



ΜΠ 229: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

ΑΣΚΗΣΕΙΣ # 8

Αφροδίτη Παπαδοπούλου
Δρ. Χημικός Μηχανικός
afpapadopoulou@isc.tuc.gr

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ 8.1:

Υπέρθερμος υδρατμός εισέρχεται σε αδιαβατικό στρόβιλο στα 2 MPa και 500°C με παροχή 12 kg/s και εξέρχεται σε πίεση 40 kPa. Να υπολογιστεί η ισχύς του στρόβιλου. Να θεωρηθεί η διεργασία αντιστρεπτή.

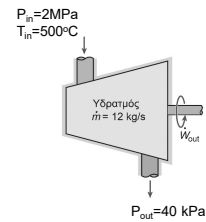
ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ 8.1:

Δεδομένα

$P_{in}=2\text{MPa}$
 $T_{in}=500^\circ\text{C}$
 $P_{out}=40\text{kPa}$
 $\dot{m}_{in}=12\text{ kg/s}$
Υδρατμός = Ατμός Νερού



Παραδοχές

- Σταθεροποιημένη ροή $\dot{m}_{in}=\dot{m}_{out}=\dot{m}=12\text{ kg/s}$ $E_{in}=E_{out}$
- Αμελητέα μεταβολή κινητικής ενέργειας $\Delta E_k \approx 0$
- Αμελητέα μεταβολή δυναμικής ενέργειας $\Delta E_\delta \approx 0$
- Αδιαβατικός στρόβιλος $Q=0$ } Ισεντροπική διεργασία $\Delta S=0$ $S_{in}=S_{out}$
- Αντιστρεπτή διεργασία

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ 8.1:

Ισοζύγιο Ενέργειας

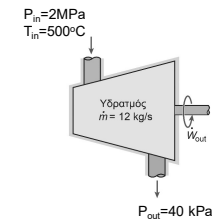
$$H_{in} + E_{k,in} + E_{\delta,in} + Q_{in} + W_{in} = H_{out} + E_{k,out} + E_{\delta,out} + Q_{out} + W_{out}$$

$$H_{in} = H_{out} + W_{out}$$

$$\dot{m}h_{in} = \dot{m}h_{out} + \dot{W}_{out}$$

$$\dot{W}_{out} = \dot{m}(h_{in} - h_{out})$$

Χρειάζεται να προσδιορίσουμε τα h_{in} και h_{out}
Πίνακες Νερού ΠΑ4-ΠΑ6



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ 8.1:

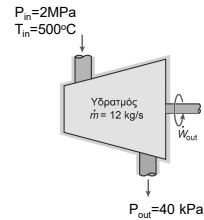
Είσοδος

$$P_{in}=2\text{MPa}$$

$$T_{in}=500^{\circ}\text{C}$$

Υπέρθερμος Ατμός H_2O

Πίνακας Α6



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



T	P = 1,60 MPa (201,41°C)				P = 1,80 MPa (207,15°C)				P = 2,00 MPa (212,42°C)			
	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
[°C]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg K)]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg K)]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg K)]
Kor.	0,1238	2596,0	2794,0	6,4218	0,11042	2598,4	2797,1	6,3794	0,09963	2600,3	2799,5	6,3409
225	0,1329	2644,7	2857,3	6,5518	0,11673	2636,6	2846,7	6,4808	0,10377	2628,3	2835,8	6,4147
250	0,1418	2692,3	2919,2	6,6732	0,12497	2686,0	2911,0	6,6066	0,11144	2679,6	2902,5	6,5453
300	0,1586	2781,1	3034,8	6,8844	0,14021	2776,9	3029,2	6,8226	0,12547	2772,6	3023,5	6,7664
350	0,1746	2866,1	3145,4	7,0694	0,15457	2863,0	3141,2	7,0100	0,13857	2859,8	3137,0	6,9563
400	0,1901	2950,1	3254,2	7,2374	0,16847	2947,7	3250,9	7,1794	0,15120	2945,2	3247,6	7,1271
500	0,2203	3119,5	3472,0	7,5390	0,19550	3117,9	3469,8	7,4825	0,17568	3116,2	3467,6	7,4317
600	0,2500	3293,3	3693,2	7,8080	0,2220	3292,1	3691,7	7,7523	0,19960	3290,9	3690,1	7,7024
700	0,2794	3472,7	3919,7	8,0535	0,2482	3471,8	3918,5	7,9983	0,2232	3470,9	3917,4	7,9487
800	0,3086	3658,3	4152,1	8,2808	0,2742	3657,6	4151,2	8,2258	0,2467	3657,0	4150,3	8,1765
900	0,3377	3850,5	4390,8	8,4935	0,3001	3849,9	4390,1	8,4386	0,2700	3849,3	4389,4	8,3895
1000	0,3668	4049,0	4635,8	8,6938	0,3260	4048,5	4635,2	8,6391	0,2933	4048,0	4634,6	8,5901
1100	0,3958	4253,7	4887,0	8,8837	0,3518	4253,2	4886,4	8,8290	0,3166	4252,7	4885,9	8,7800
1200	0,4248	4464,2	5143,9	9,0643	0,3776	4463,7	5143,4	9,0096	0,3398	4463,3	5142,9	8,9607
1300	0,4538	4679,9	5406,0	9,2364	0,4034	4679,5	5405,6	9,1818	0,3631	4679,0	5405,1	9,1329

