \quad \oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{irrev} < 0$$

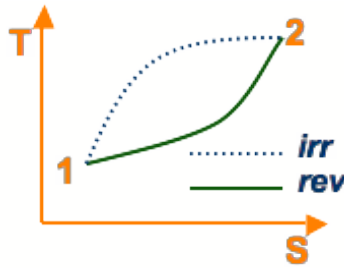
Θεωρήστε την κυκλική διεργασία στο σχήμα.

$$\oint_{irrev} \frac{\delta Q}{T} \leq 0, \quad \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \Big|_{rev} = S_1 - S_2$$

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_{irrev} + S_1 - S_2 \leq 0 \Rightarrow S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Big|_{irrev}$$

Μεταβολή της εντροπίας του συστήματος :

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T} \quad [kJ/K]$$



- Δεν εξαρτάται από τη διαδρομή της διεργασίας
- Υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα κατά μήκος μιας αυθαίρετης υποθετικής αντιστρεπτής διεργασίας μεταξύ της ίδιας αρχικής & τελικής κατάστασης

Γενικά: $dS \geq \frac{\delta Q}{T}$

« = » για αντιστρεπτές διεργασίες και « > » για μη αντιστρεπτές

$\delta Q > 0$ τότε $dS > 0$

$\delta Q = 0$ τότε $dS = 0$

$\delta Q < 0$ τότε $dS < 0$

Για αντιστρεπτή αδιαβατική διεργασία

$$dS = 0 \quad S_2 = S_1 \quad (\text{Ισεντροπική διεργασία})$$

Η αλλαγή εντροπίας οφείλεται είτε σε μεταφορά θερμότητας ή σε αναντιστρεπτότητες. Οι τελευταίες οδηγούν πάντα σε αύξηση της εντροπίας.

$$\Delta S = S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

$$\Delta S = S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

Μπορούμε να απαλλαγούμε από την ανισότητα ως εξής:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T} + S_{gen}$$

Η S_{gen} είναι θετική ή μηδέν. Η τιμή της εξαρτάται από τη διεργασία – άρα δεν είναι ιδιότητα! $S_{gen} = 0$ για αντιστρεπτές διεργασίες

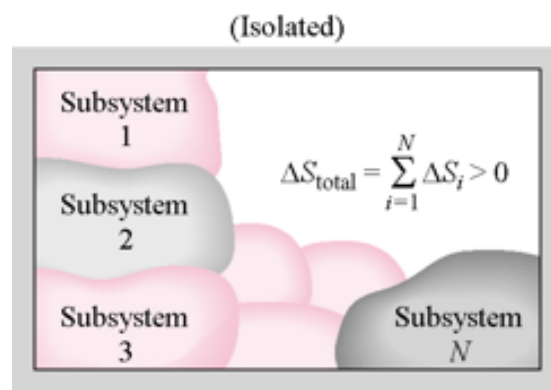
5.3.2 Εντροπία και ο 2ος νόμος

Θεωρήστε το απομονωμένο σύστημα της εικόνας.

$$\Delta S \geq \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T} \geq 0$$

$$S_{gen} \geq 0$$

Η ολική αλλαγή της εντροπίας ενός απομονωμένου συστήματος αυξάνεται σε κάθε διεργασία. Μόνο σε αντιστρεπτές διεργασίες παραμένει η ίδια. Αλλά ποτέ δεν μειώνεται! Δηλαδή, η εντροπία του σύμπαντος αυξάνει συνεχώς.



Εντροπία

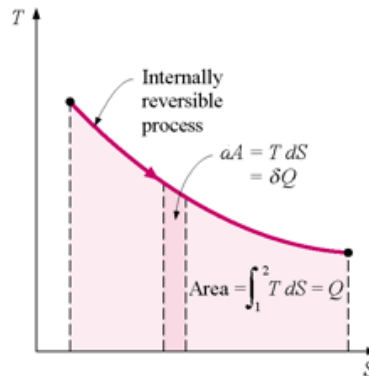
- Οι διεργασίες γίνονται μόνο προς μια μόνο κατεύθυνση έτσι ώστε $S_{gen} \geq 0$
- Η εντροπία δεν ακολουθεί ισοζύγιο
- Η απόδοση των μηχανών μειώνεται από την παρουσία αναντιστρεπτοτήτων. Η παραγωγή εντροπίας (τιμή της S_{gen}) είναι ένα μέτρο των υπάρχουσών αναντιστρεπτοτήτων στη διεργασία.
- Η περιοχή κάτω από την καμπύλη σε ένα διάγραμμα T-S μιας αντιστρεπτής διεργασίας δίνει τη θερμότητα:

$$\delta Q = T dS \quad \Rightarrow \quad Q = \int_1^2 T dS$$

Εντροπία ισοθερμοκρασιακής αντιστρεπτής διεργασίας

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T} = \frac{1}{T_0} \int_1^2 \delta Q_{rev} = \frac{Q}{T_0} \quad [kJ/K]$$

Η μεταβολή ΔS του συστήματος που υπόκειται σε αντιστρεπτή διεργασία μπορεί να είναι > 0 ή < 0 [η μεταφορά Q προς το σύστημα αυξάνει την εντροπία του συστήματος ($\Delta S > 0$) και η μεταφορά Q από το σύστημα μειώνει την εντροπία του συστήματος ($\Delta S < 0$)]



$$Q_{net} = \int_1^2 T dS$$

Η μεταφορά θερμότητας σε ένα εσωτερικά αντιστρεπτή διεργασία είναι το εμβαδόν της περιοχής κάτω από την καμπύλη σε ένα διάγραμμα T-S.

