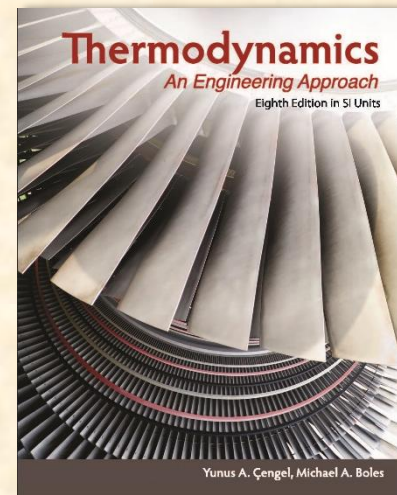


Θερμοδυναμική για Μηχανικούς  
8<sup>η</sup> έκδοση  
Yunus A. Çengel, Michael A. Boles  
Εκδόσεις Τζιόλα, 2015



## Κεφάλαιο 3

# Ιδιότητες Καθαρών Ουσιών

Επιμέλεια διαφάνειας  
**Mehmet Kanoglu**

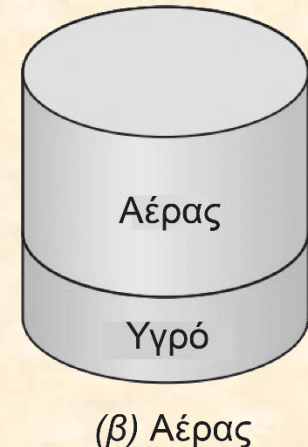
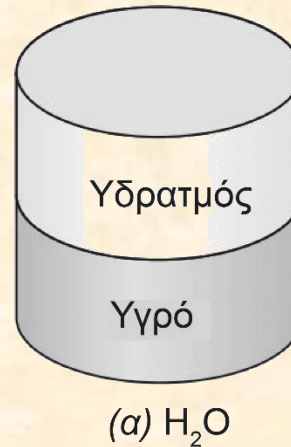
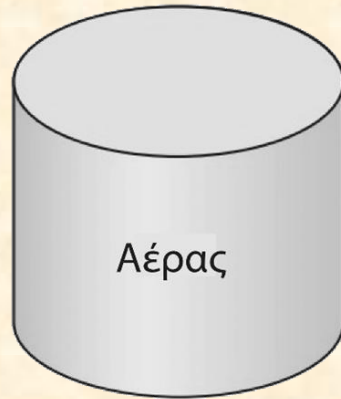
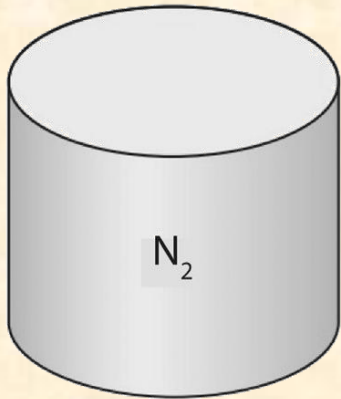
Επιμέλεια ελληνικής έκδοσης  
**Δημήτρης Τερτίπης**

# Στόχοι

- Εισαγωγή της έννοιας της καθαρής ουσίας.
- Συζήτηση της φυσικής που διέπει τις διεργασίες αλλαγής φάσης.
- Παρουσίαση των διαγραμμάτων ιδιοτήτων  $P$ - $v$ ,  $T$ - $v$ , and  $P$ - $T$  και των επιφανειών  $P$ - $v$ - $T$  των καθαρών ουσιών.
- Επίδειξη της μεθόδου προσδιορισμού των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των καθαρών ουσιών από πίνακες δεδομένων.
- Περιγραφή της υποθετικής ουσίας «ιδανικό αέριο» και της καταστατικής της εξίσωσης.
- Εφαρμογή της καταστατικής εξίσωσης των ιδανικών αερίων για τη λύση συνήθων προβλημάτων.
- Εισαγωγή του παράγοντα συμπιεστότητας, που επεξηγεί την απόκλιση της συμπεριφοράς των πραγματικών αερίων από εκείνη των ιδανικών.
- Παρουσίαση κάποιων γνωστών καταστατικών εξισώσεων.

# Καθαρή ουσία

- **Καθαρή ουσία:** είναι μια ουσία που έχει εξ' ολοκλήρου σταθερή χημική σύσταση.
- Ο αέρας είναι μείγμα διαφόρων αερίων, αλλά θεωρείται ότι είναι καθαρή ουσία.

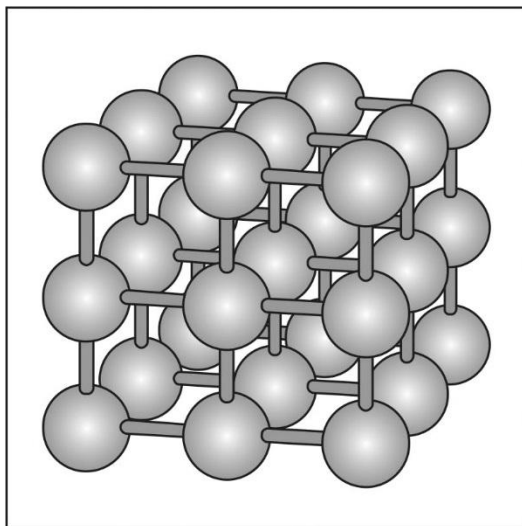
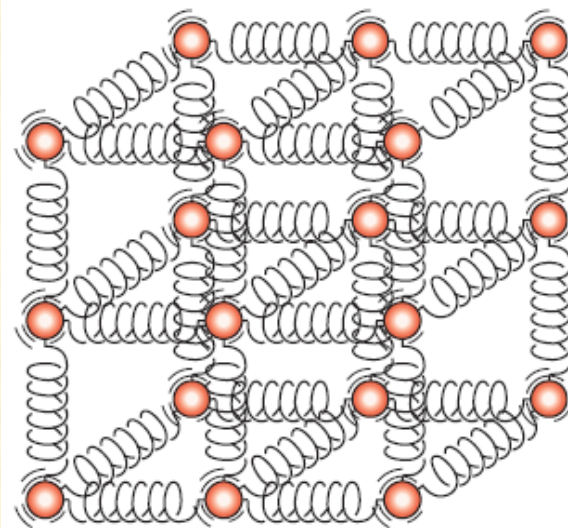


Το άζωτο κι ο αέρας σε αέρια μορφή είναι καθαρές ουσίες.

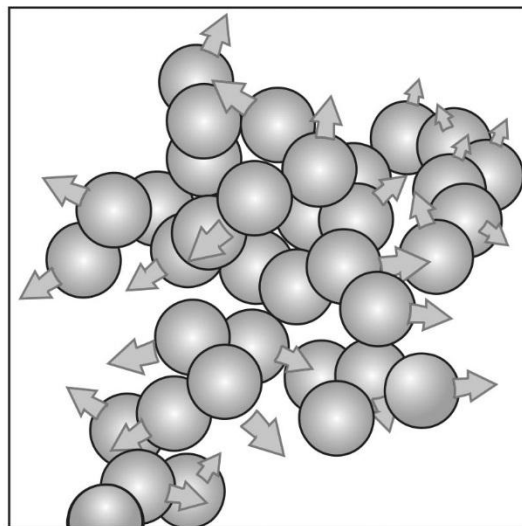
Ένα μείγμα νερού & υδατμών είναι μια καθαρή ουσία, αλλά ένα μείγμα υγρού και αέριου αέρα δεν είναι.

# Φάσεις των καθαρών ουσιών

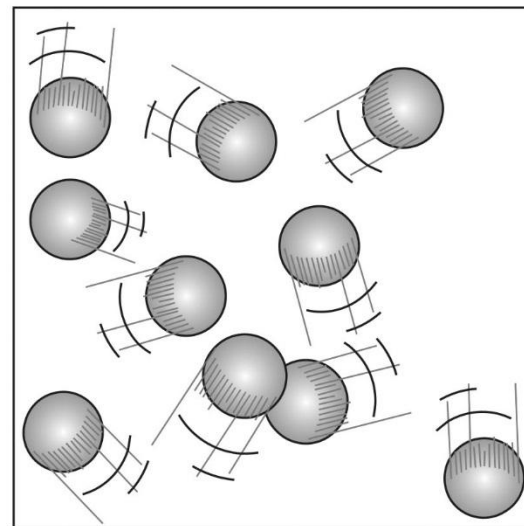
Στη στερεά φάση, τα μόρια διατηρούνται στις θέσεις του μέσω ισχυρών ενδομοριακών ελαστικών δυνάμεων.



