



Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Σχολή Μηχανικών Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Γ' εξάμηνο

Μάθημα Εφαρμ. Θερμοδυναμική Ι/ 3^η Ενότητα μαθήματος: Ιδιότητες καθαρής ουσίας

Διδάσκουσα Δρ. Κατερίνα Βαβουράκη

Google..search

Διδακτικά βιβλία για τους σπουδαστές της Ανώτατης Δημόσιας Σχολής Εμπορικού Ναυτικού (Α.Δ.Σ.Ε.Ν.):

1) Εφαρμοσμένη θερμοδυναμική (γ' έκδοση)

&

2) Παράρτημα τεχνικής Θερμοδυναμικής

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Ζ. ΠΑΓΩΝΑΡΗ

γ' έκδοση

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Εφαρμοσμένη θερμοδυναμική (γ' έκδοση)
Το βιβλίο αυτό απευθύνεται στους Μηχανικούς του Εμπορικού Ναυτικού και περιλαμβάνει τα βασικά λειτουργικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά μηχανών και μηχανημάτων όπως οι ΜΕΚ, οι στρόβιλοι, οι αεροσυμπιεστές, οι αεριοστρόβιλοι, οι ψυκτικές εγκαταστάσεις κ.ά.. Ο Μηχανικός του Εμπορικού Ναυτικού καλείται μέσω της Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής να εφαρμόσει στην πράξη τις αρχές και τους νόμους βάσει των οποίων λειτουργούν οι μηχανικές εγκαταστάσεις του πλοίου.

Βιβλίο: Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική, Κ.Ζ. ΠΑΓΩΝΑΡΗ ΑΘΗΝΑ 2020



ΑΝΩΤΕΡΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΣ ΣΧΟΛΕΣ
ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Κωνσταντίνου Ζ. Παγωνάρη
ΠΛΟΙΑΡΧΟΥ (Μ)Π.Ν.
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ-ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ Ν. Ρ.Γ.Σ. ΗΠΑ



Παράρτημα τεχνικής Θερμοδυναμικής

Το τεύχος αυτό αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του βιβλίου «Τεχνική Θερμοδυναμική», διότι περιλαμβάνει τους πίνακες και τα διαγράμματα που είναι απαραίτητα για την επίλυση των ασκήσεων επί της ύλης του βιβλίου. Ο διαχωρισμός των πινάκων και διαγραμμάτων από το βιβλίο κρίθηκε απαραίτητος, προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους σπουδαστές στις γραπτές εξετάσεις.

Βιβλίο: Παράρτημα Τεχνικής Θερμοδυναμικής, Κ.Ζ. ΠΑΓΩΝΑΡΗ ΑΘΗΝΑ 2002

<https://eclass.hmu.gr/>

στο μάθημα:

ΕΦΑΡΜ. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ Ι Γ' εξαμ. (2021-22) (MECH215)

<https://eclass.hmu.gr/courses/MECH215/>

Password: thermodynamics1

➤ **15 βδομάδες, 4ώρες/ βδομάδα= 60ώρες συνολικά**

Σύμφωνα με το **Πρόγραμμα Σπουδών 2019** του Τμήματος **Μηχ/Μηχ/ΕΛΜΕΠΑ**
Υλη μαθήματος:

1. Θεμελίωση των βασικών ενεργειακών μεγεθών, ορισμοί. Η έννοια του πεπερασμένου συστήματος και οι νόμοι της θερμοδυναμικής, εισαγωγική περιγραφή
2. Καταστατικά μεγέθη και καταστατικές εξισώσεις. Οι καθαρές ουσίες, φάσεις της ύλης. Το ιδανικό αέριο, η έννοια της ισορροπίας, η σταθερά του ιδανικού αερίου και η καταστατική εξίσωσή του
3. Οι μεταβολές ιδανικού αερίου
4. Πρώτος Θερμοδυναμικός Νόμος, μετατροπή θερμότητας σε έργο
5. Θερμοδυναμικοί κύκλοι, Υπολογισμοί έργου και βαθμού απόδοσης
6. Η έννοια της Εντροπίας, Περιγραφή και ανάλυση θερμοδυναμικών κύκλων σε πεδία πίεσης – όγκου και ενθαλπίας – εντροπίας
7. Ο Δεύτερος Θερμοδυναμικός Νόμος. Ανάλυση θερμοδυναμικών κύκλων κινητήριων μηχανών και αντλίας θερμότητας
8. Αλλαγή φάσεων και εισαγωγή στην θερμοδυναμική των μιγμάτων
9. Γενίκευση της έννοιας της εντροπίας, Αναφορές στην στατιστική μηχανική και στην θεωρία της πληροφορίας
10. Ενέργεια και πληροφορία, σχεδιασμός θερμοδυναμικών συστημάτων
11. Από την Στατιστική Μηχανική στην Κοσμολογία, το εύρος ισχύος των νόμων της Θερμοδυναμικής και οι εφαρμογές του μηχανικού σήμερα και αύριο



Ενότητες μαθήματος:

Βασικές έννοιες- Ορισμοί

Πρώτος Νόμος Θερμοδυναμικής

Ιδιότητες καθαρής ουσίας

Ιδανικά αέρια- Διεργασίες- Κλειστό Θερμοδυναμικό σύστημα

Ανοιχτό Θερμοδυναμικό σύστημα- Διεργασίες

Δεύτερος Νόμος Θερμοδυναμικής, Αναστρεψιμότητα

Εντροπία

Θερμοδυναμικοί κύκλοι

3^η Ενότητα μαθήματος: Ιδιότητες καθαρής ουσίας



Ιδιότητες καθαρής ουσίας

- Νερό ως καθαρή ουσία
- Στερεή, υγρή και αέρια φάση
- Ιδιότητες υδρατμών
- Ισορροπία στερεής, υγρής και αέριας φάσης
- Πίνακες θερμοδυναμικών ιδιοτήτων νερού- ατμού

Φάσεις μίας καθαρής ουσίας

Καθαρή ουσία είναι ένα μέρος της ύλης στο οποίο:

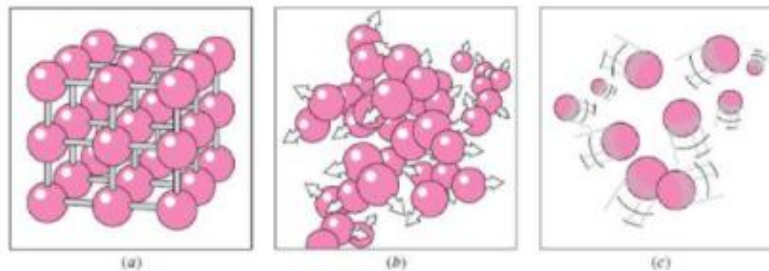
η σύσταση είναι σταθερή σε όλη του την έκταση.

- ✓ Π.χ. το νερό, το οξυγόνο, το άζωτο αλλά και ο αέρας, είναι καθαρές ουσίες.
- ✓ Ένα μίγμα 2 ή περισσότερων **φάσεων** μίας καθαρής ουσίας (π.χ. νερό και ατμός, ή νερό και πάγος, συνεχίζει να είναι καθαρή ουσία.

Φάσεις μίας καθαρής ουσίας

Οι τρεις **φάσεις** μίας καθαρής ουσίας είναι η **υγρή**, η **στερεή** και η **αέρια**

(τα κρυσταλλικά στερεά μπορούν να παρουσιάζουν περισσότερες από μία στερεές φάσεις με διαφορετική κρυσταλλική δομή η κάθε μία, αλλά κάτι τέτοιο δεν θα μας απασχολήσει στο παρόν μάθημα).



Στη **στερεή φάση** (Σχήμα α) τα μόρια της καθαρής ουσίας είναι σταθερά διατεταγμένα στο χώρο, σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους και με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται το πλάτος ταλάντωσης τους γύρω από τις σταθερές τους θέσεις στο χώρο.

Στην **υγρή φάση** (Σχήμα β) τα μόρια της καθαρής ουσίας βρίσκονται επίσης σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους (εφάπτονται το ένα με το άλλο), όμως μπορούν να κινηθούν ελεύθερα (να κυλήσουν) το ένα επάνω στο άλλο και οι μεταξύ τους σχετικές θέσεις μεταβάλλονται. Με την αύξηση της θερμοκρασίας η κίνηση αυτή επιταχύνεται.

Στην **αέρια φάση** (Σχήμα γ) τα μόρια βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις το ένα από το άλλο και κινούνται τυχαία στο χώρο και συγκρούονται μεταξύ τους ή με τις επιφάνειες στερεών ή υγρών που θα συναντήσουν.

Φάσεις μίας καθαρής ουσίας

Κάθε καθαρή ουσία μπορεί να υπάρξει και στις τρεις φάσεις ανάλογα με το συνδυασμό θερμοκρασίας και πίεσης στην οποία βρίσκεται. Έτσι:

- αν η θερμοκρασία είναι αρκετά χαμηλή και η πίεση αρκετά υψηλή, η ουσία θα βρεθεί στη στερεή φάση.
- σε έναν, συγκεκριμένο για την κάθε ουσία, συνδυασμό ενδιάμεσων θερμοκρασιών και πιέσεων η ουσία θα βρίσκεται στην υγρή φάση.
- αν η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή και η πίεση αρκετά χαμηλή, τότε η ουσία θα βρεθεί στην αέρια φάση.