Αδιαβατική διεργασία

- Όταν $Q = 0$:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T} + S_{gen} = S_{gen}$$

- Όταν η διεργασία είναι και αντιστρεπτή, τότε

$$\Delta S = 0 \text{ και } S_2 = S_1 \text{ (ισεντροπική)}$$

5.3.3 Εντροπία και μεταφορά θερμότητας

Θεωρήστε τη μεταφορά θερμότητας από μια δεξαμενή θερμότητας σε μια άλλη με διαφορά θερμοκρασίας ΔT :

$$S_{gen} = \Delta S_{total} = \Delta S_T + \Delta S_{(T-\Delta T)}$$

$$S_{gen} = \frac{-Q}{T} + \frac{Q}{T - \Delta T}$$

$$S_{gen} = \frac{Q}{T} \left[\frac{\Delta T}{T - \Delta T} \right]$$

Όταν $\Delta T \searrow$ τότε $S_{gen} \rightarrow 0$ (αντιστρεπτή διεργασία)

Παράδειγμα

Ποια είναι η αλλαγή εντροπίας για μεταφορά 1000 kJ θερμότητας από ένα θερμοδοχείο με θερμοκρασία 1000 K σε ένα άλλο στους 500 K.

$$S_{gen} = \Delta S_{total} = \frac{-Q}{T} + \frac{Q}{T - \Delta T} = 1 \frac{kJ}{K}$$

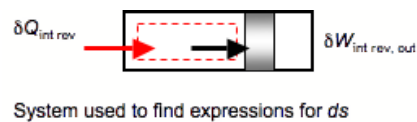
5.3.4 Ο ΤΡΙΤΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Ο τρίτος νόμος της θερμοδυναμικής λέει ότι η εντροπία ενός καθαρού κρυστάλλου στο απόλυτο μηδέν είναι μηδέν. Αυτός ο νόμος δίνει ένα απόλυτο σημείο αναφοράς για τον καθορισμό της εντροπίας. Η εντροπία που καθορίζεται με βάση αυτό το σημείο ονομάζεται απόλυτη εντροπία.

The third law of thermodynamics states that the entropy of a pure crystalline substance at absolute zero temperature is zero. This law provides an absolute reference point for the determination of entropy. The entropy determined relative to this point is called absolute entropy.

5.3.5 Η εντροπία ως ιδιότητα

Η εντροπία είναι ιδιότητα και εκφράζεται ως συνάρτηση των ιδιοτήτων (P, v, T) μέσω των σχέσεων Tds . Αυτές οι ιδιότητες βγαίνουν από την ανάλυση ενός αντιστρεπτού κλειστού συστήματος που παράγει έργο και απορροφά θερμότητα:



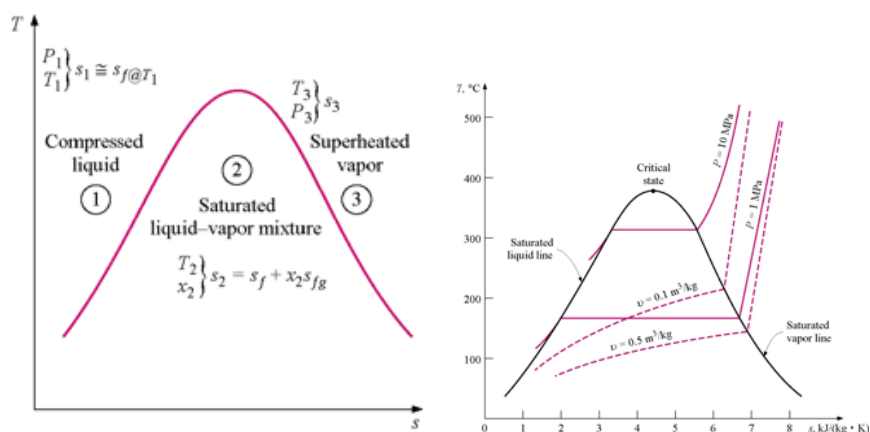
$$\delta Q - \delta W = dU \Rightarrow Tds - PdV = dU$$