(α)



(β)

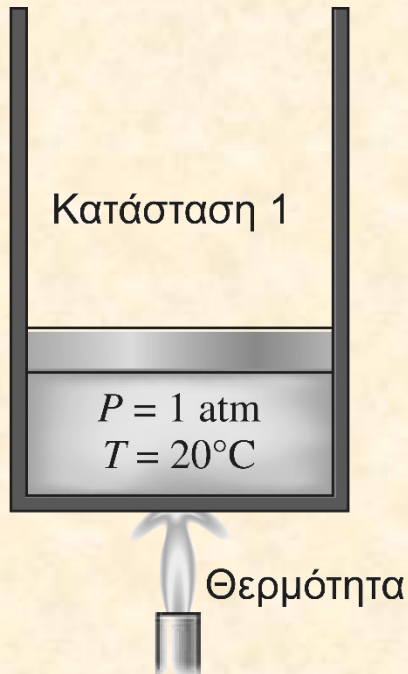


(γ)

Διάταξη των μορίων στη στερεά φάση (α), στην υγρή φάση (β) και στην αέρια φάση (γ).

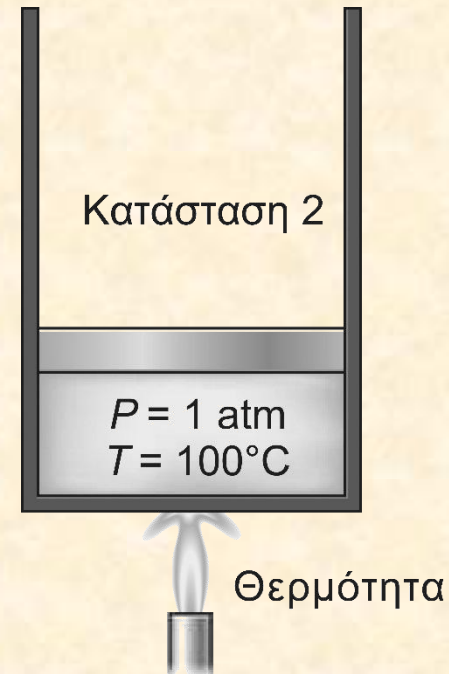
# Διεργασίες αλλαγής φάσης των καθαρών ουσιών

**Υπόψυκτο υγρό (1):** είναι μια κατάσταση, κατά την οποία δεν επίκειται η ατμοποίηση



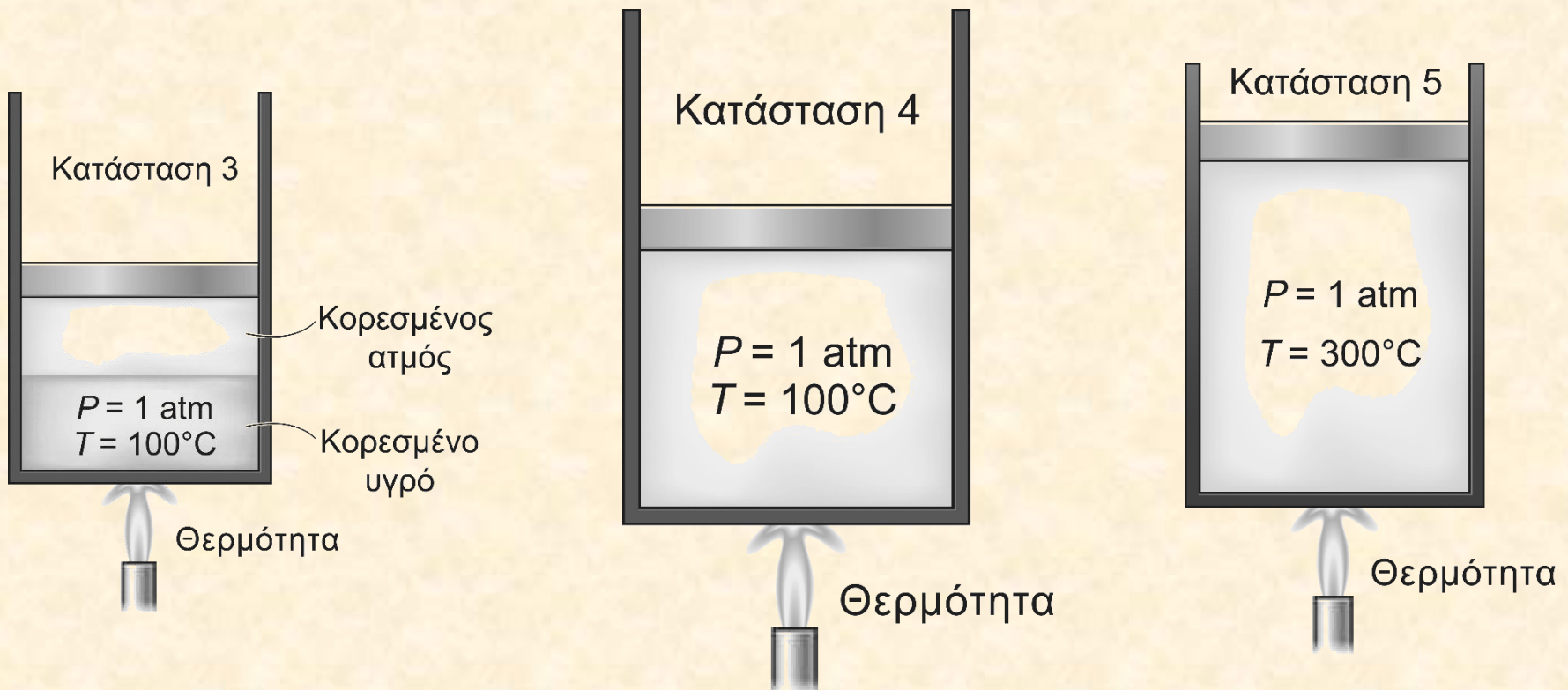
Υπό πίεση 1atm και θερμοκρασία 20°C, το νερό είναι υπόψυκτο υγρό

**Κορεσμένο υγρό (2):** είναι μια κατάσταση, κατά την οποία επίκειται η ατμοποίηση

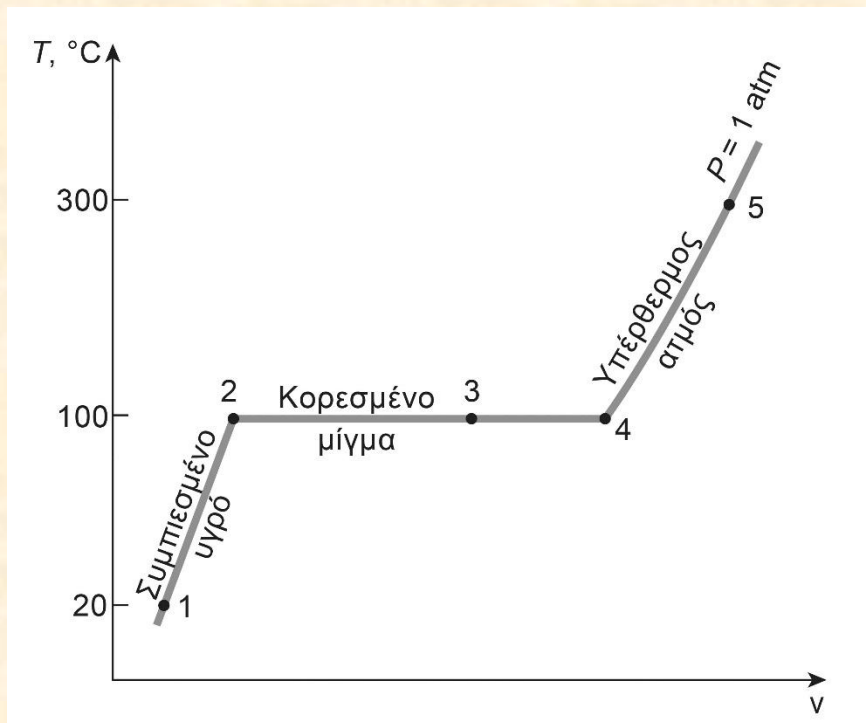


Υπό πίεση 1atm και θερμοκρασία 100°C, το νερό είναι κορεσμένο υγρό

- **Διφασικό μείγμα (3)**: είναι μια κατάσταση, κατά την οποία η υγρή κι η αέρια φάση συνυπάρχουν σε ισορροπία.
- **Κορεσμένος ατμός (4)**: είναι μια κατάσταση, κατά την οποία *επίκειται η συμπύκνωση*.
- **Υπέρθερμος ατμός (5)**: είναι μια κατάσταση, κατά την οποία *δεν επίκειται η συμπύκνωση*.(δηλαδή, δεν είναι κορεσμένος ατμός)



Αν η όλη διαδικασία μεταξύ των καταστάσεων 1 ως 5 αντιστραφεί, ψύχοντας το νερό υπό σταθερή πίεση, τότε το νερό θα επιστρέψει στην κατάσταση 1, ακολουθώντας την ίδια διαδρομή. Καθώς θα κινείται κατά μήκος της αντίστροφης διεργασίας, η ποσότητα θερμότητας που θα απελευθερώνεται θα είναι ακριβώς ίση με τη θερμότητα που προστέθηκε κατά τη διεργασία της θέρμανσης.



