



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Χημικών Μηχανικών

Εισαγωγή στη Χημική Μηχανική

Ισοζύγια ενέργειας χωρίς αντίδραση

Επ. Καθ. Κυριάκος Λαμπρόπουλος

1

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ – ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ – ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΓΙΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

$$\boxed{\text{ΕΙΣΡΟΗ}} + \boxed{\text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ}} - \boxed{\text{ΕΚΡΟΗ}} - \boxed{\text{ΚΑΤΑΜΑΛΩΣΗ}} = \boxed{\text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ}}$$

Ισοζύγια ενέργειας χωρίς αντίδραση

- **Σύστημα** (σύνολο διεργασιών που μελετάμε)
- **Περιβάλλον** (έξω από τα όρια του συστήματος)
- **Κλειστό σύστημα:** Το σύστημα δεν ανταλλάσσει μάζα με το περιβάλλον, αλλά ανταλλάσσει ενέργεια (π.χ. θερμότητα, έργο)
- **Ανοικτό σύστημα:** Το σύστημα ανταλλάσσει με το περιβάλλον μάζα και ενέργεια

2

2

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ – ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ – ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΓΙΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- **Ιδιότητα-μεταβλητή:** Μετρούμενα/παρατηρούμενα χαρακτηριστικά του συστήματος όπως p , T , V κ.ά.
- **Φάση:** Μέρος ή ολόκληρο σύστημα που είναι διακριτό, ομογενές με καθορισμένη σύσταση (στερεό, υγρό, αέριο)
- **Μόνιμη κατάσταση:** Δεν παρατηρείται συσσώρευση στο σύστημα (οι ροές και οι ιδιότητες αμετάβλητες με τον χρόνο)

$$\boxed{\text{ΕΙΣΡΟΗ}} = \boxed{\text{ΕΚΡΟΗ}}$$

- **Μη μόνιμη κατάσταση (μεταβατική)**

$$\boxed{\text{ΕΙΣΡΟΗ}} - \boxed{\text{ΕΚΡΟΗ}} = \boxed{\text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ}}$$

3

3

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ – ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ – ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΓΙΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Έννοια	Περιγραφή
Αδιαβατικό σύστημα	Σύστημα που <u>δεν ανταλλάσσει θερμότητα</u> με το περιβάλλον κατά την διάρκεια μιας διεργασίας (τέλεια μονωμένο)
Ισοβαρές σύστημα	Σύστημα στο οποίο <u>η πίεση διατηρείται σταθερή</u>
Ισοθερμοκρασιακό σύστημα	Σύστημα στο οποίο <u>η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή</u>

4

4

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ – ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ – ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΓΙΑ ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

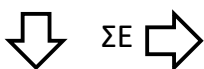
Έννοια	Περιγραφή
Μεταβλητή διαδρομής (συνάρτηση μετάβασης)	Κάθε μεταβλητή της οποίας η τιμή <u>εξαρτάται από τον τρόπο πραγματοποίησης της μεταβολής</u> και μπορεί να διαφέρει για διαφορετικές «διαδρομές» από την αρχική στην τελική κατάσταση (π.χ. θερμότητα, έργο)
Καταστατική μεταβολή (σημειακή συνάρτηση)	Κάθε μεταβλητή της οποίας η τιμή <u>εξαρτάται μόνο από την κατάσταση του συστήματος (αρχική και τελική κατάσταση)</u> και όχι από τη διαδρομή που θα ακολουθηθεί (π.χ. εσωτερική ενέργεια, ενθαλπία)

5

5

ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΕΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ & ΕΡΓΟΥ)

ΑΠΟ



ΣΕ

	J	cal	kWh	Btu	ft lb _f	hp h
J	1	0,2390	$2,778 \times 10^{-7}$	$9,478 \times 10^{-4}$	0,7376	$3,725 \times 10^{-7}$
cal	4,184	1	$1,162 \times 10^{-6}$	$3,970 \times 10^{-3}$	3,086	$1,558 \times 10^{-6}$
kWh	$3,6 \times 10^6$	$8,606 \times 10^5$	1	3412,14	$2,655 \times 10^6$	1,341
Btu	1055	252	$2,930 \times 10^{-4}$	1	778,16	$3,930 \times 10^{-4}$
ft lb _f	1,356	0,3241	$3,766 \times 10^{-7}$	$1,285 \times 10^{-3}$	1	$5,051 \times 10^{-7}$
hp h	$2,685 \times 10^6$	$6,416 \times 10^5$	0,7455	2545	$1,980 \times 10^6$	1

6

6

ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΕΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

ΑΠΟ



ΣΕ



	J s^{-1}	kW	ft lb_f / s	Btu / s	hp
J s^{-1}	1	10^{-3}	0,7376	$9,478 \times 10^{-4}$	$1,341 \times 10^{-3}$
kW	1000	1	737,56	0,9478	1,341
ft lb_f / s	1,356	$1,356 \times 10^{-3}$	1	$1,285 \times 10^{-3}$	$1,818 \times 10^{-3}$
Btu / s	1055	1,055	778,16	1	1,415
hp	745,7	0,7457	550	0,7068	1

7

7

ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι 4 βασικές μορφές της ενέργειας χαρακτηρίζουν την ενεργειακή κατάσταση ενός συστήματος μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή

Βασικές μορφές ενέργειας	Περιγραφή
Κινητική ενέργεια (E_k)	Η ενέργεια που έχει ένα σύστημα λόγω της κίνησής του [$E_k = \frac{1}{2}mu^2$]
Δυναμική ενέργεια (E_p)	Η ενέργεια που έχει ένα σύστημα λόγω της θέσης του (ως προς κάποιο δυναμικό πεδίο) [$E_p = mgh$]
Εσωτερική ενέργεια (U)	Η ενέργεια που έχει ένα σύστημα λόγω της κίνησης των μορίων (μικροσκοπικό επίπεδο)
Ενθαλπία (H)	Η ενέργεια που έχει ένα σύστημα λόγω της κίνησης των μορίων και της πίεσης

8

8

ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ενέργεια λόγω μεταφορικής κίνησης του συστήματος (συνολικό) σε σχέση με ένα σύστημα αναφοράς (π.χ. επιφάνεια της γης)



$$E_k = \frac{1}{2} m u^2 \quad [=] \text{ J}$$

$$\dot{E}_k = \frac{1}{2} \dot{m} u^2 \quad [=] \text{ J/s}$$

$$\hat{E}_k = \frac{1}{2} u^2 \quad \text{Καταστατική μεταβλητή ανά μονάδα μάζας (ειδική κινητική ενέργεια)}$$

9

9

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ενέργεια λόγω θέσης του συστήματος που βρίσκεται υπό την επίδραση πεδίου (ασκείται δύναμη σε αυτό, π.χ. βαρυτικό) σε σχέση με ένα επίπεδο αναφοράς

$$E_p = mgh$$

$$\dot{E}_p = \dot{m}gh$$

$$\hat{E}_p = gh$$



10

10

ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η Εσωτερική Ενέργεια (U) δεν περιλαμβάνει E_k και E_p , αλλά **οφείλεται στην κίνηση μορίων σε σχέση με το κέντρο μάζας του συστήματος**, λόγω περιστροφικής, δονητικής κίνησης μορίων και λόγω κίνησης και αλληλεπίδρασης ατομικών και υποατομικών σωματιδίων

Η Εσωτερική Ενέργεια U είναι **καταστατική συνάρτηση** (ιδιότητα) η οποία δεν μπορεί να μετρηθεί παρά μόνο έμμεσα μέσω άλλων μεταβλητών

$$\hat{U} = f(T, \hat{V}) \Rightarrow d\hat{U} = \underbrace{\left(\frac{\partial \hat{U}}{\partial T}\right)_{\hat{V}}}_{C_v} dT + \left(\frac{\partial \hat{U}}{\partial \hat{V}}\right)_T d\hat{V}$$

συνήθως 0

Θερμοχωρητικότητα - ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο $= f(T)$

11

ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

- Δεν έχουν νόημα οι απόλυτες τιμές εσωτερικής ενέργειας. Μόνο οι διαφορές μεταξύ δύο καταστάσεων μπορούν να μετρηθούν (ΔU):

$$\Delta \hat{U} = \hat{U}_2 - \hat{U}_1 = \int_{\hat{U}_1}^{\hat{U}_2} d\hat{U} = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT$$

Ιδανικό αέριο $U(T)$,
όχι αλλαγή φάσεων

- Γενικά, σε πίνακες δίνονται τα ΔU ως προς κάποιες συνθήκες αναφοράς, οπότε:

$$\Delta \hat{U} = \hat{U}_2 - \hat{U}_1 = \underbrace{(\hat{U}_2 - \hat{U}_{\text{ref}})}_{\text{Κατάσταση 2}} - \underbrace{(\hat{U}_1 - \hat{U}_{\text{ref}})}_{\text{Κατάσταση 1}}$$

- Σε μίγμα ισχύει $U_{\text{ολ}} = m_1 \hat{U}_1 + m_2 \hat{U}_2 + \dots$

12

12

ΕΝΘΑΛΠΙΑ

Η Ενθαλπία (H) είναι η **ενέργεια που έχει ένα σύστημα λόγω της κίνησης των μορίων και λόγω της πίεσης.**

Συνδέει την εσωτερική ενέργεια με την πίεση και τον όγκο:

$$H = U + P V$$

Η **Ενθαλπία** μπορεί να μετρηθεί μόνο έμμεσα μέσω άλλων μεταβλητών

$$\hat{H} = f(T, P) \Rightarrow d\hat{H} = \underbrace{\left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial T}\right)_P}_{C_p} dT + \cancel{\left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial P}\right)_T}_{\text{συνήθως 0}} d\hat{P}$$

Ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση = $f(T)$

13

13

ΕΝΘΑΛΠΙΑ

1. Νόημα έχουν μόνο οι διαφορές ενθαλπίας (ΔH) και όχι οι απόλυτες τιμές :

$$\Delta \hat{H} = \hat{H}_2 - \hat{H}_1 = \int_{\hat{H}_1}^{\hat{H}_2} d\hat{H} = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad \text{Ιδανικό αέριο } U(T), \text{ όχι αλλαγή φάσεων}$$

2. Γενικά, σε πίνακες δίνονται τα ΔH ως προς κάποιες συνθήκες αναφοράς, οπότε:

$$\Delta \hat{H} = \hat{H}_2 - \hat{H}_1 = (\hat{H}_2 - \hat{H}_{\text{ref}}) - (\hat{H}_1 - \hat{H}_{\text{ref}})$$

14

14

ΕΝΘΑΛΠΙΑ

Η ενθαλπία αποτελεί, ουσιαστικά, έναν άλλο τρόπο έκφρασης της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος όπου σαν ανεξάρτητες μεταβλητές επιλέγονται η θερμοκρασία και η πίεση



- Η εσωτερική ενέργεια U μετράει τις θερμοκρασιακές επιδράσεις στην κίνηση των μορίων, ενώ η ενθαλπία H μετράει τις επιδράσεις της θερμοκρασίας και της πίεσης
- Η ενθαλπία χρησιμοποιείται κυρίως στα ισοζύγια ενέργειας ανοικτών συστημάτων όπου υπάρχει ροή υλικών

15

15

ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

- Η **ειδική θερμότητα** εξαρτάται από την εξεταζόμενη ουσία και τη θερμοκρασία και εκφράζει το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για να υψώσει τη θερμοκρασία μιας μονάδας μάζας (1 g) κατά ένα βαθμό (1 °C)
- **Ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο (c_V)**
 - Για τον υπολογισμό της U
- **Ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση (c_P)**
 - Για τον υπολογισμό της H
 - Για κάθε ουσία εκφράζεται ως πολυωνυμική συνάρτηση της θερμοκρασίας και έτσι μπορούμε να υπολογίζουμε τις μεταβολές της ενθαλπίας μιας ουσίας μεταξύ δύο θερμοκρασιών: $\Delta \hat{H} = \hat{H}_2 - \hat{H}_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p dP$
- Για ιδανικά αέρια ισχύει: $c_P = c_V + R$, ενώ για υγρά, στερεά $c_P \approx c_V$

$$d\hat{U} = \left(\frac{\partial \hat{U}}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial \hat{U}}{\partial V} \right)_T d\hat{V}$$

$$d\hat{H} = \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial P} \right)_T d\hat{P}$$

16

16

ΠΙΝΑΚΕΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Table B.2 Heat Capacities^a

Form 1: $C_p[\text{kJ}/(\text{mol}\cdot^\circ\text{C})]$ or $[\text{kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})] = a + bT + cT^2 + dT^3$

Form 2: $C_p[\text{kJ}/(\text{mol}\cdot^\circ\text{C})]$ or $[\text{kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})] = a + bT + cT^{-2}$

Example: $(C_p)_{\text{acetone(g)}} = 0.07196 + (20.10 \times 10^{-5})T - (12.78 \times 10^{-8})T^2 + (34.76 \times 10^{-12})T^3$, where T is in $^\circ\text{C}$.

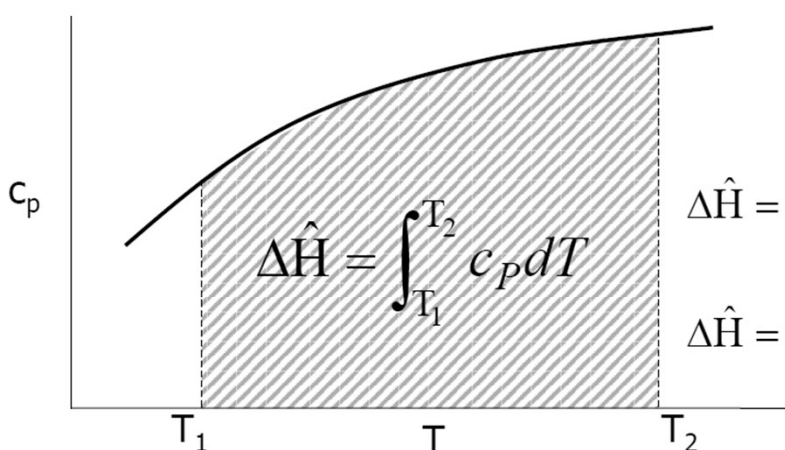
Note: The formulas for gases are strictly applicable at pressures low enough for the ideal gas equation of state to apply.

