

Prof. L. Araneo. Prova di Fisica Tecnica Ambientale (parte1) del 9 Maggio 2008. Milano  
Testo con traccia della soluzione (I dati non sempre sono realistici, ma dettati dalla necessità di variarli da un testo all'altro), e dei punteggi attribuiti, es (5.5P) = 5.5 punti ad esercizio

Materiale: •testo dell'esame (potete tenerlo) •foglio dati+risultati

E' consentito l'uso di: •calcolatrice, •tavole termodinamiche, •un formulario (una pagina A4).  
Riconsegnare: •foglio dati/risultati •formulario (segnare il COGNOME su entrambi).

1) La massa  $m = 3$  kg di ghiaccio ( $c_p = 2220$  J/kg.K allo stato solido, entalpia di fusione = 333 kJ/kg) viene portata dalla temperatura iniziale  $T_i = -3^\circ\text{C}$  ( $P = \text{ambiente}$ ) fino a completa ebollizione. Determinare l'energia necessaria all'operazione e la variazione di entropia. **Disegnare** un grafico della temperatura in funzione del tempo (ipotizzare di scaldare usando una potenza costante).

**SOLUZIONE (tot 5.5P)**

Il grafico (1.1P) indicativo mostra le 4 trasformazioni, la "potenza costante" assieme all'ipotesi  $c_p = \text{cost}$  fa sì che 12 e 34 siano rette, il rapporto tra i due  $c_p$  (circa 2) è pari al rapporto dei coefficienti angolari.  $P = \text{ambiente}$  serve per ricavare  $T_{45} = 100^\circ\text{C}$ .

Le quantità di calore scambiato sono:

$$q_{12} = c_{p\text{ghiaccio}} \Delta T_{12} = 2220 \cdot 3 = 6660 \text{ J/kg}$$

$$q_{23} = \Delta h_{\text{fusione}} = 333'000 \text{ J/kg}$$

$$q_{34}, \text{ ipotizzando } c_p = \text{costante (risulterà un piccolo errore): } q_{34} = c_{p\text{liq}} \Delta T_{34} = 4184 \cdot 100 = 418'400 \text{ J/kg}$$

$$q_{45} = \Delta h_{\text{EV}} \text{ (da tabelle)} = 2'257'000 \text{ J/kg}$$

$$\text{oppure si calcola } q_{35} = \Delta h_{35}, \text{ da tabelle } h_5 = 2'676'100, h_3 = u_3 + P_3 \cdot v_3 = 0 + 100'000 \cdot 0.001 = 100 \text{ J/kg}$$

$$(2.2P) Q_{15} = m (q_{12} + q_{23} + q_{35}) = 9047 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{12} = c_{p\text{ghiaccio}} \ln(T_2/T_1) = 2220 \cdot \ln(273/270) = 24.5 \text{ J/(kg.K)}$$

$$\Delta S_{23} = q_{23}/T = 333'000/273 = 1219.8 \text{ J/(kg.K)}$$

$$\Delta S_{34}, (c_p = \text{costante}): = c_p \ln(T_4/T_3) = 4184 \ln(373/273) = 1305.9 \quad (\text{oppure} = q_{34}/T_{\text{ML}34})$$

$$\Delta S_{45} = q_{45}/T_{4=5} = 2'257'000/373 = 6050.9$$

$$\text{oppure } \Delta S_{35} = \text{(da tabelle)} = 7354.9 - 0 = 7354.9 \text{ J/(kg.K)}$$

$$(2.2P) \Delta S_{15} = m \sum \Delta S_i = 25.8 \text{ KJ/(kg.K)}$$

2) Una bombola da sub (peso 10 kg, in alluminio  $c_p = 880$  J/kg.K) della capacità  $V = 12$  litri viene riempita di miscela 25% azoto e il restante ossigeno, fino alla pressione di  $P = 170$  bar assoluti, alla  $T_{\text{bombola}} = 60^\circ\text{C}$ ; determinare la massa dei due gas. Quando la bombola viene immersa in acqua a  $10^\circ\text{C}$ , il calore scambiato e la variazione di entropia totale. Specificare le ipotesi adottate

**SOLUZIONE (tot 5.5P)**

Se si usa l'equazione dei gas perfetti, si sa di commettere un errore di qualche % a causa dell'alta pressione.