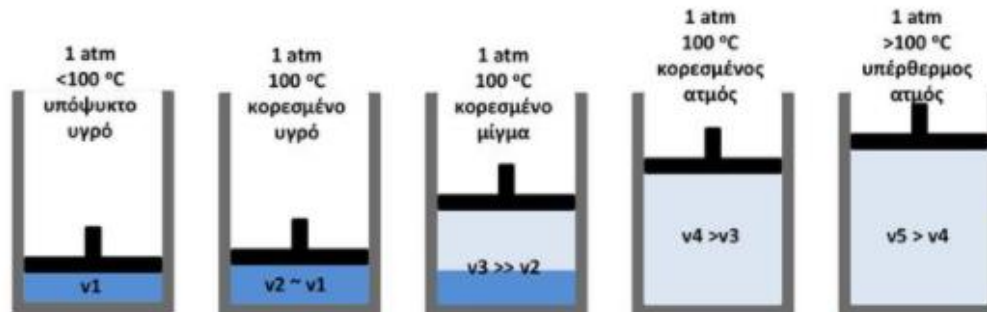
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: νερό και σε σταθερή πίεση 1 atm ($= 101.325 \text{ Nt/m}^2 = 101.325 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar}$):

1. σε θερμοκρασία κάτω από $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, θα είναι στερεό (πάγος)
2. στους $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ το στερεό θα είναι σε ισορροπία με το υγρό και οι δύο φάσεις θα συνυπάρχουν
3. σε θερμοκρασίες $0 - 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, το νερό θα είναι υγρό
4. στους $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, το υγρό θα είναι σε ισορροπία με το αέριο (ατμός) και οι δύο φάσεις θα συνυπάρχουν και ονομάζονται κορεσμένες (**κορεσμένο υγρό**, δηλαδή υγρό έτοιμο να εξατμιστεί και **κορεσμένος ατμός**, δηλαδή ατμός έτοιμος να υγροποιηθεί)
5. πάνω από τους $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ το νερό θα βρίσκεται στην κατάσταση του αερίου (ατμός)

Φάσεις μίας καθαρής ουσίας

Νερό και σε σταθερή πίεση 1 atm ($= 101.325 \text{ Nt/m}^2 = 101.325 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar}$), τότε:

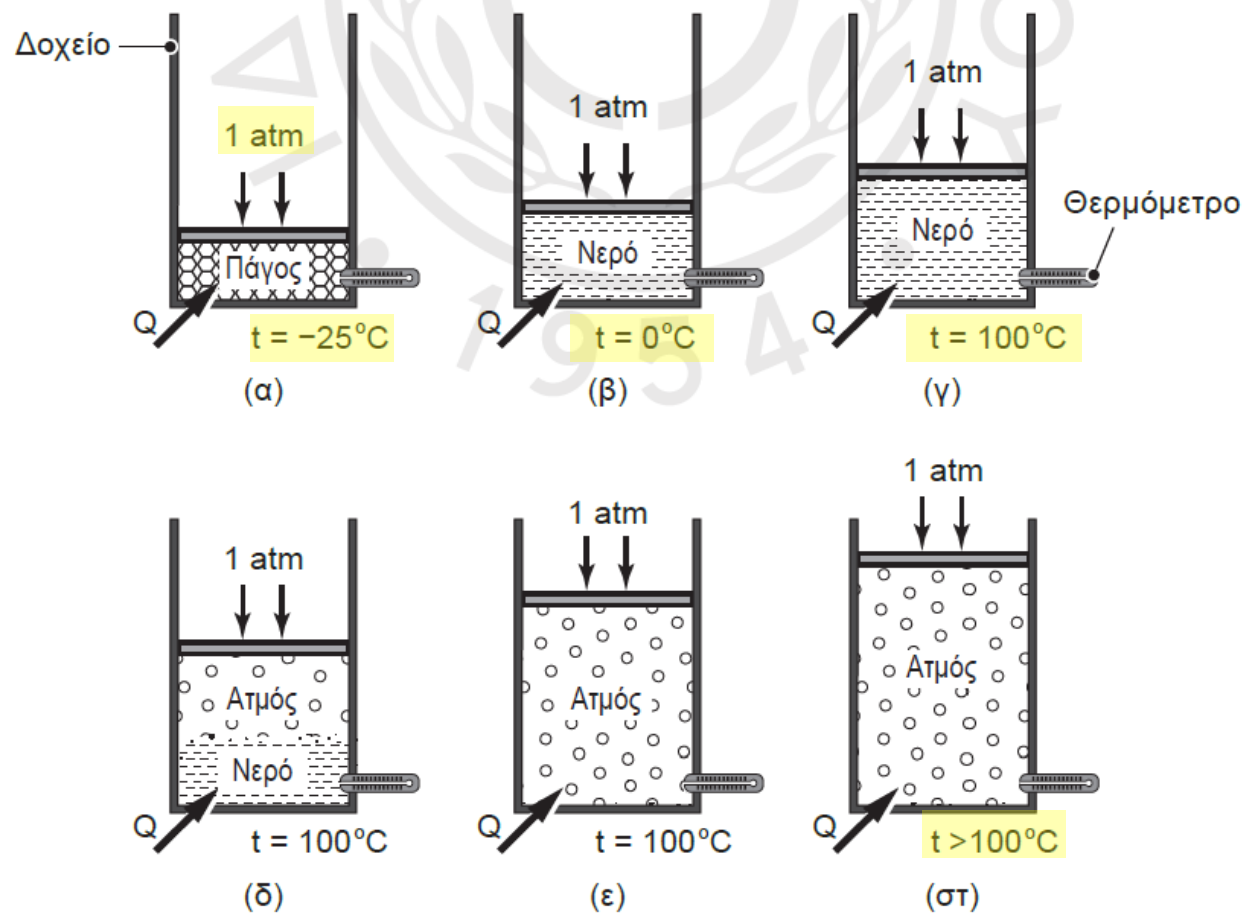
1. σε θερμοκρασίες 0 – 100 °C, το νερό είναι υγρό
2. στους 100 °C, το υγρό θα είναι σε ισορροπία με το αέριο (ατμός) και οι δύο φάσεις συνυπάρχουν
3. πάνω από τους 100 °C το νερό θα βρίσκεται στην κατάσταση του αερίου (ατμός)



Κάτω από
κινούμενο έμβολο
η πίεση είναι
σταθερή

- ✓ Στην περίπτωση 1 (θερμοκρασία: 0 °C έως 99,999.... °C, για πίεση 1 atm) το υγρό θα πρέπει να αυξήσει τη θερμοκρασία του, προκειμένου να γίνει **κορεσμένο υγρό** και στις συνθήκες αυτές το υγρό ονομάζεται **υπόψυκτο** ή **συμπιεσμένο υγρό**.
- ✓ Στην περίπτωση 3 ο ατμός πρέπει να ψυχθεί για να γίνει κορεσμένος και στις συνθήκες αυτές (θερμοκρασία πάνω από 100 °C και πίεση 1 atm) ο ατμός ονομάζεται **υπέρθερμος**.

Στερεή, υγρή και αέρια φάση νερού

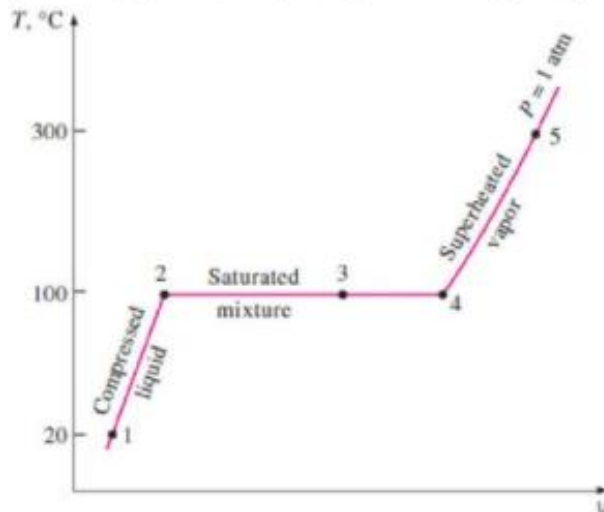


Σχ. 5.1

Μεταβολή των τριών φάσεων του νερού

Φάσεις μίας καθαρής ουσίας

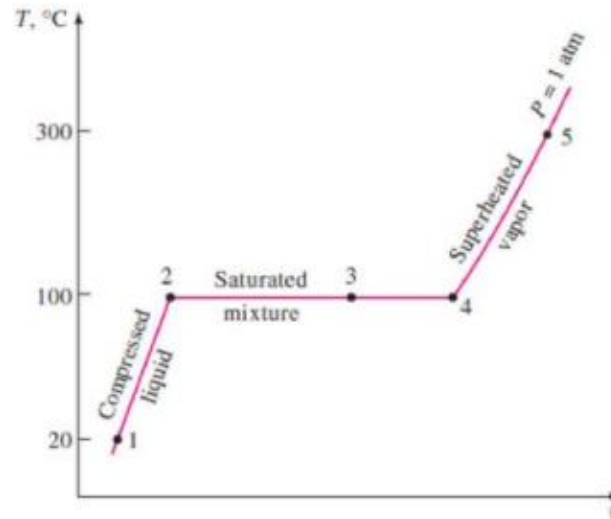
... μεταβολή του ειδικού όγκου* (v) του νερού με τη θερμοκρασία (T) ($P = 1 \text{ atm}$)



- ✓ 20 – 100 °C (**υπόψυκτο υγρό**) – διαστέλλεται ελαφρά με την αύξηση της θερμοκρασίας (η αύξηση της θερμοκρασίας γίνεται με την παροχή θερμότητας στο νερό)
- ✓ στους 100 °C συμβαίνει αλλαγή φάσης και το νερό βρίσκεται στην **κατάσταση του μίγματος κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού** (ή αλλιώς **κορεσμένο μίγμα**)
η προσθήκη θερμότητας πολλαπλασιάζει τον v , χωρίς να αυξηθεί η T
στην κατάσταση 2 το κορεσμένο μίγμα αποτελείται από 100 % κορεσμένο υγρό και
στην κατάσταση 4 το κορεσμένο μίγμα αποτελείται από 100 % κορεσμένο ατμό

* Ο όγκος V (m^3) είναι μία **εκτατική ιδιότητα**, δηλαδή εκτός από τη θερμοκρασία και την πίεση **εξαρτάται και από τη μάζα** της ουσίας (π.χ. στις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, ο όγκος 2 kg μίας ουσίας είναι διπλάσιος από τον όγκο 1 kg). Για τις εκτατικές ιδιότητες (όπως ο όγκος αλλά και η εσωτερική ενέργεια, η ενθαλπία και η εντροπία, που θα δούμε στη συνέχεια), ορίζονται τα αντίστοιχα ειδικά μεγέθη, όπως ο **ειδικός όγκος v** , δηλαδή ο όγκος 1 kg μίας ουσίας (με μονάδες m^3/kg). Τα εκτατικά μέγεθος συνδέεται με το αντίστοιχο ειδικό μέγεθος της μάζας της καθαρής ουσίας. Οπότε για τον όγκο: $V = m \cdot v$ [m^3].