Compound	Formula	Mol. Wt.	State	Form	Temp. Unit	$a \times 10^3$	$b \times 10^5$	$c \times 10^8$	$d \times 10^{12}$	Range (Units of T)
Acetone	<chem>CH3COCH3</chem>	58.08	l	1	$^\circ\text{C}$	123.0	18.6			-30-60
			g	1	$^\circ\text{C}$	71.96	20.10	-12.78	34.76	0-1200
Acetylene	<chem>C2H2</chem>	26.04	g	1	$^\circ\text{C}$	42.43	6.053	-5.033	18.20	0-1200
Air		29.0	g	1	$^\circ\text{C}$	28.94	0.4147	0.3191	-1.965	0-1500
			g	1	K	28.09	0.1965	0.4799	-1.965	273-1800
Ammonia	<chem>NH3</chem>	17.03	g	1	$^\circ\text{C}$	35.15	2.954	0.4421	-6.686	0-1200
Formaldehyde	<chem>CH2O</chem>	30.03	g	1	$^\circ\text{C}$	34.28	4.268	0.0000	-8.694	0-1200
Methane	<chem>CH4</chem>	16.04	g	1	$^\circ\text{C}$	34.31	5.469	0.3661	-11.00	0-1200
Methyl cyclopentane	<chem>C6H12</chem>	84.16	g	1	$^\circ\text{C}$	98.83	45.857	-30.44	83.81	0-1200
Nitric acid	<chem>NHO3</chem>	63.02	l	1	$^\circ\text{C}$	110.0				25
Nitric oxide	<chem>NO</chem>	30.01	g	1	$^\circ\text{C}$	29.50	0.8188	-0.2925	0.3652	0-3500

17

17

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ C_p



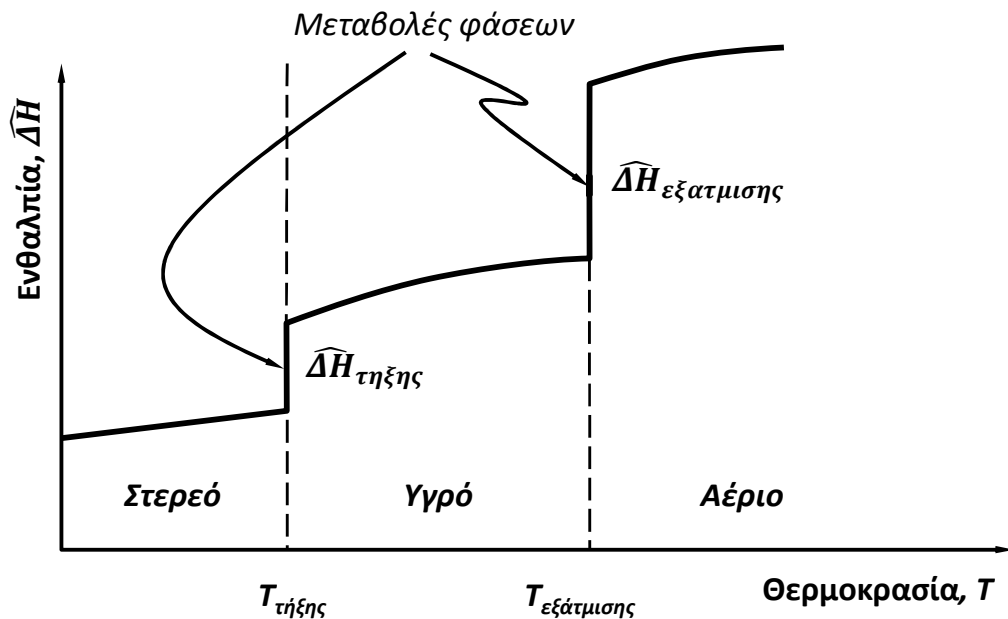
$$\Delta \hat{H} = \int_{T_1}^{T_2} (a + \beta T + \gamma T^2 + \delta T^3) dT \Rightarrow$$

$$\Delta \hat{H} = \left(aT + \frac{\beta T^2}{2} + \frac{\gamma T^3}{3} + \frac{\delta T^4}{4} \right) \Bigg|_{T_1}^{T_2} \Rightarrow$$

$$\Delta \hat{H} = a(T_2 - T_1) + \frac{\beta(T_2^2 - T_1^2)}{2} + \frac{\gamma(T_2^3 - T_1^3)}{3} + \frac{\delta(T_2^4 - T_1^4)}{4}$$

18

18

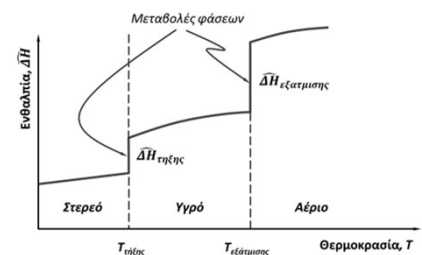
ΕΝΘΑΛΠΙΑ vs ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ – ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΤΗΞΗΣ / ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ


19

19

ΕΝΘΑΛΠΙΑ vs ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ – ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΤΗΞΗΣ / ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ
Μεταβολή φάσεων

Έστω ένα συστατικό με αλλαγή φάσεων



$$\Delta H = \hat{H}(T) - \hat{H}(T_{\text{αναφ}}) =$$

$$= \underbrace{\int_{T_{\text{αναφ}}}^{T_{\text{τήξης}}} c_{P,s} dT}_{\text{Αισθητή θερμότητα στερεού}} + \underbrace{\Delta \hat{H}_{\text{τήξης}}}_{\text{Αισθητή θερμότητα υγρού}} + \underbrace{\int_{T_{\text{τήξης}}}^{T_{\text{εξάτμ}}} c_{P,l} dT}_{\text{Αισθητή θερμότητα αερίου}} + \underbrace{\Delta \hat{H}_{\text{εξάτμ.}}}_{\text{Αισθητή θερμότητα αερίου}} + \underbrace{\int_{T_{\text{εξάτμ}}}^T c_{P,v} dT}_{\text{Αισθητή θερμότητα αερίου}}$$

Αισθητή θερμότητα στερεού

Αισθητή θερμότητα υγρού

Αισθητή θερμότητα αερίου

20

20

ΝΟΜΟΣ HESS – ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

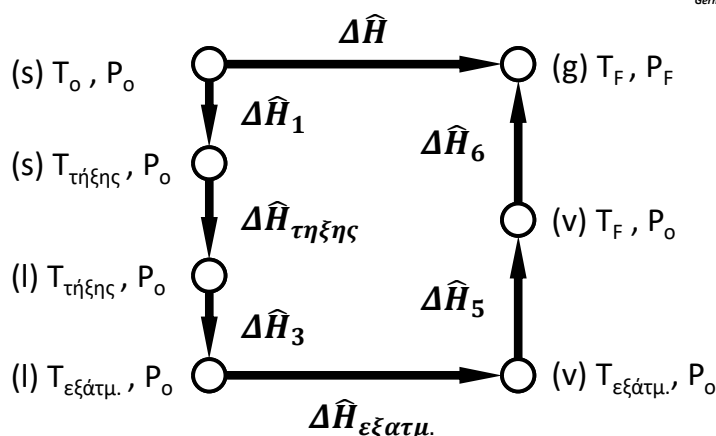
Η **συνολική μεταβολή της ενθαλπίας** κατά τη διάρκεια πλήρους κύκλου από μία κατάσταση σε μια άλλη είναι η ίδια είτε η μεταβολή γίνεται σε ένα ή περισσότερα στάδια



Germain Henri Hess

$$\begin{aligned} &\Delta \hat{H}_1 \\ &+ \Delta \hat{H}_{\text{τηξης}} \\ &+ \Delta \hat{H}_3 \\ &+ \Delta \hat{H}_{\text{εξάτμ}} \\ &+ \Delta \hat{H}_5 \\ &+ \Delta \hat{H}_6 \end{aligned}$$

$$\Delta \hat{H} = \hat{H}_F - \hat{H}_O$$



21

21

ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΠΕΡΙ Ενθαλπίας, εσωτερικής ενέργειας, C_p & C_v

$$d\hat{U} = \left(\frac{\partial \hat{U}}{\partial T} \right)_{\hat{V}} dT + \left(\frac{\partial \hat{U}}{\partial \hat{V}} \right)_T d\hat{V}$$

$$\Delta \hat{U} = \int_{T_1}^{T_2} C_V(T) dT$$

$$\Delta \hat{U} \approx 0 \quad \text{όταν } T = \text{σταθ.}$$

- Ιδανικά αέρια
- Μη ιδανικά αν $V = \text{σταθερό}$
- Στερεό, υγρό
- Ιδανικά αέρια
- Στερεό, υγρό

$$d\hat{H} = \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial P} \right)_T dP$$

$$\Delta \hat{H} = \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT$$

$$\Delta \hat{H} \approx 0 \quad \text{όταν } T = \text{σταθ.}, \Delta P \text{ μικρό}$$

$$\Delta \hat{H} = \hat{V} \Delta P \quad \text{όταν } T = \text{σταθ.}$$

$$\Delta \hat{H} = \hat{V} \Delta P + \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT$$

$$\text{όταν } \hat{V} = \text{σταθ.}, \Delta T \neq 0, \Delta P \neq 0$$

- Ιδανικά αέρια
- Μη ιδανικά αν $P = \text{σταθερό}$
- Ιδανικά αέρια
- Υγρό, στερεό
- Στερεό, υγρό

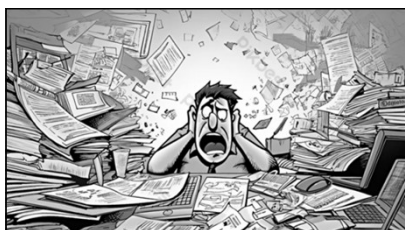
22

22

ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΠΕΡΙ Ενθαλπίας, εσωτερικής ενέργειας, C_p & C_v

- Στα στερεά/υγρά, συνήθως δεν λαμβάνουμε υπόψη την επίδραση της πίεσης P στη μεταβολή της ενθαλπίας ΔH , εκτός αν η ΔP είναι της τάξης των 50 atm ή περισσότερο.
- Στα αέρια, κατά κανόνα δεν λαμβάνουμε υπόψη την επίδραση της πίεσης P στη μεταβολή της ενθαλπίας ΔH , εκτός εάν η T είναι πολύ μικρότερη των 0°C ή η P έχει μέσες τιμές (πάνω 10 atm).

Που βρίσκω δεδομένα;



Ιδιότητα
 C_p
 $\hat{H}$ κυριότερων αερίων
 $T_m, T_b, \Delta \hat{H}_m, \Delta \hat{H}_v$

Πίνακες Felder's

B.2
B.8 & B.9
B.1

23

23

ΜΟΡΦΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μπορούμε να έχουμε μεταφορά ενέργειας ώστε να διαφοροποιείται η ενεργειακή κατάσταση ενός συστήματος.

Δύο βασικές μορφές μεταφοράς ενέργειας:

Θερμότητα (Q)

Μεταφορά ενέργειας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς (από το θερμό στο ψυχρό).

Κατά σύμβαση: **Θετική (+) όταν ρέει ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ**

Έργο (W)

Η μεταφορά ενέργειας που συνδέεται με μετατόπιση στο σύστημα όταν εφαρμόζεται σε αυτό κάποια δύναμη.

Κατά σύμβαση: **Θετικό (+) όταν ασκείται ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

Σημείωση: Βέβαια, κάποιοι θεωρούν το έργο θετικό (+) όταν προσδίδεται από το περιβάλλον στο σύστημα!!! 🤪

24

24

ΠΕΡΙ ΠΡΟΣΗΜΩΝ.....

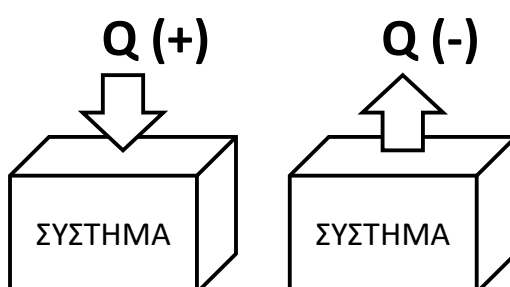
ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ (Q)

Μεταφορά ενέργειας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος

Τύπος ενέργειας: Μεταβλητή διαδρομής

Πρόσημο **Θετική (+) όταν ρέει από το περιβάλλον στο σύστημα**

Μηχανισμοί: Αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία



25

25

ΠΕΡΙ ΠΡΟΣΗΜΩΝ.....

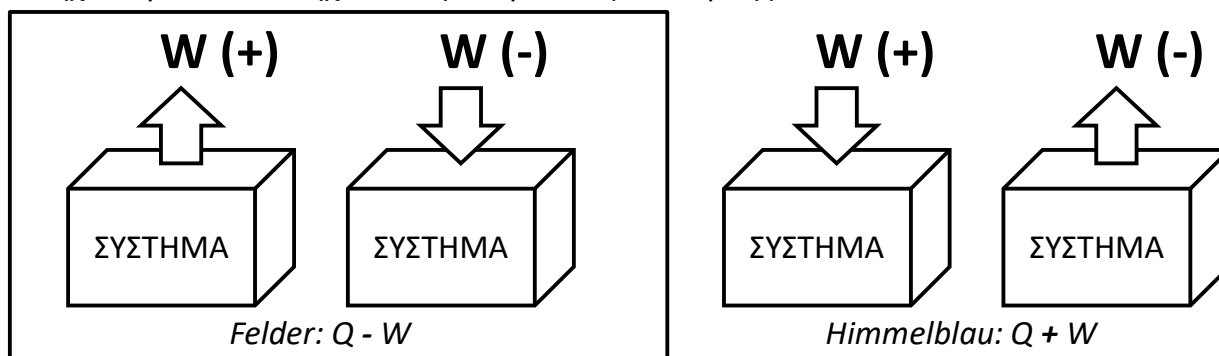
ΕΡΓΟ (W)

Μεταφορά ενέργειας, λόγω δύναμης, δυναμικού, μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος που όμως δεν αποθηκεύεται.