Dall'equazione  $P_{\text{gas}} V = m_{\text{gas}} R_{\text{gas}} T$ , usando le pressioni parziali

$$(0.6 P) m_{\text{N}_2} = (17000000 \cdot 0.25) \cdot 0.012 / (8314/28) / (60+273) = 0.52$$

$$(0.6 P) m_{\text{O}_2} = (17000000 \cdot 0.75) \cdot 0.012 / (8314/32) / (60+273) = 1.77$$

$$Q = \sum (m c \Delta T) = \text{usando } c_v \text{ per i gas, } \Delta T \text{ è lo stesso } -50^\circ\text{C}$$

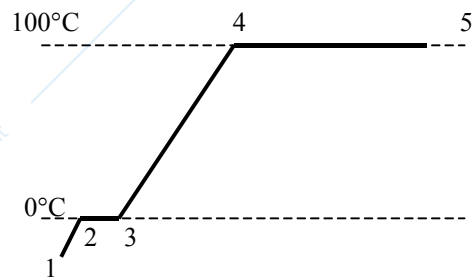
$$(2.2P) Q = (10 \cdot 880 + 0.52 \cdot 5/2 \cdot 8314/28 + 1.77 \cdot 5/2 \cdot 8314/32) \cdot (-50) = -516.6 \text{ kJ (il calore esce)}$$

$$\Delta S_{\text{bombola}} = Q/T_{\text{ML}} = -516'577 / [ (283-333)/\ln(283/333) ] = -516.577/307.3 = -1680.9 \text{ J/K}$$

$$\Delta S_{\text{acqua}} = Q/T = +516'577 / 283 = 1825.4 \text{ J/K}$$

$$(2.2P) \Delta S_{\text{tot}} = 1825.4 - 1680.9 = 144.5 \text{ J/K}$$

3) Un flusso di aria compressa percorre un tubo ( $D_{\text{interno}} = 2$  cm) lungo vari metri, entrandovi alle condizioni  $T_1 = 24^\circ\text{C}$ ,  $P_1 = 3$  bar relativi,  $w_1 = 130$  m/s, ed uscendo a  $T_2 = -18^\circ\text{C}$ ,  $w_2 = 323$  m/s.



Calcolare la portata d'aria, le restanti condizioni di uscita, se e quanto vi sia stato scambio di calore, la variazione di entropia del gas..

**SOLUZIONE (tot 5.5P)**

	T	w	P	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	A (m <sup>2</sup> )	m'
1	297	130	4.01	4.71	0.000707	0.1924
2	255	323	<b>1.39</b>	<b>1.90</b>	"	"

Si calcoli il flusso massico

$$(1.1P) m' = \rho_1 w_1 A = P/(R T) * w + \pi D^2/4 = (401125/(8314/29)/297) * 130 * \pi 0.02^2/4 = 0.1924 \text{ kg/s}$$

la costanza della portata e della sezione permette di calcolare  $\rho_2$ , quindi  $P_2$

$$\rho_1 w_1 A = \rho_2 w_2 A \text{ da cui (1.1P) } \rho_2 = 1.92, P_2 = 1.39 \text{ bar assoluti}$$

dal 1° principio  $q-l = \Delta(h + e_{cin} + e_{pot})$ , dove  $l=0 + e_{pot}=0$ , si ottiene

$$q_{IN} = c_p(T_2 - T_1) + (w_2^2/2 - w_1^2/2) = 1.005 * (255 - 297) + (323^2 - 130^2)/2 = 1504 \text{ J/kg}$$

$$(1.1P) Q' = q_{IN} * m' = 1504 * 0.1924 = 289 \text{ W (poteva risultare negativo con altri dati)}$$

$$(1.1P) \Delta S' = m' [c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1)]$$

$$= 0.1924 * 8317/29 * [7/2 \ln(255/297) - \ln(1.39/4.01)] = 13.08 \text{ W/K}$$

4) Una frigorifero mantiene la temperatura  $T_{int}=0^\circ\text{C}$  mentre quella dell'ambiente è  $T_{amb}=20^\circ\text{C}$ , l'evaporatore necessita di una differenza di temperatura di  $\Delta T_{ev}=10^\circ\text{C}$  per scambiare calore, il condensatore di  $\Delta T_{cond}=23^\circ\text{C}$ . L'efficienza è il 60% di quella di una macchina ideale che lavora tra le stesse temperature estreme del ciclo (calcolare i COP). La macchina è azionata da un motore elettrico che assorbe in media 200 W, calcolare i flussi di calore. **Disegnare** uno schema del frigorifero.