Φάσεις μίας καθαρής ουσίας



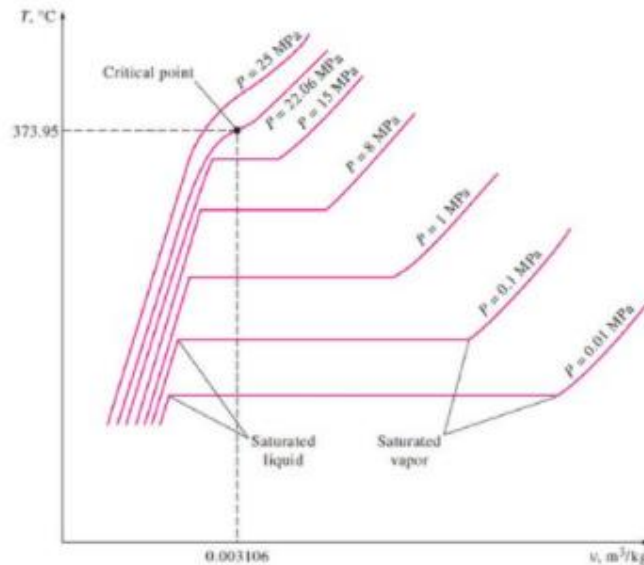
... μεταξύ των καταστάσεων 2 και 4 (κατάσταση 3), το ποσοστό (%) του ατμού στο κορεσμένο μίγμα ονομάζεται **ποιότητα** του κορεσμένου μίγματος, συμβολίζεται με x :

$$x = (v_3 - v_2)/(v_4 - v_2)$$

όπου v_3 , v_2 και v_4 , οι ειδικοί όγκοι του νερού στις αντίστοιχες καταστάσεις (ειδικά v_2 και v_4 , είναι οι ειδικοί όγκοι του κορεσμένου υγρού v_f και του κορεσμένου ατμού v_g στους 100 °C (ή ισοδύναμα σε πίεση 1 atm) και οι τιμές τους είναι πάντα δεδομένες από πίνακες.

Φάσεις μίας καθαρής ουσίας

Διάγραμμα $T - v$ του νερού, σε διάφορες P – η αύξηση της P ελαττώνει τη διαφορά $v_{sv} - v_{sl}$

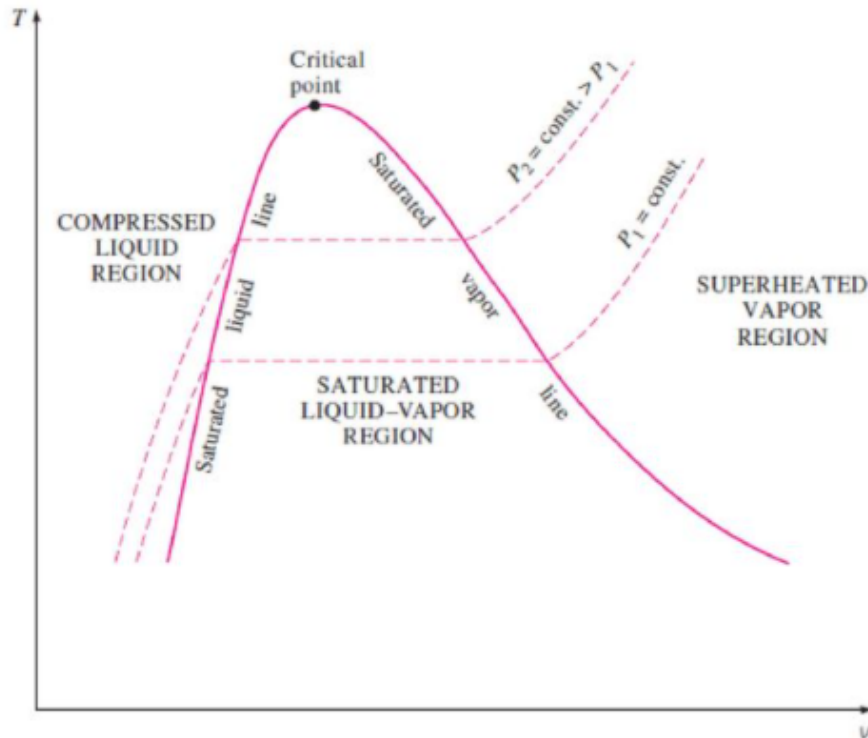


Όταν η πίεση φθάσει τα 22,06 MPa (220,6 bar ή περίπου 220,6 atm), το ευθύγραμμο τμήμα του κορεσμένου μίγματος εκφυλίζεται σε σημείο, το κρίσιμο σημείο (critical point) :

κρίσιμη πίεση	$P_{cr} = 22,06 \text{ MPa}$
κρίσιμο ειδικό όγκο	$v_{cr} = 0,003106 \text{ m}^3/\text{kg}$
κρίσιμη θερμοκρασία	$T_{cr} = 373,95 \text{ }^\circ\text{C}$

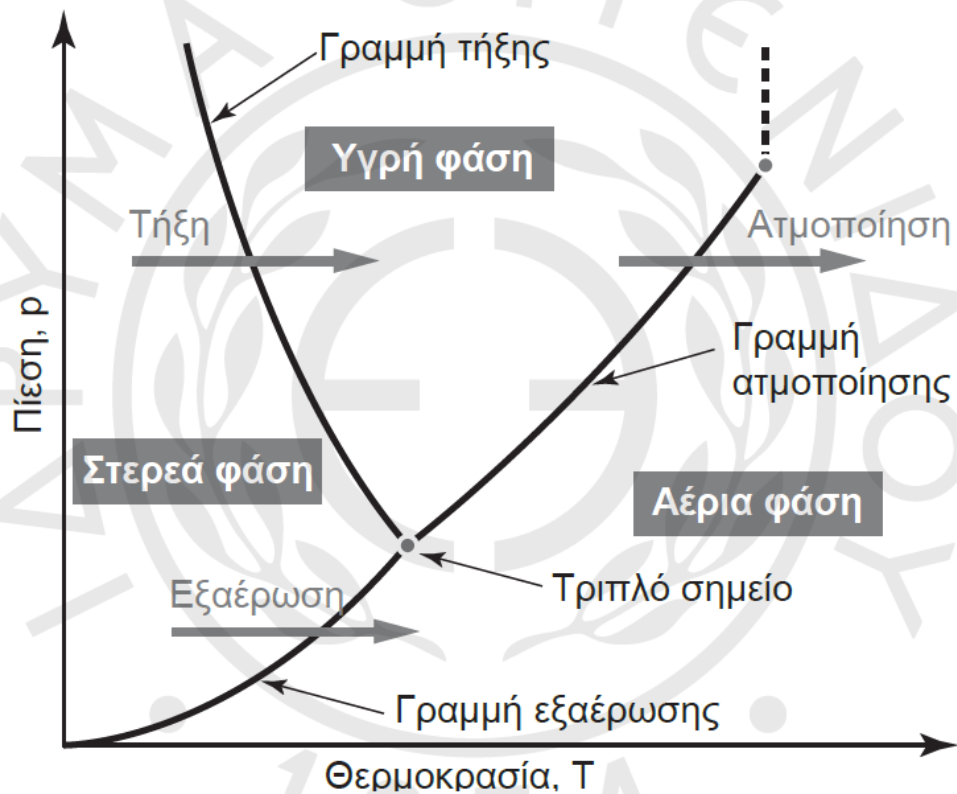
Στο κρίσιμο σημείο και σε θερμοκρασίες ή σε πιέσεις πάνω από τις κρίσιμες τιμές, οι καταστάσεις υγρού και ατμού δεν διαχωρίζονται και η ρευστή αυτή φάση της ουσίας ονομάζεται **υπερκρίσιμο ρευστό**.