Τύπος ενέργειας: Μεταβλητή διαδρομής

Πρόσημο (Κατά σύμβαση) **Θετικό (+) όταν ρέει από το σύστημα προς περιβάλλον**

Μηχανισμοί: Μηχανικό, ηλεκτρικό, αξονικό, ροής



26

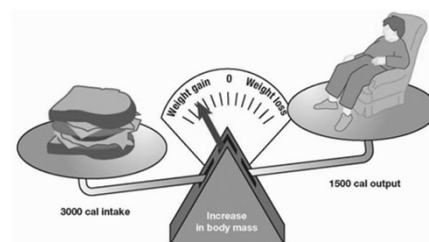
26

ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

$$\boxed{\text{ΕΙΣΡΟΗ}} + \boxed{\text{ΠΑΡΑΓΩΓΗ}} - \boxed{\text{ΕΚΡΟΗ}} - \boxed{\text{ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ}} = \boxed{\text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ}}$$

Η ενέργεια ούτε δημιουργείται, ούτε καταστρέφεται στα συστήματα που εξετάζουμε στην ενότητα αυτή

$$\boxed{\text{ΕΙΣΡΟΗ}} - \boxed{\text{ΕΚΡΟΗ}} = \boxed{\text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ}}$$



27

27

ΚΛΕΙΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Κλειστό σύστημα

- Όταν δεν υπάρχει ροή μάζας στα όρια του συστήματος.
- Παρότι δεν υπάρχει εισροή ή εκροή μάζας, μπορεί να υπάρχει εισροή ή εκροή ενέργειας.

$$\text{ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ} = \text{ΕΙΣΡΟΗ} - \text{ΕΚΡΟΗ}$$

όμως, όσον αφορά στην Ενέργεια:

$$\text{Συσσώρευση} = \text{Τελική Ενέργεια} - \text{Αρχική ενέργεια} \Rightarrow$$

$$(U + E_k + E_p)_{\text{τελική}} - (U + E_k + E_p)_{\text{αρχική}} = \text{«καθαρή» (net) ενέργεια που μεταφέρεται στο σύστημα (in-out)}$$

Μεταβολή στην ενέργεια του συστήματος (Συσσώρευση)

$$\boxed{\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p} = \boxed{Q - W}$$

Μεταφορά ενέργειας στο σύστημα που προκαλεί τη μεταβολή

28

28

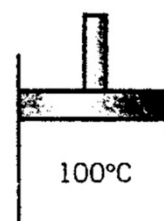
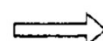
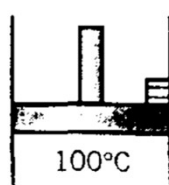
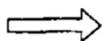
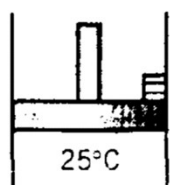
ΑΣΚΗΣΗ – ΚΛΕΙΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1



Ένα **τέλειο αέριο** περιέχεται σε ένα κύλινδρο με κινητό έμβολο στους **25°C**. Ο κύλινδρος μπαίνει σε νερό που βράζει με το έμβολο σταθερό και το **αέριο απορροφά θερμότητα 2 kcal** έτσι ώστε να φτάσει τους **100°C** (σε ισορροπία με το νερό που βράζει). Στη συνέχεια το έμβολο απελευθερώνεται και το αέριο σπρώχνει το έμβολο παράγοντας **έργο 100 J**. Η τελική θερμοκρασία του αερίου είναι αμετάβλητη στους **100°C**.

Γράψτε και επιλύστε το ισοζύγιο ενέργειας για κάθε μία από τις δύο φάσεις της διεργασίας (θέρμανση, εκτόνωση) – Σύστημα είναι το αέριο, $\Delta E_p = 0$, Ιδανικό αέριο, Ενέργεια σε Joules



29

29

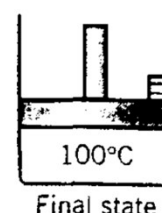
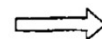
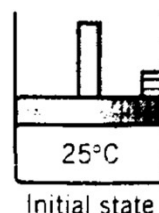
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

ΛΥΣΗ

Υποθέσεις:

- Σύστημα είναι το αέριο
- Ιδανικό αέριο
- Καμία μεταβολή ΔE_p του αερίου με μετακίνηση του εμβόλου

Διεργασία 1:
Θέρμανση



Διεργασία 1: 25°C (αρχική) → 100°C (τελική)

ακίνητο δεν μετακινείται το έμβολο

Κλειστό σύστημα: $\Delta U + \cancel{\Delta E_k} + \cancel{\Delta E_p} = Q - W$ (1)

$$\Rightarrow \Delta U = Q = 2.00 \text{ kcal} \cdot \frac{1000 \text{ cal}}{1 \text{ kcal}} \cdot \frac{4.184 \text{ J}}{1 \text{ cal}} = 8368 \text{ J}$$

Δηλαδή το σύστημα κερδίζει ενέργεια!

30

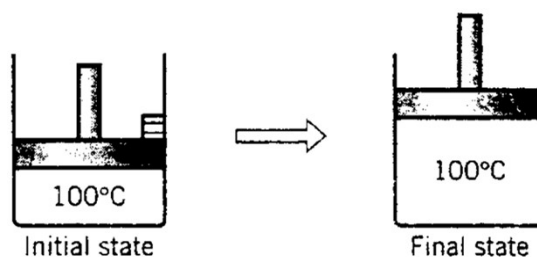
30

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

ΛΥΣΗ

Υποθέσεις:

- Σύστημα είναι το αέριο
- Ιδανικό αέριο
- Καμία μεταβολή ΔE_p του αερίου με μετακίνηση του εμβόλου

Διεργασία 2:
Εκτόνωση

Διεργασία 2: 100°C (αρχική) $\rightarrow$ 100°C (τελική)
Μετακίνηση εμβόλου (εκτόνωση αερίου)

Κλειστό σύστημα: $\Delta U + \cancel{\Delta E_k} + \cancel{\Delta E_p} = Q - W$ (2)

Όμως $\Delta U = 0$
Ιδανικό αέριο $\Delta T = 0$

$$Q = W = (+100) \text{ J}$$

Επομένως μια πρόσθετη θερμότητα 100 J μεταφέρεται στο αέριο καθώς εκτονώνεται !!!

Έργο από το σύστημα
προς το περιβάλλον
(πρόσημο +)

31

31

ΑΝΟΙΧΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ)

Ανοιχτό σύστημα

- Υπάρχει ροή μάζας στα όρια του συστήματος.
- Μόνιμη κατάσταση (συσσώρευση = 0) $\Rightarrow$

ΡΥΘΜΟΣ ΕΙΣΡΟΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ = ΡΥΘΜΟΣ ΕΚΡΟΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Εισροή Εισροή ενέργειας από την κινητική, δυναμική και εσωτερική ενέργεια των ρευμάτων εισροής, συν τη θερμότητα που τυχόν εισέρχεται από το περιβάλλον προς το σύστημα.

Εκροή Εκροή ενέργειας από την κινητική, δυναμική και εσωτερική ενέργεια των ρευμάτων εκροής, συν το έργο που τυχόν αποδίδεται από το σύστημα προς το περιβάλλον

$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k + \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}$$

Διαφορά ενεργειακής κατάστασης
εκροής – εισροής

Ρυθμός εισαγωγής ενέργειας
στο σύστημα

32

32

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΛΕΙΣΤΟΥ & ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ)
Ισοζύγιο Ενέργειας σε κλειστό σύστημα

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

Δ: Η διαφορά (τελική – αρχική, αφορά στη μάζα του συστήματος) αναφέρεται μεταξύ δύο χρονικών στιγμών
(Α' Θερμοδυναμικός νόμος)

Ισοζύγιο Ενέργειας σε ανοιχτό σύστημα

$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k + \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}$$

Δ: Η διαφορά αναφέρεται μεταξύ ρευμάτων εξόδου και εισόδου

33

33

ΕΠΙΛΥΣΗ ΙΣΟΖΥΓΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ

ΚΛΕΙΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ: $\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q - W$

ΑΝΟΙΧΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ: $\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k + \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}$

1. Επιλύω ισοζύγια μάζας
2. Καταστρώνω εξίσωση ισοζυγίου ενέργειας
3. Διαλέγω συνθήκες αναφοράς (π.χ. εισόδου, εξόδου, κ.α.)
4. Καταστρώνω πίνακας για τις ροές:

<u>Κλειστό σύστημα</u>	$n_i, \hat{U}_i$
<u>Ανοιχτό σύστημα</u>	$\dot{n}_i, \hat{H}_i$
5. Υπολογίζω τα $\hat{U}_i, \hat{H}_i$

$$\Delta U = \sum_{\tau\epsilon\lambda} n_i \hat{U}_i - \sum_{\alpha\rho\chi} n_i \hat{U}_i$$

$$\Delta \dot{H} = \sum_{\tau\epsilon\lambda} \dot{n}_i \hat{H}_i - \sum_{\alpha\rho\chi} \dot{n}_i \hat{H}_i$$

34

34

ΑΣΚΗΣΗ – ΑΝΟΙΧΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

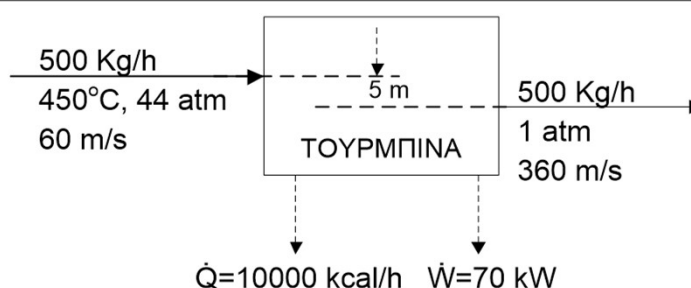
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2



500 kg/h ατμού τροφοδοτούν μια τουρμπίνα. Ο ατμός εισέρχεται στην τουρμπίνα (στρόβιλος) σε θερμοκρασία **450°C**, πίεση **44 atm** και ταχύτητα **60 m/s**. Εγκαταλείπει την τουρμπίνα **5 m** χαμηλότερα σε ατμοσφαιρική πίεση και ταχύτητα **360 m/s**. Η τουρμπίνα **αποδίδει έργο 70 kW** και έχει **απώλειες λόγω θερμότητας 10000 kcal/h**

Υπολογίστε τη μεταβολή της ειδικής ενθαλπίας στο σύστημα

$$\Delta \hat{H} = -650 \text{ kJ / kg}$$



35

35

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

ΛΥΣΗ:

Καλό θα ήταν να χρησιμοποιούμε κοινό σύστημα μονάδων (kW ή kJ/s)

$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k + \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W} \quad (1)$$

$$\Delta \dot{E}_k = \frac{1}{2} \dot{m} (u_2^2 - u_1^2) = \frac{1}{2} \cdot \frac{500 \text{ kg}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} (360^2 - 60^2) \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 8750 \text{ J/s} = \mathbf{8.75 \text{ kW}}$$

$$\Delta \dot{E}_p = \dot{m} g (h_2 - h_1) = \frac{500 \text{ kg}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (-5) \text{ m} = -6.81 \text{ J/s} = \mathbf{-6.81 \cdot 10^{-3} \text{ kW}}$$

$$\dot{Q} = -10000 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \cdot \frac{4.184 \text{ kJ}}{\text{kcal}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = -11,6 \text{ kJ/s} = \mathbf{-11.6 \text{ kW}}$$

[(-) θερμότητα αποδίδεται στο περιβάλλον]

$$\dot{W} = +70 \text{ kW} \quad [(+) \text{ έργο αποδίδεται στο περιβάλλον }]$$

36

36

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

ΛΥΣΗ:

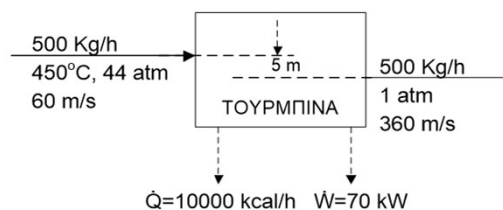
Καλό θα ήταν να χρησιμοποιούμε κοινό σύστημα μονάδων (kW ή kJ/s)

$$(1) \Rightarrow \Delta \dot{H} = -\Delta \dot{E}_k - \Delta \dot{E}_p + \dot{Q} - \dot{W}$$

$$\Delta \dot{H} = -8.75 \text{ kW} - (-6.81 \cdot 10^{-3} \text{ kW}) + (-11.6) \text{ kW} - (+70) \text{ kW} = -90.3 \text{ kW}$$

Αλλά $\Delta \dot{H} = \dot{m}(\hat{H}_2 - \hat{H}_1) = \dot{m} \cdot \Delta \hat{H} \Rightarrow$

$$\Delta \hat{H} = \frac{\Delta \dot{H}}{\dot{m}} = \frac{-90.3 \text{ kJ/s}}{500 \text{ kg/h}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = -650 \text{ kJ/kg}$$



37

37

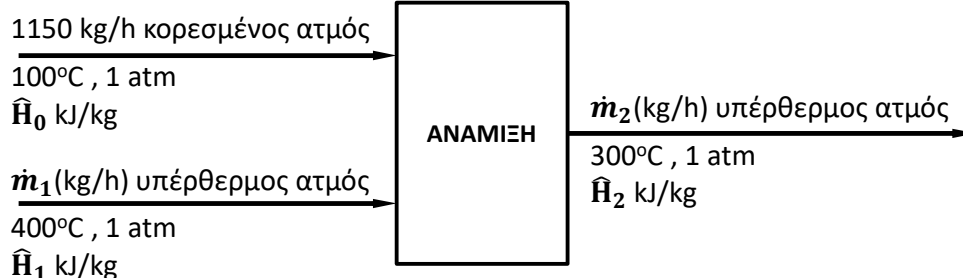
ΑΣΚΗΣΗ – ΑΝΟΙΧΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3



Σε ένα εναλλάκτη θερμότητας απαιτείται **υπέρθερμος ατμός 300°C** και πίεσης **1 atm**. Ο ατμός αυτός θα προκύψει από την **αδιαβατική ανάμιξη** ($Q=0$) ρεύματος **1150 kg/h κορεσμένου ατμού πίεσης 1 atm** και ρεύματος **υπέρθερμου ατμού 400°C και πίεσης 1 atm**.

- Υπολογίστε την ποσότητα (kg/h) του απαιτούμενου υπέρθερμου ατμού των 400°C και του παραγόμενου υπέρθερμου ατμού των 300°C.
- Υπολογίστε τις αντίστοιχες ογκομετρικές παροχές.