**SOLUZIONE (tot 5.5P)**

L'evaporatore è quello che riceve calore all'interno del frigorifero, permette di calcolare la  $T_{min}$  ciclo =  $0 - 10 = -10^\circ\text{C} = 263\text{K}$ . Il condensatore esterno, più caldo dell'ambiente permette di calcolare la  $T_{mass}$   $20 + 23 = 43^\circ\text{C} = 316\text{K}$ .

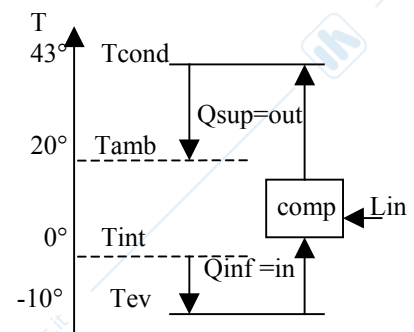
$$(1.1P) COP_{ideale} = T_{inf}/\Delta T = 263/53 = 4.96$$

$$(1.1P) COP_{reale} = 4.96 * 0.6 = 2.98$$

$$L'_{IN} = 200, (1.1P) Q'_{IN} = L * COP = 200 * 2.98 = 595\text{W},$$

$$(1.1P) Q'_{OUT} = 595 + 200 = 795\text{W}$$

(1.1P) Il diagramma delle temperature è riportato. Per lo schema del frigorifero fare riferimento al libro di testo.



5) Una turbina a gas a ciclo Bryton schematizzabile come ciclo chiuso utilizza aria che entra nel compressore a pressione ambiente e  $T=25^\circ\text{C}$ . Il rapporto di compressione è  $\beta=10$ , la temperatura massima raggiunta  $T_{max}=1000^\circ\text{C}$ . Determinare i punti del ciclo ideale, e di quello più simile al reale avente rendimenti di compressore e turbina pari a  $\eta_{comp}=0.8$ ,  $\eta_{turb}=0.95$ . Per il ciclo reale determinare i rendimenti di 1° e 2° principio. **Rappresentare** il ciclo nel piano T-s.

**SOLUZIONE (tot 5.5P)**

$$T_1 = 298 \quad T_{2id} = T_1 * (P_2/P_1)^{R/C_p} = 298 * (10)^{2/7} = 575.3 \text{ K}$$

$$\Delta T_{12,id} = 575.3 - 298 = 277.3$$

$$\Delta T_{12,re} = \Delta T_{12,id} / \eta_{comp} = 277.3 / 0.8 = 346.7$$

$$(1.1P) T_{2re} = T_1 + \Delta T_{12,re} = 298 + 346.7 = 644.7 \text{ K}$$

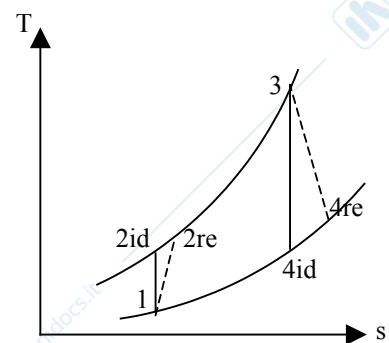
$$T_3 = 1273 \text{ K} \quad T_{4id} = T_3 * (P_4/P_3)^{R/C_p} = 298 * (0.1)^{2/7} = 659.3$$

$$|\Delta T_{34,id}| = 1273 - 659.3 = 613.7$$

$$\Delta T_{34,re} = \Delta T_{34,id} * \eta_{turb} = 583.0$$

$$(1.1P) T_{4re} = T_3 - \Delta T_{34,re} = 1273 - 583 = 690.0 \text{ K}$$

$$(1.1P) \eta_1 = (l_{Turb} - l_{Comp})/q_{IN} = (c_p \Delta T_{34,re} - c_p \Delta T_{12,re}) / (c_p \Delta T_{23}) = (613.7 - 346.7) / (1273 - 644.7) = 37.6\%$$



$\eta_C$  (di confronto calcolato tra le T estreme del ciclo  $T_1$  e  $T_3$ ) =  $1 - 298/1273 = 76.6\%$

(1.1P)  $\eta_2 = \eta_1 / \eta_C = 49.1\%$  dice quanto il ciclo sfrutta le sorgenti di calore  $T_1$  e  $T_3$ .