Φάσεις μίας καθαρής ουσίας



1. προσθήκη θερμότητας υπό σταθερή πίεση
2. αφαίρεση θερμότητας υπό σταθερή πίεση
3. προσθήκη θερμότητας υπό σταθερό όγκο
4. αντίθετα, η αφαίρεση θερμότητας υπό σταθερό όγκο
5. αύξηση της πίεσης υπό σταθερή θερμοκρασία
6. ελάττωση της πίεσης υπό σταθερή θερμοκρασία

Ισορροπία στερεής, υγρής και αέριας φάσης νερού



Σχ. 5.4

Διάγραμμα $p - T$, όπου φαίνονται
οι τρεις φάσεις του νερού και το τριπλό σημείο

Πίνακες θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του νερού

Πίνακας κορεσμένου νερού (ως προς τη θερμοκρασία)

Saturated water—Temperature table

Temp., T °C	Sat. press., p _{sat} kPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg · K)		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	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

Για δεδομένες θερμοκρασίες δίνει:

- την πίεση κορεσμού (ή αλλιώς την πίεση ισορροπίας υγρού-ατμού)
- τις τιμές του ειδικού όγκου (v_f και v_g σε m³/kg)
- τις τιμές της ειδικής εσωτερικής ενέργειας (u_f και u_g σε kJ/kg)
- τις τιμές της ειδικής ενθαλπίας (h_f και h_g σε kJ/kg) και
- τις τιμές της ειδικής εντροπίας (s_f και s_g σε kJ/kgK)

για το κορεσμένο υγρό (δείκτης f) και για τον κορεσμένο ατμό (δείκτης g)

Δίνει επίσης τις τιμές της ειδικής λανθάνουσας εσωτερικής ενέργειας εξάτμισης (u_{fg} σε kJ/kg), της ειδικής λανθάνουσας ενθαλπίας (h_{fg} σε kJ/kg) και της ειδικής λανθάνουσας εντροπίας (s_{fg} σε kJ/kgK), τις οποίες σε **ΔΕΝ ΘΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕ**

Πίνακες θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του νερού

Πίνακας κορεσμένου νερού (ως προς τη θερμοκρασία)

Saturated water—Temperature table

Temp., T °C	Sat. press., P _{sat} kPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg · K)		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	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	5.626	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

Οι τιμές των παραπάνω μεγεθών σε θερμοκρασίες μεταξύ των θερμοκρασιών του Πίνακα, υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή. Π.χ. η ειδική εσωτερική ενέργεια του κορεσμένου ατμού στους 22 °C είναι:

$$\begin{aligned}
 T, \text{ } ^\circ\text{C} & \quad u_g, \text{ kJ/kg} \\
 20 & \quad 2402,9 \\
 22 & \quad u_g \\
 25 & \quad 2409,8
 \end{aligned}$$

$$(22 - 20)/(25 - 20) = (u_g - 2402,9)/(2409,8 - 2402,9) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow u_g = 2402,9 + (22 - 20)/(2409,8 - 2402,9)/(25 - 20) = \mathbf{2405,66 \text{ kJ/kg}}$$

Αντίστοιχα, η ειδική εσωτερική ενέργεια του κορεσμένου ατμού στους 23 °C είναι:

$$(25-23)/(25 - 20) = (2409,8 - u_g)/(2409,8 - 2402,9) \Leftrightarrow u_g = 2409,8 - (25 - 23)*(2409,8 - 2402,9) / (25 - 20) = \mathbf{2407,04 \text{ kJ/kg}}$$

Δηλαδή, ως βάση για τη γραμμική παρεμβολή λαμβάνεται κάθε φορά η θερμοκρασία που είναι πιο κοντά στη θερμοκρασία για την οποία την ιδιότητα ψάχνουμε.

Πίνακες θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του νερού

Πίνακας κορεσμένου νερού (ως προς την πίεση)

Press., P/kPa	Sat. temp., T _{sat} /°C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg · K)		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
0.6113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.48	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.67	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939

Για δεδομένες πιέσεις δίνει:

- την θερμοκρασία κορεσμού (ή αλλιώς την πίεση ισορροπίας υγρού-ατμού)
- τις τιμές του ειδικού όγκου (v_f και v_g σε m³/kg)
- τις τιμές της ειδικής εσωτερικής ενέργειας (u_f και u_g σε kJ/kg)
- τις τιμές της ειδικής ενθαλπίας (h_f και h_g σε kJ/kg) και
- τις τιμές της ειδικής εντροπίας (s_f και s_g σε kJ/kgK)

για το κορεσμένο υγρό (δείκτης f) και για τον κορεσμένο ατμό (δείκτης g)

Πρόκειται στην ουσία για τον ίδιο με τον προηγούμενο Πίνακα, μόνο που αυτή τη φορά δίνονται οι πιέσεις στην πρώτη στήλη και σε σταθερό βήμα.

Πίνακες θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του νερού

Πίνακες υπέρθερμου ατμού

Superheated water											
T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg
P = 0.01 MPa (45.81°C)*				P = 0.05 MPa (81.33°C)				P = 0.10 MPa (99.63°C)			
50.1	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2453.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5
60	14.859	2443.9	2592.6	8.1749							
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6998	2506.7	2676.3
150	18.612	2587.9	2763.0	8.6882	3.889	2585.6	2760.1	7.9401	1.9264	2562.8	2776.4
200	21.625	2661.3	2879.8	8.9038	4.556	2659.9	2877.7	8.1040	2.172	2618.1	2876.3
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.920	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.204	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3
400	31.953	2969.9	3279.6	9.6077	6.259	2969.5	3279.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2
500	36.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3486.1
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.026	3301.9	3704.4
700	44.911	3479.6	3929.7	10.4026	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6261	9.904	3663.6	4158.5	9.8852	4.952	3663.5	4158.0
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.826	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0390	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3
1100	63.372	4267.5	4891.2	11.2297	12.674	4257.4	4891.1	10.4809	6.337	4257.3	4891.0
1200	67.987	4487.8	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6
1300	72.602	4693.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5

Πρόκειται για ένα σύνολο μικρότερων πινάκων, ο καθένας σε σταθερή πίεση (για κάθε πίεση αναφέρεται και η αντίστοιχη θερμοκρασία κορεσμού). Σε κάθε πίνακα, στην πρώτη γραμμή δίνονται οι ιδιότητες (vg, ug, hg, sg) του κορεσμένου ατμού και στις επόμενες γραμμές οι ίδιες ιδιότητες του υπέρθερμου ατμού σε δεδομένη θερμοκρασία, πάνω από την θερμοκρασία κορεσμού.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι:

- ο υπέρθερμος ατμός, σε συγκεκριμένη πίεση, βρίσκεται πάντα σε υψηλότερη θερμοκρασία από τον κορεσμένο ατμό, στην ίδια πίεση
- ο υπέρθερμος ατμός, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, βρίσκεται πάντα σε χαμηλότερη πίεση από τον κορεσμένο ατμό, στην ίδια θερμοκρασία.

Πίνακες θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του νερού

Πίνακες υπέρθερμου ατμού

Superheated water											
T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/(kg · K)
P = 0,01 MPa (45,81°C)*				P = 0,05 MPa (81,33°C)				P = 0,10 MPa (99,63°C)			
Sat.	14,674	2437,9	2584,7	8,1502	3,240	2453,9	2645,9	7,5829	1,6940	2506,1	2675,5
50	14,860	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
150	19,512	2587,9	2783,0	8,6862	3,689	2585,6	2780,1	7,8401	1,6964	2507,8	2677,4
200	21,825	2661,3	2879,6	8,9038	4,056	2659,9	2877,7	8,1090	2,172	2658,1	2875,9
250	24,130	2736,0	2977,3	9,1002	4,520	2735,0	2976,0	8,3556	2,400	2733,7	2974,3
300	26,445	2812,1	3076,5	9,2813	5,094	2811,3	3075,5	8,5773	2,639	2810,4	3074,3
350	28,762	2889,9	3178,0	9,4477	5,759	2888,5	3178,9	8,7842	3,103	2887,9	3178,2
400	31,082	2969,9	3279,6	9,5977	6,509	2968,5	3279,9	8,9642	3,585	2968,1	3278,1
450	33,405	3052,3	3381,1	9,7378	7,334	3132,0	3486,7	9,1546	4,029	3021,9	3379,4
500	35,729	3136,3	3489,1	9,8678	8,261	3479,4	3629,5	9,3509	4,490	3479,2	3629,2
600	40,205	3302,5	3705,4	10,1608	9,904	3863,6	4158,9	9,6652	4,952	3663,5	4158,9
700	44,911	3479,6	3928,7	10,4029	10,829	3854,9	4390,3	10,0957	5,414	3854,8	4396,1
800	49,526	3663,8	4158,0	10,6091	11,751	4052,9	4640,5	10,2964	5,875	4052,9	4640,5
900	54,141	3855,0	4396,4	10,8090	12,674	4257,4	4891,1	10,4859	6,337	4257,3	4891,0
1000	58,757	4053,0	4640,8	11,0393	13,597	4467,9	5147,7	10,6662	6,799	4467,7	5147,6
1100	63,372	4257,8	4891,2	11,2597	14,521	4683,5	5409,6	10,8383	7,260	4683,5	5409,5
1200	67,987	4467,9	5147,8	11,4691							
1300	72,602	4683,7	5409,7	11,6811							

Για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του υπέρθερμου ατμού σε κάποιες συνθήκες, ενδέχεται να χρειαστεί να γίνουν τρεις γραμμικές παρεμβολές. Π.χ. η ειδική ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού σε πίεση 60 kPa (0,06 MPa) και στους 240 °C, υπολογίζεται ως εξής:

$$0,05 \text{ MPa}, 240 \text{ °C} \quad h_g = 2976,0 - (250 - 240) \cdot (2976,0 - 2877,7) / (250 - 200) = 2956,34 \text{ kJ/kg}$$

$$0,1 \text{ MPa}, 240 \text{ °C} \quad h_g = 2974,3 - (250 - 240) \cdot (2974,3 - 2875,3) / (250 - 200) = 2954,50 \text{ kJ/kg}$$

Και τέλος στα 0,06 MPa και 240 °C

$$h_g = 2956,34 + (0,06 - 0,05) \cdot (2954,50 - 2956,34) / (0,1 - 0,05) = 2955,97 \text{ kJ/kg}$$