$$Tds = du + PdV$$

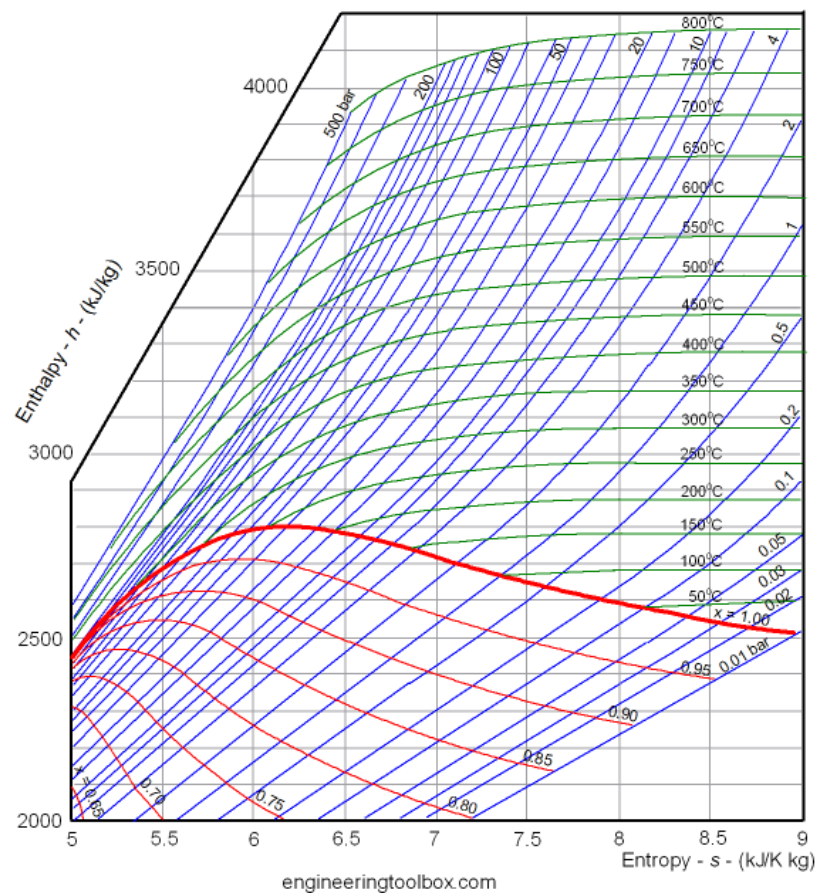
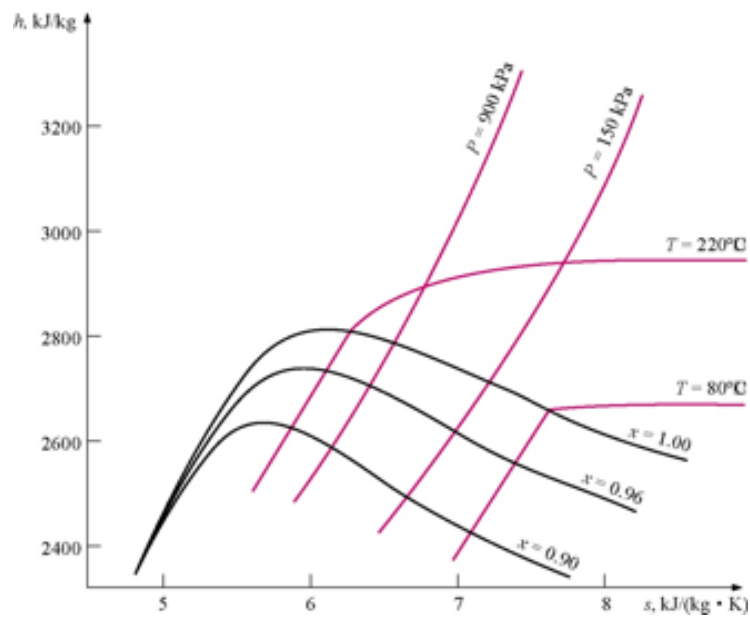
$$Tds = dh - vdP$$

Από τις δύο αυτές σχέσεις αρχίζουμε για να υπολογίσουμε τις αλλαγές της εντροπίας για τις διεργασίες. Για τις τιμές της εντροπίας ψάχνουμε τους πίνακες ιδιοτήτων!

T-s διάγραμμα νερού



h-s διάγραμμα νερού (Mollier)



Παράδειγμα (Συμπληρώστε τον πίνακα για το νερό/ατμό:)

P	T °C	Κατάσταση	s (kJ/kg K)
5 MPa	120	κορ. υγρό	1.53
1 MPa	50	κορ. υγρό	0.7
1.8 MPa	400	ατμός	0.18
40 kPa	75.9	x = 0.9	7.0
40 kPa	75.9	x=0.926	7.1794

Παράδειγμα 2 Ένα δοχείο περιέχει 5 kg ψυκτικό 134a στους 20 °C και 140 kPa. Κατόπιν το ψυκτικό ψύχεται υπο ανάδευση μέχρι να μειωθεί η πίεσή του στα 100 kPa. Ποια είναι η μεταβολή της ενθαλπίας του;

Ο όγκος της δεξαμενής είναι σταθερός, δηλ. $v_2 = v_1$

Κατάσταση 1. υπέρθερμος ατμός. $P_1 = 140 \text{ kPa}$, $T_1 = 20 \text{ °C}$, $s_1 = 1.0532 \text{ kJ/kgK}$, $v_1 = 0.1652 \text{ m}^3/\text{kg}$