38

38

3940

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3**ΛΥΣΗ:****ΒΗΜΑ 1:**

Από τους πίνακες/διαδικτυακά εργαλεία/εφαρμογές βρίσκουμε τις $\hat{H}$ του ατμού στις αναφερόμενες θερμοκρασίες:

$$\hat{H}_0 = 2676 \text{ kJ/kg}, \quad \hat{H}_1 = 3278 \text{ kJ/kg}, \quad \hat{H}_2 = 3074 \text{ kJ/kg}$$

Επειδή όμως θέλουμε να υπολογίσουμε και ογκομετρικές ροές (β' ερώτημα), από τις ίδιες πηγές βρίσκουμε και τους ειδικούς όγκους:

$$\hat{V}_0 = 1.673 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad \hat{V}_1 = 3.103 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad \hat{V}_2 = 2.639 \text{ m}^3/\text{kg}$$

41

41

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3**ΛΥΣΗ:****ΒΗΜΑ 2:** Βαθμοί Ελευθερίας

Β.Ε.: Άγνωστοι 2 ($\dot{m}_1, \dot{m}_2$) – Ισοζύγιο Μάζας (1) – Ισοζύγιο Ενέργειας (1) = 0

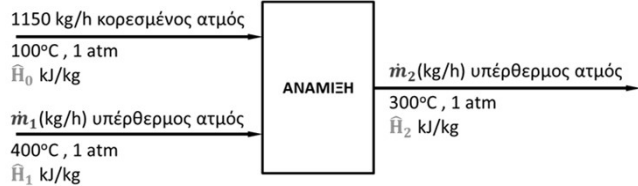
ΒΗΜΑ 3: Καταστρώνω Ισοζύγια

Ισοζύγιο Μάζας: $\text{ΕΙΣΡΟΗ} = \text{ΕΚΡΟΗ} \Rightarrow$

$$1150 + \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (1)$$

42

42

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3**ΛΥΣΗ:****ΒΗΜΑ 3 (συνέχεια):**

Ισοζύγιο Ενέργειας: $\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k + \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}$ (2)

Όμως: $\dot{Q} = 0$ (αδιαβατική λειτουργία)

$\dot{W} = 0$ (όχι κινητά μέρη)

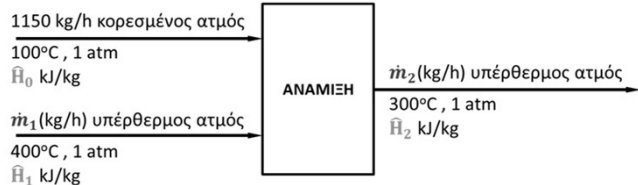
$\Delta \dot{E}_k = 0, \Delta \dot{E}_p = 0$ (δεν υπάρχει μεταβολή ταχύτητας, ή υψομετρική διαφορά)

$$(2) \Rightarrow \Delta \dot{H} = 0 \quad \Rightarrow (3) \quad \Delta \dot{H} = \sum_{\text{τελ}} \dot{m}_i \hat{H}_i - \sum_{\text{αρχ}} \dot{m}_i \hat{H}_i = 0$$

Σημ. Εδώ χρησιμοποιούμε $\dot{m}_i$ αντί $\dot{n}_i$, καθώς από τους πίνακες βρήκαμε τις $\hat{H}_i$ ανά kg. Αν τις βρίσκαμε ανά mol θα χρησιμοποιούσαμε τα $\dot{n}_i$ αντίστοιχα

43

43

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3**ΛΥΣΗ:****ΒΗΜΑ 3 (συνέχεια):**

$$(3) \Rightarrow \Delta \dot{H} = \dot{m}_2 \cdot \hat{H}_2 - 1150 \cdot \hat{H}_0 - \dot{m}_1 \cdot \hat{H}_1 = 0 \quad \Rightarrow$$

$$\dot{m}_2 \cdot 3074 - 1150 \cdot 2676 - \dot{m}_1 \cdot 3278 = 0 \quad \Rightarrow$$

$$3074 \cdot \dot{m}_2 - 3278 \cdot \dot{m}_1 = 3077400 \text{ kg/h} \quad (4)$$

Από τις εξισώσεις (1) & (4) προκύπτει $\dot{m}_1 = 2240 \text{ kg/h}$
 $\dot{m}_2 = 3390 \text{ kg/h}$

44

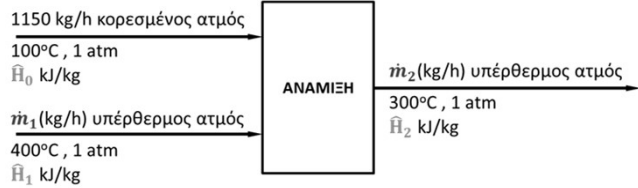
44

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3**ΛΥΣΗ:****ΒΗΜΑ 4 :** Ογκομετρικές παροχές

$$\dot{V}_o = \dot{m}_o \cdot \hat{V}_o = 1150 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1.673 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 1920 \text{ m}^3/\text{h}$$

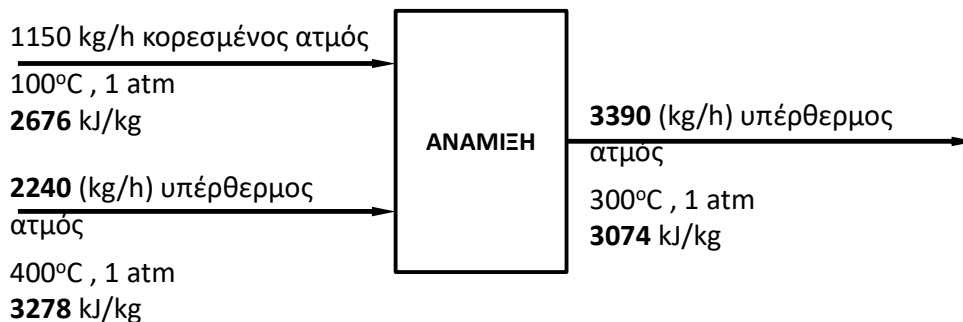
$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 \cdot \hat{V}_1 = 2240 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 3.103 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 6950 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_2 = \dot{m}_2 \cdot \hat{V}_2 = 3390 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 2.639 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 8950 \text{ m}^3/\text{h}$$



45

45

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3**ΛΥΣΗ:**

$$1150 \text{ kg/h} \Leftrightarrow 1920 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$2240 \text{ kg/h} \Leftrightarrow 6950 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$3390 \text{ kg/h} \Leftrightarrow 8950 \text{ m}^3/\text{h}$$

*Υπολογίστηκαν από τους πίνακες ιδιοτήτων ατμού
Υπολογίστηκαν από ισοζύγια μάζας και ενέργειας*

46

46

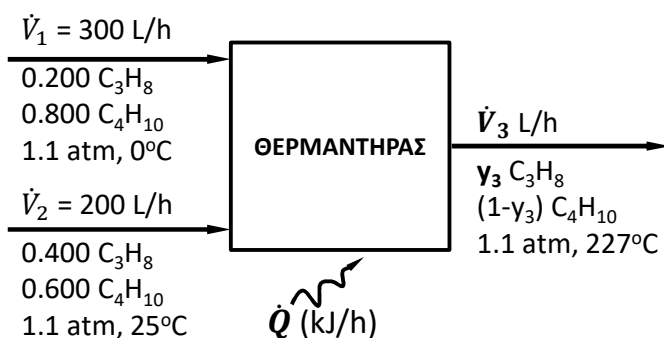
ΑΣΚΗΣΗ – ΑΝΟΙΧΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4



300 L/h αερίου ρεύματος 20.0% C₃H₈ και 80.0% C₄H₁₀ θερμοκρασίας 0°C και πίεσης 1.1 atm και 200 L/h αερίου ρεύματος 40.0% C₃H₈ και 60.0% C₄H₁₀ θερμοκρασίας 25°C και πίεσης 1.1 atm τροφοδοτούνται σε θερμαντήρα όπου θερμαίνονται στους 227°C σε σταθερή πίεση.

Υπολογίστε την θερμική απαίτηση (kJ/h) της διεργασίας
(θεωρείστε ιδανική συμπεριφορά αερίων)



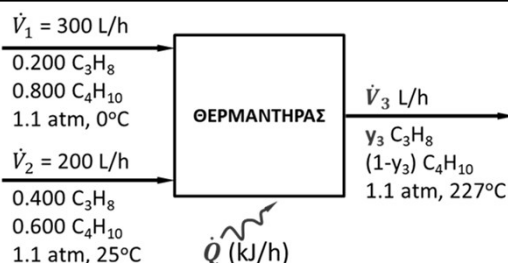
T (°C)	$\hat{H}$ (J/mol) C ₃ H ₈	$\hat{H}$ (J/mol) C ₄ H ₁₀
0	0	0
25	1772	2394
227	20685	27442

47

47

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

ΛΥΣΗ:



ΒΗΜΑ 1:

Αφού οι ειδικές ενθαλπίες δίνονται σε όλα τα ρεύματα σε J/mol, καλό είναι να μετατρέψουμε τις ογκομετρικές παροχές σε παροχές mol, καθώς, μάλιστα ισχύει ΕΙΣΡΟΗ = ΕΚΡΟΗ για τα moles, ενώ αντίθετα $V = f(P, T)$.

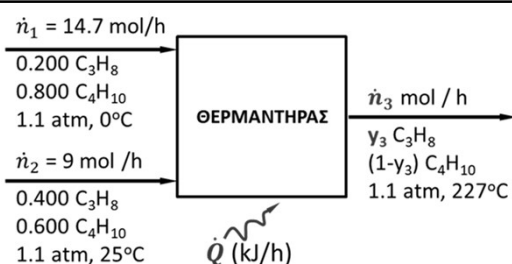
Αφού θεωρούμε ιδανικά αέρια ($P V = n R T$) $\Rightarrow$

$$\dot{n}_1 = \frac{P_1 \cdot \dot{V}_1}{R \cdot T_1} = \frac{1.1 \text{ atm} \cdot 300 \text{ L/h}}{0.08206 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol K}} \cdot (0 + 273)} = 14.7 \text{ mol/h}$$

$$\dot{n}_2 = \frac{P_2 \cdot \dot{V}_2}{R \cdot T_2} = \frac{1.1 \text{ atm} \cdot 200 \text{ L/h}}{0.08206 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{mol K}} \cdot (25 + 273) \text{ K}} = 9 \text{ mol/h}$$

48

48

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4**ΛΥΣΗ:****ΒΗΜΑ 2:**

Ισοζύγιο μάζας

ΕΙΣΡΟΗ = ΕΚΡΟΗ

Συνολικό:

$$\dot{n}_1 + \dot{n}_2 = \dot{n}_3$$

$$\Rightarrow \dot{n}_3 = 23.7 \text{ mol/h}$$

 C_3H_8 :

$$0.200 \cdot \dot{n}_1 + 0.400 \cdot \dot{n}_2 = y_3 \cdot \dot{n}_3$$

$$\Rightarrow y_3 = 0.276 \text{ mol C}_3\text{H}_8 / \text{mol}$$

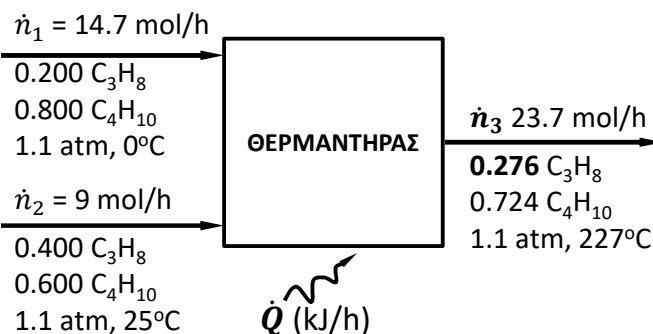
$$(1 - y_3) = 0.724 \text{ mol C}_4\text{H}_{10} / \text{mol}$$

49

49

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4**ΛΥΣΗ:**

T (°C)	$\hat{H}$ (J/mol) C_3H_8	$\hat{H}$ (J/mol) C_4H_{10}
0	0	0
25	1772	2394
227	20685	27442

**ΒΗΜΑ 3:**

Ισοζύγιο Ενέργειας:

$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k + \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W} \quad (2)$$

Όμως: $\dot{W} = 0$ (όχι κινητά μέρη) $\Delta \dot{E}_k = 0, \Delta \dot{E}_p = 0$ (δεν υπάρχει μεταβολή ταχύτητας, ή υψομετρική διαφορά)

$$(2) \Rightarrow \Delta \dot{H} = \dot{Q} \quad \Rightarrow (3) \quad \Delta \dot{H} = \sum_{\tau\epsilon\lambda} \dot{n}_i \hat{H}_i - \sum_{\alpha\rho\chi} \dot{n}_i \hat{H}_i = \dot{Q}$$

Σημ. Εδώ χρησιμοποιούμε $\dot{n}_i$ αντί $\dot{m}_i$ καθώς από τους πίνακες δίνονται τις $\hat{H}_i$ ανά mol.

50

50

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4**ΛΥΣΗ:**

T (°C)	$\hat{H}$ (J/mol) C ₃ H ₈	$\hat{H}$ (J/mol) C ₄ H ₁₀
0	0	0
25	1772	2394
227	20685	27442

ΒΗΜΑ 3 (συνέχεια):

$$\Delta \dot{H} = \sum_{\tau\epsilon\lambda} \dot{n}_i \hat{H}_i - \sum_{\alpha\rho\chi} \dot{n}_i \hat{H}_i = \dot{Q}$$

$$\dot{n}_1 = 14.7 \text{ mol/h}$$

0.200 C₃H₈
0.800 C₄H₁₀
1.1 atm, 0°C

$$\dot{n}_2 = 9 \text{ mol/h}$$

0.400 C₃H₈
0.600 C₄H₁₀
1.1 atm, 25°C

ΘΕΡΜΑΝΤΗΡΑΣ

$$\dot{n}_3 = 23.7 \text{ mol/h}$$

0.276 C₃H₈
0.724 C₄H₁₀
1.1 atm, 227°C

$$\dot{Q} \text{ (kJ/h)}$$

Συστατικά	$\dot{n}_i$, IN (mol/h)	$\hat{H}_i$, IN (J/mol)		$\dot{n}_i$, OUT (mol/h)	$\hat{H}_i$, OUT (J/mol)
(1) C ₃ H ₈	0.2 · 14.7	0	(3)	0.276 · 23.7	20685
(1) C ₄ H ₁₀	0.8 · 14.7	0	(3)	0.724 · 23.7	27442
(2) C ₃ H ₈	0.4 · 9	1772			
(2) C ₄ H ₁₀	0.6 · 9	2394			

51

51

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4**ΛΥΣΗ:****ΒΗΜΑ 3 (συνέχεια):**

$$\Delta \dot{H} = \sum_{\tau\epsilon\lambda} \dot{n}_i \hat{H}_i - \sum_{\alpha\rho\chi} \dot{n}_i \hat{H}_i = \dot{Q}$$

$$300 \text{ L/h}$$

0.200 C₃H₈
0.800 C₄H₁₀
1.1 atm, 0°C

$$200 \text{ L/h}$$

0.400 C₃H₈
0.600 C₄H₁₀
1.1 atm, 25°C

ΘΕΡΜΑΝΤΗΡΑΣ

$$885 \text{ L/h}$$

0.276 C₃H₈
0.724 C₄H₁₀
1.1 atm, 227°C

$$587 \text{ kJ/h}$$

Επομένως:

$$\begin{aligned} \dot{Q} = & (\dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_8, \text{OUT } 3} \cdot \hat{H}_{\text{C}_3\text{H}_8, \text{OUT } 3} + \dot{n}_{\text{C}_4\text{H}_{10}, \text{OUT } 3} \cdot \hat{H}_{\text{C}_4\text{H}_{10}, \text{OUT } 3}) \\ & - (\dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_8, \text{IN } 1} \cdot \hat{H}_{\text{C}_3\text{H}_8, \text{IN } 1} + \dot{n}_{\text{C}_4\text{H}_{10}, \text{IN } 1} \cdot \hat{H}_{\text{C}_4\text{H}_{10}, \text{IN } 1}) \\ & - (\dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_8, \text{IN } 2} \cdot \hat{H}_{\text{C}_3\text{H}_8, \text{IN } 2} + \dot{n}_{\text{C}_4\text{H}_{10}, \text{IN } 2} \cdot \hat{H}_{\text{C}_4\text{H}_{10}, \text{IN } 2}) \end{aligned}$$

και με αντικατάσταση των τιμών από το προηγούμενο πίνακα:

$$\dot{Q} = 587 \text{ kJ/h}$$

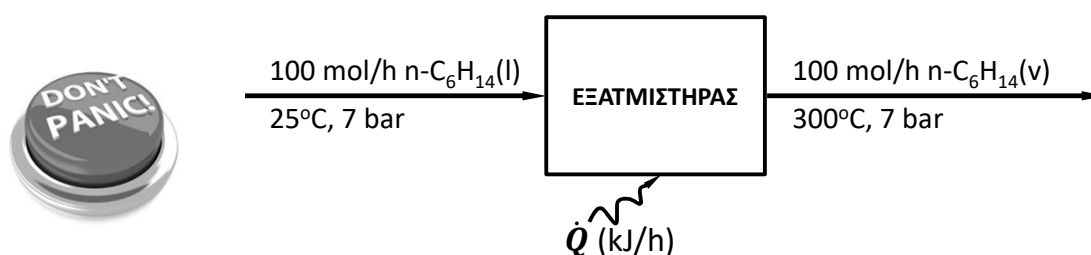
52

52

ΑΣΚΗΣΗ – ΑΝΟΙΧΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (ΜΕ ΑΛΛΑΓΗ ΦΑΣΗΣ)
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5


100 mol/h υγρού εξανίου ($n\text{-C}_6\text{H}_{14}$) στους 25°C και πίεση 7 bar εξατμίζονται και θερμαίνονται στους 300°C υπό σταθερή πίεση.