Πίνακες θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του νερού

Πίνακες συμπιεσμένου (ή υπόψυκτου) υγρού

Compressed liquid water											
T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg
P = 5 MPa (263.99°C)				P = 10 MPa (311.06°C)				P = 15 MPa (342.24°C)			
Sat	0.0012659	1147.5	1154.2	2.9202	0.0014524	1269.0	1407.6	3.2696	0.0016581	1585.6	1610.5
0	0.0009877	0.04	5.04	0.0001	0.0009952	0.09	10.04	0.0002	0.0009958	0.15	15.05
20	0.0009905	83.65	88.65	0.2958	0.0009972	83.36	93.33	0.2945	0.0009960	83.00	97.99
40	0.0010058	166.95	171.97	0.5705	0.0010034	166.35	176.38	0.5686	0.0010013	165.78	180.78
60	0.0010149	250.23	255.30	0.8285	0.0010127	249.36	259.49	0.8258	0.0010105	248.51	263.67
80	0.0010268	333.72	338.85	1.0720	0.0010246	332.59	342.83	1.0688	0.0010222	331.48	346.81
100	0.0010410	417.52	422.72	1.3030	0.0010386	416.12	426.50	1.2992	0.0010361	414.74	430.28
120	0.0010576	501.80	507.09	1.5233	0.0010549	500.08	510.64	1.5189	0.0010522	498.40	514.19
140	0.0010768	586.70	592.15	1.7343	0.0010737	584.68	595.42	1.7292	0.0010707	582.66	596.72
160	0.0010988	672.62	678.12	1.9375	0.0010953	670.13	681.08	1.9317	0.0010918	667.71	684.09
180	0.0011240	759.63	765.25	2.1341	0.0011199	756.65	767.84	2.1275	0.0011159	753.76	770.50
200	0.0011530	848.1	853.9	2.3255	0.0011480	844.5	856.0	2.3178	0.0011433	841.0	858.2
220	0.0011866	938.4	944.4	2.5128	0.0011805	934.1	945.9	2.5039	0.0011748	929.9	947.5
240	0.0012264	1031.4	1037.5	2.6979	0.0012187	1026.0	1038.1	2.6872	0.0012114	1020.8	1039.0
260	0.0012749	1127.9	1134.3	2.8830	0.0012645	1121.1	1133.7	2.8699	0.0012560	1114.8	1133.4
280					0.0013216	1220.9	1234.1	3.0548	0.0013084	1212.5	1232.1
300					0.0013972	1329.4	1342.3	3.2469	0.0013770	1316.6	1337.3
320									0.0014724	1431.1	1453.2
340									0.0016311	1567.5	1591.9

Πρόκειται για ένα σύνολο μικρότερων πινάκων, ο καθένας σε σταθερή πίεση (για κάθε πίεση αναφέρεται και η αντίστοιχη θερμοκρασία κορεσμού), όπως και οι πίνακες υπέρθερμου ατμού

οι ιδιότητες του συμπιεσμένου υγρού είναι κατά προσέγγιση ίσες με τις ιδιότητες του κορεσμένου υγρού, στην ίδια θερμοκρασία

Ιδιότητες καθαρής ουσίας (17α/24)

Παράδειγμα 1

Να υπολογιστεί η ενθαλπία κεκορεσμένου ατμού μάζας 20 kg σε πίεση 60×10^3 N/m².

Λύση

Από τις εξισώσεις (4.14) και (4.14α) έχουμε ότι:

$$h = u + pu \quad (1)$$

και

$$H = mh = U + pV \quad (2)$$

Το άθροισμα $u + pu$ το ονομάζουμε **ενθαλπία** h της μάζας.

$$h = u + pu \quad \text{σε J/kg} \quad (4.14)$$

Η ενθαλπία είναι μία ιδιότητα της μάζας και δεν έχει καμία φυσική έννοια, παρά μόνο ότι παριστάνει το άθροισμα $u + pu$. Η ενθαλπία όλης της μάζας m , που περνά μέσα από το σύστημα, ισούται με:

$$mh = U + pV \quad (4.14α)$$

Για να υπολογίσουμε την h , θα πρέπει να προσδιορίσουμε το u και το v από τον Πίνακα Γ2, γιατί γνωρίζουμε την πίεση p και όχι τη θερμοκρασία t . Η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η πίεση p .

Η πίεση $p = 60 \times 10^3$ N/m² ή 0,6 bar (1 bar = 10^5 N/m²)

Από τον Πίνακα Γ2, για $p = 0,6$ bar, έχουμε ότι:

Ειδική εσωτερική ενέργεια του ατμού $u_g = 2489,7$ kJ/kg

Ειδικός όγκος του ατμού $v_g = 2,731$ m³/kg

Αντικαθιστούμε τις τιμές στην εξίσωση (1):

$$h_g = 2489,7 + (60 \times 2,731) = 2653,6 \text{ kJ/kg}$$

Από την εξίσωση (2) παίρνουμε την ολική ενθαλπία του ατμού:

$$H = mh \rightarrow H = 20 \times 2653,6 = 53.072 \text{ kJ}$$

Γ' εξαμ. 2021-22

Ιδιότητες καθαρής ουσίας (17β/24)

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ2.

Ίδιότητες κεκορεσμένου νερού καί κεκορεσμένου ατμού. Πίνακας πίεσως.

Απολ. Πίεση bar p	Θερμ. °C t	Είδικός όγκος, m ³ /kg Κεκ.νερό Κεκ.ατμός		Ένθαλπια, kJ/kg Κεκ.νερό Κεκ.ατμός			Έσωτερ. ενέργεια, kJ/kg Κεκ.νερό Κεκ.ατμός		Έντροπία, kJ/kgK Κεκ.νερό Κεκ.ατμός			Απολ. πίεση bar p
		v_f	v_g	h_f	h_{fg}	h_g	u_f	u_g	s_f	s_{fg}	s_g	
0-006 02	0	0-001 000 2	206-298 7	-0-0	2501-6	2501-6	-0-0	2375-6	-0-0	9-1578	9-1578	0-006 02
0-006 11	0-01	0-001 000 2	206-162 9	+0-0	2501-6	2501-6	0	2375-6	0	9-1575	9-1575	0-006 11
0-010	6-98	0-001 001	129-210 7	29-3	2485-0	2514-4	29-3	2385-2	0-1060	8-8706	8-9767	0-010
0-020	17-51	0-001 001 2	67-011 6	73-5	2460-2	2533-6	73-5	2399-6	0-2606	8-4640	8-7246	0-020
0-030	24-10	0-001 002 7	45-670 0	101-0	2444-6	2545-6	101-0	2408-6	0-3543	8-2242	8-5785	0-030
0-040	28-98	0-001 004 0	34-803 3	121-4	2433-1	2554-5	121-4	2415-3	0-4225	8-0530	8-4755	0-040
0-050	32-90	0-001 005 2	28-194 5	137-8	2423-8	2561-6	137-8	2420-6	0-4763	7-9197	8-3960	0-050
0-060	36-18	0-001 006 4	23-740 6	151-5	2416 0	2567-5	151-5	2425-1	0-5209	7-8103	8-3312	0-060
0-070	39-03	0-001 007 4	20-530 4	163-4	2409-2	2572-6	163-4	2428-9	0-5591	7-7176	8-2767	0-070
0-080	41-54	0-001 008 4	18-103 8	173-9	2403-2	2577-1	173-9	2432-3	0-5926	7-6370	8-2295	0-080
0-090	43-79	0-001 009 4	16-203 4	183-3	2397-9	2581-1	183-3	2435 3	0-6224	7-5657	8-1881	0-090
0-10	45-83	0-001 010 2	14-673 7	191-8	2392-9	2584-8	191-8	2438-1	0-6493	7-5018	8-1511	0-10
0-15	54-00	0-001 014 0	10-022 1	226-0	2373-2	2599-2	226-0	2448-9	0-7549	7-2544	8-0093	0-15
0-20	60-09	0-001 017 2	7-649 2	251-5	2358-4	2609-9	251 5	2456-9	0-8321	7-0773	7-9094	0-20
0-25	64-99	0-001 019 9	6-204 0	272 0	2346-4	2618-3	272-0	2463-2	0-8933	6-9390	7-8323	0-25
0-30	69-13	0-001 022 3	5-229 0	289-3	2336-1	2625-4	289-6	2468-2	0-9441	6-8254	7-7695	0-30
0-35	72-71	0-001 024 5	4-525 5	304-3	2327-2	2631-5	304-3	2473-1	0-9878	6-7288	7-7166	0-35
0-40	75-89	0-001 026 5	3-993 2	317-7	2319-2	2636-9	317-7	2477-2	1-0261	6-6448	7-6709	0-40
0-45	78-74	0-001 028 4	3-576 1	329-6	2312-0	2641-7	329-6	2480-8	1-0603	6-5703	7-6306	0-45
0-50	81-35	0-001 030 1	3-240 1	340-6	2305-4	2646-0	340-5	2484-0	1-0912	6-5035	7-5947	0-50
0-60	85-95	0-001 033 3	2-731 7	359-9	2293-6	2653-6	359-8	2489-7	1-1455	6-3872	7-5327	0-60
0-70	89-96	0-001 036 1	2-364 7	376-8	2283-3	2660-1	376-3	2494-6	1-1921	6-2883	7-4804	0-70
0-80	93-51	0-001 038 7	2-086 9	391-7	2274-0	2665-8	391-6	2498-8	1-2330	6-2022	7-4352	0-80
0-90	96-71	0-001 041 2	1-869 1	405-2	2265-6	2670-9	405-1	2502-7	1-2696	6-1258	7-3954	0-90
1-00	99-63	0-001 043 4	1-693 7	417-5	2257-9	2675-4	417-4	2506-0	1-3027	6-0571	7-3598	1-00
1-013 25	100-00	0-001 043 7	1-673 0	419-1	2256-9	2676-0	419-0	2506-5	1-3069	6-0485	7-3554	1-013 25
1-20	104-81	0-001 047 6	1-428 1	439-4	2244-1	2683-4	439-3	2512-0	1-3609	5-9375	7-2984	1-20
1-40	109-32	0-001 051 3	1-236 3	458-4	2231-9	2690-3	458-3	2517-2	1-4109	5-8356	7-2465	1-40
1-60	113-32	0-001 054 7	1-091 1	475-4	2220-9	2696-2	475-2	2521-6	1-4550	5-7467	7-2017	1-60
1-80	116-93	0-001 057 9	0-977 18	490-7	2210-8	2701-5	490-5	2525-6	1-4944	5-6677	7-1622	1-80