(1.1P) Nel piano T-s si disegnano due isobare (ricordare  $s = \log(T) + \text{cost}$ ), due isoentropiche, e le trasformazioni reali tratteggiate (l'entropia aumenta, in entrambe  $T_{re} > T_{id}$ )

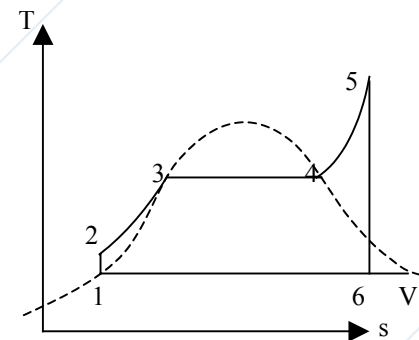
6) Determinare i punti di un ciclo Rankine a vapore d'acqua, date le temperature minima e massima e la pressione massima, considerare pompa e turbina isoentropici. Calcolare i rendimenti di 1° e 2° principio del ciclo. **Disegnare** il ciclo nel piano T-s.

Dati:  $T_{min} = 35^\circ\text{C}$ ,  $P_{max} = 100\text{bar}$ ,  $T_{max} = 550^\circ\text{C}$

**SOLUZIONE** (tot 5.5P)

Sono riportati intabella i dati essenziali (2.2P), il grafico a destra (1.1P); i punti 1 e 2 sul grafico dovrebbero essere quasi coincidenti ( $T_1 \cong T_2$ ); segmento 1-6 = 79.7% di 1-V

	P [kPa]	Titolo	h [kJ/kg]	s [kJ/(kg.K)]
1	5.628	0	146.68	0.5053
2	10000	nd	156.69	"
3	(10000)	(0)		
4	(10000)	(1)		
5	10000	nd	3500.9	6.7561
6	5.628	0.797	2073.1	6.7561
V=saturo	5.628	1	2565.3	8.3531



Procedimento

Da tabella si trovano  $P_1$ ,  $h_1$ ,  $s_1$ ,  $v_1$

$\Delta h_{12} = v \Delta P$  (acqua liquida  $\cong$  fluido incompressibile  $v_1 \cong v_2 = 0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$ , usando  $P = [\text{kPa}] \rightarrow h = [\text{kJ}]$ )

Da tabella si trovano  $h_5$ ,  $s_5$

$s_6 = s_5$  permette di trovare  $x_6 = (s_6 - s_1) / (s_V - s_1)$

$x_6$  permette di trovare  $h_6 = (1-x)h_1 + x h_V$

$q_{in} = h_5 - h_2 = 3344.21 \text{ kJ/kg}$

$l_{nu} = |h_6 - h_5| - (h_2 - h_1) = 1417.77 \text{ kJ/kg}$

(1.1P)  $\eta_1 = l_{nu} / q_{in} = 42.4\%$  (quanto calore viene trasformato in lavoro)

$\eta_C$  (di confronto tra  $35^\circ\text{C}$  e  $550^\circ\text{C}$ ) =  $1 - 307/823 = 62.6\%$  (massimo lavoro ottenibile tra  $T_1$  e  $T_5$ )

(1.1P)  $\eta_2 = \eta_1 / \eta_C = 67.7\%$  (quanto del lavoro idealmente ottenibile viene veramente ottenuto)

7) Le domande di teoria erano: (5.5P)

- Partendo dall'espressione del primo principio della termodinamica, ricavare l'espressione della variazione di entropia per un gas perfetto in funzione delle variabili P e T
- Scrivere l'equazione di conservazione dell'energia per un sistema aperto illustrarne i vari elementi e le possibili semplificazioni in casi particolari
- Descrivere e commentare l'esperimento di Joule che dimostra che in un gas perfetto l'entalpia è funzione della sola temperatura
- Partendo dall'espressione della variazione di entropia per un gas perfetto ricavare l'espressione dell'adiabatica reversibile
- Ricavare l'espressione del rendimento per un ciclo Otto ideale
- Ricavare l'espressione del rendimento per un ciclo Bryton ideale
- Partendo dall'espressione della variazione di entropia per un gas perfetto ricavare e disegnare un'isobara nel piano T-s
- Partendo dall'espressione della variazione di entropia per un gas perfetto ricavare e disegnare un'isocora nel piano T-s

