



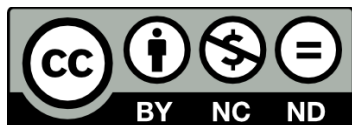
# Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική

## Ενότητα 2: Ιδιότητες

Χατζηαθανασίου Βασίλειος

Καδή Στυλιανή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



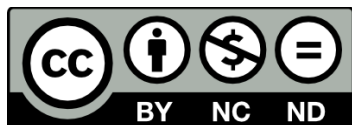
# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





# Ιδιότητες



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Περιεχόμενα ενότητας

1. Καθαρή ουσία (ύλη):
  1. Φάσεις
  2. Αλλαγές φάσης
  3. Διαγράμματα φάσεων
  4. Πίνακες ιδιοτήτων



# Καθαρή ουσία

- Μια ουσία στην οποία η χημική σύσταση παραμένει σταθερή σε όλη της την έκταση.
  - Ένα μίγμα χημικών στοιχείων ή συστατικών είναι καθαρή ουσία όσο το μίγμα είναι ομογενές π.χ. αέρας.
  - Ένα μίγμα δύο ή περισσότερων φάσεων είναι επίσης καθαρή ουσία όταν η χημική σύσταση κάθε φάσης είναι ίδια, π.χ μίγμα πάγου και υγρού νερού ή μίγμα υγρού νερού και ατμού. Δεν είναι το μίγμα υγρής και αέριας φάσης του αέρα.



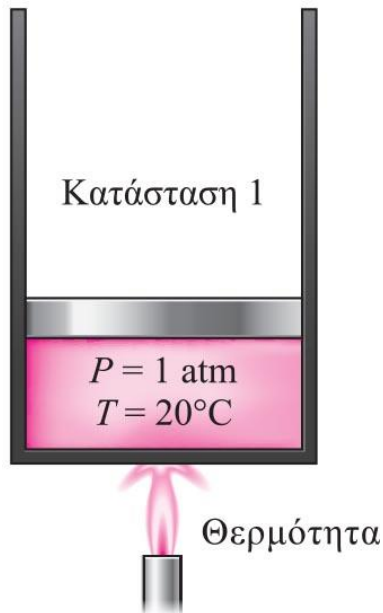
# Καταστάσεις υγρής και αέριας φάσης

- συμπιεσμένο ή υπόθερμο (υπόψυκτο) υγρό.
- κορεσμένο υγρό.
- μίγμα κορεσμένου υγρού – ατμού.
- κορεσμένος ατμός.
- υπέρθερμος ατμός.



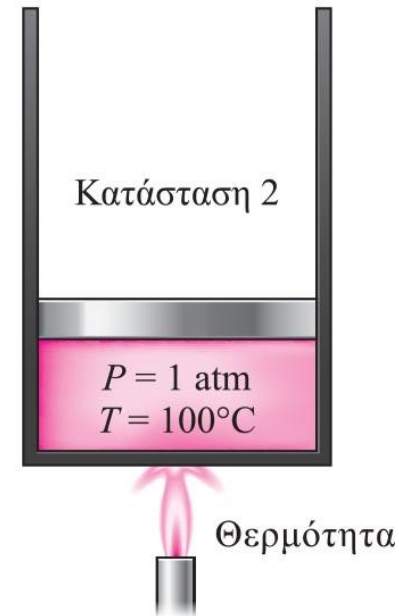
# Διεργασίες αλλαγής φάσης καθαρών ουσιών (1/3)

Υπόθερμο υγρό



**Εικόνα 1:** Σε πίεση 1 atm και θερμοκρασία  $20^\circ\text{C}$  το νερό βρίσκεται στην υγρή φάση (συμπιεσμένο υγρό)

Κορεσμένο υγρό



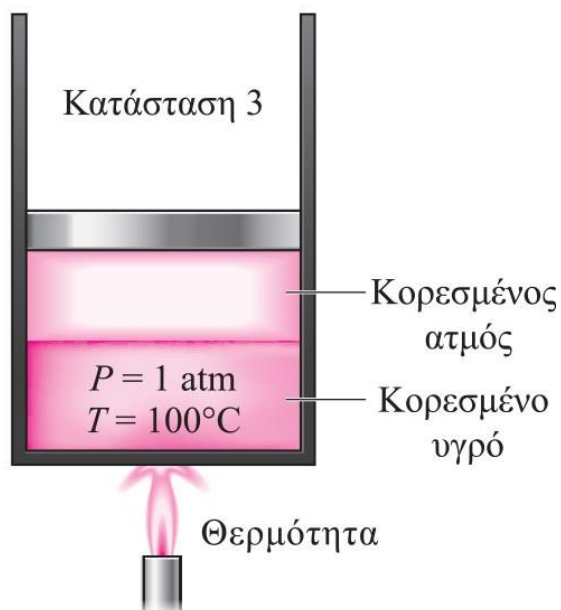
**Εικόνα 2:** Σε πίεση 1 atm και θερμοκρασία  $100^\circ\text{C}$  το νερό είναι έτοιμο να εξατμιστεί (κορεσμένο υγρό)





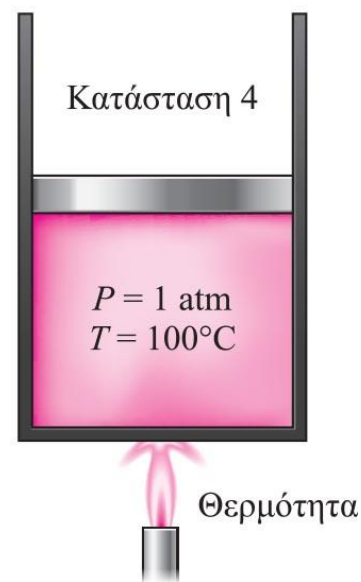
# Διεργασίες αλλαγής φάσης καθαρών ουσιών (2/3)

## Υγρός ατμός



**Εικόνα 3:** Καθώς μεταφέρεται περισσότερη θερμότητα, ένα μέρος του κορεσμένου υγρού εξατμίζεται (κορεσμένο μίγμα υγρού και ατμού)