Παράδειγμα 2

Ένας μικρός βοηθητικός λέβητας παράγει κεκορεσμένο ατμό πίεσης 1,28 bar. Ποια είναι η ενθαλπία του ατμού;

Λύση

Επειδή ο Πίνακας Γ2 δεν περιλαμβάνει την πίεση $p = 1,28 \text{ bar}$, θα κάνουμε γραμμική παρεμβολή, όπως δίνεται από τη Μαθηματική Ανάλυση, μεταξύ των πιέσεων $p = 1,20 \text{ bar}$ και $p = 1,40 \text{ bar}$, που δίνονται στους πίνακες. Έτσι για:

$$p = 1,20 \text{ bar} \quad \text{έχουμε} \quad h_g = 2683,4 \text{ kJ/kg}$$

$$p = 1,40 \text{ bar} \quad \text{έχουμε} \quad h_g = 2690,3 \text{ kJ/kg}$$

οπότε με τη γραμμική παρεμβολή έχουμε ότι:

$$\text{σε } p = 1,28 \text{ bar} \quad h_g = \frac{1,28 - 1,20}{1,40 - 1,20} \times (2690,3 - 2683,4) + 2683,4 = 2686,2 \text{ kJ/kg}$$

Ιδιότητες καθαρής ουσίας (18β/24)

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ2.

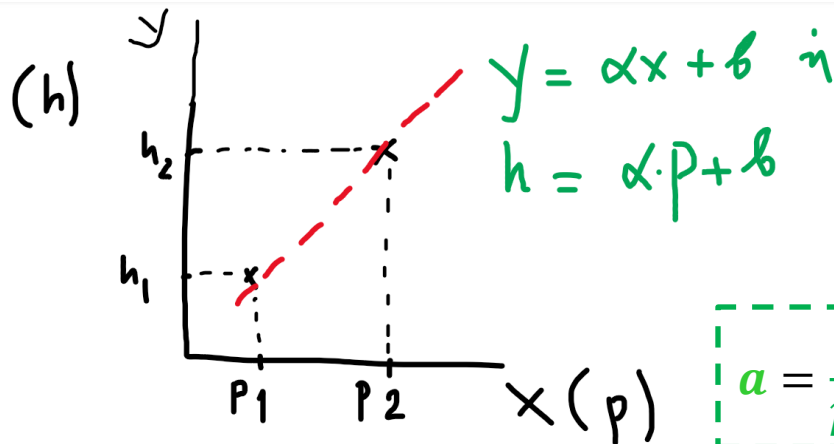
Ιδιότητες κεκορεσμένου νερού και κεκορεσμένου ατμού. Πίνακας πίεσης.

Απολ. Πίεση bar p	Θερμ. °C t	Ειδικός όγκος, m ³ /kg Κεκ.νερό Κεκ.ατμός		Ένθαλπια, kJ/kg Κεκ.νερό Κεκ.ατμός			Έσωτερ. ενέργεια, kJ/kg Κεκ.νερό Κεκ.ατμός		Έντροπία, kJ/kgK Κεκ.νερό Κεκ.ατμός			Απολ. πίεση bar p
		v _f	v _g	h _f	h _{fg}	h _g	u _f	u _g	s _f	s _{fg}	s _g	
0.006 02	0	0.001 000 2	206.298 7	−0.0	2501.6	2501.6	−0.0	2375.6	−0.0	9.1578	9.1578	0.006 02
0.006 11	0.01	0.001 000 2	206.162 9	+0.0	2501.6	2501.6	0	2375.6	0	9.1575	9.1575	0.006 11
0.010	6.98	0.001 001	129.210 7	29.3	2485.0	2514.4	29.3	2385.2	0.1060	8.8706	8.9767	0.010
0.020	17.51	0.001 001 2	67.011 6	73.5	2460.2	2533.6	73.5	2399.6	0.2606	8.4640	8.7246	0.020
0.030	24.10	0.001 002 7	45.670 0	101.0	2444.6	2545.6	101.0	2408.6	0.3543	8.2242	8.5785	0.030
0.040	28.98	0.001 004 0	34.803 3	121.4	2433.1	2554.5	121.4	2415.3	0.4225	8.0530	8.4755	0.040
0.050	32.90	0.001 005 2	28.194 5	137.8	2423.8	2561.6	137.8	2420.6	0.4763	7.9197	8.3960	0.050
0.060	36.18	0.001 006 4	23.740 6	151.5	2416.0	2567.5	151.5	2425.1	0.5209	7.8103	8.3312	0.060
0.070	39.03	0.001 007 4	20.530 4	163.4	2409.2	2572.6	163.4	2428.9	0.5591	7.7176	8.2767	0.070
0.080	41.54	0.001 008 4	18.103 8	173.9	2403.2	2577.1	173.9	2432.3	0.5926	7.6370	8.2295	0.080
0.090	43.79	0.001 009 4	16.203 4	183.3	2397.9	2581.1	183.3	2435.3	0.6224	7.5657	8.1881	0.090
0.10	45.83	0.001 010 2	14.673 7	191.8	2392.9	2584.8	191.8	2438.1	0.6493	7.5018	8.1511	0.10
0.15	54.00	0.001 014 0	10.022 1	226.0	2373.2	2599.2	226.0	2448.9	0.7549	7.2544	8.0093	0.15
0.20	60.09	0.001 017 2	7.649 2	251.5	2358.4	2609.9	251.5	2456.9	0.8321	7.0773	7.9094	0.20
0.25	64.99	0.001 019 9	6.204 0	272.0	2346.4	2618.3	272.0	2463.2	0.8933	6.9390	7.8323	0.25
0.30	69.13	0.001 022 3	5.229 0	289.3	2336.1	2625.4	289.3	2468.2	0.9441	6.8254	7.7695	0.30
0.35	72.71	0.001 024 5	4.525 5	304.3	2327.2	2631.5	304.3	2473.1	0.9878	6.7288	7.7166	0.35
0.40	75.89	0.001 026 5	3.993 2	317.7	2319.2	2636.9	317.7	2477.2	1.0261	6.6448	7.6709	0.40
0.45	78.74	0.001 028 4	3.576 1	329.6	2312.0	2641.7	329.6	2480.8	1.0603	6.5703	7.6306	0.45
0.50	81.35	0.001 030 1	3.240 1	340.6	2305.4	2646.0	340.5	2484.0	1.0912	6.5035	7.5947	0.50
0.60	85.95	0.001 033 3	2.731 7	359.9	2293.6	2653.6	359.8	2489.7	1.1455	6.3872	7.5327	0.60
0.70	89.96	0.001 036 1	2.364 7	376.8	2283.3	2660.1	376.3	2494.6	1.1921	6.2883	7.4804	0.70
0.80	93.51	0.001 038 7	2.086 9	391.7	2274.0	2665.8	391.6	2498.8	1.2330	6.2022	7.4352	0.80
0.90	96.71	0.001 041 2	1.869 1	405.2	2265.6	2670.9	405.1	2502.7	1.2696	6.1258	7.3954	0.90
1.00	99.63	0.001 043 4	1.693 7	417.5	2257.9	2675.4	417.4	2506.0	1.3027	6.0571	7.3598	1.00
1.013 25	100.00	0.001 043 7	1.673 0	419.1	2256.9	2676.0	419.0	2506.5	1.3069	6.0485	7.3554	1.013 25
1.20	104.81	0.001 047 6	1.428 1	439.4	2244.1	2683.4	439.3	2512.0	1.3609	5.9375	7.2984	1.20
1.40	109.32	0.001 051 3	1.236 3	458.4	2231.9	2690.3	458.3	2517.2	1.4109	5.8356	7.2465	1.40
1.60	113.32	0.001 054 7	1.091 1	475.4	2220.9	2696.2	475.2	2521.6	1.4550	5.7467	7.2017	1.60
1.80	116.93	0.001 057 9	0.977 18	490.7	2210.8	2701.5	490.5	2525.6	1.4944	5.6677	7.1622	1.80

Γραμμική παρεμβολή..