Κατάσταση 2. μείγμα ατμού/υγρού: $P_2 = 100 \text{ kPa}$, $v_2 = v_1$, $v_f = 0.0007258$, $v_g = 0.1917 \text{ m}^3/\text{kg}$, $x_2 = \dots = 0.861$

Άρα: $s_2 = s_f + x_2 s_{fg} = -1.174 \text{ kJ/K}$

Παράδειγμα 3. Ισεντροπική εκτόνωση υδρατμού σε στρόβιλο

Σε έναν αδιαβατικό στρόβιλο εισέρχεται υδρατμός με πίεση 5 MPa και θερμοκρασία 450 °C και τον εγκαταλείπει με πίεση 1.4 MPa. Να υπολογισθεί το έργο (kJ/kg ατμού) για αντιστρεπτή διεργασία και αμελώντας κινητική και δυναμική ενέργεια.

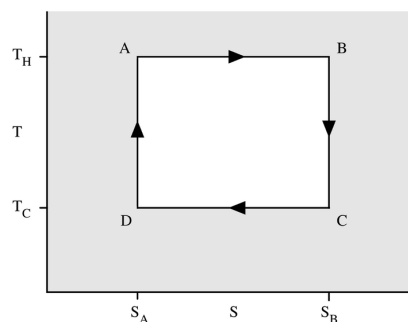
Πρόκειται για αδιαβατική και ισεντροπική διεργασία σε ανοικτό σύστημα

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad \dot{W}_{out} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

Κατάσταση 1: $h_1 = 3316.2 \text{ kJ/kg}$, $s_1 = 6.8186 \text{ kJ/kgK}$

Κατάσταση 2: $s_2 = s_1$, $P_2 = 1.4 \text{ MPa} \Rightarrow h_2 = 2966.6 \text{ kJ/kg}$

Το διάγραμμα T-s για τον κύκλο του Carnot



Δύο ισοθερμοκρασιακές και δύο ισεντροπικές διεργασίες. Το εμβαδόν του τετραγώνου δίνει το έργο $W_{net} = Q_H - Q_C$

Τί είναι η εντροπία;

- Ένα μέτρο της αταξίας των μορίων
π.χ. η εντροπία των στερεών είναι χαμηλότερη από την εντροπία των αερίων
- Εξίσωση του Boltzmann

$$S = k \ln \Omega$$

Ω είναι η θερμοδυναμική πιθανότητα, δηλ. ο αριθμός πιθανών καταστάσεων σε αυτές τις συνθήκες

- Σε μη αντιστρεπτή διεργασία η εντροπία αυξάνεται:
Η ενέργεια υποβαθμίζεται
Η ικανότητα παραγωγής έργου μειώνεται
Παράγεται μοριακή αταξία
- Οι διεργασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο προς την κατεύθυνση αύξησης της ολικής εντροπίας

Μεταβολή της εντροπίας στα υγρά και στα στερεά

Υγρά και Στερεά: ασυμπίεστα $\Rightarrow dS = \frac{du}{T} + \frac{Pdv}{T} = \frac{C}{T} dT$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C \frac{dT}{T} \approx C_{av} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Ισεντροπική διεργασία $\Rightarrow \ln T_2/T_1 = 0 \Rightarrow T_2 = T_1$

$$P = \frac{RT}{v} \Rightarrow ds = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Ομοίως:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Μεταβλητές C_p και C_v

Γενικά $C_v, C_p = f(T)$.

Π.χ. $\bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$

Ορίζουμε:

$$s^0 = \int_0^T C_p(T) \frac{dT}{T}$$

Οι τιμές $\bar{s}^0$ για διάφορα αέρια υπάρχουν σε πίνακες (Α-17, Α-18 κλπ.)

και $s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{P_2}{P_1}$

Ανά mol: $\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{s}_2^0 - \bar{s}_1^0 - R_u \ln \frac{P_2}{P_1}$

Παράδειγμα: Συμπύεση ιδανικού αερίου

- Άζωτο (ιδανικό αέριο) συμπιέζεται από τα 100 kPa και 17 °C στα 600 kPa και 57 °C. Να υπολογιστεί η Δs .

a) Από τον πίνακα Α-18:

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{s}_2^0 - \bar{s}_1^0 - R_u \ln \frac{P_2}{P_1} = \dots = -11.13 \text{ kJ/kmol.K}$$

$$s_2 - s_1 = -11.133/28.013 = -0.3974 \text{ kJ/kg.K}$$

b) Με χρήση της μέσης τιμής (Πίνακας Α-2b για θερμοκρασία 37 °C)

$$C_{p,av} = 1.0394 \text{ kJ/kg.K} \Rightarrow s_2 - s_1 = -0.3978 \text{ kJ/kmol.K}$$

Ισεντροπικές διεργασίες ιδανικών αερίων

Για σταθερές C_p και C_v :

$$s_2 = s_1 \quad \Rightarrow \quad \ln \frac{T_2}{T_1} = -\frac{R}{C_v} \ln \frac{v_2}{v_1} \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{\Delta s=0} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1}$$