## Κορεσμένος ατμός

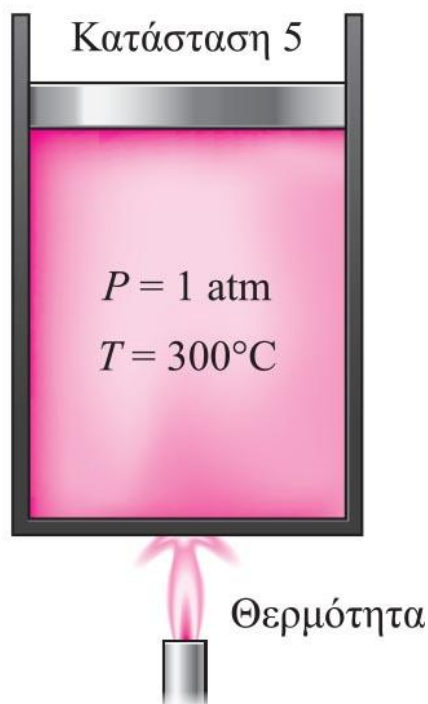


**Εικόνα 4:** Σε πίεση 1 atm η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στους  $100^\circ\text{C}$ , μέχρι να εξατμιστεί και η τελευταία σταγόνα υγρού (κορεσμένος ατμός)

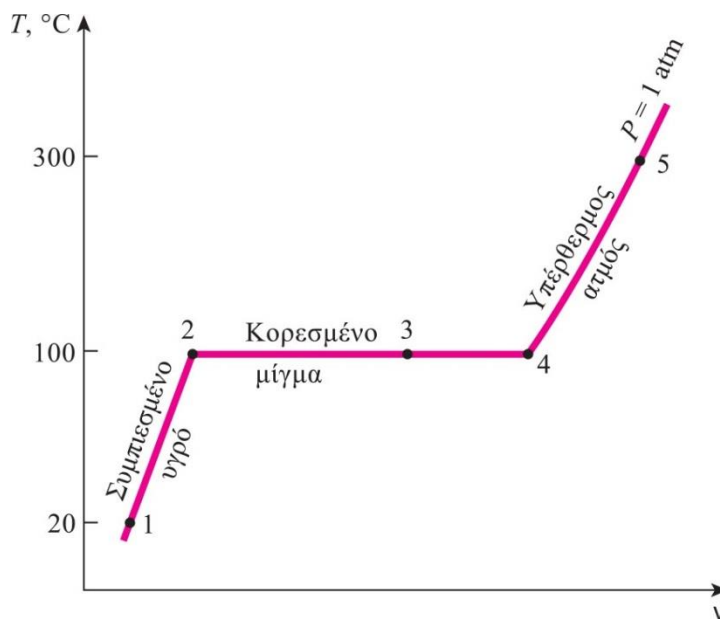


# Διεργασίες αλλαγής φάσης καθαρών ουσιών (3/3)

## Υπέρθερμος ατμός



**Εικόνα 5:** Καθώς συνεχίζεται η μεταφορά θερμότητας προς τον ατμό, η θερμοκρασία του αρχίζει να αυξάνεται (υπέρθερμος ατμός)



**Εικόνα 6:** Διάγραμμα T-v για τη διεργασία θέρμανσης νερού υπό σταθερή πίεση



# Θερμοκρασία Κορεσμού και Πίεση Κορεσμού (1/2)

- Θερμοκρασία κορεσμού ( $T_{sat}$ ): η θερμοκρασία στη οποία, σε δεδομένη πίεση, μια καθαρή ουσία αλλάζει φάση από υγρή σε αέρια ή από αέρια σε υγρή.
- Πίεση κορεσμού ( $P_{sat}$ ): η πίεση στην οποία, σε δεδομένη θερμοκρασία, μια καθαρή ουσία αλλάζει φάση από υγρή σε αέρια ή από αέρια σε υγρή.
- $T_{sat} = f(P_{sat})$  ή  $(P_{sat}) = f(T_{sat})$
- $T_{sat}$  αυξάνει με την  $P_{sat}$  και αντίστροφα.



# Θερμοκρασία Κορεσμού και Πίεση Κορεσμού (2/2)

- $P = 101,325 \text{ kPa}$      $T_{\text{sat}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
- $P = 500 \text{ kPa}$      $T_{\text{sat}} = 151,9 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$      $P_{\text{sat}} = 3.17 \text{ kPa}$



# Λανθάνουσα Θερμότητα

- Το ποσό της ενέργειας που απορροφάται ή απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της μετάβασης μιας ουσίας από μια φάση στην άλλη.
  - Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ( ή ενθαλπία εξάτμισης  $h_{fg} = h_g - h_f$  ).
  - Λανθάνουσα θερμότητα τήξης.
- $P_{sat}, T_{sat}$ : καθορίζουν το χρόνο βρασμού και ψύξης.