$p_1 = 1,20 \text{ bar}$ έχουμε $h_{g,1} = 683,4 \text{ kJ/kg}$
 $p_2 = 1,40 \text{ bar}$ έχουμε $h_{g,2} = 690,3 \text{ kJ/kg}$

$p_3 = 1,28 \text{ bar}$ $h_3 ?$



$$\left. \begin{aligned} h_1 &= a \cdot p_1 + \beta \\ h_2 &= a \cdot p_2 + \beta \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} \beta &= h_1 - a \cdot p_1 \\ h_2 &= a \cdot p_2 + (h_1 - a \cdot p_1) \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$h_2 = h_1 + a \cdot (p_2 - p_1) \rightarrow$$

$$\& \quad \beta = h_1 - \frac{h_2 - h_1}{p_2 - p_1} \cdot p_1 = \boxed{\frac{p_2 h_1 - p_1 h_2}{p_2 - p_1}}$$

ΑΡΑ ΓΕΝΙΚΑ

$$h = a \cdot p + \beta \rightarrow \boxed{h = \frac{h_2 - h_1}{p_2 - p_1} \cdot p + \frac{p_2 h_1 - p_1 h_2}{p_2 - p_1}}$$

Για $p_3 = 1.28 \text{ bar} \rightarrow h_3 = 2686.2 \text{ kJ/kg}$

Κορεσμένο υγρό και κορεσμένος ατμός

Οι πίνακες αυτοί περιλαμβάνουν τον ειδικό όγκο v , την ειδική ενθαλπία h , καθώς και την ειδική εσωτερική ενέργεια u , για διάφορες θερμοκρασίες και πιέσεις. Οι δείκτες των συμβόλων των ιδιοτήτων δείχνουν ότι η ιδιότητα του εργαζόμενου μέσου αναφέρεται:

- f : στην κατάσταση του κεκορεσμένου υγρού
- g : στην κατάσταση του κεκορεσμένου ατμού
- fg : στη διαφορά μεταξύ κεκορεσμένου υγρού και κεκορεσμένου ατμού.

Υγρός ατμός

όταν το νερό βρίσκεται στη **μεταβατική φάση** μεταξύ του κεκορεσμένου υγρού και κεκορεσμένου ατμού, όταν δηλαδή έχουμε **υγρό ατμό**. Για να τις βρούμε, χρησιμοποιούμε μία καινούργια ποσότητα, η οποία ονομάζεται **βαθμός ξηρότητας ή ποιότητα ατμού**.

Ο βαθμός ξηρότητας είναι ο λόγος της μάζας του ατμού προς το σύνολο της μάζας του συστήματος που αποτελείται τόσο από μάζα ατμού όσο και από μάζα νερού. Τη μάζα αυτή του συστήματος τη συναντάμε στην περιοχή που περικλείεται από τις καμπύλες του κεκορεσμένου ατμού και κεκορεσμένου νερού στο διάγραμμα T - u του σχήματος 5.3. Σημειώνουμε ότι ο ορισμός του βαθμού ξηρότητας προϋποθέτει ότι το μείγμα ατμού και νερού είναι **ομογενές και σε ισορροπία**. Έτσι, ο βαθμός ξηρότητας ορίζεται ως:

$$x = \frac{\text{μάζα ατμού}}{\text{μάζα ατμού} + \text{μάζα νερού}} = \frac{m_g}{m_g + m_f} \quad (5.1)$$

Υγρός ατμός

μάζα ατμού m_g και μάζα νερού m_f ,
δηλαδή συνολική μάζα $m_k = m_g + m_f$. Η ενθαλπία στο σημείο κ είναι ίση με το άθροισμα της ενθαλπίας του ατμού h_g και της ενθαλπίας του νερού h_f , που αντιστοιχούν στο σημείο αυτό. Το ίδιο ισχύει και για την ενέργεια, οπότε:

$$h_k m_k = h_g m_g + h_f m_f \quad (5.1\alpha)$$

όπου τα h_g και h_f δίνονται από τους πίνακες ατμού.

Επίσης η διαφορά των ενθαλπιών των σημείων δ και ε του σχήματος 5.4α είναι:

$$h_{fg} = h_g - h_f \quad (5.1\beta)$$

Από την εξίσωση (5.1α), μετά από ορισμένες πράξεις, έχουμε ότι η ενθαλπία στο σημείο κ και γενικά σε κάθε σημείο στην περιοχή του υγρού ατμού είναι:

$$h = h_f + x h_{fg} \quad (5.2)$$

$$\text{ή } h = h_g - (1 - x) h_{fg} \quad (5.2\alpha)$$

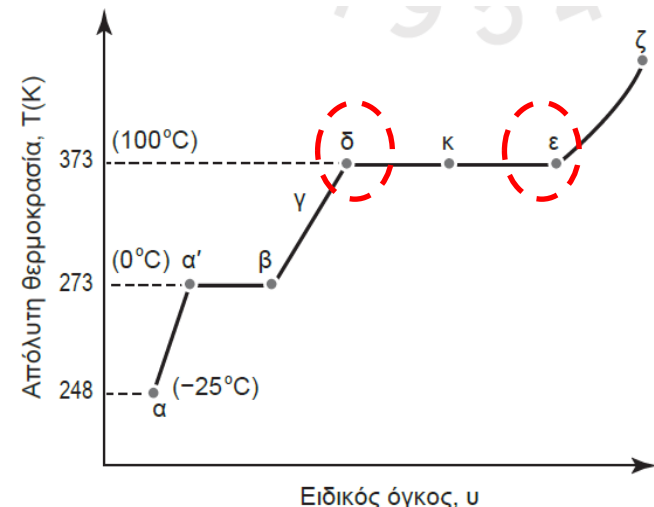
Οι εξισώσεις (5.2) και (5.2α) εφαρμόζονται και για τον ειδικό όγκο u και για την ειδική εσωτερική ενέργεια u του υγρού ατμού. Ισχύουν δηλαδή ανάλογα οι σχέσεις:

$$u = u_f + x u_{fg} \quad \text{ή } u = u_g - (1 - x) u_{fg} \quad (5.3)$$

όπου $u_{fg} = u_g - u_f$

$$u = u_f + x u_{fg} \quad \text{ή } u = u_g - (1 - x) u_{fg} \quad (5.4)$$

όπου $u_{fg} = u_g - u_f$



Σχ. 5.2
Θέρμανση νερού υπό
σταθερή πίεση 1 at

Παράδειγμα 3

Να υπολογιστεί η ενθαλπία, ο ειδικός όγκος και η ειδική εσωτερική ενέργεια ατμού πίεσης $p = 7 \text{ bar}$ και βαθμού ξηρότητας 50%.

Λύση

Η ενθαλπία μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (5.2):

$$h = h_f + xh_{fg} \quad (1)$$

Από τον Πίνακα Γ2 έχουμε ότι για $p = 7 \text{ bar}$

$$h_f = 697,1 \text{ kJ/kg} \quad \text{και} \quad h_{fg} = 2064,9 \text{ kJ/kg}$$

οπότε από την εξίσωση (1): $h = 697,1 + (0,5 \times 2064,9) = 1729,6 \text{ kJ/kg}$

$$u_{fg} = u_g - u_f \quad (2)$$

αλλά, από τον Πίνακα Γ2 για την ίδια πίεση παίρνουμε ότι:

$$u_g = 0,27268 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \text{και} \quad u_f = 0,00111 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2) έχουμε:

$$u_{fg} = 0,27268 - 0,00111 = 0,27157 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Ιδιότητες καθαρής ουσίας (21β/24)

Για τον ειδικό όγκο έχουμε όμοια ότι, εξίσωση (5.3):

$$u = u_f + x u_{fg} \quad (3)$$

$$\text{οπότε } u = 0,00111 + (0,5 \times 0,27157) = 0,13690 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Με τον ίδιο τρόπο, εξίσωση (5.4), υπολογίζουμε την εσωτερική ενέργεια του ατμού, γιατί:

$$u = u_f + x u_{fg} \quad (4)$$

αλλά από τον Πίνακα Γ2 έχουμε ότι:

$$u_{fg} = u_g - u_f = 2571,1 - 696,3 = 1874,8 \text{ kJ/kg},$$

οπότε από την εξίσωση (4),

$$u = 696,3 + (0,5 \times 1874,8) = 1633,7 \text{ kJ/kg}$$

ή

$$h = u + p v$$



$$u = h - p v$$



$$u = 1729,6 - \left(\frac{7 \times 10^5}{1000} \times 0,13690 \right) = 1633,8 \text{ kJ/kg}$$

$$h = 1729,6 \text{ kJ/kg} \quad \text{και} \quad u = 0,13690 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Ιδιότητες καθαρής ουσίας (21γ/24)

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ2.

Ιδιότητες κεκορεσμένου νερού καί κεκορεσμένου ατμού. Πίνακας πίεσεως.

Απολ. Πίεση bar p	Θερμ. °C t	Είδικός όγκος, m ³ /kg		Ένθαλπία, kJ/kg			Έσωτερ. ενέργεια, kJ/kg		Έντροπία, kJ/kgK		
		Κεκ.νερό v _f	Κεκ.άτμός v _g	Κεκ.νερό h _f	Κεκ.άτμός h _{fg}	Κεκ.άτμός h _g	Κεκ.νερό u _f	Κεκ.άτμός u _g	Κεκ.νερό s _f	Κεκ.άτμός s _{fg}	Κεκ.άτμός s _g
5·00	151·85	0·001 092 8	0·374 66	640·1	2107·4	2747·5	639·6	2560·2	1·8604	4·9588	6·8192
6·00	158·84	0·001 100 9	0·315 46	670·4	2085·0	2755·5	669·7	2566·2	1·9308	4·8267	6·7575
7·00	164·96	0·001 108 2	0·272 68	697·1	2064·9	2762·0	696·3	2571·1	1·9918	4·7134	6·7052
8·00	170·41	0·001 115 0	0·240 26	720·9	2046·5	2767·5	720·0	2575·3	2·0457	4·6139	6·6596
9·00	175·36	0·001 121 3	0·214 82	742·6	2029·5	2772·1	741·6	2578·8	2·0941	4·5251	6·6192

Παράδειγμα 1

Ένας λέβητας που διαθέτει υπερθερμαντήρα παράγει ατμό πίεσης $1,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$

με βαθμό υπερθέρμανσης 76.7°C Να βρεθεί η ενθαλπία, ο ειδικός όγκος και η εσωτερική ενέργεια του ατμού.