Να υπολογιστεί η απαιτούμενη παροχή θερμότητας στο σύστημα.



53

53

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5

- Η **ενθαλπία είναι μια καταστατική συνάρτηση** (state function / point function), και επομένως η μεταβολή της ενθαλπίας εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση του συστήματος και όχι από την ενδιάμεση διαδρομή (path)
- Για να **αποφασίσουμε ποια διαδρομή θα ακολουθήσουμε**, θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη ποια δεδομένα έχουμε ή μπορούμε να βρούμε:

Κατάσταση 1
Κατάσταση 2

$n\text{-C}_6\text{H}_{14}$, **liquid, 25°C, 7 bar** → $n\text{-C}_6\text{H}_{14}$, **vapor, 300°C, 7 bar**

- Αναζήτηση δεδομένων (βλ. επόμενη σελίδα):

MB = 86.17 Ειδικό βάρος (**specific gravity**) = 0.659

T_b = 69°C $\Delta \hat{H}_v$ (69°C, 1 atm) = 28.85 kJ/mol

$C_{p,l}$ = 0.2163 kJ/(mol·°C)

$C_{p,v}$ = $0.13744 + 40.85 \times 10^{-5} T - 23.92 \times 10^{-8} T^2 + 57.66 \times 10^{-12} T^3$ kJ/(mol·°C)

54

54



Table B.2 Heat Capacities*

Form 1: $C_p[\text{kJ}/(\text{mol}\cdot^\circ\text{C})]$ or $[\text{kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})] = a + bT + cT^2 + dT^3$
 Form 2: $C_p[\text{kJ}/(\text{mol}\cdot^\circ\text{C})]$ or $[\text{kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})] = a + bT + cT^{-2}$

Example: $(C_p)_{\text{acetone(g)}} = 0.07196 + (20.10 \times 10^{-5})T - (12.78 \times 10^{-8})T^2 + (34.76 \times 10^{-12})T^3$, where T is in $^\circ\text{C}$.

Note: The formulas for gases are strictly applicable at pressures low enough for the ideal gas equation of state to apply.

Compound	Formula	Mol. Wt.	State	Form	Temp. Unit	$a \times 10^3$	$b \times 10^5$	$c \times 10^8$	$d \times 10^{12}$	Range (Units of T)
Acetone	<chem>CH3COCH3</chem>	58.08	l	1	$^\circ\text{C}$	123.0	18.6			-30-60
			g	1	$^\circ\text{C}$	71.96	20.10	-12.78	34.76	0-1200
Acetylene	<chem>C2H2</chem>	26.04	g	1	$^\circ\text{C}$	42.43	6.053	-5.033	18.20	0-1200
Air		29.0	g	1	$^\circ\text{C}$	28.94	0.4147	0.3191	-1.965	0-1500
			g	1	K	28.09	0.1965	0.4799	-1.965	273-1800
Ammonia	<chem>NH3</chem>	17.03	g	1	$^\circ\text{C}$	35.15	2.954	0.4421	-6.686	0-1200
Ammonium sulfate	<chem>(NH4)2SO4</chem>	132.15	c	1	K	215.9				275-328
Benzene	<chem>C6H6</chem>	78.11	l	1	$^\circ\text{C}$	126.5	23.4			6-67
			g	1	$^\circ\text{C}$	74.06	32.95	-25.20	77.57	0-1200
Isobutane	<chem>C4H10</chem>	58.12	g	1	$^\circ\text{C}$	89.46	30.13	-18.91	49.87	0-1200
<i>n</i> -Butane	<chem>C4H10</chem>	58.12	g	1	$^\circ\text{C}$	92.30	27.88	-15.47	34.98	0-1200
Isobutene	<chem>C4H8</chem>	56.10	g	1	$^\circ\text{C}$	82.88	25.64	-17.27	50.50	0-1200
Calcium carbide	<chem>CaC2</chem>	64.10	c	2	K	68.62	1.19	-8.66×10^{10}	—	298-720
Calcium carbonate	<chem>CaCO3</chem>	100.09	c	2	K	82.34	4.975	-12.87×10^{10}	—	273-1033
Calcium hydroxide	<chem>Ca(OH)2</chem>	74.10	c	1	K	89.5				276-373
Calcium oxide	<chem>CaO</chem>	56.08	c	2	K	41.84	2.03	-4.52×10^{10}		273-1173
Carbon	<chem>C</chem>	12.01	c	2	K	11.18	1.095	-4.891×10^{10}		273-1373
Carbon dioxide	<chem>CO2</chem>	44.01	g	1	$^\circ\text{C}$	36.11	4.233	-2.887	7.464	0-1500
Carbon monoxide	<chem>CO</chem>	28.01	g	1	$^\circ\text{C}$	28.95	0.4110	0.3548	-2.220	0-1500
Carbon tetrachloride	<chem>CCl4</chem>	153.84	l	1	K	93.39	12.98			273-343
Chlorine	<chem>Cl2</chem>	70.91	g	1	$^\circ\text{C}$	33.60	1.367	-1.607	6.473	0-1200
Copper	<chem>Cu</chem>	63.54	c	1	K	22.76	0.6117			273-1357

55

55

Table B.1 (Continued)

Compound	Formula	Mol. Wt.	SG (20 $^\circ$ /4 $^\circ$)	$T_m(^{\circ}\text{C})^b$	$\Delta\hat{H}_m(T_m)^{c,j}$ kJ/mol	$T_b(^{\circ}\text{C})^d$	$\Delta\hat{H}_v(T_b)^{c,j}$ kJ/mol	$T_c(\text{K})^f$	$P_c(\text{atm})^g$	$(\Delta\hat{H}_f^{\circ})^{h,j}$ kJ/mol	$(\Delta\hat{H}_f^{\circ})^{i,j}$ kJ/mol
<i>n</i> -Heptane	<chem>C7H16</chem>	100.20	0.684	-90.59	14.03	98.43	31.69	540.2	27.0	-224.4(l) -187.8(g)	-4816.9(l) -4853.5(g)
<i>n</i> -Hexane	<chem>C6H14</chem>	86.17	0.659	-95.32	13.03	68.74	28.85	507.9	29.9	-198.8(l) -167.2(g)	-4163.1(l) -4194.8(g)
Hydrogen	<chem>H2</chem>	2.016	—	-259.19	0.12	-252.76	0.904	33.3	12.8	0(g)	-285.84(g)
Hydrogen bromide	<chem>HBr</chem>	80.92	—	-86	—	-67	—	—	—	-36.23(g)	—

Table B.2 (Continued)

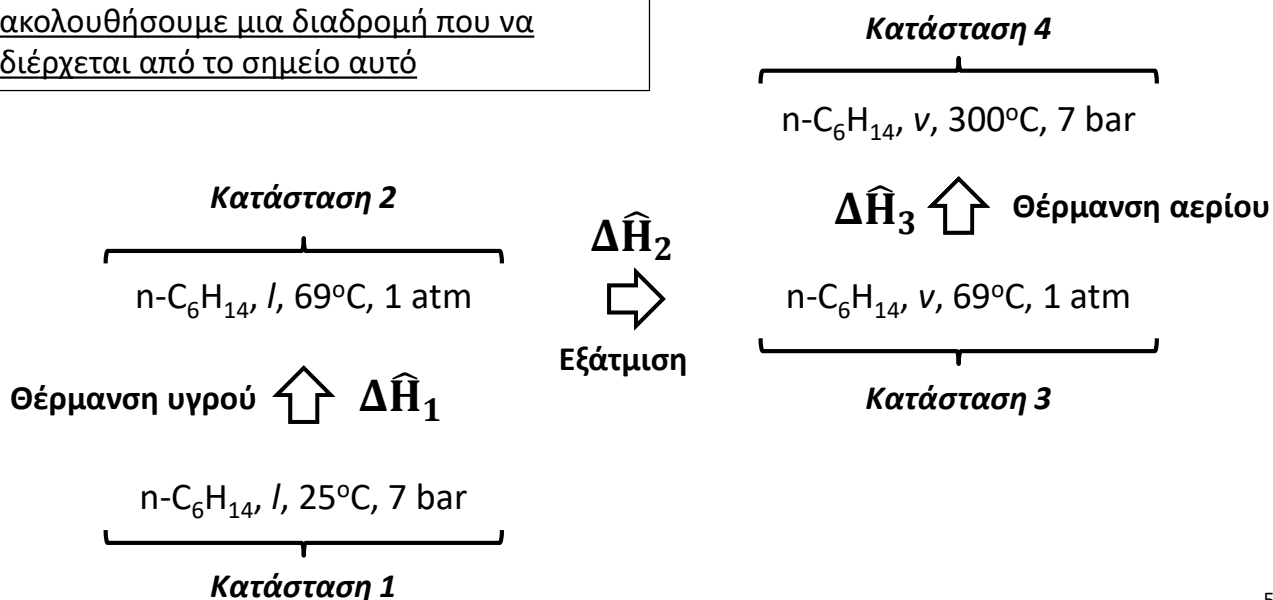
Compound	Formula	Mol. Wt.	State	Form	Temp. Unit	$a \times 10^3$	$b \times 10^5$	$c \times 10^8$	$d \times 10^{12}$	Range (Units of T)
Cumene (Isopropyl benzene)	<chem>C9H12</chem>	120.19	g	1	$^\circ\text{C}$	139.2	53.76	-39.79	120.5	0-1200
Cyclohexane	<chem>C6H12</chem>	84.16	g	1	$^\circ\text{C}$	94.140	49.62	-31.90	80.63	0-1200
Cyclopentane	<chem>C5H10</chem>	70.13	g	1	$^\circ\text{C}$	73.39	39.28	-25.54	68.66	0-1200
Ethane	<chem>C2H6</chem>	30.07	g	1	$^\circ\text{C}$	49.37	13.92	-5.816	7.280	0-1200
Ethyl alcohol (Ethanol)	<chem>C2H5OH</chem>	46.07	l	1	$^\circ\text{C}$	103.1				0
			l	1	$^\circ\text{C}$	158.8				100
			g	1	$^\circ\text{C}$	61.34	15.72	-8.749	19.83	0-1200
Ethylene	<chem>C2H4</chem>	28.05	g	1	$^\circ\text{C}$	+40.75	11.47	-6.891	17.66	0-1200
Ferric oxide	<chem>Fe2O3</chem>	159.70	c	2	K	103.4	6.711	-17.72×10^{10}	—	273-1097
Formaldehyde	<chem>CH2O</chem>	30.03	g	1	$^\circ\text{C}$	34.28	4.268	0.0000	-8.694	0-1200
Helium	<chem>He</chem>	4.00	g	1	$^\circ\text{C}$	20.8				0-1200
<i>n</i> -Hexane	<chem>C6H14</chem>	86.17	l	1	$^\circ\text{C}$	216.3				20-100
			g	1	$^\circ\text{C}$	137.44	40.85	-23.92	57.66	0-1200

56

56

- Επειδή έχουμε τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης $\Delta\hat{H}_v$, μόνο στο κανονικό σημείο βρασμού (**69°C, 1 atm**) πρέπει να ακολουθήσουμε μια διαδρομή που να διέρχεται από το σημείο αυτό

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5



57

57

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5

ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ $\Delta\hat{H}$ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ P, T

T = σταθερή, μεταβολή P ($P_1 \rightarrow P_2$)

$$\Delta\hat{H} = \hat{V} \cdot \Delta P = \hat{V} \cdot (P_2 - P_1)$$

υγρά/στερεά (κατά κανόνα λαμβάνεται υπόψη μόνο όταν $\Delta P > 50$ bar)

$$\Delta\hat{H} = 0$$

ιδανικά αέρια

$$\Delta\hat{H} \approx 0$$

«σχεδόν» ιδανικά αέρια

$$\Delta\hat{H} \neq 0$$

όταν η T είναι σημαντικά μικρότερη των 0°C, ή η P είναι σημαντικά μεγαλύτερη της 1 atm $\Rightarrow$ χρήση πινάκων ή διαγραμμάτων με δεδομένα $\hat{H} = f(T, P)$

P = σταθερή, μεταβολή T ($T_1 \rightarrow T_2$)

$$\Delta\hat{H} = \int_{T_1}^{T_2} C_P(T) dT$$

58

58

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5

Κατάσταση 1

n-C₆H₁₄, liq, 25°C, 7 bar

➡

Κατάσταση 2

n-C₆H₁₄, liq, 69°C, 1 atm

Δ $\hat{H}_1$
Θέρμανση υγρού

$$\Delta \hat{H}_1 = \hat{V} \cdot \Delta P + \int_{25}^{69} C_{P,liq} dT \quad (1)$$

όπου $\hat{V} = \frac{M_r}{d} = \frac{86.17 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \cdot \frac{1 \text{ cm}^3}{0.659 \text{ g}} \cdot \frac{\text{m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} = 1.31 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{mol}$