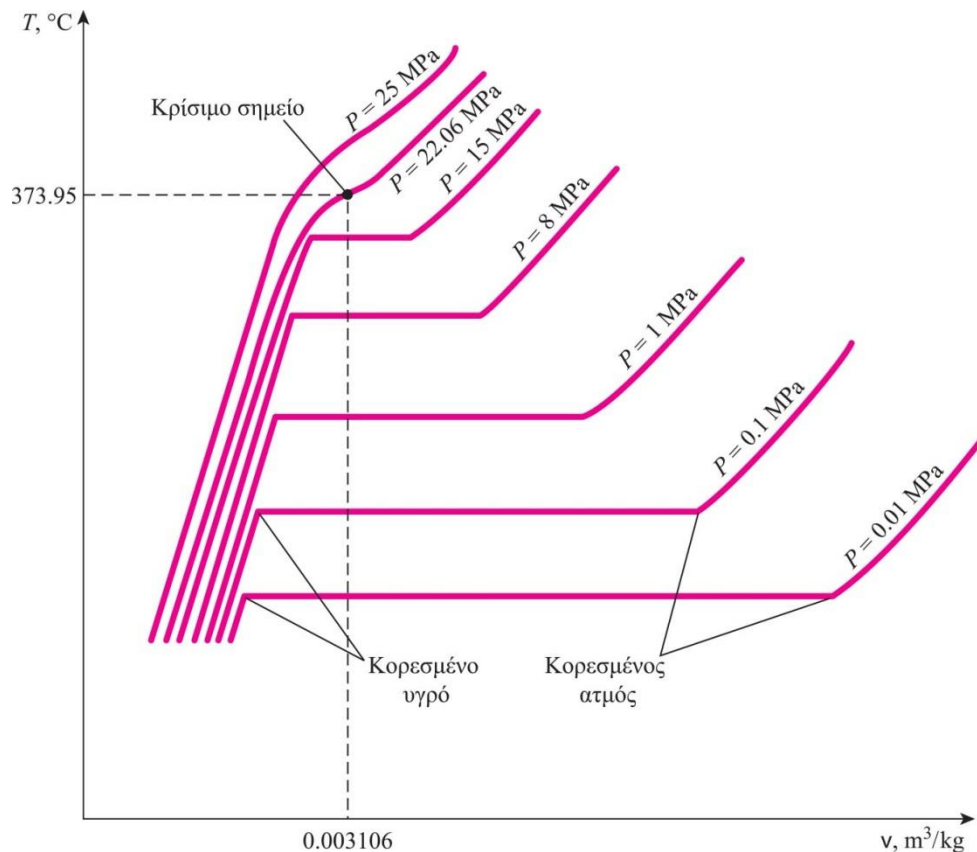


# Κρίσιμο σημείο

- Το σημείο του διαγράμματος αλλαγής φάσης μιας καθαρής ουσίας στο οποίο οι καταστάσεις κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού γίνονται ίδιες.
- Πέρα από το κρίσιμο σημείο δεν υπάρχει διακριτή διαδικασία αλλαγής φάσεων.
- Για το νερό:  $P_{cr} = 22.09 \text{ MPa}$ ,  $T_{cr} = 374.1^\circ\text{C}$ .
- Στην κρίσιμη πίεση δεν υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ υπόθερμου υγρού και υπέρθερμου ατμού (δεν υπάρχει η περιοχή των δύο φάσεων).

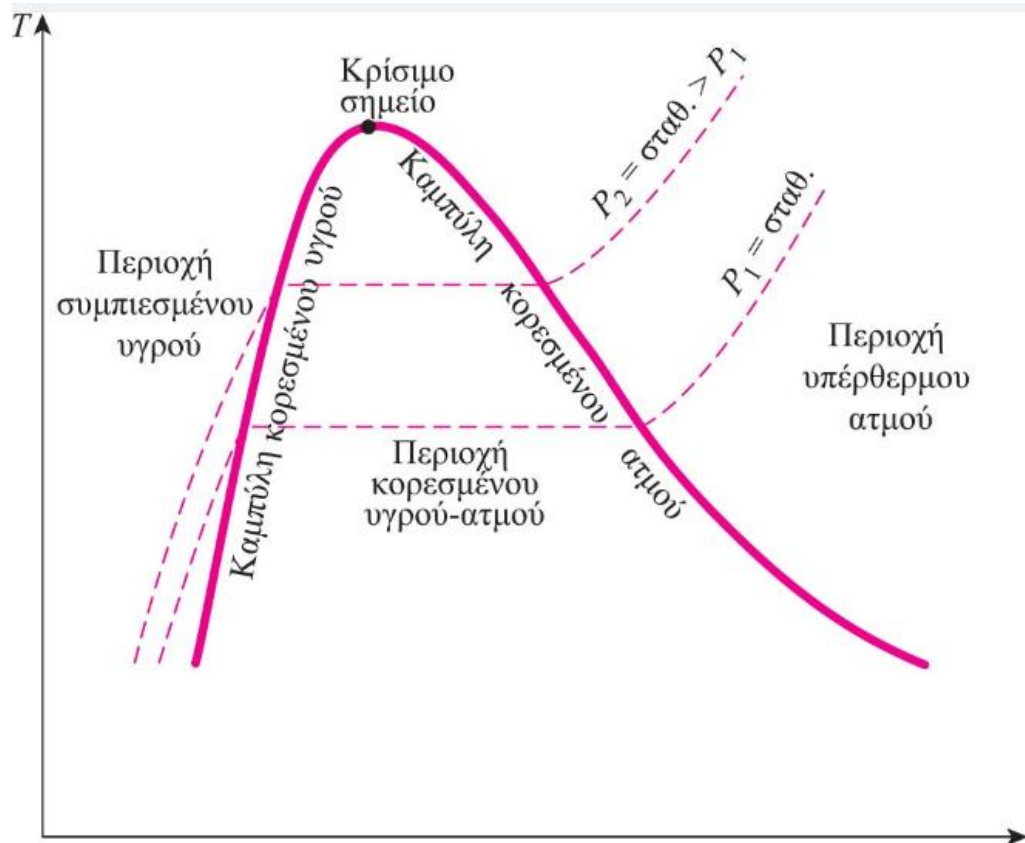


# Διαγράμματα φάσεων (1/2)



**Εικόνα 7:** Διάγραμμα T-v για διεργασίες μετατροπής φάσης μιας καθαρής ουσίας υπό σταθερή πίεση, σε διάφορες τιμές πίεσης

# Διαγράμματα φάσεων (2/2)



Εικόνα 8: Διάγραμμα T-n μιας καθαρής ουσίας





# Ιδιότητες μίγματος κορεσμένου υγρού - ατμού (1/3)

- Ποιότητα:

$$x \equiv \frac{\text{μάζα ατμού}}{\text{μάζα μίγματος}}$$

- ποσοστό υγρής φάσης:  $1 - x$



# Ιδιότητες μίγματος κορεσμένου υγρού - ατμού (2/3)

$$\begin{aligned} V &= V_f + V_g = M_f v_f + M_g v_g = \\ &= (1 - x)Mv_f + xMv_g \end{aligned}$$

$$U = (1 - x)Mu_f + xMu_g$$



# Ιδιότητες μίγματος κορεσμένου υγρού - ατμού (3/3)

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

$$u = (1 - x)u_f + xu_g$$

$$h = (1 - x)h_f + xh_g$$

$$h_{fg} = h_g - h_f$$



# Πίνακες Ιδιοτήτων (1/2)

- Οι θερμοδυναμικές σχέσεις είναι μερικές φορές περίπλοκες. Οι πίνακες παρέχουν έναν εύκολο τρόπο καταχώρησης των σχετικών ιδιοτήτων και χρήσης τους κατά την ανάλυση.
- Παρέχουν πληροφορίες για τις καταστάσεις του κορεσμένου υγρού, του κορεσμένου ατμού και του υπέρθερμου ατμού για πολλές καθαρές ουσίες.