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΑΣΚΗΣΗ 8.1:

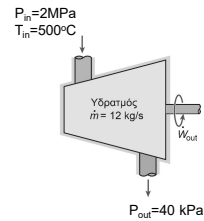
Είσοδος

$$P_{in}=2\text{MPa}$$

$$T_{in}=500^{\circ}\text{C}$$

Υπέρθερμος Ατμός H_2O

Πίνακας Α6 $\Rightarrow h_{in} = 3467.6 \text{ kJ/kg}$



Έξοδος

$$P_{out}=40 \text{ kPa}$$

Κατάσταση?

$$S_{in}=S_{out}$$

$$P_{out}=40 \text{ kPa}$$

$$s_{out} = 7.4317 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

Σύγκριση s_{out} με $s_{f@40\text{kPa}}$ και $s_{g@40\text{kPa}}$

Πίνακας Α5

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική



ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΤΜΟΥ 2 - ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ H_2O (A-5)												
P	T	Ειδικός όγκος		Ειδική εσωτερική ενέργεια		Ειδική ενθαλπία		Ειδική εντροπία		s	s _f	s _g
		υ _f	υ _g	u _f	u _g	h _f	h _g	υ _f	υ _g			
[kPa]	[°C]	[m³/kg]	[m³/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg K)]	[kJ/(kg K)]	[kJ/(kg K)]	[kJ/(kg K)]	[kJ/(kg K)]
1,0	6,97	0,001000	129,21	29,30	2385,70	29,30	2484,90	0,1059	8,8697	8,8697	8,8697	8,8697
1,5	13,02	0,001001	87,98	54,71	2138,59	54,71	2470,59	0,1957	8,6322	8,6322	8,6322	8,6322
2,0	17,50	0,001001	67,00	73,48	2126,02	73,48	2460,02	0,2607	8,4630	8,4630	8,4630	8,4630
2,5	21,08	0,001002	54,25	88,48	2115,92	88,48	2453,51	0,3120	8,3312	8,3312	8,3312	8,3312
3,0	24,08	0,001003	45,67	101,04	2107,46	101,05	2444,45	0,3545	8,2231	8,2231	8,2231	8,2231
4,0	28,96	0,001004	34,80	121,45	2093,75	121,46	2432,94	0,4026	8,0520	8,0520	8,0520	8,0520
5,0	32,87	0,001005	28,19	137,81	2082,69	137,82	2423,68	0,4474	7,9187	7,9187	7,9187	7,9187
7,5	40,29	0,001008	19,24	168,78	2061,72	168,79	2406,01	0,5764	7,6751	7,6751	7,6751	7,6751
10,0	45,81	0,001010	14,67	191,82	2046,08	191,83	2392,87	0,6493	7,5009	7,5009	7,5009	7,5009
15,0	53,97	0,001014	10,02	225,92	2022,78	225,94	2373,16	0,7549	7,2536	7,2536	7,2536	7,2536
20,0	60,06	0,001017	7,649	251,38	2005,32	251,40	2358,30	0,8320	7,0765	7,0765	7,0765	7,0765
25,0	64,96	0,001020	6,204	271,90	1991,20	271,93	2346,27	0,8931	6,9383	6,9383	6,9383	6,9383
30,0	69,09	0,001022	5,229	289,20	1979,20	289,23	2336,07	0,9420	6,8247	6,8247	6,8247	6,8247
40,0	75,86	0,001027	3,993	317,53	1959,47	317,58	2319,22	1,0259	6,6441	6,6441	6,6441	6,6441
50,0	81,32	0,001030	3,240	340,44	1943,46	340,49	2305,41	1,0910	6,5029	6,5029	6,5029	6,5029
75,0	91,76	0,001037	2,217	384,31	1912,39	384,39	2278,61	1,2130	6,2434	6,2434	6,2434	6,2434