(1) $\Rightarrow$

$$\Delta \hat{H}_1 = 1.31 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}} \cdot (1.013 - 7) \text{ bar} \cdot \frac{10^5 \text{ Pa}}{\text{bar}} + 0.2163 \cdot (69 - 25) \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta \hat{H}_1 = -0.0784 + 9.517 \text{ (kJ/mol)} = \mathbf{9.44 \text{ kJ/mol}}$$

↖

Σημ. πολύ μικρή η συμβολή του όρου $\hat{V} \cdot \Delta P$, που θα μπορούσε να είχε απαλειφθεί εξ αρχής ($\Delta P < 50 \text{ bar}$)

59

59

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5

Κατάσταση 2

n-C₆H₁₄, liq, 69°C, 1 atm

➡

Κατάσταση 3

n-C₆H₁₄, ν, 69°C, 1 atm

Δ $\hat{H}_2$
Εξάτμιση

$$\Delta \hat{H}_2 = \Delta \hat{H}_v = \mathbf{28.85 \text{ kJ/mol}}$$

Κατάσταση 3

n-C₆H₁₄, ν, 69°C, 1 atm

➡

Κατάσταση 4

n-C₆H₁₄, ν, 300°C, 7 bar

Δ $\hat{H}_3$
Θέρμανση αερίου

$$\Delta \hat{H}_3 = \cancel{\hat{V} \cdot \Delta P} + \int_{69}^{300} C_{P,vapor} dT \quad (2)$$

όπου $\hat{V} \cdot \Delta P \approx 0$ καθώς ούτε η T είναι σημαντικά μικρότερη των 0°C, ούτε η P είναι σημαντικά μεγαλύτερη της 1 atm

60

60

(2) $\Rightarrow$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5

$$\Delta \hat{H}_3 = \int_{69}^{300} C_{P,\text{vapor}} dT =$$

$$= 0.13744 \cdot (300-69) + \frac{1}{2} 40.85 \times 10^{-5} \cdot (300^2 - 69^2) - \frac{1}{3} 23.92 \times 10^{-8} \cdot (300^3 - 69^3) +$$

$$+ \frac{1}{4} 57.66 \times 10^{-12} \cdot (300^4 - 69^4) = \mathbf{47.1 \text{ kJ/(mol} \cdot ^\circ\text{C)}}$$

$$\Delta \hat{H} = \Delta \hat{H}_1 + \Delta \hat{H}_2 + \Delta \hat{H}_3 = (9.44 + 28.85 + 47.1) \text{ kJ/mol} = 85.4 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta \dot{H} + \cancel{\Delta \dot{E}_k} + \cancel{\Delta \dot{E}_p} = \dot{Q} - \cancel{\dot{W}} \quad (3) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \dot{Q} = \Delta \dot{H} = \dot{n} \cdot \Delta \hat{H} = 100 \frac{\text{mol}}{\text{h}} \cdot 85.4 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{h}}{3600 \text{ s}} = 2.37 \text{ kJ/s} = \mathbf{2.37 \text{ kW}}$$

61

61

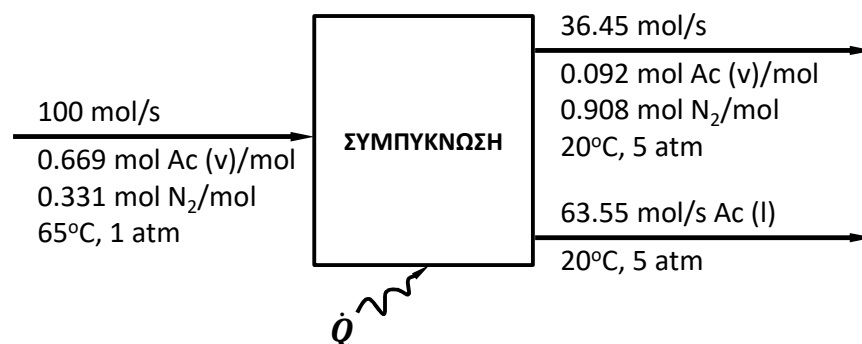
ΑΣΚΗΣΗ – ΑΝΟΙΧΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (ΜΕ ΑΛΛΑΓΗ ΦΑΣΗΣ)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6



Το παρακάτω διάγραμμα ροής αφορά στην παραλαβή υγρής ακετόνης (Ac) από συμπύκνωση αερίου ρεύματος Ac/N₂.

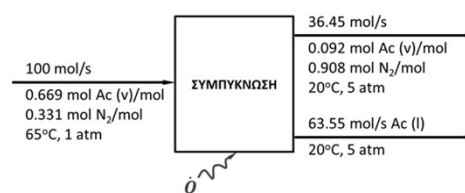
Να υπολογιστεί η απαιτούμενη παροχή θερμότητας στο σύστημα.



62

62

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6



Ισοζύγιο ενέργειας (σημ. Εδώ δεν χρειαζόμαστε ισοζύγιο μάζας, καθώς μας έχουν ήδη δοθεί οι ροές)

Ανοιχτό σύστημα: $\Delta\dot{H} + \cancel{\Delta\dot{E}_k} + \cancel{\Delta\dot{E}_p} = \dot{Q} - \cancel{\dot{W}} \Rightarrow \Delta\dot{H} = \dot{Q} \Rightarrow$

$$\Delta\dot{H} = \sum_{OUT} \dot{n}_{i,OUT} \hat{H}_{i,OUT} - \sum_{IN} \dot{n}_{i,IN} \hat{H}_{i,IN} = \dot{Q}$$

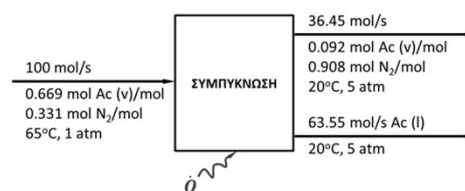
Καλό είναι, προς διευκόλυνση μας, να καταστρώσουμε πίνακα με **ροές**, **ενθαλπίες** και **κατάσταση αναφοράς**. Η κατάσταση αναφοράς επιλέγεται ώστε να διευκολύνει τους υπολογισμούς (**κάποια $\hat{H}$ να είναι 0**).

- Στο παράδειγμα αυτό επιλέγουμε πρότυπες συνθήκες αναφοράς:
Ac (l), 20°C, 5 atm
- Δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της P (βλ. προηγούμενα παραδείγματα)

63

63

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6



Πίνακας ροών (mol/s) και ενθαλπιών

Συστατικό	$\dot{n}_{i,IN}$	$\hat{H}_{i,IN}$	$\dot{n}_{i,OUT}$	$\hat{H}_{i,OUT}$
Ac (v)	66.9 (0.669 · 100)	$\hat{H}_1$	3.35 (0.092 · 36.45)	$\hat{H}_3$
Ac (l)	-	-	63.55	0
N ₂	33.1 (0.331 · 100)	$\hat{H}_2$	33.1 (0.908 · 36.45)	$\hat{H}_4$

64

64

Κατάσταση αναφοράς

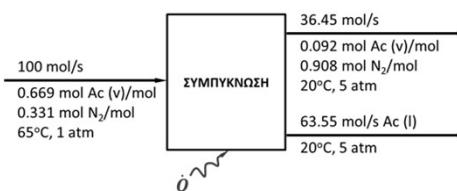
Ac, liq, 20°C, 5 atm



Κατάσταση 1

Ac, vap, 65°C, 1 atm

Αλλαγή φάσης, αλλαγή P, αλλαγή T



Αναζήτηση δεδομένων (βλ. πίνακες):

ΑΚΕΤΟΝΗMB = 58.087 Ειδικό βάρος (**specific gravity**) = 0.791 $T_b = 56^\circ\text{C}$ $\Delta\hat{H}_v (56^\circ\text{C}, 1 \text{ atm}) = 30.2 \text{ kJ/mol}$ $C_{p,l} = 0.123 + 18.6 \times 10^{-5} T \text{ kJ/(mol} \cdot ^\circ\text{C)}$ $C_{p,v} = 0.07196 + 20.10 \times 10^{-5} T - 12.78 \times 10^{-8} T^2 + 34.76 \times 10^{-12} T^3 \text{ kJ/(mol} \cdot ^\circ\text{C)}$ **ΑΖΩΤΟ**Πίνακας $\hat{H}$ σε συνάρτηση με T (κατάσταση αναφοράς T = 25°C, P = 1 atm)

65

65

Κατάσταση αναφοράς

Ac, liq, 20°C, 5 atm



Κατάσταση 1

Ac, vap, 65°C, 1 atm

Αλλαγή φάσης, αλλαγή P, αλλαγή T



Ανάλυση «διαδρομής»

Ac (l, 20°C, 5 atm) $\xRightarrow{\Delta\hat{H}_{1a}}$ Ac (l, 20°C, 1 atm) $\xRightarrow{\Delta\hat{H}_{1b}}$ Ac (l, 56°C, 1 atm) $\Rightarrow$ $\xRightarrow{\Delta\hat{H}_{1c}}$ Ac (v, 56°C, 1 atm) $\xRightarrow{\Delta\hat{H}_{1d}}$ Ac (v, 65°C, 1 atm)

$$\hat{H}_1 = \Delta\hat{H}_{1a} + \Delta\hat{H}_{1b} + \Delta\hat{H}_{1c} + \Delta\hat{H}_{1d} \Rightarrow$$

$$\hat{H}_1 = \left[\cancel{\hat{V}_{Ac,l} dP} + \int_{20}^{20} C_{p,Ac,l} dT \right] + \int_{20}^{56} C_{p,Ac,l} dT + \Delta\hat{H}_{v,Ac} + \int_{56}^{65} C_{p,Ac,v} dT$$

$\Delta P < 50 \text{ bar } \hat{V} dP \approx 0$

$$\hat{H}_1 = 0.0297 + 4.68 + 30.2 + 0.753 = \mathbf{35.6 \text{ kJ/mol}}$$

66

66

Κατάσταση αναφοράς

Ac, liq, 20°C, 5 atm

➡

Κατάσταση 3

Ac, vap, 20°C, 5 atm

Αλλαγή φάσης

100 mol/s

0.669 mol Ac (v)/mol

0.331 mol N₂/mol

65°C, 1 atm

ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

36.45 mol/s

0.092 mol Ac (v)/mol

0.908 mol N₂/mol

20°C, 5 atm

63.55 mol/s Ac (l)

20°C, 5 atm

$\dot{Q}$

Ανάλυση «διαδρομής»

Ac (l, 20°C, 5 atm) $\xrightarrow{\Delta \hat{H}_{3a}}$ Ac (l, 20°C, 1 atm) $\xrightarrow{\Delta \hat{H}_{3b}}$ Ac (l, 56°C, 1 atm)

$\xrightarrow{\Delta \hat{H}_{3c}}$ Ac (v, 56°C, 1 atm) $\xrightarrow{\Delta \hat{H}_{3d}}$ Ac (v, 20°C, 1 atm) $\xrightarrow{\Delta \hat{H}_{3e}}$ Ac (v, 20°C, 5 atm)

$\hat{H}_3 = \Delta \hat{H}_{3a} + \Delta \hat{H}_{3b} + \Delta \hat{H}_{3c} + \Delta \hat{H}_{3d} + \Delta \hat{H}_{3e} \Rightarrow$

$\hat{H}_3 = \cancel{\hat{V}_{Ac,l}} dP + \int_{20}^{56} C_{P,Ac,l} dT + \Delta \hat{H}_{v,Ac} + \int_{56}^{20} C_{P,Ac,v} dT + \cancel{\hat{V}_{Ac,l}} dP$

$\Delta P = 1-5 \text{ atm} < 50 \text{ bar} \Rightarrow \hat{V} dP \approx 0$

$\Delta P = 5-1 \text{ atm} < 50 \text{ bar} \Rightarrow \hat{V} dP \approx 0$

$\hat{H}_3 = 0 + 4.68 + 30.2 - 2.88 + 0 = \mathbf{32.0 \text{ kJ/mol}}$

67

Κατάσταση αναφοράς

N₂, gas, 25°C, 1 atm

➡

Κατάσταση 2

N₂, g, 65°C, 1 atm

Αλλαγή T

100 mol/s

0.669 mol Ac (v)/mol

0.331 mol N₂/mol

65°C, 1 atm

ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

36.45 mol/s

0.092 mol Ac (v)/mol

0.908 mol N₂/mol

20°C, 5 atm

63.55 mol/s Ac (l)

20°C, 5 atm

$\dot{Q}$

Κατάσταση αναφοράς

N₂, gas, 25°C, 1 atm

➡

Κατάσταση 4

N₂, g, 20°C, 5 atm

Αλλαγή T

Σημ. Η επίδραση της P είναι απειροελάχιστη, καθώς $T > 0^\circ\text{C}$ και P κοντά σε 1 atm

Με γραμμική παρεμβολή από τα δεδομένα του Πίνακα Β.8:

T=65°C, P=1 atm $\hat{H}_2 = \mathbf{1.17 \text{ kJ/mol}}$

T=20°C, P=1 atm $\hat{H}_4 = \mathbf{-0.146 \text{ kJ/mol}}$

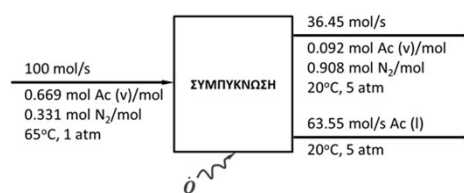
Table B.8 Specific Enthalpies of Selected Gases: SI Units

T	$\hat{H}$ (kJ/mol)						
	Air	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
0	-0.72	-0.73	-0.73	-0.72	-0.73	-0.92	-0.84
25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100	2.19	2.24	2.19	2.16	2.19	2.90	2.54
200	5.15	5.31	5.15	5.06	5.16	7.08	6.01

68

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6

Συστατικό	$\dot{n}_{i,IN}$	$\hat{H}_{i,IN}$	$\dot{n}_{i,OUT}$	$\hat{H}_{i,OUT}$
Ac (v)	66.9 (0.669 · 100)	$\hat{H}_1$	3.35 (0.092 · 36.45)	$\hat{H}_3$
Ac (l)	-	-	63.55	0
N ₂	33.1 (0.331 · 100)	$\hat{H}_2$	33.1 (0.908 · 36.45)	$\hat{H}_4$



$$\Delta \dot{H} = \sum_{OUT} \dot{n}_{i,OUT} \hat{H}_{i,OUT} - \sum_{IN} \dot{n}_{i,IN} \hat{H}_{i,IN} = \dot{Q}$$

$$\Delta \dot{H} = \dot{n}_{Ac,out} \cdot \hat{H}_3 + \dot{n}_{N_2,out} \cdot \hat{H}_4 + 0 - \dot{n}_{Ac,IN} \cdot \hat{H}_1 - \dot{n}_{N_2,IN} \cdot \hat{H}_2 = \dot{Q}$$

$$\Delta \dot{H} = 3.35 \cdot 32.0 + 33.1 \cdot (-0.146) + 0 - 66.9 \cdot 35.6 - 33.1 \cdot 1.17 = -2318 \text{ kJ/s} = \dot{Q}$$

$$\dot{Q} = -2318 \text{ kW}$$

69

69

ΑΣΚΗΣΗ – ΑΝΟΙΧΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (ΜΕ ΑΛΛΑΓΗ ΦΑΣΗΣ)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7



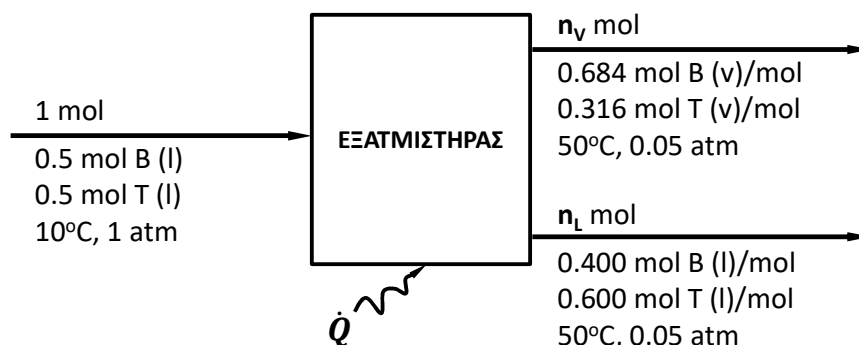
Ένα ισομοριακό μίγμα βενζολίου (B) – τολουολίου (T) στους 10°C τροφοδοτείται συνεχώς υπό $P_{\text{feed}} = 1 \text{ atm}$ σε δοχείο διαχωρισμού το οποίο θερμαίνεται στους 50°C. Το υγρό προϊόν που απομακρύνεται περιέχει 40.0% βενζόλιο, ενώ το αέριο προϊόν περιέχει 68.4 % βενζόλιο (σε mol). Τα προϊόντα βρίσκονται υπό πίεση 0.05 atm. Βάση τροφοδοσίας 1 mol.