# Πίνακες Ιδιοτήτων (2/2)

- Πίνακες I,II: πίνακες κορεσμένου νερού-ατμού.
- Πίνακας III: υπέρθερμων ατμών νερού.
- Κατάσταση Αναφοράς - Τιμές αναφοράς:
  - Οι ιδιότητες παίρνουν την τιμή μηδέν.
  - Για το νερό: τριπλό σημείο,  $T=0.01^{\circ}\text{C}$ .



# Ενθαλπία

- Οι πίνακες ιδιοτήτων περιέχουν και τιμές για τις ιδιότητες της ενθαλπίας και εντροπίας.
- Ενθαλπία: μια ιδιότητα που εισάγεται για λόγους απλότητας και ευκολίας.
- Συνολική ενθαλπία:  $H = U + PV$ .
  - Ειδική ενθαλπία:  $h = u + Pv$ .
- Συνήθως χρησιμοποιείται στην ανάλυση των ανοικτών συστημάτων (όγκος ελέγχου).



# Πίνακας Θερμοκρασίας

Κορεσμένο νερό - Πίνακας θερμοκρασίας												
		Ειδικός όγκος		Εσωτερική Ενέργεια			Ενθαλπία			Εντροπία		
		m <sup>3</sup> /kg		kJ/kg			kJ/kg			KJ/(kg.K)		
Θερμοκρ.	Πίεση	Κορεσμ.	Κορεσμ.	Κορεσμ.	Εξάτμ.	Κορεσμ.	Κορεσμ.	Εξάτμ.	Κορεσμ.	Κορεσμ.	Εξάτμ.	Κορεσμ.
	κορ.	υγρό	ατμός	υγρό		ατμός	υγρό		ατμός	υγρό		ατμός
T (°C)	P <sub>sat</sub> (kPa)	v <sub>f</sub>	v <sub>g</sub>	u <sub>f</sub>	u <sub>fg</sub>	u <sub>g</sub>	h <sub>f</sub>	h <sub>fg</sub>	h <sub>g</sub>	s <sub>f</sub>	s <sub>fg</sub>	s <sub>g</sub>
0,01	0,6113	0,001000	206,14	0,00	2375,3	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,12	20,97	2361,3	2382,3	20,98	2489,6	2510,6	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,38	42,00	2347,2	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,7498	8,9008
15	1,7051	0,001001	77,93	62,99	2333,1	2396,1	62,99	2465,9	2528,9	0,2245	8,5569	8,7814
20	2,339	0,001002	57,79	83,95	2319,0	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,3706	8,6672
25	3,169	0,001003	43,36	104,88	2304,9	2409,8	104,89	2442,3	2547,2	0,3674	8,1905	8,5580
30	4,246	0,001004	32,89	125,78	2290,8	2416,6	125,79	2430,5	2556,3	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,628	0,001006	25,22	146,67	2276,7	2423,4	146,68	2418,6	2565,3	0,5053	7,8478	8,3531
40	7,384	0,001008	19,52	167,56	2262,6	2430,1	167,57	2406,7	2574,3	0,5725	7,6845	8,2570
45	9,593	0,001010	15,26	188,44	2248,4	2436,8	188,45	2394,8	2583,2	0,6387	7,5261	8,1648
<b>50</b>	<b>12,349</b>	<b>0,001012</b>	<b>12,03</b>	209,32	2234,2	2443,5	209,33	2382,7	2592,1	0,7038	7,3725	8,0763
55	15,758	0,001015	9,568	230,21	2219,9	2450,1	230,23	2370,7	2600,9	0,7679	7,2234	7,9913
60	19,94	0,001017	7,671	251,11	2205,5	2456,6	251,13	2358,5	2609,6	0,8312	7,0784	7,9096



# Πίνακας Πίεσης

Κορεσμένο νερό - Πίνακας πίεσης												
Πίεση	Θερμοκρ. κορ.	Ειδικός όγκος		Εσωτερική Ενέργεια			Ενθαλπία			Εντροπία		
		Κορεσμ. υγρό	Κορεσμ. ατμός	Κορεσμ. υγρό	Εξάτμ.	Κορεσμ. ατμός	Κορεσμ. υγρό	Εξάτμ.	Κορεσμ. ατμός	Κορεσμ. υγρό	Εξάτμ.	Κορεσμ. ατμός
P (kPa)	T <sub>sat</sub> (°C)	v <sub>f</sub>	v <sub>g</sub>	u <sub>f</sub>	u <sub>fg</sub>	u <sub>g</sub>	h <sub>f</sub>	h <sub>fg</sub>	h <sub>g</sub>	s <sub>f</sub>	s <sub>fg</sub>	s <sub>g</sub>
0,6113	0,01	0,001000	206,14	0,0	2375,3	2375,3	0,0	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562	9,1562
1,0	6,98	0,001000	129,21	29,3	2355,7	2385,0	29,3	2484,9	2514,2	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,98	54,7	2338,6	2393,3	54,7	2470,6	2525,3	0,1957	8,6322	8,8279
<b>2,0</b>	<b>17,50</b>	<b>0,001001</b>	<b>67,00</b>	<b>73,5</b>	<b>2326,0</b>	<b>2399,5</b>	<b>73,5</b>	<b>2460,0</b>	<b>2533,5</b>	<b>0,2607</b>	<b>8,4629</b>	<b>8,7237</b>
2,5	21,08	0,001002	54,25	88,5	2315,9	2404,4	88,5	2451,6	2540,0	0,3120	8,3311	8,6432
3,0	24,08	0,001003	45,67	101,0	2307,5	2408,5	101,1	2444,5	2545,5	0,3545	8,2231	8,5776
4,0	28,96	0,001004	34,80	121,5	2293,7	2415,2	121,5	2432,9	2554,4	0,4226	8,0520	8,4746
5,0	32,88	0,001005	28,19	137,8	2282,7	2420,5	137,8	2423,7	2561,5	0,4764	7,9187	8,3951
7,5	40,29	0,001008	19,24	168,8	2261,7	2430,5	168,8	2406,0	2574,8	0,5764	7,6750	8,2515
10	45,81	0,001010	14,67	191,8	2246,1	2437,9	191,8	2392,8	2584,7	0,6493	7,5009	8,1502
15	53,97	0,001014	10,02	225,9	2222,8	2448,7	225,9	2373,1	2599,1	0,7549	7,2536	8,0085
20	60,06	0,001017	7,649	251,4	2205,4	2456,7	251,4	2358,3	2609,7	0,8320	7,0766	7,9085
25	64,97	0,001020	6,204	271,9	2191,2	2463,1	271,9	2346,3	2618,2	0,8931	6,9383	7,8314
30	69,10	0,001022	5,229	289,2	2179,2	2468,4	289,2	2336,1	2625,3	0,9439	6,8247	7,7686