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.1:

Έξοδος

$$P_{out}=40 \text{ kPa}$$

$$s_{out} = 7.4317 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Πίνακας A5:

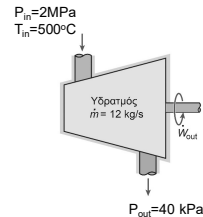
$$s_{f@40\text{kPa}} = 1.0259 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$s_{g@40\text{kPa}} = 7.6700 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$s_{f@40\text{kPa}} < s_{out} < s_{g@40\text{kPa}}$$

Κατάσταση: Μίγμα κορεσμένου υγρού και ατμού

$$\text{Ποιότητα: } x = \frac{s_{out} - s_f}{s_g - s_f} = \frac{7.4317 - 1.0259}{7.6700 - 1.0259} = 0.964$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΤΜΟΥ 2 - ΚΟΡΕΙΜΕΝΟ H₂O (A-5)

Πίεση	Θερμοκρασία κορεσμού	Ειδικός όγκος		Ειδική εσωτερική ενέργεια		Ειδική ενθαλπία		Ειδική εντροπία	
		Κορεσμένου υγρού	Κορεσμένου ατμού	Κορεσμένου υγρού	Κορεσμένου ατμού	Κορεσμένου υγρού	Κορεσμένου ατμού	Κορεσμένου υγρού	Κορεσμένου ατμού
P	T _{sat}	v _f	v _g	u _f	u _g	h _f	h _g	s _f	s _g
[kPa]	[°C]	[m ³ /kg]	[m ³ /kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/(kg·K)]	[kJ/(kg·K)]
1.0	6.97	0.001000	129.21	29.30	2355.70	29.30	2484.90	0.1059	8.8697
1.5	13.02	0.001001	87.96	54.71	2338.59	54.71	2470.59	0.1957	8.6322
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.02	73.48	2460.02	0.2607	8.4630
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.92	88.49	2451.51	0.3120	8.3312
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.46	101.05	2444.45	0.3545	8.2231
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.75	121.46	2432.94	0.4226	8.0520
5.0	32.87	0.001005	28.19	137.81	2282.69	137.82	2423.68	0.4764	7.9187
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.72	168.79	2406.01	0.5764	7.6751
10.0	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.08	191.83	2392.87	0.6493	7.5009
15.0	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.78	225.94	2373.16	0.7549	7.2536
20.0	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.12	251.40	2358.30	0.8320	7.0765
25.0	64.96	0.001020	6.204	271.90	2191.20	271.93	2346.27	0.8931	6.9383
30.0	69.09	0.001022	5.229	289.20	2179.20	289.23	2336.07	0.9439	6.8247
40.0	75.86	0.001027	3.993	317.53	2159.47	317.58	2319.22	1.0259	6.6441
50.0	81.32	0.001030	3.240	340.44	2143.46	340.49	2305.41	1.0910	6.5029
75.0	91.76	0.001037	2.217	384.31	2112.39	384.39	2278.61	1.2180	6.2434

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.1:

Έξοδος

$$P_{out}=40 \text{ kPa}$$

$$x = 0.964$$

Πίνακας A5:

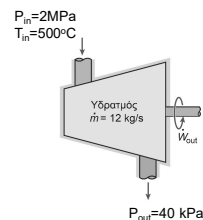
$$h_{f@40\text{kPa}} = 317.58 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fg@40\text{kPa}} = 2319.22 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{out} = h_{f@40\text{kPa}} + x h_{fg@40\text{kPa}} = 317.58 + 0.964 \cdot 2319.22 = 2553.3 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{W}_{out} = 12 \text{ kg/s} \cdot (3467.6 - 2553.3) \text{ kJ/kg} \Rightarrow$$

$$\dot{W}_{out} = 10972 \text{ kW}$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.2:

Μια πηγή ενέργειας στους 300 K μεταφέρει θερμότητα σε μια πλήρως αντιστρεπτή θερμική μηχανή. Η μηχανή αυτή μεταφέρει θερμότητα προς ένα ψυχροδοχείο στους 100K. Πόση θερμότητα πρέπει να μεταφερθεί από την πηγή ενέργειας, ώστε η εντροπία του ψυχροδοχείου να αυξηθεί κατά 20 kJ/K? Ποια είναι η μεταβολή της εντροπίας της πηγής ενέργειας και ποια της θερμικής μηχανής;