Απεικόνιση της ισόθλιπτης θέρμανσης του νερού σε διάγραμμα  $T-v$ .

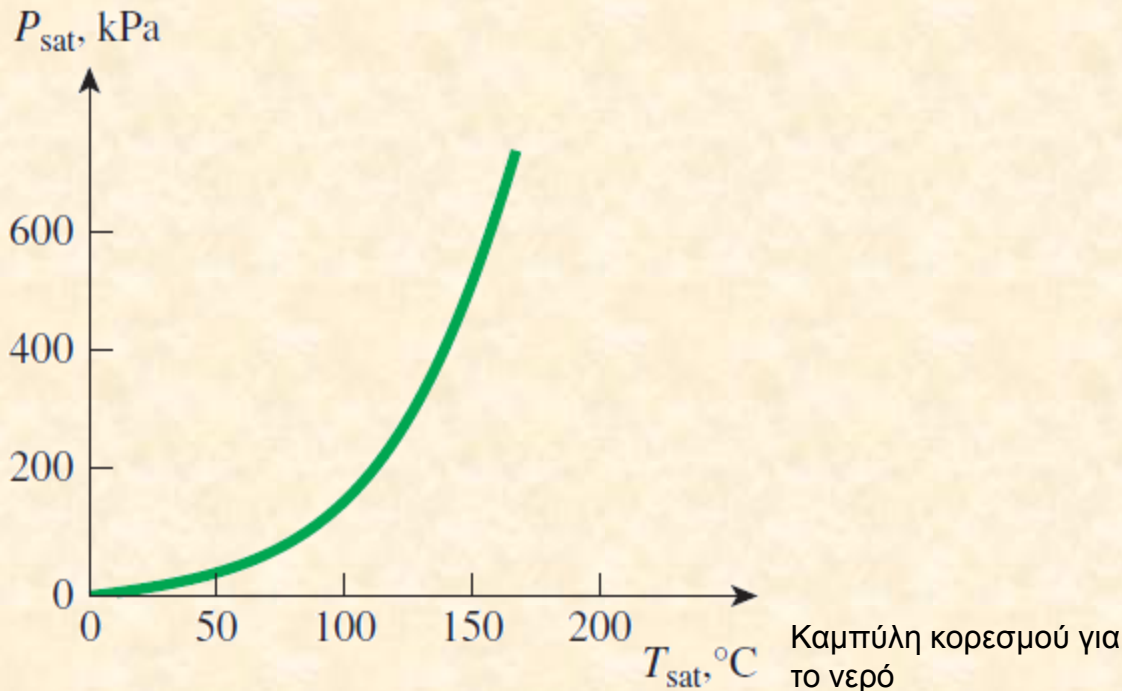
# Θερμοκρασία Κορεσμού & Πίεση Κορεσμού

Η θερμοκρασία βρασμού του νερού εξαρτάται από την πίεση. Έτσι, για δεδομένη πίεση, είναι δεδομένη κι η θερμοκρασία βρασμού

*Το νερό βράζει υπό θερμοκρασία 100°C και πίεση 1 atm .*

**Θερμοκρασία Κορεσμού  $T_{sat}$ :** είναι η θερμοκρασία αλλαγής φάσης μιας καθαρής ουσίας υπό δεδομένη πίεση.

**Saturation pressure  $P_{sat}$ :** είναι η πίεση αλλαγής φάσης μιας καθαρής ουσίας υπό δεδομένη θερμοκρασία.



**Πίνακας 3-1:**

Πίεση κορεσμού (βρασμού) του νερού για διάφορες θερμοκρασίες.

| $T, ^\circ C$ | $P_{sat}, kPa$ |
|---------------|----------------|
| -10           | 0,26           |
| -5            | 0,40           |
| 0             | 0,61           |
| 5             | 0,87           |
| 10            | 1,23           |
| 15            | 1,71           |
| 20            | 2,34           |
| 25            | 3,17           |
| 30            | 4,25           |
| 40            | 7,39           |
| 50            | 12,35          |
| 100           | 101,4          |
| 150           | 476,2          |
| 200           | 1555,0         |
| 250           | 3976,0         |
| 300           | 8588,0         |



- **Λανθάνουσα θερμότητα:** είναι η ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται ή αποδίδεται κατά την αλλαγή φάσης.
- **Λανθάνουσα θερμότητα τήξης:** είναι η ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται κατά την τήξη και ισοδυναμεί με την ποσότητα της ενέργειας που αποδίδεται κατά την πήξη.
- **Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης:** είναι η ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται κατά την ατμοποίηση και ισοδυναμεί με την ποσότητα της ενέργειας που αποδίδεται κατά τη συμπύκνωση.
- Η αριθμητική τιμή των λανθανουσών θερμοτήτων εξαρτάται από τη θερμοκρασία ή την πίεση υπό την οποία πραγματοποιείται η αλλαγή φάσης.
- Υπό πίεση 1atm, η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του νερού είναι 333.7kJ/kg κι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης είναι 2256.5kJ/kg.
- Η ατμοσφαιρική πίεση, άρα κι η θερμοκρασία βρασμού του νερού, μειώνεται με το υψόμετρο.

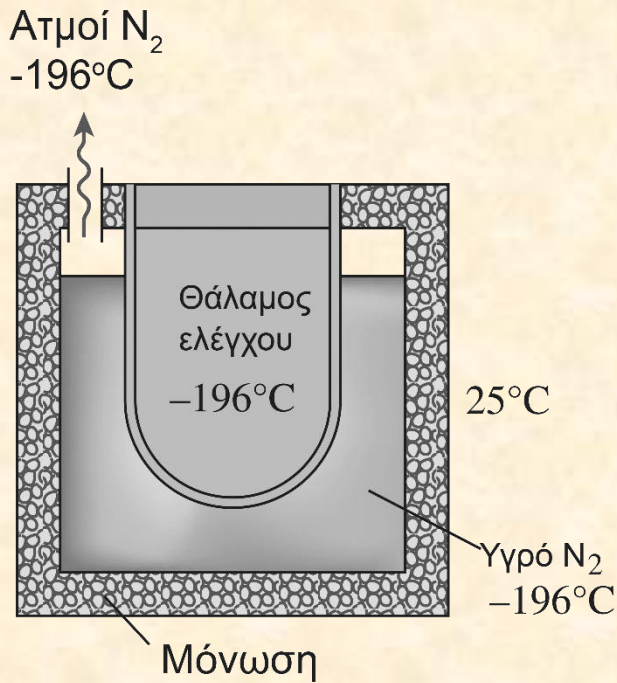
**Πίνακας 3-2:**

Μεταβολή της κανονικής ατμοσφαιρικής πίεσης και της θερμοκρασίας βρασμού (κορεσμού) του νερού με το υψόμετρο.

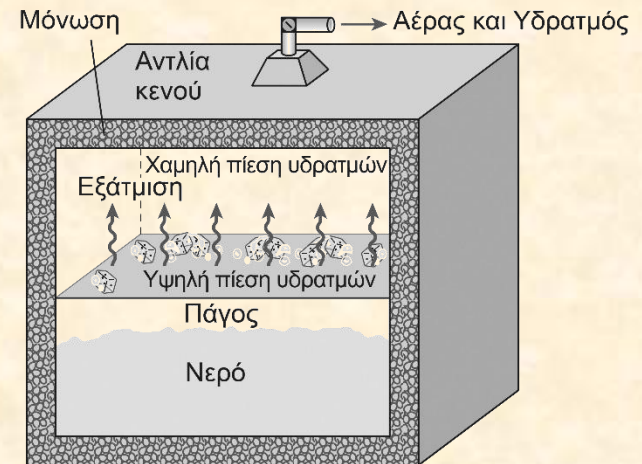
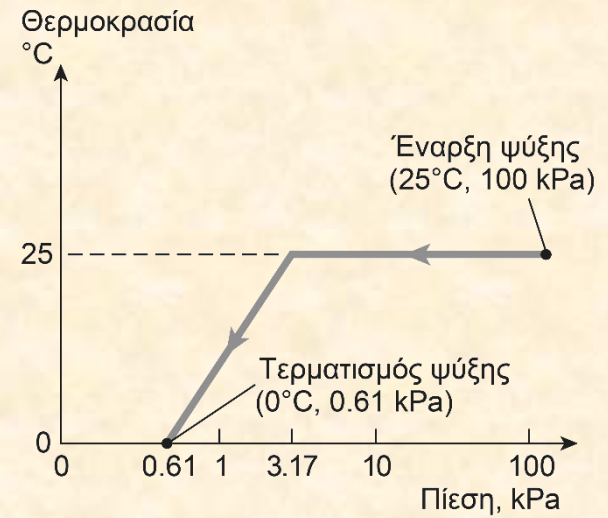
| Υψόμετρο<br><i>m</i> | Ατμοσφαιρική<br>Πίεση <i>kPa</i> | Θερμοκρασία<br>Βρασμού $^{\circ}\text{C}$ |
|----------------------|----------------------------------|---|
| 0                    | 101,33                           | 100,0                                     |
| 1.000                | 89,55                            | 96,5                                      |
| 2.000                | 79,50                            | 93,3                                      |
| 5.000                | 54,05                            | 83,3                                      |
| 10.000               | 26,50                            | 66,3                                      |
| 20.000               | 5,53                             | 34,7                                      |

# Συνέπειες της εξάρτησης των $T_{sat}$ και $P_{sat}$

Μεταβολή της θερμοκρασίας των φρούτων και των λαχανικών ως προς την πίεση, κατά τη διάρκεια ψύξης κενού από τους 25°C ως τους 0°C.