## VOTI, in ordine di matricola, totale e parziali

Matr	Voto	Es1	Es2	Es3	Es4	Es5	Es6	Es7
648386	9	0	1.1	3.3	0	1.1	3.3	0
657165	10	2.75	1.1	3.3	0	0	3.3	0
657286	12	0	0	5.5	0	2.75	0.55	3.3
658446	13	0	0	2.2	5.5	0	5.5	0
661645	23	0.55	0	4.4	2.75	4.95	4.95	5.5
662966	7	0	0	0	4.95	0	2.2	0
663152	rit	0	0	0	0	0	0	0
665219	12	1.1	0	0	2.75	3.85	1.1	2.75
668920	rit	0	0	0	0	0	0	0
669042	12	0.55	1.1	2.75	0	1.1	1.1	5.5
669069	8	0	1.1	3.3	0.55	1.65	1.65	0
669253	5	1.1	0	0	0.55	0	0	3.3
669301	6	1.1	0	3.3	0	1.1	0.55	0
670833	13	1.1	0	4.4	0.55	1.65	1.1	4.4
672070	11	5.5	1.1	3.3	0	0.55	0.55	0
672124	rit	0	0	0	0	0	0	0
672435	rit	0	0	0	0	0	0	0
676046	19	1.1	1.1	2.2	1.1	5.5	3.3	4.4
676079	9	3.3	2.2	0	0.55	1.65	1.65	0
676090	13	1.1	0	3.3	1.1	2.75	3.3	1.1
676613	19	0	0	1.1	5.5	4.4	2.2	5.5
676656	6	0	0	1.1	0.55	2.75	0	1.1
676910	19	0.55	0	4.4	0.55	4.4	3.3	5.5
677605	16	0	0.825	4.4	5.5	0.55	0	4.4
677668	13	0	0	5.5	4.95	2.2	0	0
678208	17	0.55	0	5.5	4.4	4.95	1.1	0
678263	8	0	3.3	2.75	1.1	0	0	1.1
678291	20	0	1.1	4.4	4.95	4.4	5.5	0
678860	18	0.55	0	2.2	3.3	4.4	3.3	4.4
679294	4	0	0	2.2	0	0.55	1.65	0
682332	28	5.5	0	4.95	2.75	3.85	5.5	5.5
700036	15	0	1.1	0	1.1	5.5	3.3	3.85
700063	23	4.95	0.55	3.3	2.75	2.2	4.4	4.95
700066	18	5.5	0	4.4	2.2	0	0	5.5
700101	29	5.5	4.4	5.5	0	2.75	5.5	5.5
700117	rit	0	0	0	0	0	0	0
700151	12	1.1	0	1.1	0	2.75	2.2	4.4
700210	14	1.1	4.4	2.2	0.55	2.75	3.3	0
700237	19	5.5	0	4.4	0.55	2.2	1.1	5.5
700256	2	0	0	0	1.1	0	0	1.1
700281	18	0.55	0	5.5	4.95	1.65	0.55	4.4
700304	31	3.3	1.1	4.95	5.5	5.5	4.95	5.5
700416	23	5.5	3.3	5.5	2.2	3.85	2.2	0
700478	17	5.5	1.1	3.3	2.75	2.75	0	1.1
700530	18	5.5	0	1.1	2.75	2.75	0	5.5
700531	17	0	0	5.5	0	1.1	4.4	5.5
700534	25	5.5	1.1	5.5	5.5	4.4	3.3	0
700563	3	0	0	0	0	2.75	0	0
700602	29	5.5	0	4.4	5.5	2.75	5.5	5.5
700694	30	3.3	4.4	4.4	3.3	4.95	4.4	5.5