# Πίνακας Υπέρθερμων ατμών

Πίνακας υπέρθερμων ατμών												
T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg.K)	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg.K)	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg.K)
	P = 0.01 MPa (45.81 °C)				P = 0.05 MPa (81.33 °C)				P = 0.10 MPa (99.63 °C)			
Κορ.	14,674	2437,9	2584,7	8,1502	3,240	2483,9	2645,9	7,5939	1,6940	2506,1	2675,5	7,3594
50	14,869	2443,9	2592,6	8,1749								
100	17,196	2515,5	2687,5	8,4479	3,418	2511,6	2682,5	7,6947	1,6958	2506,7	2676,2	7,3614
150	19,512	2587,9	2783,0	8,6882	3,889	2585,6	2780,1	7,9401	1,9364	2582,8	2776,4	7,6134
200	21,825	2661,3	2879,5	8,9038	4,356	2659,9	2877,7	8,1580	2,172	2658,1	2875,3	7,8343
250	24,136	2736,0	2977,3	9,1002	4,820	2735,0	2976,0	8,3556	2,406	2733,7	2974,3	8,0333
<b>300</b>	<b>26,445</b>	<b>2812,1</b>	<b>3076,5</b>	<b>9,2813</b>	5,284	2811,3	3075,5	8,5373	2,639	2810,4	3074,3	8,2158
400	31,063	2968,9	3279,6	9,6077	6,209	2968,5	3278,9	8,8642	3,103	2967,9	3278,2	8,5435
500	35,679	3132,3	3489,1	9,8978	7,134	3132,0	3488,7	9,1546	3,565	3131,6	3488,1	8,8342
600	40,295	3302,5	3705,4	10,1608	8,057	3302,2	3705,1	9,4178	4,028	3301,9	3704,4	9,0976
700	44,911	3479,6	3928,7	10,4028	8,981	3479,4	3928,5	9,6599	4,490	3479,2	3928,2	9,3398
800	49,526	3663,8	4159,0	10,6281	9,904	3663,6	4158,9	9,8852	4,952	3663,5	4158,6	9,5652
900	54,141	3855,0	4396,4	10,8396	10,828	3854,9	4396,3	10,0967	5,414	3854,8	4396,1	9,7767
1000	58,757	4053,0	4640,6	11,0393	11,751	4052,9	4640,5	10,2964	5,875	4052,8	4640,3	9,9764
1100	63,372	4257,5	4891,2	11,2287	12,674	4257,4	4891,1	10,4859	6,337	4257,3	4891,0	10,1659
1200	67,987	4467,9	5147,8	11,4091	13,597	4467,8	5147,7	10,6662	6,799	4467,7	5147,6	10,3463
1300	72,602	4683,7	5409,7	11,5811	14,521	4683,6	5409,6	10,8382	7,260	4683,5	5409,5	10,5183



# Υπόθερμο υγρό

- Οι ιδιότητες ασθενείς συναρτήσεις της πίεσης.
- Άρα για  $p < 50 \text{ bar} = 5 \text{ MPa}$ : ιδιότητες υπόθερμου ίδιες με αυτές του κορεσμένου υγρού στη θερμοκρασία του υπόθερμου (**ασυμπίεστο υγρό**).



# Χρήση Πινάκων Ιδιοτήτων (1/3)

- Καθορισμός ύλης για την επιλογή των κατάλληλων πινάκων.
- Καθορισμός κατάστασης ρευστού:
  - Α Υπόθερμο υγρό
  - Β Κορεσμένο υγρό
  - Γ Υγρός ατμός
  - Δ Κορεσμένος ατμός
  - Ε Υπέρθερμος ατμός



# Χρήση Πινάκων Ιδιοτήτων (2/3)

- Κορεσμένο υγρό ή κορεσμένος ατμός (B ή Δ).



# Χρήση Πινάκων Ιδιοτήτων (3/3)

- Έστω ότι η πρώτη γνωστή ιδιότητα είναι η πίεση.
- Η τιμή της δεύτερης γνωστής ιδιότητας (εκτός από τη θερμοκρασία) είναι ακριβώς η τιμή της ιδιότητας του κορεσμένου υγρού ή του κορεσμένου ατμού.
- Η κατάσταση του ρευστού είναι κορεσμένο υγρό ή κορεσμένος ατμός αντίστοιχα.



# Παράδειγμα: Πίνακες υδρατμών (1/4)

	T °C	p kPa	x %	v m <sup>3</sup> /kg	h kJ/kg	u kJ/kg
A	17,5	2	0	1,00E-03	73,48	73,48

- Η τιμή του ειδικού όγκου είναι η τιμή του ειδικού όγκου του κορεσμένου υγρού στη δεδομένη πίεση. Άρα το ρευστό είναι κορεσμένο υγρό. Όλες οι ιδιότητες προκύπτουν από το πίνακα.