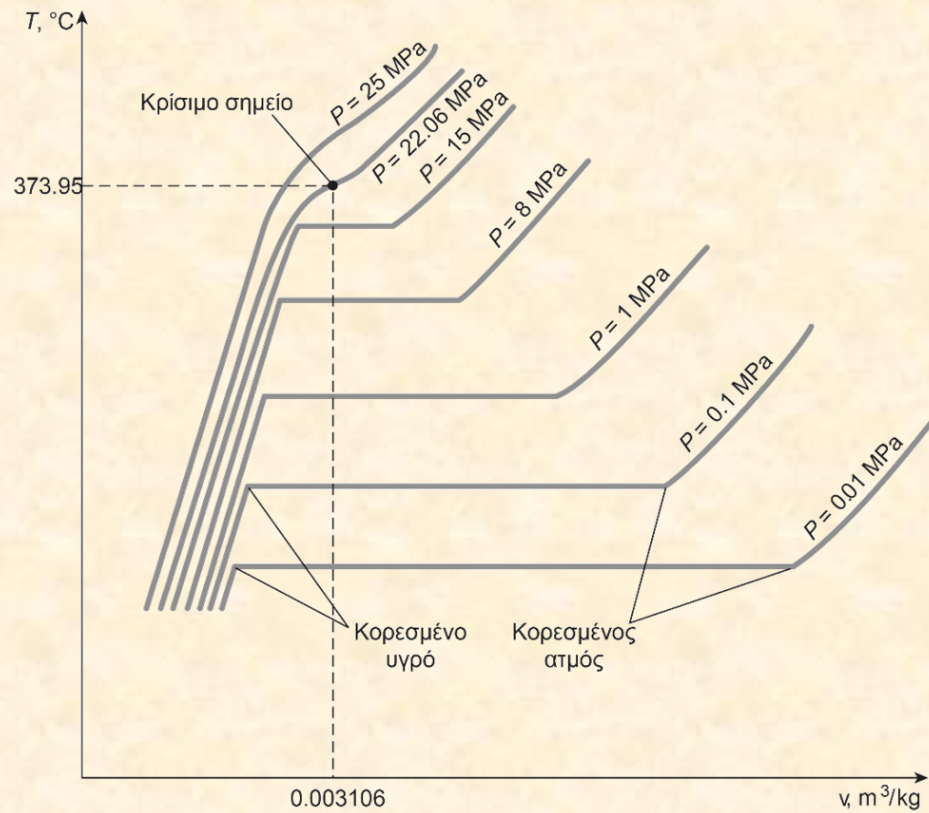
Η θερμοκρασία του υγρού αζώτου, όταν είναι εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα, παραμένει σταθερή στους -196°C, επομένως κι ο θάλαμος ελέγχου παραμένει υπό θερμοκρασία -196°C.



Παραγωγή πάγου (1775)

# Διαγράμματα ιδιοτήτων για διεργασίες αλλαγής φάσης

Οι μεταβολές των ιδιοτήτων κατά τη διάρκεια μεταβολών αλλαγής φάσης είναι ευκολότερα κατανοητές με χρήση διαγραμμάτων, όπως τα  $T-v$ ,  $P-v$  και  $P-T$  για καθαρές ουσίες.

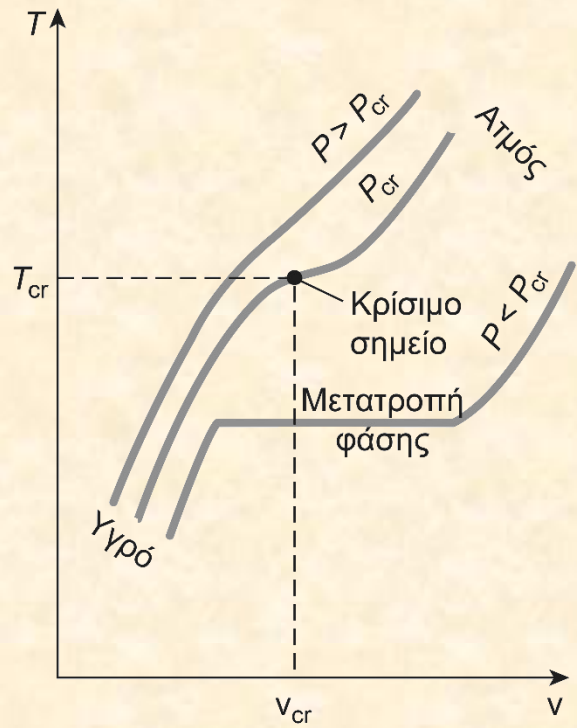


Διάγραμμα  $T-v$  για το νερό

- καμπύλη κορεσμένου υγρού
- καμπύλη κορεσμένου ατμού
- περιοχή υπόψυκτου (συμπιεσμένου) υγρού
- Περιοχή υπέρθερμου ατμού
- Περιοχή κορεσμένου υγρού - ατμού



(α) Διάγραμμα T-v μιας καθαρής ουσίας



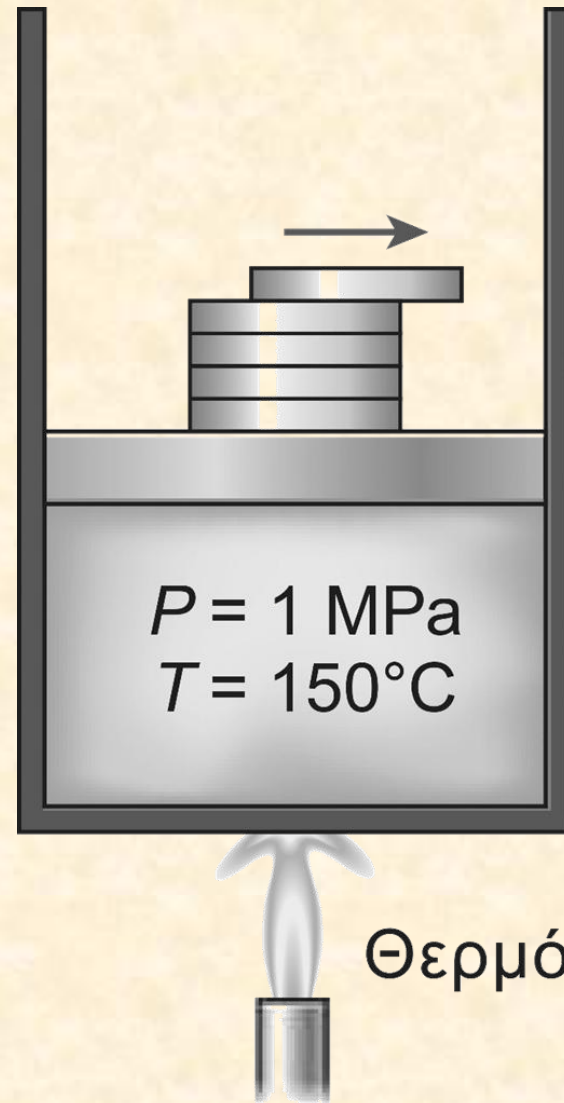
Διάγραμμα T-v για το νερό

Σε υπερκρίσιμες πιέσεις ( $P > P_{cr}$ ), δεν υπάρχει κάποια ευκρινής διεργασία αλλαγής φάσης.