Πόση θερμότητα πρέπει να προσφέρεται για το διαχωρισμό;

70

70

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7



Δεδομένα (από σχετικούς πίνακες B.1 & B.2)

$$C_{p,B}^{(l)} = 0.1265 + 23.4 \times 10^{-5} T$$

$$C_{p,T}^{(l)} = 0.1488 + 32.4 \times 10^{-5} T$$

$$C_{p,B}^{(v)} = 0.07406 + 32.95 \times 10^{-5} T - 25.20 \times 10^{-8} T^2 + 77.57 \times 10^{-12} T^3$$

$$C_{p,T}^{(v)} = 0.09418 + 38.00 \times 10^{-5} T - 27.86 \times 10^{-8} T^2 + 80.33 \times 10^{-12} T^3$$

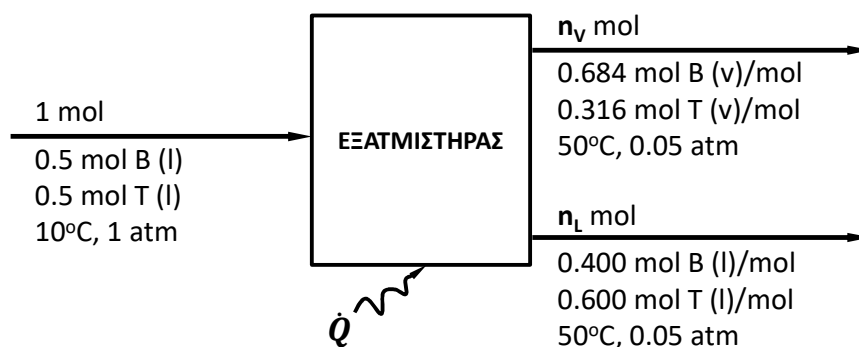
$$T_{b,B} = 80.10 \text{ } ^\circ\text{C}, \Delta \hat{H}_{v,B} = 30.765 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{b,T} = 110.62 \text{ } ^\circ\text{C}, \Delta \hat{H}_{v,T} = 33.47 \text{ kJ/kg}$$

71

71

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7



1. Ανάλυση Β.Ε.

Άγνωστοι 3 (n_v , n_l , Q) – Ισοζύγια μάζας 2 – Ισοζύγιο Ενέργειας (1) = 0

2. Εύρεση n_v και n_l από τα Ισοζύγια μάζας:

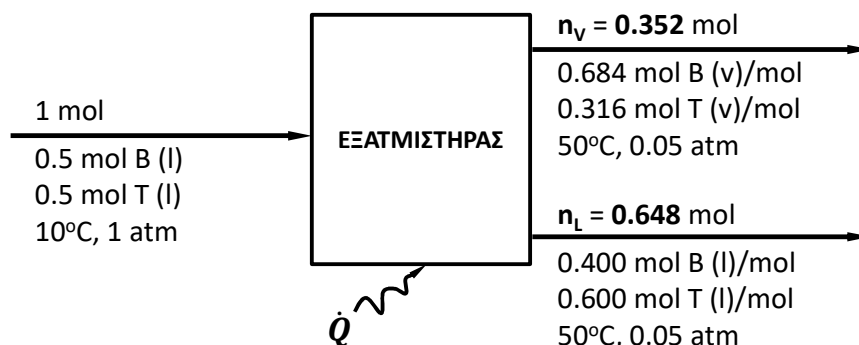
Συνολικό: $1 = n_v + n_l$ (1)

I.M. B $0.5 = 0.684 \cdot n_v + 0.400 \cdot n_l$ (2)

(1), (2) $\Rightarrow n_v = 0.352 \text{ mol μίγματος}$ $n_l = 0.648 \text{ mol μίγματος}$

72

72

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7**3. Ισοζύγιο Ενέργειας**

Ανοιχτό σύστημα: $\Delta H + \cancel{\Delta E_k} + \cancel{\Delta E_p} = Q - \cancel{W} \Rightarrow \Delta H = Q \Rightarrow$

$$\Delta H = \sum_{OUT} n_{i,OUT} \hat{H}_{i,OUT} - \sum_{IN} n_{i,IN} \hat{H}_{i,IN} = Q$$

4. Επιλογή πρότυπων συνθηκών αναφοράς

Επιλέγουμε πρότυπες συνθήκες αναφοράς για τον πίνακα Ενθαλπιών :

B (liquid, 10°C, 1 atm), T (liquid, 10°C, 1 atm),

73

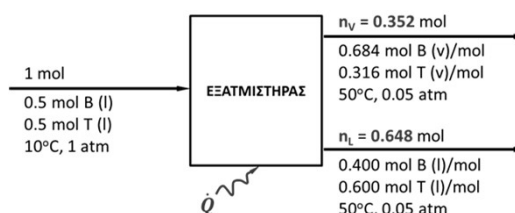
73

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7

Πρότυπες συνθήκες αναφοράς

B (liquid, 10°C, 1 atm),

T (liquid, 10°C, 1 atm),

**Πίνακας ροών (mol/s) και ενθαλπιών**

Συστατικό	$n_{i,IN}$	$\hat{H}_{i,IN}$	$n_{i,OUT}$	$\hat{H}_{i,OUT}$
B (l)	0.5	0	0.259 (0.400 · 0.648)	$\hat{H}_1$
T (l)	0.5	0	0.389 (0.600 · 0.648)	$\hat{H}_2$
B (v)	-	-	0.241 (0.684 · 0.352)	$\hat{H}_3$
T (v)	-	-	0.111 (0.316 · 0.352)	$\hat{H}_4$

74

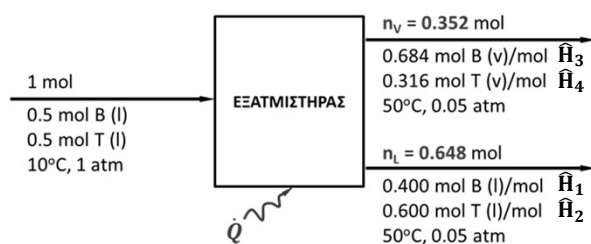
74

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7

Πρότυπες συνθήκες αναφοράς

B (liquid, 10°C, 1 atm),

T (liquid, 10°C, 1 atm),



Οι διαδρομές που θα ακολουθηθούν για τον υπολογισμό είναι:

$$\hat{H}_1: \quad B(l, 10^\circ\text{C}) \xrightarrow{\Delta\hat{H}_1} B(l, 50^\circ\text{C})$$

$$\hat{H}_2: \quad T(l, 10^\circ\text{C}) \xrightarrow{\Delta\hat{H}_2} T(l, 50^\circ\text{C})$$

$$\hat{H}_3: \quad B(l, 10^\circ\text{C}) \xrightarrow{\Delta\hat{H}_{3a}} B(l, 80.1^\circ\text{C}) \xrightarrow{\Delta\hat{H}_{3b}} B(v, 80.1^\circ\text{C}) \xrightarrow{\Delta\hat{H}_{3c}} B(v, 50^\circ\text{C})$$

$$\hat{H}_4: \quad T(l, 10^\circ\text{C}) \xrightarrow{\Delta\hat{H}_{4a}} T(l, 110.62^\circ\text{C}) \xrightarrow{\Delta\hat{H}_{4b}} T(v, 110.62^\circ\text{C}) \xrightarrow{\Delta\hat{H}_{4c}} T(v, 50^\circ\text{C})$$

75

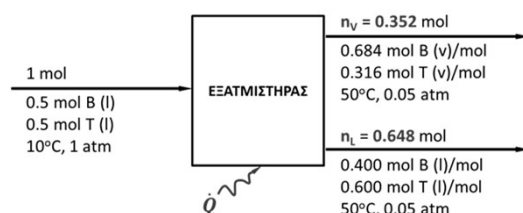
75

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7

Πρότυπες συνθήκες αναφοράς

B (liquid, 10°C, 1 atm),

T (liquid, 10°C, 1 atm),



- Στα στερεά/υγρά, κατά κανόνα δεν λαμβάνουμε υπόψη την επίδραση της πίεσης P στη μεταβολή της ενθαλπίας ΔH , εκτός αν το ΔP είναι της τάξης των 50 bar ή περισσότερο.
- Στα αέρια, κατά κανόνα δεν λαμβάνουμε υπόψη την επίδραση της πίεσης P στη μεταβολή της ενθαλπίας ΔH , εκτός εάν η T είναι σημαντικά μικρότερη των 0°C ή η P σημαντικά μεγαλύτερη της 1 atm.

⇒ Δεν θα ασχοληθούμε με τις συνεισφορές $(\hat{V}dP)$ στους υπολογισμούς των ΔH

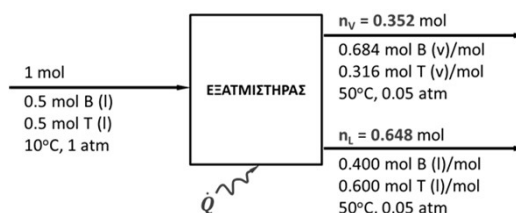
76

76

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7Πρότυπες συνθήκες αναφοράς

B (liquid, 10°C, 1 atm),

T (liquid, 10°C, 1 atm),



$$\hat{H}_1 = \int_{10^\circ C}^{50^\circ C} C_{p,B}^{(l)} dT = \int_{10^\circ C}^{50^\circ C} (0.1265 + 23.4 \times 10^{-5} T) dT = 5.332 \text{ kJ/mol}$$

$$\hat{H}_2 = \int_{10^\circ C}^{50^\circ C} C_{p,T}^{(l)} dT = \int_{10^\circ C}^{50^\circ C} (0.1488 + 32.4 \times 10^{-5} T) dT = 6.340 \text{ kJ/mol}$$

$$\hat{H}_3 = \int_{10^\circ C}^{80.1^\circ C} C_{p,B}^{(l)} dT + \Delta \hat{H}_{v,B} + \int_{80.1^\circ C}^{50^\circ C} C_{p,B}^{(v)} dT = 9.61 + 30.77 - 2.84 = 37.54 \text{ kJ/mol}$$

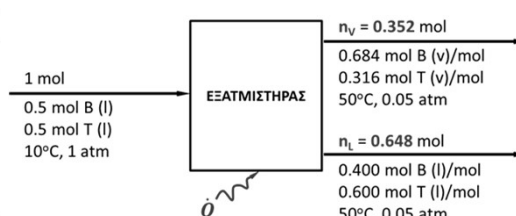
$$\hat{H}_4 = \int_{10^\circ C}^{110.62^\circ C} C_{p,T}^{(l)} dT + \Delta \hat{H}_{v,T} + \int_{110.62^\circ C}^{50^\circ C} C_{p,T}^{(v)} dT = 16.94 + 33.47 - 7.45 = 42.96 \text{ kJ/mol}$$

77

77

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7

Συστατικό	$n_{i,IN}$	$\hat{H}_{i,IN}$	$n_{i,OUT}$	$\hat{H}_{i,OUT}$
B (l)	0.5	0	0.259 (0.400 · 0.648)	$\hat{H}_1$
T (l)	0.5	0	0.389 (0.600 · 0.648)	$\hat{H}_2$
B (v)	-	-	0.241 (0.684 · 0.352)	$\hat{H}_3$
T (v)	-	-	0.111 (0.316 · 0.352)	$\hat{H}_4$



$$\Delta H = \sum_{OUT} n_{i,OUT} \hat{H}_{i,OUT} - \sum_{IN} n_{i,IN} \hat{H}_{i,IN} = Q$$

Καταστάσεις αναφοράς

$$\Delta H = n_{B,L,OUT} \hat{H}_1 + n_{T,L,OUT} \hat{H}_2 + n_{B,V,OUT} \hat{H}_3 + n_{T,V,OUT} \hat{H}_4 = Q$$

$$\Delta H = Q = 0.259 \cdot 5.34 + 0.389 \cdot 6.34 + 0.241 \cdot 37.54 + 0.111 \cdot 42.96 = \mathbf{17.7 \text{ kJ}}$$

78

78

ΑΣΚΗΣΗ – ΧΡΗΣΗ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8



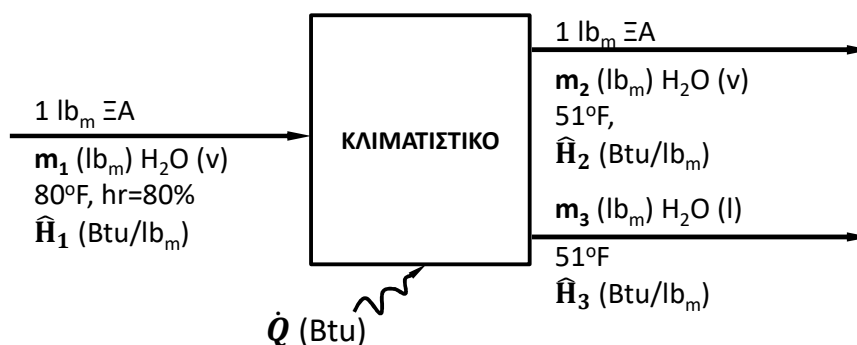
Αέρας με σχετική υγρασία 80% και θερμοκρασία 80° F ψύχεται στους 51° F σε σταθερή πίεση 1 atm. Χρησιμοποιήστε το ψυχομετρικό διάγραμμα και με βάση υπολογισμό 1 lb ΞΑ στην είσοδο: (1) υπολογίστε τους βαθμούς ελευθερίας, (2) υπολογίστε το ποσοστό του νερού που συμπυκνώνεται. (3) Υπολογίστε τη θερμότητα (Btu/min) που πρέπει να απαχθεί για την παραλαβή 1000 ft³/min **κορεσμένου αέρα** στην τελική κατάσταση.