# Παράδειγμα: Πίνακες υδρατμών (2/4)

Κορεσμένο νερό - Πίνακας πίεσης												
		Ειδικός όγκος		Εσωτερική Ενέργεια			Ενθαλπία			Εντροπία		
		m <sup>3</sup> /kg		kJ/kg			kJ/kg			KJ/(kg.K)		
Πίεση	Θερμοκρ. κορ.	Κορεσμ. υγρό	Κορεσμ. ατμός	Κορεσμ. υγρό	Εξάτμ.	Κορεσμ. ατμός	Κορεσμ. υγρό	Εξάτμ.	Κορεσμ. ατμός	Κορεσμ. υγρό	Εξάτμ.	Κορεσμ. ατμός
P (kPa)	T <sub>sat</sub> (°C)	υ <sub>f</sub>	υ <sub>g</sub>	υ <sub>f</sub>	υ <sub>fg</sub>	υ <sub>g</sub>	h <sub>f</sub>	h <sub>fg</sub>	h <sub>g</sub>	s <sub>f</sub>	s <sub>fg</sub>	s <sub>g</sub>
0,6113	0,01	0,001000	206,14	0,0	2375,3	2375,3	0,0	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562	9,1562
1,0	6,98	0,001000	129,21	29,3	2355,7	2385,0	29,3	2484,9	2514,2	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,98	54,7	2338,6	2393,3	54,7	2470,6	2525,3	0,1957	8,6322	8,8279
<b>2,0</b>	<b>17,50</b>	<b>0,001001</b>	<b>67,00</b>	<b>73,5</b>	<b>2326,0</b>	<b>2399,5</b>	<b>73,5</b>	<b>2460,0</b>	<b>2533,5</b>	<b>0,2607</b>	<b>8,4629</b>	<b>8,7237</b>
2,5	21,08	0,001002	54,25	88,5	2315,9	2404,4	88,5	2451,6	2540,0	0,3120	8,3311	8,6432
3,0	24,08	0,001003	45,67	101,0	2307,5	2408,5	101,1	2444,5	2545,5	0,3545	8,2231	8,5776
4,0	28,96	0,001004	34,80	121,5	2293,7	2415,2	121,5	2432,9	2554,4	0,4226	8,0520	8,4746
5,0	32,88	0,001005	28,19	137,8	2282,7	2420,5	137,8	2423,7	2561,5	0,4764	7,9187	8,3951
7,5	40,29	0,001008	19,24	168,8	2261,7	2430,5	168,8	2406,0	2574,8	0,5764	7,6750	8,2515
10	45,81	0,001010	14,67	191,8	2246,1	2437,9	191,8	2392,8	2584,7	0,6493	7,5009	8,1502
15	53,97	0,001014	10,02	225,9	2222,8	2448,7	225,9	2373,1	2599,1	0,7549	7,2536	8,0085
20	60,06	0,001017	7,649	251,4	2205,4	2456,7	251,4	2358,3	2609,7	0,8320	7,0766	7,9085
25	64,97	0,001020	6,204	271,9	2191,2	2463,1	271,9	2346,3	2618,2	0,8931	6,9383	7,8314
30	69,10	0,001022	5,229	289,2	2179,2	2468,4	289,2	2336,1	2625,3	0,9439	6,8247	7,7686



# Παράδειγμα: Πίνακες υδρατμών (3/4)

- Έστω ότι η πρώτη γνωστή ιδιότητα είναι η πίεση.
- Αν η δεύτερη γνωστή ιδιότητα είναι η θερμοκρασία και η τιμή της είναι αυτή της θερμοκρασίας κορεσμού, δεν έχουμε δύο ανεξάρτητες ιδιότητες και δεν μπορεί να καθορισθεί η κατάσταση του ρευστού.





# Παράδειγμα: Πίνακες υδρατμών (4/4)

Δεν ορίζεται

	T °C	p kPa	x %	v m <sup>3</sup> /kg	h kJ/kg	u kJ/kg
A		2		1.00E-03		
B	17.5	2				



# Υγρός ατμός (1/2)

- Η τιμή της δεύτερης γνωστής ιδιότητας είναι μεταξύ των τιμών κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού για τη δεδομένη πίεση ή θερμοκρασία.
- Υπολογίζεται η ποιότητα από τη δεύτερη γνωστή τιμή και τις αντίστοιχες τιμές κορεσμού.



# Υγρός ατμός (2/2)

Ποιότητα:

$$x = \frac{v - v_f}{v_g - v_f} = \frac{u - u_f}{u_g - u_f} = \frac{h - h_f}{h_g - h_f} = \frac{s - s_f}{s_g - s_f}$$



# Υπέρθερμος ατμός

- Η τιμή της δεύτερης γνωστής ιδιότητας είναι μεγαλύτερη των τιμών κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού για τη δεδομένη πίεση ή θερμοκρασία.
- Οι τιμές των άλλων ιδιοτήτων προκύπτουν από το πίνακα των υπέρθερμων ατμών (με γραμμική παρεμβολή αν είναι αναγκαίο).



# Πίνακας Υπέρθερμων ατμών

Πίνακας υπέρθερμων ατμών												
T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg.K)	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg.K)	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg.K)
	P = 0.01 MPa (45.81 °C)				P = 0.05 MPa (81.33 °C)				P = 0.10 MPa (99.63 °C)			
Κορ.	14,674	2437,9	2584,7	8,1502	3,240	2483,9	2645,9	7,5939	1,6940	2506,1	2675,5	7,3594
50	14,869	2443,9	2592,6	8,1749								
100	17,196	2515,5	2687,5	8,4479	3,418	2511,6	2682,5	7,6947	1,6958	2506,7	2676,2	7,3614
150	19,512	2587,9	2783,0	8,6882	3,889	2585,6	2780,1	7,9401	1,9364	2582,8	2776,4	7,6134
200	21,825	2661,3	2879,5	8,9038	4,356	2659,9	2877,7	8,1580	2,172	2658,1	2875,3	7,8343
250	24,136	2736,0	2977,3	9,1002	4,820	2735,0	2976,0	8,3556	2,406	2733,7	2974,3	8,0333
<b>300</b>	<b>26,445</b>	<b>2812,1</b>	<b>3076,5</b>	<b>9,2813</b>	5,284	2811,3	3075,5	8,5373	2,639	2810,4	3074,3	8,2158
400	31,063	2968,9	3279,6	9,6077	6,209	2968,5	3278,9	8,8642	3,103	2967,9	3278,2	8,5435
500	35,679	3132,3	3489,1	9,8978	7,134	3132,0	3488,7	9,1546	3,565	3131,6	3488,1	8,8342
600	40,295	3302,5	3705,4	10,1608	8,057	3302,2	3705,1	9,4178	4,028	3301,9	3704,4	9,0976
700	44,911	3479,6	3928,7	10,4028	8,981	3479,4	3928,5	9,6599	4,490	3479,2	3928,2	9,3398
800	49,526	3663,8	4159,0	10,6281	9,904	3663,6	4158,9	9,8852	4,952	3663,5	4158,6	9,5652
900	54,141	3855,0	4396,4	10,8396	10,828	3854,9	4396,3	10,0967	5,414	3854,8	4396,1	9,7767
1000	58,757	4053,0	4640,6	11,0393	11,751	4052,9	4640,5	10,2964	5,875	4052,8	4640,3	9,9764
1100	63,372	4257,5	4891,2	11,2287	12,674	4257,4	4891,1	10,4859	6,337	4257,3	4891,0	10,1659
1200	67,987	4467,9	5147,8	11,4091	13,597	4467,8	5147,7	10,6662	6,799	4467,7	5147,6	10,3463
1300	72,602	4683,7	5409,7	11,5811	14,521	4683,6	5409,6	10,8382	7,260	4683,5	5409,5	10,5183



# Υπόθερμο Υγρό (1/2)

- Αν η τιμή της δεύτερης γνωστής ιδιότητας είναι μικρότερη των τιμών κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού για τη δεδομένη πίεση ή θερμοκρασία, το υγρό είναι υπόθερμο.