**Κρίσιμο σημείο:** εκεί ταυτίζονται οι καταστάσεις κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού



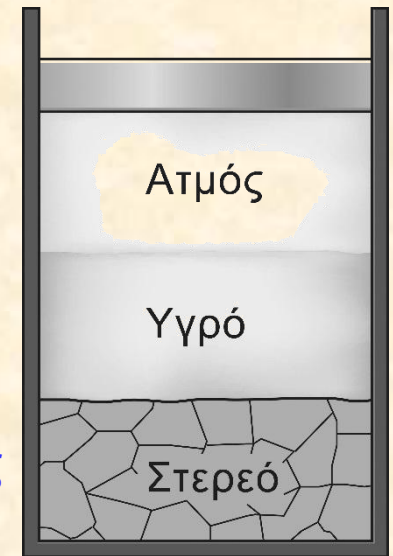
(β) Διάγραμμα  $P-v$  μιας καθαρής ουσίας



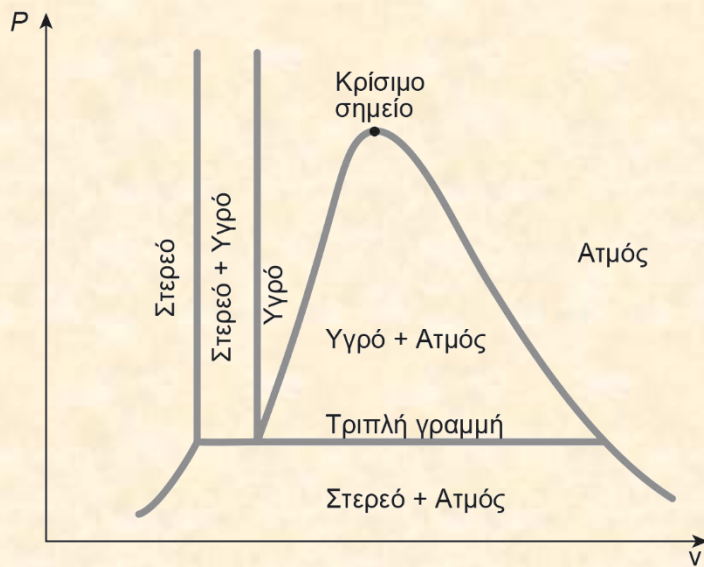
Σε μια διάταξη κυλίνδρου – εμβόλου, η πίεση μπορεί να ελαττωθεί αφαιρώντας ένα βαρίδι από το έμβολο

# Επέκταση των διαγραμμάτων στη στερεά φάση

Για το νερό:  
 $T_{tp} = 0.01^{\circ}\text{C}$   
 $P_{tp} = 0.6117\text{kPa}$



Στο τριπλό σημείο, οι τρεις φάσεις  
συνυπάρχουν σε ισορροπία.



(α) Διάγραμμα  $P$ - $v$  μιας ουσίας η οποία συστέλλεται κατά την πήξη



(β) Διάγραμμα  $P$ - $v$  μιας ουσίας η οποία διαστέλλεται κατά την πήξη (π.χ. νερό)

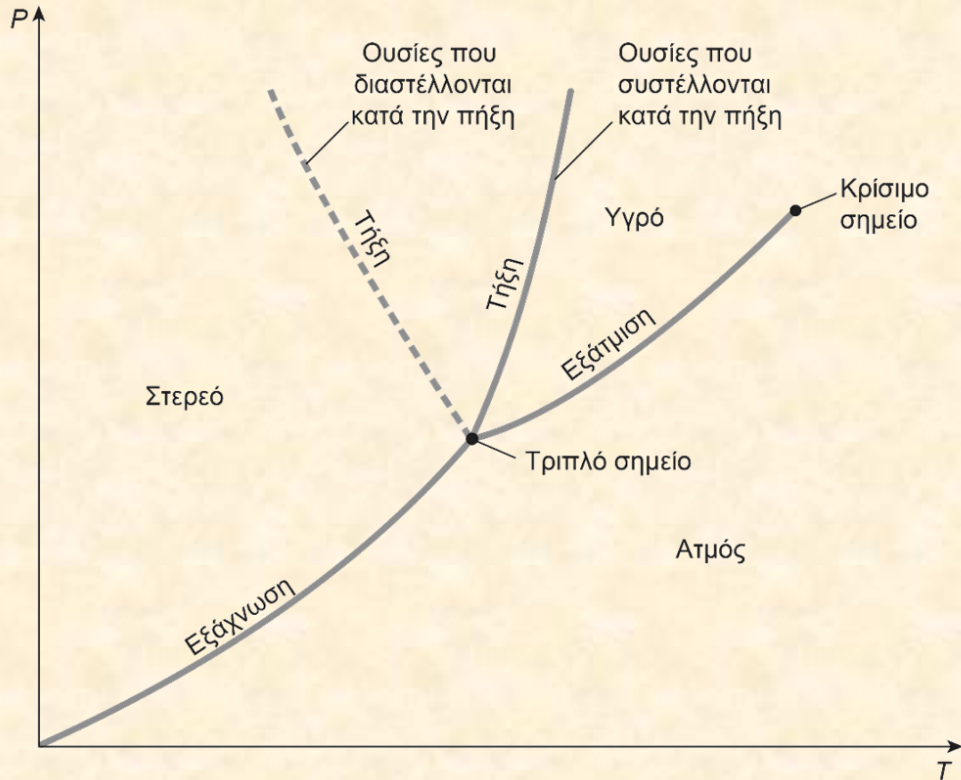
# Διάγραμμα φάσεων

## Εξαχνωση:

μετάβαση από τη στερεά φάση κατ' ευθείαν στην αέρια

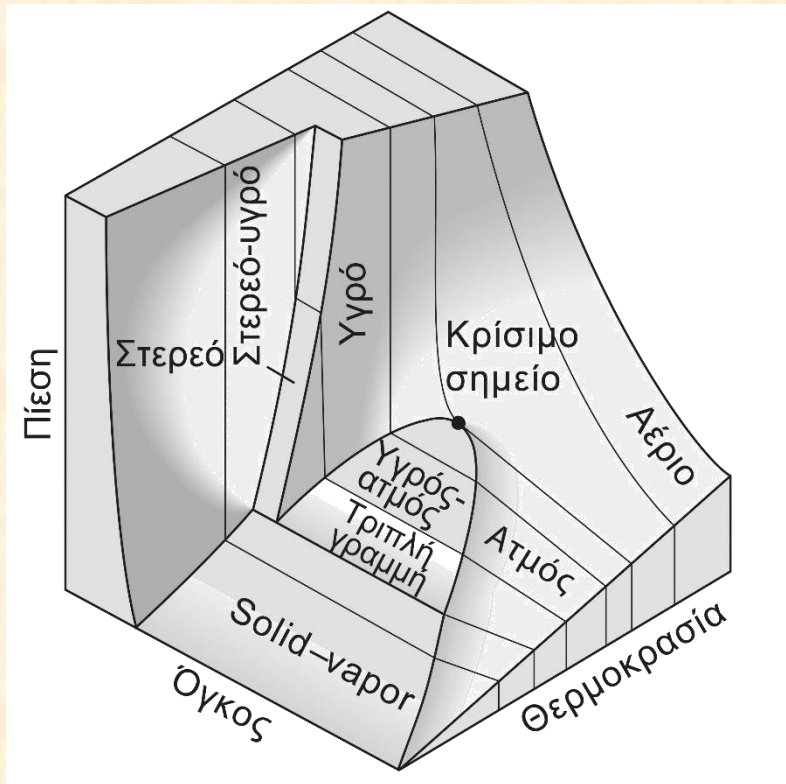


Υπό χαμηλές πιέσεις (κάτω του τριπλού σημείου), τα στερεά εξαχνώνονται προς την αέρια φάση, χωρίς ενδιάμεσα να τηχθούν.

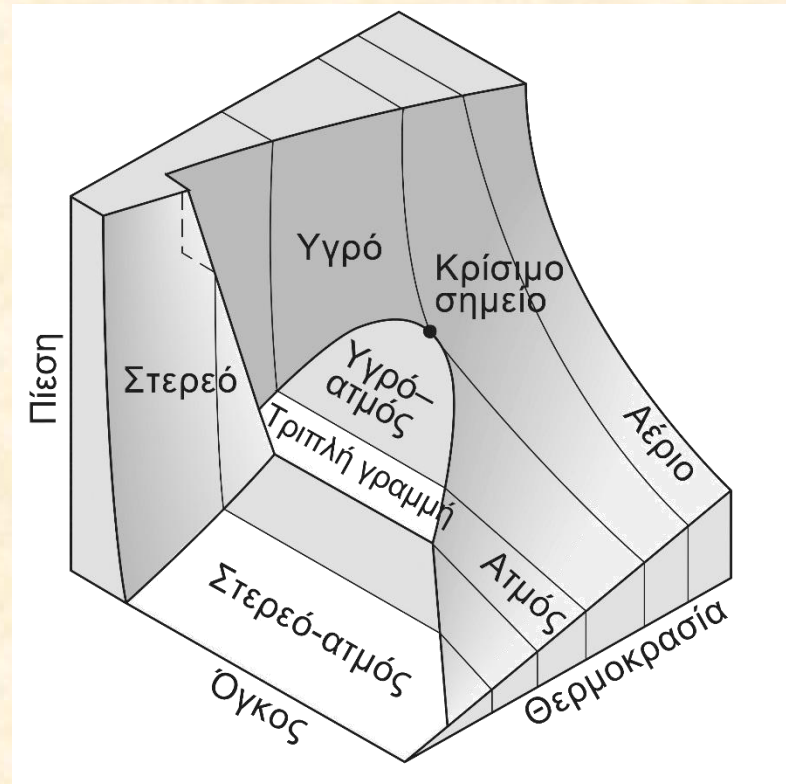


Διάγραμμα P-T καθαρών ουσιών

Οι επιφάνειες  $P$ - $v$ - $T$  προσφέρουν πλούσιες πληροφορίες, όμως στην πράξη είναι πιο εύχρηστο να εργάζεται κανείς με διδιάστατα διαγράμματα όπως τα  $P$ - $v$  και  $T$ - $v$ .