εφόσον $R = C_p - C_v$ $\gamma = C_p/C_v$ και $R/C_v = k - 1$. Ομοίως:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{\Delta s=0} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

και

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{\Delta s=0} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma}$$

Άρα: $Tv^{\gamma-1} = ct$ $TP^{(1-\gamma)/\gamma} = ct$ $Pv^{\gamma} = ct$

Για μεταβλητές C_p και C_v :

$$s_2^0 = s_1^0 + R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{\Delta s=0} = \frac{P_2^r}{P_1^r} \quad \text{όπου} \quad P^r = \exp \frac{s^0}{R}$$

Ομοίως

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)_{\Delta s=0} = \frac{v_2^r}{v_1^r} \quad \text{όπου} \quad v^r = T/P^r = \frac{T}{\exp \frac{s^0}{R}}$$

Οι τιμές των P^r v^r υπάρχουν ή βρίσκονται από τους πίνακες A-17, A-18 κλπ.

Παράδειγμα: Συμπύκνωση αέρα

- Σε μια μηχανή Diesel ο αέρας («ιδανικό αέριο») από τις συνθήκες περιβάλλοντος (π.χ. 22 °C και 95 kPa) συμπιέζεται στη μηχανή πριν την εισαγωγή του καυσίμου κατά τρόπο αντιστρεπτό και αδιαβατικό. Να υπολογισθεί η τελική θερμοκρασία για λόγο συμπίεσης $V_2/V_1 = 1/8$.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{v_2}{v_1} \quad \text{κλειστό σύστημα}$$

- Από πίνακα A-17 βρίσκεται $v_1^r = v_{@295K}^r = 647.9$

- Άρα $v_2^r = v_1^r \times V_2/V_1 = 80.99 \quad \Rightarrow \quad T_2 = 663 \text{ K } (390^\circ\text{C})$

Αντιστρεπτό έργο μόνιμης ροής

$$W = \int_1^2 P dV$$

Γενικά για ροή που επιτελεί αντιστρεπτή διεργασία:

$$\delta q - \delta w = dh + de_k + de_p$$

$$\delta q = Tds = dh - vdP \quad \Rightarrow \quad -\delta w = vdP + de_k + de_p$$

$$w = \int_2^1 v dP - \Delta e_k - \Delta e_p$$

Για σταθερό v μηδενική παραγωγή έργου έχουμε την εξίσωση Bernoulli:

$$v(P_2 - P_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) = 0$$

Συμπίεση ουσίας κατά την συνύπαρξη υγρού-ατμών

- Να υπολογιστεί το έργο που απαιτείται για την ισεντροπική συμπίεση νερού από 100 kPa σε 1 MPa για αρχικά (α) κορεσμένο υγρό ή (β) κορεσμένο ατμό.
- (α) κορεσμένο υγρό $v_1 = v_{f@100kPa} = 0.001043 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$w = \int_1^2 v dP \approx v_1(P_2 - P_1) = 0.94 \text{ kJ/kg}$$

- (β) Συμπίεση κορ. ατμός $\Rightarrow$ αλλαγή ειδ. όγκου.
- Ισεντροπική: $Tds = dh - v dP \Rightarrow dh = v dP \Rightarrow w = \int_1^2 v dP = \int_1^2 dh = h_2 - h_1$
- h_1 και h_2 από πίνακες και $w = 520 \text{ kJ/kg}$

Ελαχιστοποίηση του έργου συμπίεσης

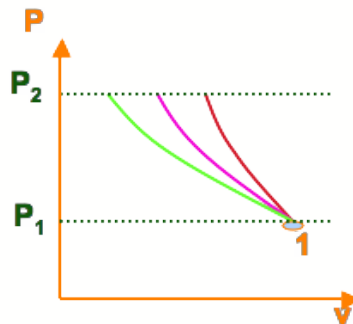
- Το (αντιστρ.) έργο στον συμπιεστή είναι $w = \int_1^2 v dP$
- Για ελάχιστο έργο $\Rightarrow$ αντιστρεπτή ή / και μικρό v (π.χ. με ψύξη του αερίου)
- Ισεντροπική συμπίεση (χωρίς ψύξη) ($Pv^\gamma = ct$)

$$w = \frac{\gamma R(T_2 - T_1)}{\gamma - 1} = \frac{\gamma R T_1}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right]$$

- Πολυτροπική συμπίεση (μέτρια ψύξη) ($Pv^n = ct$)

$$w = \frac{n R(T_2 - T_1)}{n - 1} = \frac{n R T_1}{n - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]$$

- Ισόθερμη συμπίεση (ισχυρή ψύξη) ($Pv = ct$) $w = RT \ln \frac{P_2}{P_1}$



πράσινη: ισόθερμη φούξια: πολυτροπική κόκκινη: ισεντροπική

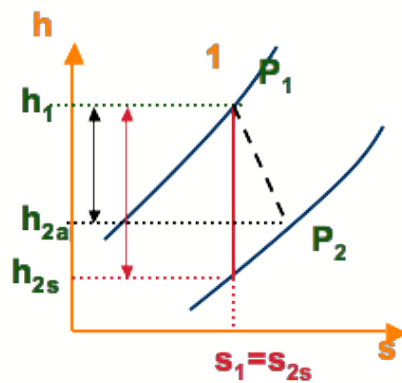
Ισεντροπικές αποδόσεις των διατάξεων μόνιμης ροής