# Υπόθερμο Υγρό (2/2)

- Προσέγγιση ασυμπίεστου ρευστού: οι  $u$ ,  $v$ ,  $h$ , και  $s$  είναι συναρτήσεις μόνο της θερμοκρασίας.
- Οι πίνακες κορεσμού (πίεσης ή θερμοκρασίας) χρησιμοποιούνται για τον προσεγγιστικό προσδιορισμό των ιδιοτήτων.



# Παράδειγμα (1/3)

	T °C	P bar	x	υ m <sup>3</sup> /kg	h kJ/kg	υ kJ/kg
1	<b>150</b>	4.758	1.0	<b>0.3928</b>	2746.5	2559.5
2	<b>350</b>	<b>20</b>	-	0.13857	3137.0	2859.8
3	<b>100</b>	1.014	0.745	1.246	<b>2100</b>	1974.2
4	275.6	<b>60</b>	0.7609	<b>0.025</b>	2409	2259





# Παράδειγμα (2/3)

	T °C	P bar	x	v m <sup>3</sup> /kg	h kJ/kg	u kJ/kg
5	<b>140</b>	<b>50</b>	-	0.00108 0	589.13	588.74
6	<b>400</b>	<b>15</b>	-	0.2030	3255.8	2951.3
7	179.9	<b>10</b>	<b>0.6</b>	0.1171	1972	1855
8	<b>290</b>	74.36	1	0.02557	<b>2766.2</b>	2576.0



# Παράδειγμα (3/3)

	T °C	P bar	x	υ m <sup>3</sup> /kg	h kJ/kg	υ kJ/kg
9	<b>200</b>	15.5	0.66	0.0841	2132.4	<b>2000</b>
10	<b>140</b>	3.613	0	0.001080	<b>589.1</b>	588.74
11	147.9	<b>4.5</b>	0	0.001088	623.25	<b>622.2</b>
12	<b>100</b>	<b>1.014</b>	Δεν	ορίζονται		

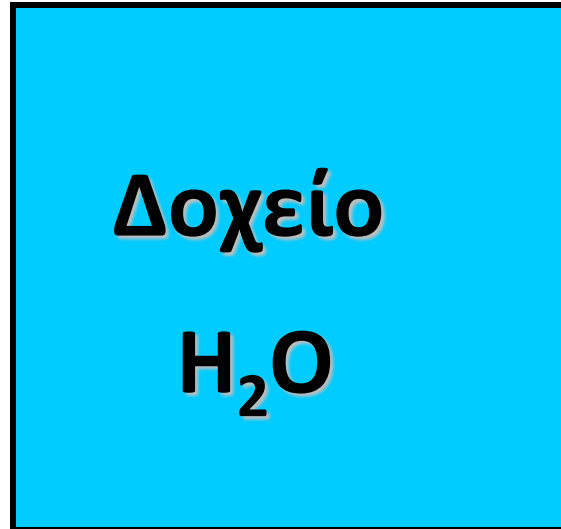


# Παράδειγμα (1/2)

- Κορεσμένο υγρό νερό περιέχεται σε κλειστό δοχείο. Το μίγμα ψύχεται στους  $50^{\circ}\text{C}$ , οπότε οι μάζες του κορεσμένου ατμού και του κορεσμένου υγρού είναι  $0.03$  και  $1999.97$  kg αντίστοιχα. Ζητούνται:
  - Η αρχική θερμοκρασία [ $^{\circ}\text{C}$ ], και
  - ο όγκος του δοχείου [ $\text{m}^3$ ].



# Παράδειγμα (2/2)



Κατάσταση 1:

Κορεσμένο

υγρό

$$T_1 = ? \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V = ? \text{ m}^3$$

Κατάσταση 2:

$$T = 50^\circ\text{C}$$

$$m_\alpha = 1999.97 \text{ kg}$$

$$m_\upsilon = 0.03 \text{ kg}$$



# Λύση - Εξισώσεις:

$$X = \frac{m_{\alpha}}{m_{\nu} + m_{\alpha}}$$

$$\nu = \nu_f + X(\nu_g - \nu_f)$$

$$V = m\nu$$



# Λύση (1/4)

T (°C)	P <sub>sat</sub> (kPa)	v <sub>f</sub>	v <sub>g</sub>	u <sub>f</sub>	u <sub>fg</sub>	u <sub>g</sub>	h <sub>f</sub>	h <sub>fg</sub>	h <sub>g</sub>	s <sub>f</sub>	s <sub>fg</sub>	s <sub>g</sub>
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
<b>50</b>	<b>12.349</b>	<b>0.001012</b>	<b>12.03</b>	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.94	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2569.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791