Επιφάνεια  $P$ - $v$ - $T$  ουσίας που συστέλλεται κατά την πήξη της.



Επιφάνεια  $P$ - $v$ - $T$  ουσίας που διαστέλλεται κατά την πήξη της (π.χ. νερό).



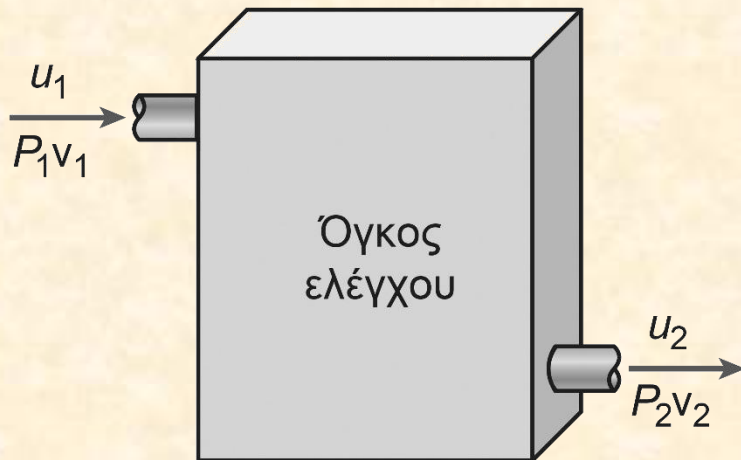
# Πίνακες ιδιοτήτων

- Για τις περισσότερες ουσίες, οι σχέσεις μεταξύ των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων είναι πολύ περίπλοκες ώστε να μπορούν να παρασταθούν από απλές σχέσεις. Έτσι, οι ιδιότητες συχνά παρουσιάζονται υπό μορφή πινάκων.
- Κάποιες θερμοδυναμικές ιδιότητες μετρούνται εύκολα, αλλά άλλες όχι, απαιτώντας τον υπολογισμό τους βάσει των σχέσεων που τις συνδέουν με μετρήσιμες ιδιότητες.
- Τα αποτελέσματα τέτοιων μετρήσεων και υπολογισμών παρουσιάζονται εύχρηστα σε πίνακες.

## Ενθαλπία: μια συνδυαστική ιδιότητα

$$h = u + Pv \quad (\text{kJ/kg})$$

$$H = U + PV \quad (\text{kJ})$$



|   |
|---|
| $\text{kPa} \cdot \text{m}^3 \equiv \text{kJ}$              |
| $\text{kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \equiv \text{kJ/kg}$ |
| $\text{bar} \cdot \text{m}^3 \equiv 100 \text{ kJ}$         |
| $\text{MPa} \cdot \text{m}^3 \equiv 1000 \text{ kJ}$        |
| $\text{psi} \cdot \text{ft}^3 \equiv 0.18505 \text{ Btu}$   |

# Καταστάσεις κορεσμένου υγρού & κορεσμένου ατμού

$v_f$  = ειδικός όγκος κορεσμένου υγρού  
 $v_g$  = ειδικός όγκος κορεσμένου ατμού  
 $v_{fg}$  = διαφορά μεταξύ των  $v_g$  και  $v_f$  ( $v_{fg} = v_g - v_f$ )

Τμήμα του Πίνακα A-4

| Θερ/σια<br>°C<br>$T$ | Πίεση<br>κορε-<br>σμού<br>kPa<br>$P_{sat}$ | Ειδικός όγκος<br>m <sup>3</sup> /kg |                        |
|----------------------|--|-------------------------------------|------------------------|
|                      |  | Κορ.<br>υγρό<br>$v_f$               | Κορ.<br>ατμός<br>$v_g$ |
| 85                   | 57.868                                     | 0.001032                            | 2.8261                 |
| 90                   | 70.183                                     | 0.001036                            | 2.3593                 |
| 95                   | 84.609                                     | 0.001040                            | 1.9808                 |

↑  
Θερμοκρασία

↑  
Αντίστοιχη  
πίεση  
κορεσμού

↑  
Ειδικός  
όγκος  
κορεσμένου  
υγρού

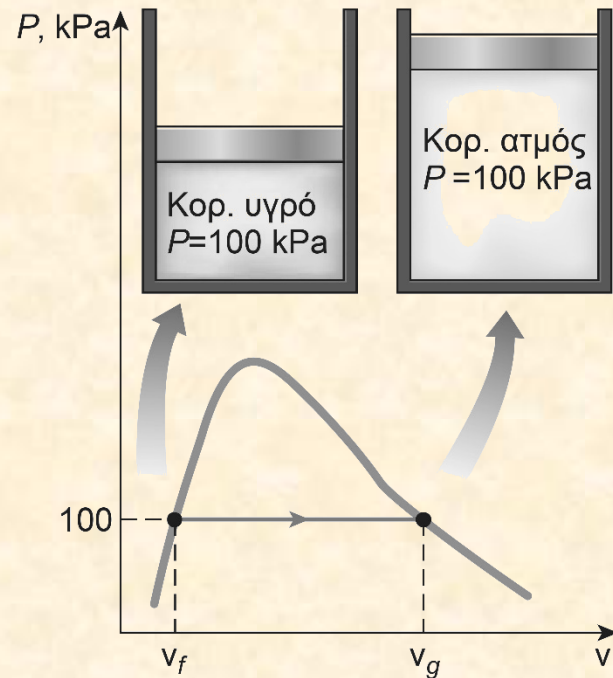
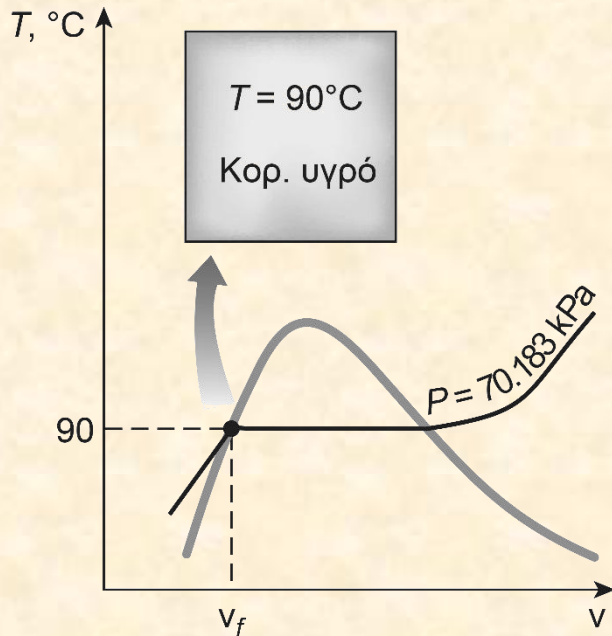
↑  
Ειδικός  
όγκος  
κορεσμένου  
ατμού

- **Πίνακας A-4:** Πίνακας θερμοκρασίας ιδιοτήτων κορεσμού
- **Πίνακας A-5:** Πίνακας πίεσης ιδιοτήτων κορεσμού

**Ενθαλπία ατμοποίησης,  $h_{fg}$**   
**(Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης):**  
είναι η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για την ατμοποίηση μιας μονάδας μάζας κορεσμένου υγρού υπό δεδομένη θερμοκρασία ή πίεση.

## Παραδείγματα:

Καταστάσεις κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού στα διαγράμματα  $T-v$  και  $P-v$ .



# Διφασική περιοχή

**Ποιότητα,  $x$** : Ο λόγος της μάζας του ατμού προς την ολική μάζα του δ/φ μείγματος.  
**Λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1** → 0: κορεσμένο υγρό, 1: κορεσμένος ατμός.