- Ισεντροπική ή αδιαβατική απόδοση: μέτρο της απόκλισης της πραγματικής διεργασίας από την ιδανική
- Ισεντροπική απόδοση στροβίλου

Ο λόγος του πραγματικού έργου εξόδου του στροβίλου προς το έργο που θα παραγόταν αν η διεργασία μεταξύ της κατάστασης εισόδου και της πίεσης εξόδου ήταν ισεντροπική:

$$\eta_T = \frac{\text{πραγματικό έργο}}{\text{ισεντροπικό έργο}} = \frac{w_a}{w_s}$$

$$\eta_T \approx \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$$

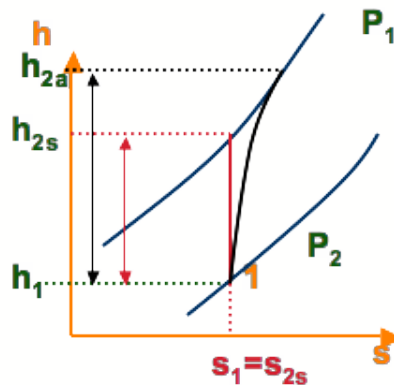


Ισεντροπική απόδοση συμπίεστή

- Ο λόγος του έργου που απαιτείται για την ισεντροπική αύξηση της πίεσης του αερίου μέχρι μια ορισμένη τιμή προς το πραγματικό έργο εισόδου

$$\eta_C = \frac{\text{ισεντροπικό έργο}}{\text{πραγματικό έργο}} = \frac{w_s}{w_a}$$

$$\eta_C \approx \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$



Ισεντροπική απόδοση αντλίας

- Ο λόγος του έργου που απαιτείται για την ισεντροπική αύξηση της πίεσης του ρευστού μέχρι μια ορισμένη τιμή προς το πραγματικό έργο εισόδου

$$\eta_P = \frac{w_s}{w_a} = \frac{v(P_2 - P_1)}{h_{2a} - h_1}$$

Ισεντροπική απόδοση ακροφυσίου

- Ο λόγος της πραγματικής κινητικής ενέργειας του ρευστού στην έξοδο ενός ακροφυσίου ως προς την κινητική ενέργεια του ρευστού στην έξοδο ισεντροπικού ακροφυσίου για την ίδια κατάσταση εισόδου και πίεση εξόδου.

$$\eta_N = \frac{V_{2a}^2}{V_{2s}^2} = \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$$

- Οι ισεντροπικές αποδόσεις του ακροφυσίου μπορούν να ξεπεράσουν το 95%

Ισοζύγιο εντροπίας

$$\left(\begin{array}{c} \text{Ολική} \\ \text{Εντροπία} \\ \text{Εισόδου} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Ολική} \\ \text{Εντροπία} \\ \text{Εξόδου} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Ολική} \\ \text{Παραγόμενη} \\ \text{Εντροπία} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Μεταβολή} \\ \text{Συνολικής} \\ \text{Εντροπίας} \\ \text{συστήματος} \end{array} \right)$$

$$S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{sys} = S_2 - S_1$$

$$S_{sys} = \int sdm = \int_V s \rho dV$$

Μεταφορά Εντροπίας στο σύστημα

- Μεταφορά θερμότητας

$$S_{heat} = \frac{Q}{T} \quad S_{heat} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

- Το έργο δεν περιέχει εντροπία για μεταφορά
- Δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος:
Η μεταφορά θερμότητας συνοδεύεται από μεταφορά εντροπίας
Μια αλληλεπίδραση ενέργειας που δεν συνοδεύεται από μεταφορά εντροπίας είναι έργο

Ροή μάζας

- Η μάζα περιέχει εντροπία και ενέργεια
- Μεταφορά εντροπίας κατ τη ροή μάζας: $S_{mass} = ms$

$$\dot{S}_{mass} = \int_{A_c} s \rho V_n dA_c \quad S_{mass} = \int_{\Delta t} sdm = \int_{\Delta t} \dot{S}_{mass} dt$$

Παραγωγή εντροπίας

- Από τις αναντιστρεπτότητες

$$\begin{aligned} S_{in} - S_{out} + S_{gen} &= \Delta S_{sys} \\ \dot{S}_{in} - \dot{S}_{out} + \dot{S}_{gen} &= \Delta \dot{S}_{sys} \end{aligned}$$

$$(s_{in} - s_{out}) + s_{gen} = \Delta s_{sys}$$

- S_{gen} είναι η εντροπία που παράγεται λόγω εσωτερικών αναντιστρεπτοτήτων

Κλειστό σύστημα

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + S_{gen} = \Delta S_{syst}$$