700698	15	5.5	0	3.3	1.1	2.2	0	3.3
700724	19	1.1	0	3.3	0	4.95	3.85	5.5
700729	12	3.3	1.1	4.4	0	1.1	0.55	1.65
700820	21	5.5	4.4	3.85	2.42	2.2	0	2.75
700835	14	2.2	3.3	0	0	0.55	3.3	4.4
700900	23	3.3	1.65	5.5	0.55	3.3	4.4	4.4
701076	16	2.2	0	4.4	5.5	1.65	2.2	0
701078	26	5.5	0	4.4	2.75	4.95	4.4	4.4
701085	30	3.3	1.1	4.4	5.5	4.4	5.5	5.5
701103	13	0	0	3.85	1.1	4.4	3.3	0
701105	17	0	0	4.4	5.5	0.55	1.1	5.5
701197	18	3.3	5.5	0	4.4	2.2	2.75	0
701199	12	0	0	4.4	2.75	1.65	2.75	0
701222	2	0	0	0	0	2.2	0	0
701226	rit	0	0	0	0	0	0	0
701239	13	1.1	1.65	0	0.55	1.1	2.75	5.5
701266	31	1.1	2.75	5.5	5.5	4.95	5.5	5.5
701273	19	5.5	0	5.5	1.1	3.85	3.3	0
701444	9	1.1	1.1	1.1	0	0	0	5.5
701539	23	4.95	0	4.4	0.55	3.85	3.3	5.5
701845	9	0	1.1	2.2	0	1.65	1.1	3.3
701878	26	5.5	1.1	4.4	2.75	2.75	4.4	5.5
702114	22	5.5	1.1	3.85	2.75	2.75	1.1	4.95
702172	14	4.95	0	3.3	1.65	3.85	0	0
702431	29	5.5	3.3	5.5	2.75	2.75	3.3	5.5
702442	13	0	0	3.3	4.95	1.1	0	3.3
702801	12	1.1	0	1.65	2.75	2.75	3.3	0
702916	10	1.1	0	1.1	0	4.4	3.3	0
703005	12	5.5	0	0	4.95	1.1	0	0
703175	17	1.1	3.3	1.1	1.65	2.2	3.3	4.4
703335	7	1.1	0	0	1.1	1.65	3.3	0
703349	7	0	0	0	2.75	1.65	2.2	0
703359	11	1.1	0	2.2	0	4.95	2.75	0
703410	30	1.1	5.5	3.3	4.4	5.5	4.4	5.5
703469	19	0	0	4.4	1.65	5.5	2.2	5.5
703605	12	5.5	0	0	0	4.95	1.1	0
703608	8	0	0	2.2	4.4	0	1.1	0
703670	2	0	0	0	0	0.55	1.1	0
703771	2	2.2	0	0	0	0	0	0
703783	23	0	1.1	4.4	5.5	1.65	4.4	5.5
703977	22	1.1	0.55	3.3	5.5	2.75	3.3	5.5
704115	6	0	0	0	1.65	1.65	1.1	1.1
704126	25	1.1	0	4.4	5.5	5.5	2.75	5.5
704777	21	5.5	1.1	5.5	5.5	1.1	2.75	0
704998	20	0	0	3.3	2.75	3.85	5.5	4.4
705102	20	1.1	0	4.4	2.2	4.4	2.2	5.5
705284	4	0.55	0	0	1.1	1.1	1.1	0
705453	9	1.1	0	2.2	1.1	1.1	1.1	2.2
705574	7	1.1	0	0	5.5	0	0	0
705920	9	0.55	0	3.3	0	0	0	5.5
706132	26	0	1.1	5.5	5.5	4.4	4.4	5.5
706197	13	0	3.3	2.2	2.2	2.75	1.1	1.1

711442	25	2.75	0	5.5	2.75	5.5	3.3	5.5
711570	15	0	2.2	3.3	1.65	3.3	1.1	3.3
720284	12	1.1	0	0	2.2	4.4	1.65	2.2

## NOTA

Approfitto dell'invio di questo file, per segnalarvi alcune correzioni da apportare all'eserciziario

## Pag 27

Err.  $h_{\text{H}_2\text{O},\text{liq}} = 1 * 10.2^\circ = 42.68 \text{ [kcal/kg}_{\text{AS}}] = 42.68 * (0.011384 - 0.008) = 0.14 \text{ [kJ/kg}_{\text{AS}}]$

Cor.  $h_{\text{H}_2\text{O},\text{liq}} = 4.184 * 10.2^\circ = 42.68 \text{ [kJ/kg}_{\text{liq}}] \rightarrow 42.68 * (0.011384 - 0.008) \text{ kg}_{\text{liq}}/\text{kg}_{\text{AS}} = 0.14 \text{ [kJ/kg}_{\text{AS}}]$

## Pag 33

Err.  $k B = h_{\text{int}} (T_{\text{int}} - C)$

Corr.  $-k B = h_{\text{int}} (T_{\text{int}} - C)$

Err.  $h_i C + h_e C + h_i h_e L / k = q L + h_i T_i + q h_e L^2 / 2k + h_i h_e T_i L / k + h_e T_e$

Corr.  $h_i C + h_e C + h_i h_e C L / k = q L + h_i T_i + q h_e L^2 / 2k + h_i h_e T_i L / k + h_e T_e$