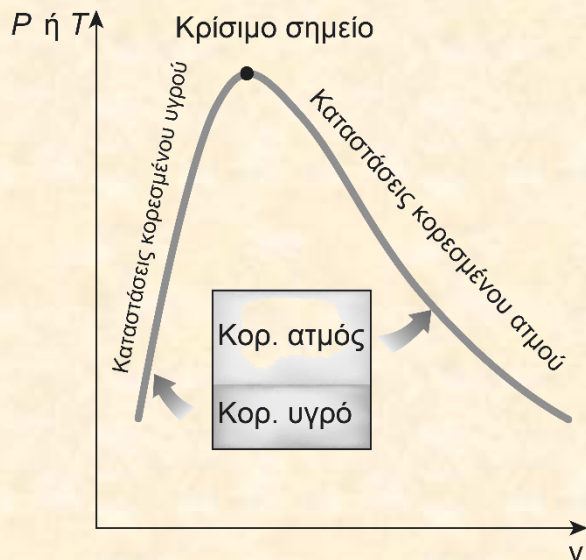
Οι ιδιότητες του κορεσμένου υγρού παραμένουν ίδιες, άσχετα αν το υγρό είναι μεμονωμένο ή αν είναι σε δ/φ μείγμα με κορεσμένο ατμό.

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{total}}}$$

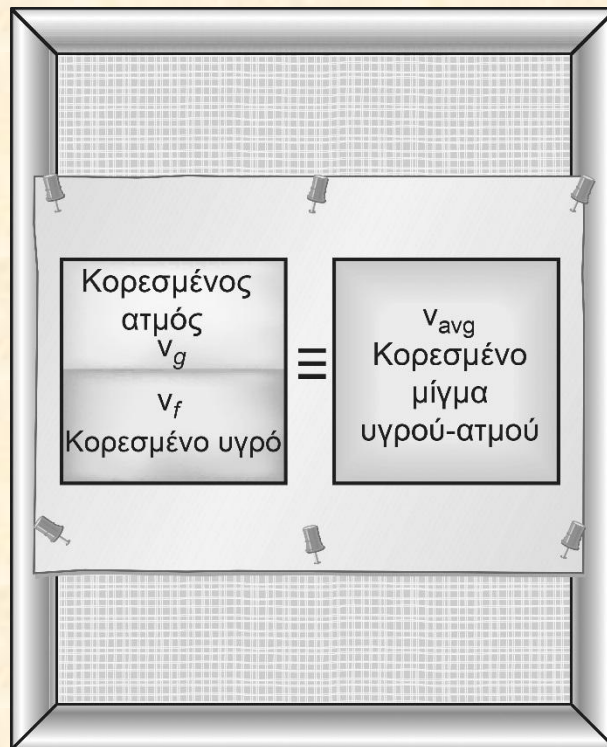
$$m_{\text{total}} = m_{\text{liquid}} + m_{\text{vapor}} = m_f + m_g$$

Η θερμοκρασία κι η πίεση ενός δ/φ μείγματος είναι εξαρτημένα μεγέθη

Η σύσταση του δ/φ μείγματος σε κορεσμένο ατμό και κορεσμένο υγρό ποσοτικοποιείται από την ποιότητα.



Για λόγους ευχρηστίας, ένα δ/φ μείγμα μπορεί να θεωρείται ομογενές



$$v_{\text{avg}} = v_f + xv_{fg} \quad (\text{m}^3/\text{kg})$$

$$x = m_g/m_t \quad x = \frac{v_{\text{avg}} - v_f}{v_{fg}}$$

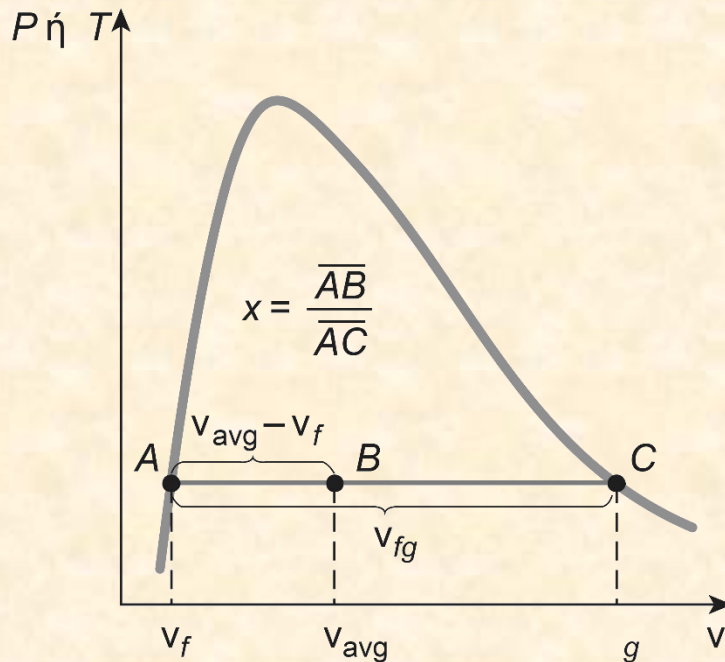
$$u_{\text{avg}} = u_f + xu_{fg} \quad (\text{kJ}/\text{kg})$$