αδιαβατικό κλειστό σύστημα

$$S_{gen} = \Delta S_{adiab.sys}$$

Σύστημα & περιβάλλον

$$S_{gen} = \Delta S_{sys} + \Delta S_{surr}$$

Όγκοι Ελέγχου

- Ισοζύγιο

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + \sum m_i s_i - \sum m_e s_e + S_{gen} = (S_2 - S_1)_{CV}$$

$$\sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \dot{S}_{gen} = \Delta \dot{S}_{CV}$$

- Σταθεροποιημένη ροή

$$\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}$$

- Σταθεροποιημένη ροή, ένα ρεύμα, αδιαβατική διεργασία:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_e - s_i) \quad (> 0)$$

Παράδειγμα: Παραγωγή εντροπίας σε ένα θάλαμο ανάμιξης:

Νερό σε πίεση 1.5 bar και θερμοκρασίας 23 °C εισέρχεται σε θάλαμο ανάμιξης με παροχή 150 kg/min όπου και αναμιγνύεται με υδρατμό που εισέρχεται με την ίδια πίεση αλλά θερμοκρασία 120 °C. Το μίγμα εγκαταλείπει τον θάλαμο στην ίδια πίεση και σε θερμοκρασία 55 °C και οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον είναι 180 kJ/min. Να υπολογισθεί ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας αν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 22 °C.

Ισοζύγιο μάζας: $\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$

Ισοζύγιο ενέργειας: $\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{Q}_{out}$

Από αυτά τα δύο ισοζύγια βρίσκουμε τα άγνωστα $\dot{m}_2$ και $\dot{m}_3$.

Ισοζύγιο εντροπίας: $\dot{S}_{in} - \dot{S}_{out} + \dot{S}_{gen} = 0$

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

Βρίσκουμε τις h_1 , h_2 και h_3 , και τις s_1 , s_2 και s_3 από τους πίνακες!

5.4 Ανακεφαλαίωση

- Η εντροπία ορίζεται από την ανισότητα του Clausius

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

- Για αντιστρεπτές διεργασίες η εντροπία ορίζεται ως:

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

- Η εντροπία που παράγεται σε μια διεργασία είναι πάντα ≥ 0 .
- Σχέσεις $T ds$:

$$Tds = du + Pdv$$

$$Tds = dh - vdP$$

- Οι σχέσεις μεταβολής της εντροπίας σε διεργασίες

- Καθαρές ουσίες

Οποιαδήποτε διεργασία : $\Delta s = s_2 - s_1$

Ισεντροπική διεργασία : $s_2 = s_1$

- Ασυμπίστες ουσίες

Οποιαδήποτε διεργασία : $s_2 - s_1 = C_{av} \ln \frac{T_2}{T_1}$

Ισεντροπική διεργασία : $T_2 = T_1$

- Ιδανικά αέρια

(α) Σταθερές ειδικές θερμότητες

Οποιαδήποτε διεργασία :

$$s_2 - s_1 = C_{v,av} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{u_2}{u_1}$$

$$s_2 - s_1 = C_{p,av} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{u_2}{u_1}$$

Ισεντροπική διεργασία :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{u_1}{u_2} \right)^{\gamma-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{u_1}{u_2} \right)^{\gamma}$$

(β) Μεταβλητές ειδικές θερμότητες

Οποιαδήποτε διεργασία :

$$s_2 - s_1 = s_2^o - s_1^o - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Ισεντροπική διεργασία :

$$s_2^o = s_1^o + R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{r2}}{P_{r1}} \quad \frac{u_2}{u_1} = \frac{u_{r2}}{u_{r1}}$$

- Έργο σταθεροποιημένης ροής: $w_{rev} = - \int_1^2 u dP - \Delta e_k - \Delta E_p$

ασυμπίεστες ουσίες: $w_{rev} = -u(P_2 - P_1) - \Delta e_k - \Delta E_p$

- Έργο αντιστρεπτού συμπίεσής:

$$\text{Ισεντροπική: } w_{comp} = \frac{\gamma R(T_2 - T_1)}{\gamma - 1} = \frac{\gamma R T_1}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right]$$

$$\text{Πολυτροπική: } w_{comp} = \frac{n R(T_2 - T_1)}{n - 1} = \frac{n R T_1}{n - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]$$

$$\text{Ισόθερμη: } w_{comp} = R T \ln \frac{P_1}{P_2}$$

- Ισεντροπική ή αδιαβατική απόδοση:

$$\text{Στρόβιλος: } \eta_T = \frac{\text{πραγματικό έργο}}{\text{ισεντροπικό έργο}} = \frac{w_a}{w_s} \approx \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$$

$$\text{Συμπίεστής: } \eta_C = \frac{\text{ισεντροπικό έργο}}{\text{πραγματικό έργο}} = \frac{w_s}{w_a} \approx \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

$$\text{Ακροφύσιο: } \eta_N = \frac{\text{πραγματική KE}}{\text{ισεντροπική KE}} = \frac{V_{2a}^2}{V_{2s}^2} \approx \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$$

- Ισοζύγιο εντροπίας: $S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{sys}$

$$\dot{S}_{in} - \dot{S}_{out} + \dot{S}_{gen} = \Delta \dot{S}_{sys}$$

$$\text{Σταθερή ροή: } \dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}$$