# Λύση (2/4)

$$x_2 = \frac{m_\alpha}{m_\nu + m_\alpha} = \frac{0.03}{1999.97 + 0.03} = 1.5 \times 10^{-5}$$

$$v_2 = v_f + x(v_g - v_f)$$

$$= 1.012 \times 10^{-3} + (1.5 \times 10^{-5})(12.03 - 1.012 \times 10^{-3})$$

$$= 1.197 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$



# Λύση (3/4)

- Από τον Πίνακα θερμοκρασίας, προκύπτει  $\nu_f = 1.197 \times 10^{-3}$  όταν  $T = 224^\circ\text{C}$ .
- Οπότε:

$$T_1 = 224^\circ\text{C}$$

$$V = (2000 \text{ kg})(1.197 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}) = 2.394 \text{ m}^3$$

$$V = 2.394 \text{ m}^3$$





# Λύση (4/4)

		Ειδικός όγκος		Εσωτερική Ενέργεια			Ενθαλπία			Εντροπία		
		m <sup>3</sup> /kg		kJ/kg			kJ/kg			KJ/(kg.K)		
Θερμοκρ.	Πίεση	Κορεσμ.	Κορεσμ.	Κορεσμ.	Εξάτμ.	Κορεσμ.	Κορεσμ.	Εξάτμ.	Κορεσμ.	Κορεσμ.	Εξάτμ.	Κορεσμ.
	κορ.	υγρό	ατμός	υγρό		ατμός	υγρό		ατμός	υγρό		ατμός
T (°C)	P <sub>sat</sub> (MPa)	v <sub>f</sub>	v <sub>g</sub>	u <sub>f</sub>	u <sub>fg</sub>	u <sub>g</sub>	h <sub>f</sub>	h <sub>fg</sub>	h <sub>g</sub>	s <sub>f</sub>	s <sub>fg</sub>	s <sub>g</sub>
150	0,4758	0,001910	0,3928	631,68	1927,9	2559,5	632,20	2114,3	2746,5	1,8418	4,9960	6,8379
155	0,5431	0,001096	0,3468	653,24	1910,8	2564,1	653,84	2098,6	2752,4	1,8925	4,9010	6,7935
160	0,6178	0,001102	0,3071	674,87	1893,5	2568,4	675,55	2082,6	2758,1	1,9427	4,8075	6,7502
165	0,7005	0,001108	0,2727	696,56	1876,0	2572,5	697,34	2066,2	2763,5	1,9925	4,7153	6,7078
170	0,7917	0,001114	0,2428	718,33	1858,1	2576,5	719,21	2049,5	2768,7	2,0419	4,6244	6,6663
175	0,8920	0,001121	0,2168	740,17	1840,0	2580,2	741,17	2032,4	2773,6	2,0909	4,5347	6,6256
180	1,0021	0,001127	0,19405	762,09	1821,6	2583,7	763,22	2015,0	2778,2	2,1396	4,4461	6,5857
185	1,1227	0,001134	0,17409	784,10	1802,9	2587,0	785,37	1997,1	2782,4	2,1879	4,3586	6,5465
190	1,2544	0,001141	0,15654	806,19	1783,8	2590,0	807,62	1978,8	2786,4	2,2359	4,2720	6,5079
195	1,3978	0,001149	0,14105	828,37	1764,4	2592,8	829,98	1960,0	2790,0	2,2835	4,1863	6,4698
200	1,5538	0,001157	0,12736	850,65	1744,7	2595,3	852,45	1940,7	2793,2	2,3309	4,1014	6,4323
205	1,7230	0,001164	0,11521	873,04	1724,5	2597,5	875,04	1921,0	2796,0	2,3780	4,0172	6,3952
210	1,9062	0,001173	0,10441	895,53	1703,9	2599,5	897,76	1900,7	2798,5	2,4248	3,9337	6,3585
215	2,104	0,001181	0,09479	918,14	1682,9	2601,1	920,62	1879,9	2800,5	2,4714	3,8507	6,3221
<b>220</b>	<b>2,318</b>	<b>0,001190</b>	<b>0,08619</b>	<b>940,87</b>	<b>1661,5</b>	<b>2602,4</b>	<b>943,62</b>	<b>1858,5</b>	<b>2802,1</b>	<b>2,5178</b>	<b>3,7683</b>	<b>6,2861</b>
<b>225</b>	<b>2,548</b>	<b>0,001199</b>	<b>0,07849</b>	<b>963,73</b>	<b>1639,6</b>	<b>2603,3</b>	<b>966,78</b>	<b>1836,5</b>	<b>2803,3</b>	<b>2,5639</b>	<b>3,6863</b>	<b>6,2503</b>



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (1/2)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

- Εικόνα 1:

Σε πίεση 1 atm και θερμοκρασία 20<sup>0</sup>C το νερό βρίσκεται στην υγρή φάση (συμπιεσμένο υγρό): Σελίδα 133, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, 7<sup>η</sup> έκδοση, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 2:

Σε πίεση 1 atm και θερμοκρασία 100<sup>0</sup>C το νερό είναι έτοιμο να εξατμιστεί (κορεσμένο υγρό): Σελίδα 133, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, 7<sup>η</sup> έκδοση, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 3:

Καθώς μεταφέρεται περισσότερη θερμότητα, ένα μέρος του κορεσμένου υγρού εξατμίζεται (κορεσμένο μίγμα υγρού και ατμού): Σελίδα 134, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, 7<sup>η</sup> έκδοση, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 4:

Σε πίεση 1 atm η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στους 100<sup>0</sup>C, μέχρι να εξατμιστεί και η τελευταία σταγόνα υγρού (κορεσμένος ατμός): Σελίδα 134, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, 7<sup>η</sup> έκδοση, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/2)

- Εικόνα 5:

Καθώς συνεχίζεται η μεταφορά θερμότητας προς τον ατμό, η θερμοκρασία του αρχίζει να αυξάνεται (υπέρθερμος ατμός: Σελίδα 134, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, 7<sup>η</sup> έκδοση, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 6:

Διάγραμμα T-n για τη διεργασία θέρμανσης νερού υπό σταθερή πίεση: Σελίδα 135, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, 7<sup>η</sup> έκδοση, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 7:

Διάγραμμα T-n για διεργασίες μετατροπής φάσης μιας καθαρής ουσίας υπό σταθερή πίεση, σε διάφορες τιμές πίεσης: Σελίδα 138, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, 7<sup>η</sup> έκδοση, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 8:

Διάγραμμα T-n μιας καθαρής ουσίας: Σελίδα 139, Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, 7<sup>η</sup> έκδοση, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζηαθανασίου Βασίλειος, Καδή Στυλιανή. «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ. Ιδιότητες».  
Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:  
<http://eclass.auth.gr/courses/OCRS423/>.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

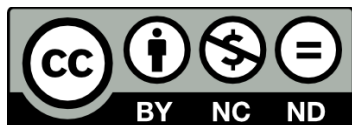
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





# Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα  
Θεσσαλονίκη, Εαρινό εξάμηνο 2015



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

---

# Σημειώματα

# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