Δίνεται ότι $C_{p_{\text{νερού}(l)}} = 1.0 \text{ Btu}/(\text{lb}_m \text{ } ^\circ\text{F})$

79

79

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8



1. Ανάλυση Β.Ε.

- Β.Ε. = Άγνωστοι 7 ($m_1, m_2, m_3, \hat{H}_1, \hat{H}_2, \hat{H}_3, Q$) – 1 Ισοζύγιο μάζας (H_2O)
 – 2 Απόλυτες υγρασίες (IN: 80%, OUT: κορεσμένο) – 2 Ενθαλπίες (είσ.– έξοδ.)
 – 1 Ενθαλπία Συμπύκνωσης – 1 Ισοζύγιο Ενέργειας = 0

80

80

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8**ΕΙΣΟΔΟΣ (Α)**

Για 80 °F και 80% RH

- Απόλυτη υγρασία
 $h_a = 0.018 \text{ lb H}_2\text{O (v) / lb } \Xi\text{A}$
- Ενθαλπία κορεσμένου αέρα
 $\hat{H}_1 = 38.8 \text{ Btu/lb } \Xi\text{A}$

ΕΞΟΔΟΣ (Β)

Για 51 °F και 100% RH

- Απόλυτη υγρασία
 $h_a = 0.0079 \text{ lb H}_2\text{O (v) / lb } \Xi\text{A}$
- Ενθαλπία κορεσμένου αέρα
 $\hat{H}_2 = 20.9 \text{ Btu/lb } \Xi\text{A}$

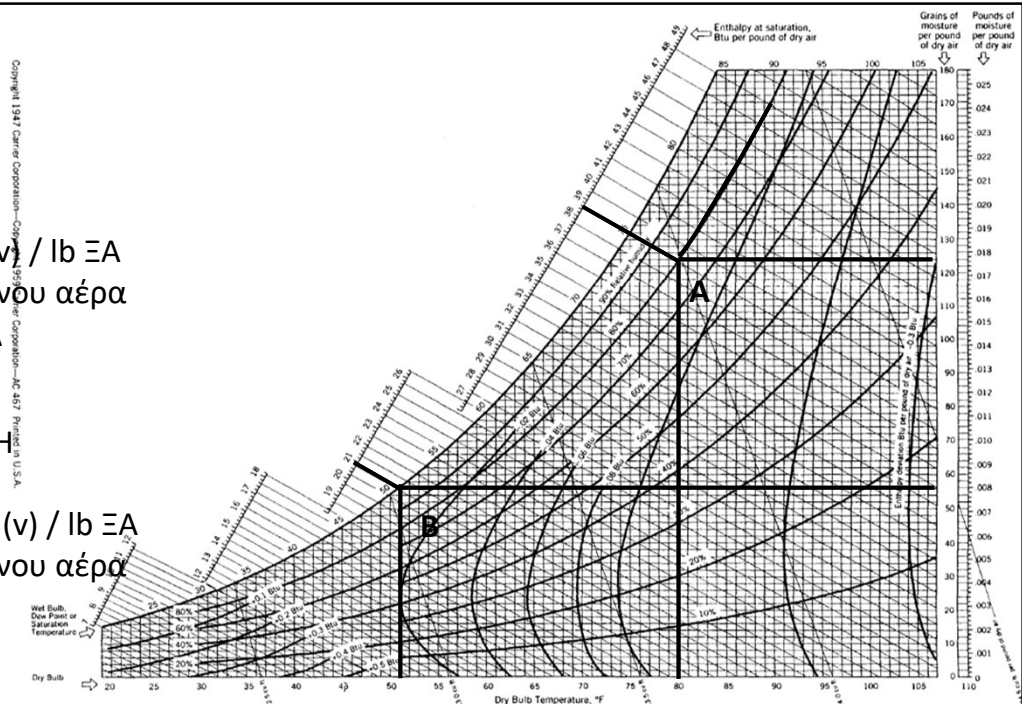
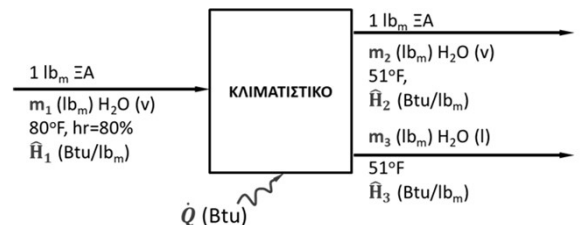


Figure 8.4-2 Psychrometric chart—American Engineering units. Reference states: H₂O (L, 32°F, 1 atm), dry air (0°F, 1 atm). (Reprinted with permission of Carrier Corporation.)

81

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8**2Α. Υπολογισμός ποσότητας H₂O (m₁) και $\hat{H}_1$ στην ΕΙΣΟΔΟ**

Για 80°F και 80% RH, βάσει του ψυχομετρικού διαγράμματος:

$$h_a = 0.018 \text{ lb H}_2\text{O (v) / lb } \Xi\text{A} \quad \text{και} \quad \hat{H}_1 = 38.8 \text{ Btu/lb } \Xi\text{A}$$

$$\text{Οπότε } m_1 = h_a \cdot m_{\Xi\text{A}} = 0.018 \frac{\text{lb}_m \text{ H}_2\text{O}}{1 \text{ lb}_m \Xi\text{A}} = \mathbf{0.018 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O}}$$

2Β. Υπολογισμός ποσότητας H₂O (m₂) και $\hat{H}_2$ στην ΕΞΟΔΟ

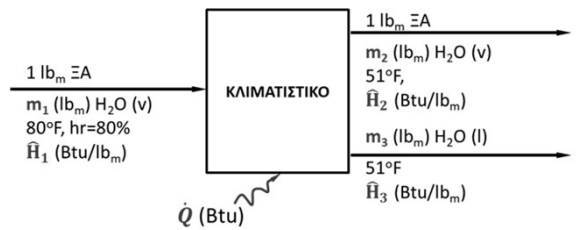
Για 51°F & κορεσμένο αέρα, βάσει του ψυχομετρικού διαγράμματος :

$$h_a = 0.0079 \text{ lb H}_2\text{O (v) / lb } \Xi\text{A} \quad \text{και} \quad \hat{H}_2 = 20.9 \text{ Btu/lb } \Xi\text{A}$$

$$\text{Οπότε } m_2 = h_a \cdot m_{\Xi\text{A}} = 0.0079 \frac{\text{lb}_m \text{ H}_2\text{O}}{1 \text{ lb}_m \Xi\text{A}} = \mathbf{0.0079 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O}}$$

82

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8



3. ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ

Μερικό Ι.Μ. H₂O:

$$m_1 = m_2 + m_3 \Rightarrow m_3 = 0.010 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O}$$

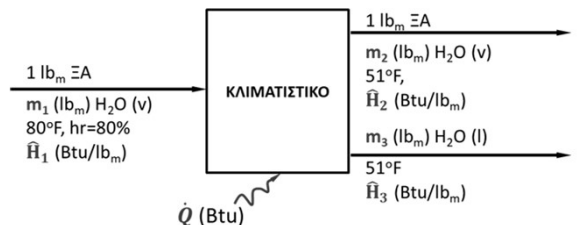
4. ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ

Βαθμός συμπύκνωσης: $\frac{m_3}{m_1} = \frac{0.010}{0.018} = 0.555$ ήτοι **55.5 %**

83

83

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8



5. ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ανοιχτό σύστημα: $\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k + \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}$ $\Rightarrow \Delta H = Q \Rightarrow$

$$\Delta \dot{H} = \sum_{OUT} \dot{m}_i \hat{H}_i - \sum_{IN} \dot{m}_i \hat{H}_i = \dot{Q} \quad (1)$$

6. ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (για τον υπολογισμό του $\hat{H}_3$)

Επιλέγουμε πρότυπες συνθήκες αναφοράς αυτές του ψυχομετρικού διαγράμματος:

H₂O (l, 32°F, 1 atm)

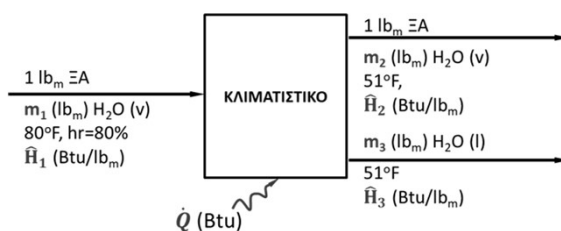
Psychrometric chart—American Engineering units. Reference states: H₂O (l, 32°F, 1 atm), dry air (0°F, 1 atm).
Humid Volume, ft³/lb_m Dry Air

$$\Delta H = \hat{H}_3 = \int_{32}^{51} c_{p \text{ H}_2\text{O}} dT = 1.0 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m \text{ } ^\circ\text{F}} \cdot (51 - 32) = 19.0 \text{ Btu/lb}_m \text{ H}_2\text{O}$$

84

84

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8



7. Πίνακας ροών (mol/s) και ενθαλπιών

Συστατικό	$\dot{m}_{i,IN}$	$\hat{H}_{i,IN}$	$\dot{m}_{i,OUT}$	$\hat{H}_{i,OUT}$
Υγρός αέρας	1.0 lb_m ΞΑ	38.8 Btu/lb_m ΞΑ ($\hat{H}_1$)	1.0 lb_m ΞΑ	20.9 Btu/lbm ΞΑ ($\hat{H}_2$)
H ₂ O (l)	-	-	0.010 lb_m	19.0 Btu/lbm ($\hat{H}_3$)

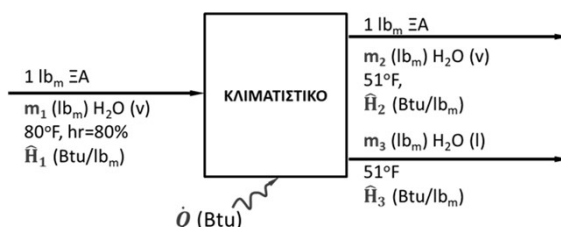
Οπότε (1) $\Rightarrow$ $Q = \Delta H = m_2 \cdot \hat{H}_2 + m_3 \cdot \hat{H}_3 - m_1 \cdot \hat{H}_1 \Rightarrow$
 $Q = 1.0 \cdot 20.9 + 0.010 \cdot 19.0 - 1.0 \cdot 38.8 = -17.71 \text{ Btu}$

Σημ. Το αρνητικό πρόσημο του Q υποδεικνύει ότι απάγεται από το κλιματιστικό

85

85

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8

8. ΑΝΑΓΩΓΗ ΣΕ 1000 ft³/min

Βάσει του ψυχομετρικού διαγράμματος για κορεσμένο αέρα στους 51°F (σημείο B, βλ. επόμενη σελ.) προκύπτει $\hat{V} \approx 13.0 \frac{ft^3 \text{ υγρου αερα}}{lb_m \text{ ΞΑ}} \Rightarrow$

$$\dot{Q} = \frac{-17.71 \text{ Btu}}{1 lb_m \text{ ΞΑ}} \cdot 1000 \frac{ft^3}{min} \cdot \frac{lb_m \text{ ΞΑ}}{13.0 ft^3} \rightarrow \dot{Q} = -1362 \text{ Btu/min}$$

86

86

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8

Copyright 1947 Carrier Corporation—Copyright 1953 Carrier Corporation—AC 457 Printed in U.S.A.

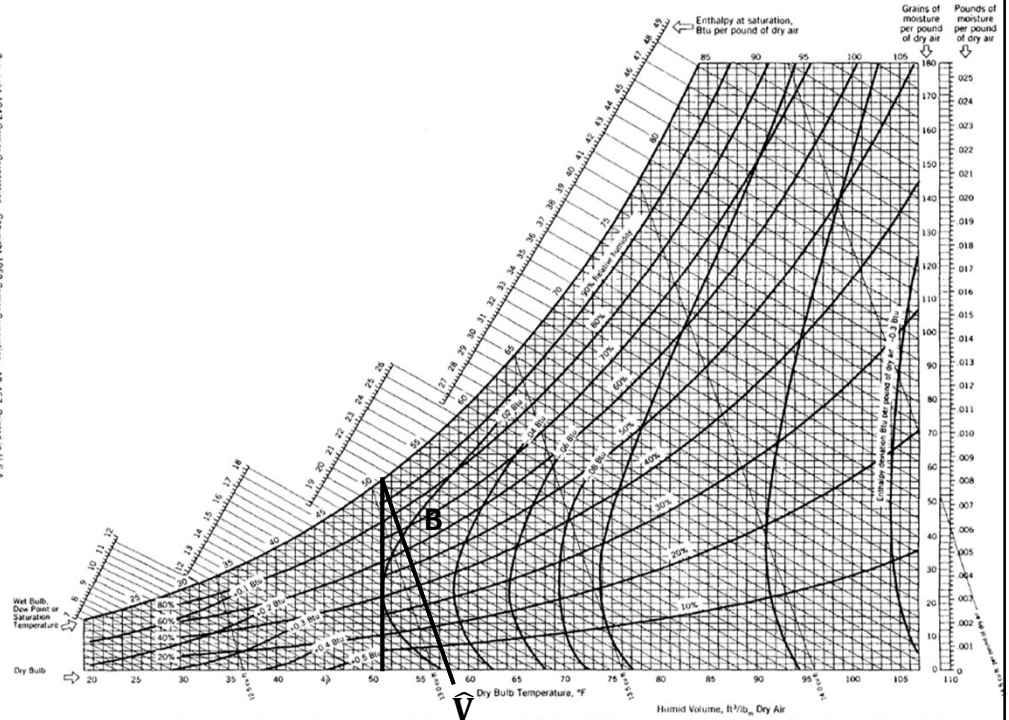


Figure 8.4-2 Psychrometric chart—American Engineering units. Reference states: H_2O (L, 32°F, 1 atm), dry air (0°F, 1 atm). (Reprinted with permission of Carrier Corporation.)

87