Κεφάλαιο 6

Εξέργεια

6.1 Ορισμοί

- **Δυναμικό έργο:** η ποσότητα της ενέργειας μιας πηγής που μπορεί να εξαχθεί με τη μορφή ωφέλιμου έργου.
- **Εξέργεια:** το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί από ένα σύστημα που βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση
- **Αντιστρεπτό έργο:** το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να ληφθεί από ένα σύστημα μέσω μιας διεργασίας μεταξύ δύο καθορισμένων καταστάσεων.
- **Αναντιστρεπτότητα:** το έργο που δεν μπορεί να ληφθεί από το σύστημα λόγω μη αντιστρεπτών διεργασιών.
-
- Ένα σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης όταν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον του.
- Το μέγιστο δυνατό έργο πραγματοποιείται από μια αντιστρεπτή διεργασία όταν το σύστημα καταλήγει στην κατάσταση του περιβάλλοντός του.
- Η **εξέργεια** είναι το *το ανώτερο όριο της ποσότητας έργου που μπορεί να παράγει μια συσκευή χωρίς να παραβιάζει κάποιον από τους νόμους της θερμοδυναμικής.*

6.1.1 Εξέργεια σε μία ανεμογεννήτρια

Ο αέρας θα φθάσει σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης όταν μηδενισθεί η ταχύτητα του.

$$\text{Εξέργεια αέρα} = \frac{V_1^2}{2} \quad (kJ/kg)$$

με V_1 τη μέση του ταχύτητα.

$$\text{Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς} = \dot{m}e_k = \rho A V_1 \frac{V_1^2}{2}$$

Αυτή είναι η ισχύς μίας τέλει ανεμογεννήτριας που θα αναγκάζει αυτόν τον αέρα να σταματήσει τελείως!

6.2 Αντιστρεπτότητα

- **Ωφέλιμο Έργο:** Πραγματικό έργο – έργο περιβάλλοντος
- **Αντιστρεπτό Έργο:** Μέγιστη ποσότητα ωφέλιμου έργου που μπορεί να παραχθεί από το σύστημα όταν αλλάζει από μια συγκεκριμένη αρχική σε μία συγκεκριμένη τελική κατάσταση.
- Η διαφορά ανάμεσα στο Ωφέλιμο Έργο και στο Αντιστρεπτό Έργο είναι η **Αναντιστρεπτότητα** της διεργασίας

$$I = W_{rev,out} - W_{u,out}$$

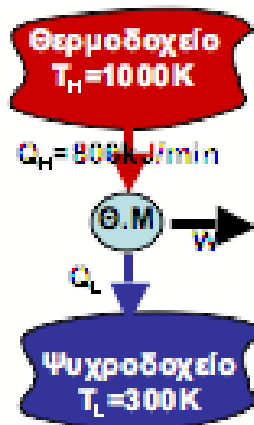
(εξέργεια που καταστρέφεται)

6.2.1 Ο ρυθμός αναντιστρεπτότητας μιας Θερμικής Μηχανής

Η αντιστρεπτή (μέγιστη) ισχύς για μια θερμική μηχανή είναι η ισχύς που παράγει μια αντιστρεπτή μηχανή Carnot ανάμεσα στα ίδιες T_H και T_L .

$$\dot{W}_{rev} = \eta_{rev} \dot{Q}_{in} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) \dot{Q}_{in}$$

Ο ρυθμός αναντιστρεπτότητας είναι $\dot{W}_{rev} - \dot{W}$



Απόδοση, η_{II} του 2ου νόμου

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{therm}}{\eta_{therm,rev}}$$

$$\bullet \text{ Παραγωγή έργου: } \eta_{II} = \frac{W}{W_{rev}}$$

$$\bullet \text{ Αντλίες θερμότητας: } \eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}}$$

$$\bullet \eta_{II} = \frac{\text{εξέργεια που ανακτάται}}{\text{εξέργεια}} = 1 - \frac{\text{αναντιστρεπτότητα}}{\text{εξέργεια}}$$

Εξέργεια που σχετίζεται με διάφορες μορφές ενέργειας

- Κινητική: $x = \frac{V^2}{2}$
- Δυναμική: $x = gz$
- Εσωτερική: $x = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$
- Ροής: $x = (P - P_0)v$
- Ενθαλπίας: $x = (u - u_0) + P_0(v - v_0) + (P - P_0)v - T_0(s - s_0) = (h - h_0) - T(s - s_0)$

Μεταβολή της εξέργειας

- Εξέργεια απουσία ροής:

$$\Delta\phi = (u_2 - u_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

- Εξέργεια ροής:

$$\Delta\psi = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

6.3 Αρχή μείωσης της εξέργειας

- Απομονωμένο σύστημα: $\Delta X_{isol} = (X_2 - X_1)_{isol} \leq 0$
- Για ένα απομονωμένο σύστημα η μείωση της εξέργειας είναι ίση με την αναντιστροφή
- Καταστροφή της εξέργειας: $X_{destroyed} = T_0 S_{gen}$