Λύση

Όταν λέμε «βαθμό υπερθέρμανσης: 76.7°C η θερμοκρασία του ατμού είναι κατά 76.7°C πάνω από τη θερμοκρασία του κεκορεσμένου ατμού στην αντίστοιχη πίεση.

Από τον Πίνακα Γ3 βλέπουμε ότι για $p = 15 \text{ bar}$ η θερμοκρασία του κεκορεσμένου ατμού ($x = 100\%$) είναι $t_g = 198,3^\circ\text{C}$. Συνεπώς η θερμοκρασία t του παραγόμενου υπέρθερμου ατμού είναι:

$$t = 198,3 + 76,7 = 275^\circ\text{C}$$

Η θερμοκρασία όμως αυτή δεν περιέχεται στον Πίνακα Γ3, άρα θα πρέπει να πραγματοποιηθεί παρεμβολή, ως εξής:

σε $p = 15 \text{ bar}$, $t = 250^\circ\text{C}$ έχουμε $h = 2923,5 \text{ kJ/kg}$

σε $p = 15 \text{ bar}$, $t = 300^\circ\text{C}$ έχουμε $h = 3038,9 \text{ kJ/kg}$

Γραμμική παρεμβολή..

Συνεπώς σε $p = 15 \text{ bar}$ και $t = 275^\circ\text{C}$, θα έχουμε:

$$h = 2923,5 + \frac{275 - 250}{300 - 250} \times (3038,9 - 2923,5) = 2981,2 \text{ kJ/kg}$$

Παράδειγμα 1

Ένας λέβητας που διαθέτει υπερθερμαντήρα παράγει ατμό πίεσης $1,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$

με βαθμό υπερθέρμανσης $76,7^\circ\text{C}$ Να βρεθεί η ενθαλπία, ο ειδικός όγκος και η εσωτερική ενέργεια του ατμού.

Όμοια, για τον ειδικό όγκο:

σε $p = 15 \text{ bar}$, $t = 250^\circ\text{C}$ έχουμε $u = 0,15199 \text{ m}^3/\text{kg}$

σε $p = 15 \text{ bar}$, $t = 300^\circ\text{C}$ έχουμε $u = 0,16970 \text{ m}^3/\text{kg}$

και για $p = 15 \text{ bar}$ και $t = 275^\circ\text{C}$ έχουμε ότι: Γραμμική παρεμβολή..

$$u = 0,15199 + \frac{275 - 250}{300 - 250} \times (0,16970 - 0,15199) = 0,16085 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Η ειδική εσωτερική ενέργεια υπολογίζεται ως:

$$u = h - pu = 2981,2 - \left(\frac{1,5 \times 10^6}{1000} \times 0,16085 \right) = 2739,9 \text{ kJ/kg}$$

Ιδιότητες καθαρής ουσίας (22γ/24)

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ3.

Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού

[Ειδικός όγκος, v , m^3/kg - Ένθαλπία, h , kJ/kg - Έντροπία, s , kJ/kgK]

Απόλ. πίεση bar (Θερμοκρασία κορεσμού, °C)	Θερμοκρασία, °C											
	50	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800
<i>v</i>	—	—	—	0·132 38	0·151 99	0·169 70	0·186 53	0·202 92	0·235 03	0·266 66	0·298 03	0·329 21
15·00 (198·3) <i>h</i>	—	—	—	2794·7	2923·5	3038·9	3148·7	3256·6	3472·8	3693·3	3919·6	4151·7
<i>s</i>	—	—	—	6·4508	6·7059	6·9267	7·1044	7·2709	7·5703	7·8385	8·0838	8·3108

Εσωτερική ενέργεια, U

Η **εσωτερική ενέργεια U [kJ]** μίας **καθαρής ουσίας** είναι η συνολική ενέργεια που περιέχεται σε μία ποσότητα μάζας της ουσίας και αφορά την ενέργεια χημικών δεσμών των μορίων της καθαρής ουσίας, την κινητική ενέργεια μεταφοράς, την ενέργεια δόνησης των ατόμων μέσα στο μόριο, την ενέργεια περιστροφής των μορίων, την ενέργεια κίνησης και περιστροφής (spin) των ηλεκτρονίων, ακόμη και η ενέργεια που συγκρατεί τα σωματίδια του πυρήνα των ατόμων.

η σύσταση εξ ορισμού δεν μεταβάλλεται και ούτε (τα μόρια της δεν συμμετέχουν σε χημικές αντιδράσεις, πολύ περισσότερο τα άτομα που αποτελούν τα μόρια της δεν μεταστοιχειώνονται (δεν συμβαίνουν πυρηνικές αντιδράσεις, τα σχετικά ποσά εσωτερικής ενέργειας δεν μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία και την πίεση, δηλαδή με την κατάσταση της ουσίας.

Οι τιμές εσωτερικής ενέργειας των Πινάκων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων (όπως και οι τιμές ενθαλπίας και εντροπίας) είναι σχετικές τιμές μεταξύ της κατάστασης που αναφέρει ο Πίνακας και της κατάστασης αναφοράς. Η κατάσταση αναφοράς για τις τιμές των Πινάκων αυτών είναι η κατάσταση του κορεσμένου νερού σε θερμοκρασία $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$, όπου η εσωτερική ενέργεια και η εντροπία παίρνουν την τιμή μηδέν.

Η **εσωτερική ενέργεια είναι μία εκτατική ιδιότητα** (δηλαδή λαμβάνει τιμές ανάλογες της μάζας της ουσίας που βρίσκεται σε μία κατάσταση), οπότε και για την εσωτερική ενέργεια ορίζεται η **ειδική εσωτερική ενέργεια u (kJ/kg)** η οποία αναφέρεται στην εσωτερική ενέργεια που περιέχεται σε μάζα 1 kg της καθαρής ουσίας στην ίδια κατάσταση (σε αναλογία με τον όγκο V [m^3] και τον ειδικό όγκο v [m^3/kg]).

Έργο, W & Ενθαλπία, H

Όταν μία ουσία αυξάνει τον όγκο της (διαστέλλεται) κατά V [m^3], υπό πίεση P [kPa] τότε παράγει έργο:

$$W_b = P \cdot V$$

$$[m^3 \cdot kPa = m^3 \cdot kNt/m^2 = kNt \cdot m = kJ]$$

η σε όρους ειδικών μεγεθών:

$$w_b = P \cdot v$$

$$[m^3/kg \cdot kPa = m^3 \cdot kNt/kg \cdot m^2 = kNt \cdot m/kg = kJ/kg]$$

Αντίστοιχα όταν συστέλλεται, καταναλώνει (απορροφά) έργο W_b . Παράδειγμα, ένα έμβολο σε ένα κύλινδρο, που περιέχει μία ουσία. Όταν η ουσία διαστέλλεται, το έμβολο κινείται προς τα έξω και μας δίνει έργο. Το έργο αυτό που έχει να κάνει με τη μεταβολή του όγκου μίας ουσίας ονομάζεται **έργο ογκομεταβολής W_b [kJ]** και όταν έχει να κάνει με τη μεταβολή του όγκου 1 kg της ουσίας ονομάζεται **ειδικό έργο ογκομεταβολής w_b [kJ/kg]**.

Όταν ένα ποσό ενέργειας E_1 μεταφέρεται προς μία ουσία (η ενέργεια μεταφέρεται είτε με τη μορφή θερμότητας, είτε με τη μορφή έργου) και η ουσία μεταβαίνει (εξαιτίας αυτής της μεταφοράς) από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2, τότε:

αν ο όγκος της ουσίας δεν μεταβάλλεται (π.χ. αν η ουσία βρίσκεται μέσα σε ένα άκαμπτο στεγανό δοχείο), τότε όλη η ενέργεια μεταφράζεται σε αύξηση της εσωτερικής ενέργειας U της ουσίας ($E_1 = \Delta U$)

αν όμως ο όγκος της ουσίας μεταβάλλεται (π.χ. όταν αυτή βρίσκεται σε έναν στεγανό κύλινδρο με κινούμενο έμβολο), τότε για να μεταβεί η ουσία από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2, και να μεταβληθεί η εσωτερικής της ενέργεια κατά ΔU , τότε το ποσό της ενέργειας που πρέπει να μεταφερθεί προς της ουσία θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το E_1 κατά το έργο ογκομεταβολής $P \cdot \Delta V$. Έστω E_2 αυτό το ποσό της ενέργειας για το οποίο ισχύει $E_2 = E_1 + P \Delta V = \Delta U + P \Delta V$. Με τον τρόπο αυτό ορίζεται το θερμοδυναμικό μέγεθος της ενθαλπίας ΔH [kJ], ως $\Delta H = \Delta U + P \Delta V$ και αν 1 είναι η κατάσταση αναφοράς:

$$H = U + PV$$

$$[kJ]$$

η οποία ως άθροισμα δύο εκτατικών μεγεθών είναι επίσης εκτατικό μέγεθος, οπότε ορίζεται και η **ειδική ενθαλπία h [kJ/kg]**. Δηλαδή, η ενθαλπία είναι η εσωτερική ενέργεια μίας ουσίας σε μία κατάσταση συν το έργο ογκομεταβολής που αντάλλαξε η ουσία με το περιβάλλον της κατά τη μετάβαση της ουσίας από την κατάσταση αναφοράς στην κατάσταση αυτή, όταν η μετάβαση αυτή συνοδεύεται από μεταβολή του όγκου της ουσίας.