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.2:

Δεδομένα:

$$T_H = 300\text{K}$$

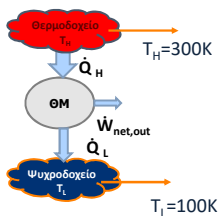
$$T_L = 100\text{K}$$

$$\Delta S_L = 20 \text{ kJ/K}$$

Ζητούνται: Q_H , ΔS_H , $\Delta S_{\Theta M}$

Με βάση τα δεδομένα η θερμική μηχανή λειτουργεί πλήρως αντιστρεπτά, άρα

Ιδανική θερμική μηχανή Carnot. Ισχύει:



$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.2:

Στο ψυχροδοχείο έχουμε:

$$T_L = 100\text{K}$$

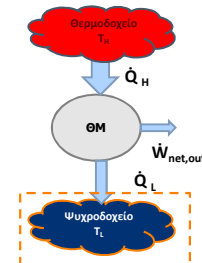
$$\Delta S_L = 20 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_L = \frac{Q_L}{T_L}$$

Οπότε:

$$Q_L = \Delta S_L \cdot T_L \Rightarrow Q_L = 20 \text{ kJ/K} \cdot 100\text{K} = 2000 \text{ kJ}$$

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L} \quad Q_H = Q_L \cdot \frac{T_H}{T_L} \quad Q_H = 2000 \text{ kJ} \cdot \frac{300\text{K}}{100\text{K}} \quad Q_H = 6000 \text{ kJ}$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.2:

Στο θερμοδοχείο έχουμε:

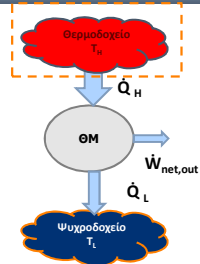
$$T_H = 300\text{K}$$

$$Q_H = 6000 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_H = - \frac{Q_H}{T_H}$$

Οπότε:

$$\Delta S_H = - \frac{6000 \text{ kJ}}{300\text{K}} \quad \Delta S_H = - 20 \text{ kJ/K}$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.2:

Στη θερμική μηχανή έχουμε:

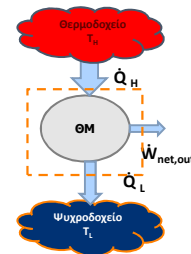
$$T_H = 300\text{K}, Q_H = 6000 \text{ kJ (είσοδος)}$$

$$T_L = 100\text{K}, Q_L = 2000 \text{ kJ (έξοδος)}$$

$$\Delta S_{\Theta M} = + \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L}$$

Οπότε:

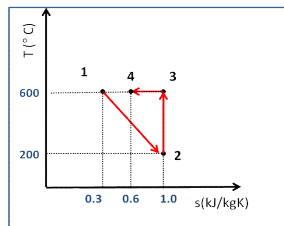
$$\Delta S_{\Theta M} = - \frac{6000 \text{ kJ}}{300\text{K}} + \frac{2000 \text{ kJ}}{100\text{K}} \quad \Delta S_{\Theta M} = 0 \text{ kJ/K}$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.3:

Να υπολογιστεί η μεταφορά θερμότητας σε kJ/kg για την αντιστρεπτή διεργασία 1→4 που απεικονίζεται στο σχήμα



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.3:

Δεδομένα:

$$\delta Q = T ds \Rightarrow Q = \int T ds$$

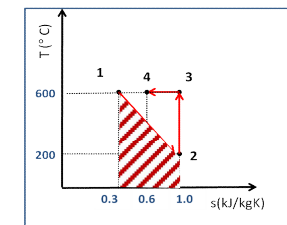
Στο διάγραμμα Ts -> Εμβαδό

$$Q_{1 \rightarrow 4} = Q_{1 \rightarrow 2} + Q_{2 \rightarrow 3} + Q_{3 \rightarrow 4}$$

$Q_{1 \rightarrow 2}$: Εμβαδό τραπεζίου

$$Q_{1 \rightarrow 2} > 0$$

$$Q_{1 \rightarrow 2} = 0.5 [(600+273)K + (200+273)K] \cdot [1.0-0.3](kJ/kgK) = 471.1 \text{ kJ/kg}$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.3:

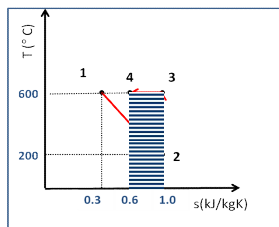
$$Q_{2 \rightarrow 3} = 0 \text{ kJ}$$

$Q_{3 \rightarrow 4}$: Εμβαδό παραλληλογράμμου

$$Q_{3 \rightarrow 4} < 0$$

$$Q_{3 \rightarrow 4} = [(600+273)K] \cdot [0.6-1.0](kJ/kgK) = -349.72 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{1 \rightarrow 4} = Q_{1 \rightarrow 2} + Q_{2 \rightarrow 3} + Q_{3 \rightarrow 4} = 471.1 - 349.72 \Rightarrow \mathbf{Q_{1 \rightarrow 4} = 121.9 \text{ kJ/kg}}$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.4:

Ένα τεμάχιο αλουμινίου 30 kg αρχικής θερμοκρασίας 140° C έρχεται σε επαφή με ένα τεμάχιο σιδήρου 40 kg αρχικής θερμοκρασίας 60° C, μέσα σε ένα μονωμένο περίβλημα. Να προσδιορίσετε την τελική θερμοκρασία ισορροπίας και την ολική μεταβολή της εντροπίας για τη διεργασία αυτή.

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.4:

Δεδομένα:

Al:

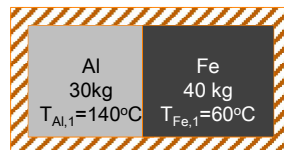
$$m_{Al}=30\text{kg}$$

$$T_{Al,1}=140^{\circ}\text{C}$$

Fe:

$$m_{Fe}=40\text{kg}$$

$$T_{Fe,1}=60^{\circ}\text{C}$$



Ζητείται T ισορροπίας και $\Delta S_{\text{ολικό}}$

Παραδοχές:

- Μονωμένο σύστημα
- Δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις έργου με περιβάλλον
- Μεταβολή κινητικής και δυναμικής ενέργειας = 0

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.4:

Πίνακας A3

Substance	SOLIDS		
	Density kg/m ³ ρ	Sp. heat kJ/kg °C cp	Mol. Mass kg/kmol M
Metals			
Aluminum	2700	0,902	26,98
Bronze (76% Cu, 2% Zn, 2% Al)	8280	0,400	50,12
Brass, yellow (65% Cu, 35% Zn)	8310	0,400	64,29
Copper	8900	0,386	63,55
Iron	7840	0,450	55,85
Lead	11310	0,128	207,20
Magnesium	1730	1,000	24,31
Nickel	8890	0,440	58,69
Silver	10470	0,235	107,87
Steel, mild	7830	0,500	55,71
Tungsten	19400	0,130	183,85

ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.4:

T ισορροπίας ?

Μονωμένο Σύστημα



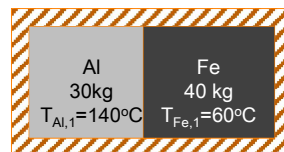
$$\Delta U_{\text{ολικό}}=0$$

$$\Delta U_{Al} + \Delta U_{Fe}=0$$

$$m_{Al}c_{Al}(T-T_{Al,1}) + m_{Fe}c_{Fe}(T-T_{Fe,1})=0$$

$$30\text{kg} \cdot 0.902\text{kJ}(\text{kg}^{\circ}\text{C})^{-1} (T-140)^{\circ}\text{C} + 40\text{kg} \cdot 0.405\text{kJ}(\text{kg}^{\circ}\text{C})^{-1} (T-60)^{\circ}\text{C} = 0$$

$$T=110.04^{\circ}\text{C}$$



ΜΠ 229: Περιβαλλοντική Θερμοδυναμική

ΑΣΚΗΣΗ 8.4:

$\Delta S_{\text{ολικό}}$?

$$\Delta S_{\text{ολικό}} = \Delta S_{Al} + \Delta S_{Fe}$$

$$\Delta S_{Al} = m_{Al}c_{Al} \ln\left(\frac{T}{T_{Al,1}}\right) = 30\text{kg} \cdot 0.902\text{kJ}(\text{kgK})^{-1} \ln\left(\frac{110.4+273}{140+273}\right)$$

$$\Delta S_{Al} = -2.0378 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_{Fe} = m_{Fe}c_{Fe} \ln\left(\frac{T}{T_{Fe,1}}\right) = 40\text{kg} \cdot 0.405\text{kJ}(\text{kgK})^{-1} \ln\left(\frac{110.4+273}{60+273}\right)$$

$$\Delta S_{Fe} = +2.2680 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_{\text{ολικό}} = -2.0378 \text{ kJ/K} + 2.2680 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_{\text{ολικό}} = 0.2302 \text{ kJ/K}$$