$$h_{\text{avg}} = h_f + xh_{fg} \quad (\text{kJ}/\text{kg})$$

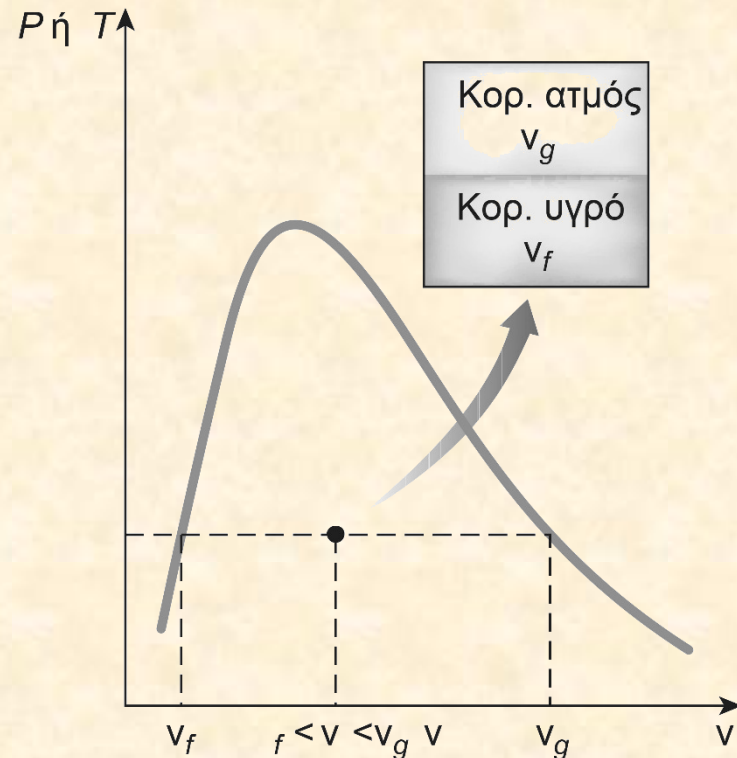
$y \rightarrow v, u \text{ ή } h.$

$$y_{\text{avg}} = y_f + xy_{fg}$$

$$y_f \leq y_{\text{avg}} \leq y_g$$

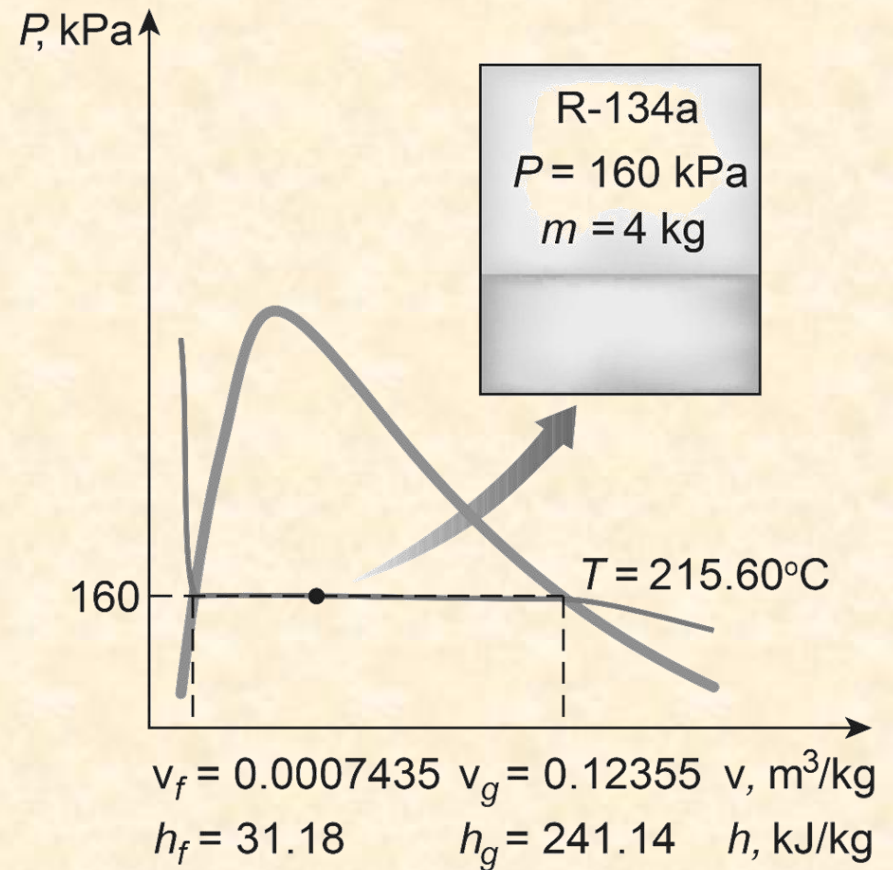
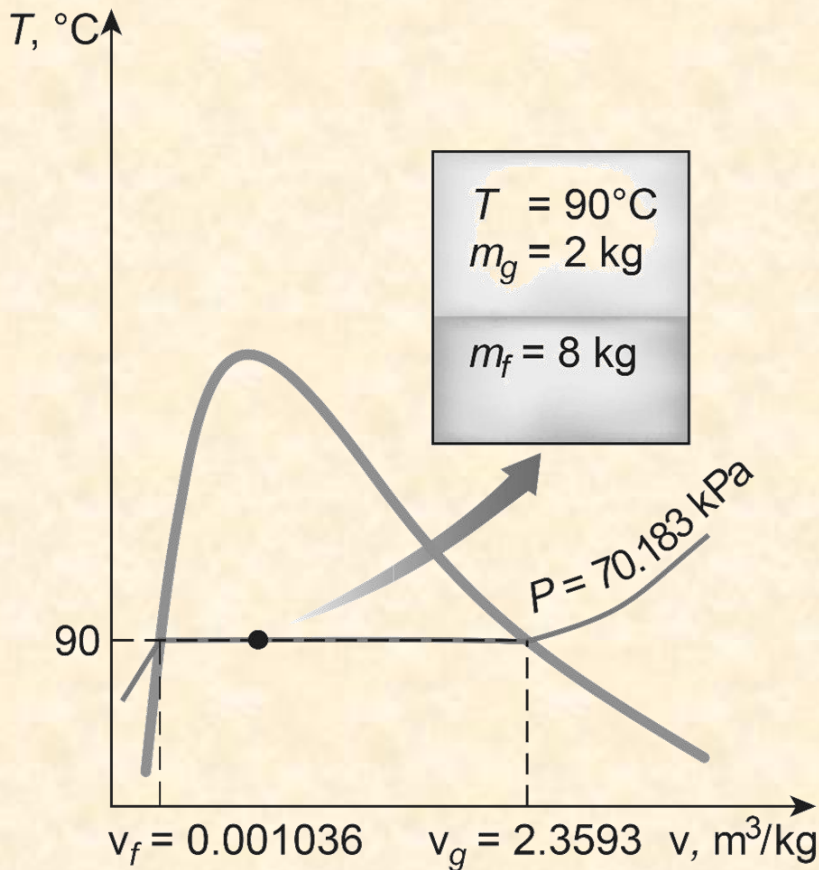


Η ποιότητα σχετίζεται με τα οριζόντια μήκη στα διαγράμματα  $P$ - $v$  και  $T$ - $v$



Η ποιότητα σχετίζεται με τα οριζόντια μήκη στα διαγράμματα  $P$ - $v$  και  $T$ - $v$

## Παραδείγματα: Διφασικά μείγματα στα διαγράμματα $T$ - $v$ και $P$ - $v$ .



# Υπέρθερμος ατμός

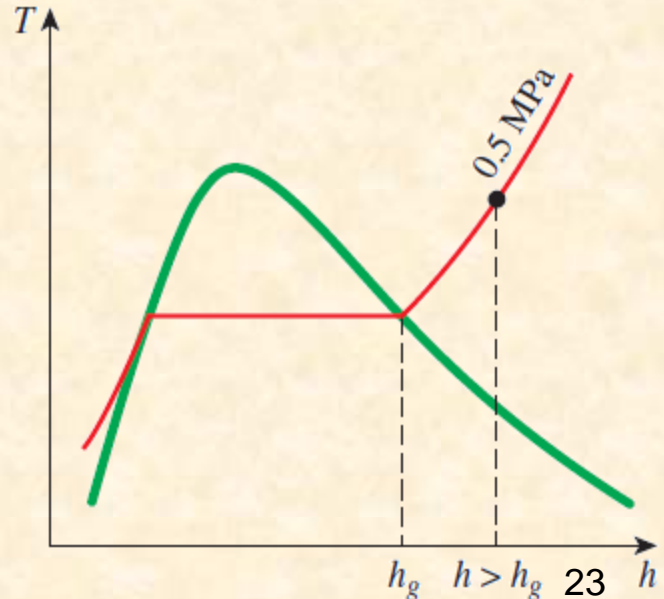
Δεξιά της καμπύλης του κορεσμένου ατμού και σε θερμοκρασίες υψηλότερες της κρίσιμης, μια ουσία υφίσταται ως κορεσμένος ατμός. Εκεί, η θερμοκρασία κι η πίεση είναι ανεξάρτητες ποσότητες.

Σε σχέση με τον κορεσμένο ατμό, ο υπέρθερμος χαρακτηρίζεται από:

- Χαμηλότερες πιέσεις σε δεδομένη θερμοκρασία
- Υψηλότερες θερμοκρασίες σε δεδομένη πίεση
- Υψηλότερους ειδικούς όγκους σε δεδομένη πίεση ή θερμοκρασία
- Υψηλότερες εσωτερικές ενέργειες σε δεδομένη πίεση ή θερμοκρασία
- Υψηλότερες ενθαλπίες σε δεδομένη πίεση ή θερμοκρασία

| $T, ^\circ\text{C}$                          | $v$<br>$\text{m}^3/\text{kg}$ | $u$<br>$\text{kJ}/\text{kg}$ | $h$<br>$\text{kJ}/\text{kg}$ |
|--|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| $P = 0.1 \text{ MPa} (99.61^\circ\text{C})$  |                               |                              |                              |
| Sat.   | 1.6941                        | 2505.6                       | 2675.0                       |
| 100  | 1.6959                        | 2506.2                       | 2675.8                       |
| 150  | 1.9367                        | 2582.9                       | 2776.6                       |
| $\vdots$                                     | $\vdots$                      | $\vdots$                     | $\vdots$                     |
| 1300   | 7.2605                        | 4687.2                       | 5413.3                       |
| $P = 0.5 \text{ MPa} (151.83^\circ\text{C})$ |                               |                              |                              |
| Sat.   | 0.37483                       | 2560.7                       | 2748.1                       |
| 200  | 0.42503                       | 2643.3                       | 2855.8                       |
| 250  | 0.47443                       | 2723.8                       | 2961.0                       |

Υπό δεδομένη πίεση, η ενθαλπία του υπερθέρμου ατμού είναι υψηλότερη εκείνης του κορεσμένου.



Μέρος του Πίνακα A-6

Οι ιδιότητες του υπόψυκτου υγρού εξαρτώνται πολύ εντονότερα από τη θερμοκρασία απ' ότι από την πίεση.

$$y \cong y_f @ T \quad y \rightarrow v, u, \text{ or } h$$

Ακριβέστερη σχέση για την  $h$ :

$$h \cong h_f @ T + v_f @ T (P - P_{\text{sat}} @ T)$$

$$v \cong v_f @ T$$

$$u \cong u_f @ T$$

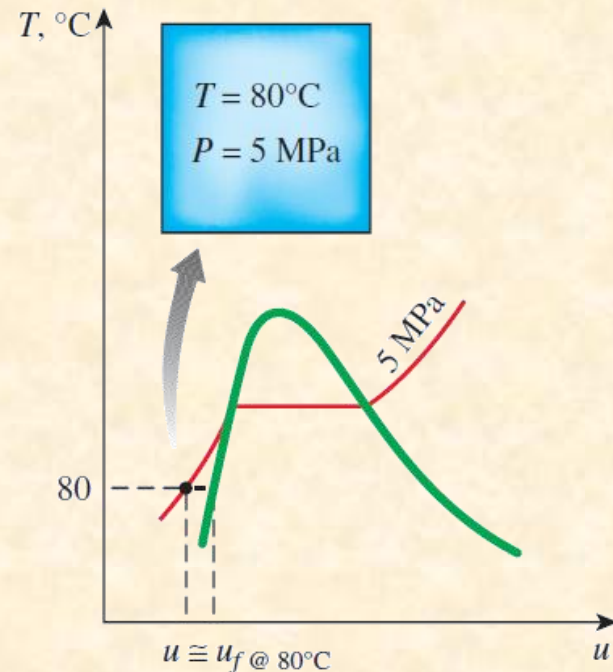
$$h \cong h_f @ T$$

Το υπόψυκτο υγρό μπορεί να προσεγγιστεί ως κορεσμένο της αυτής θερμοκρασίας

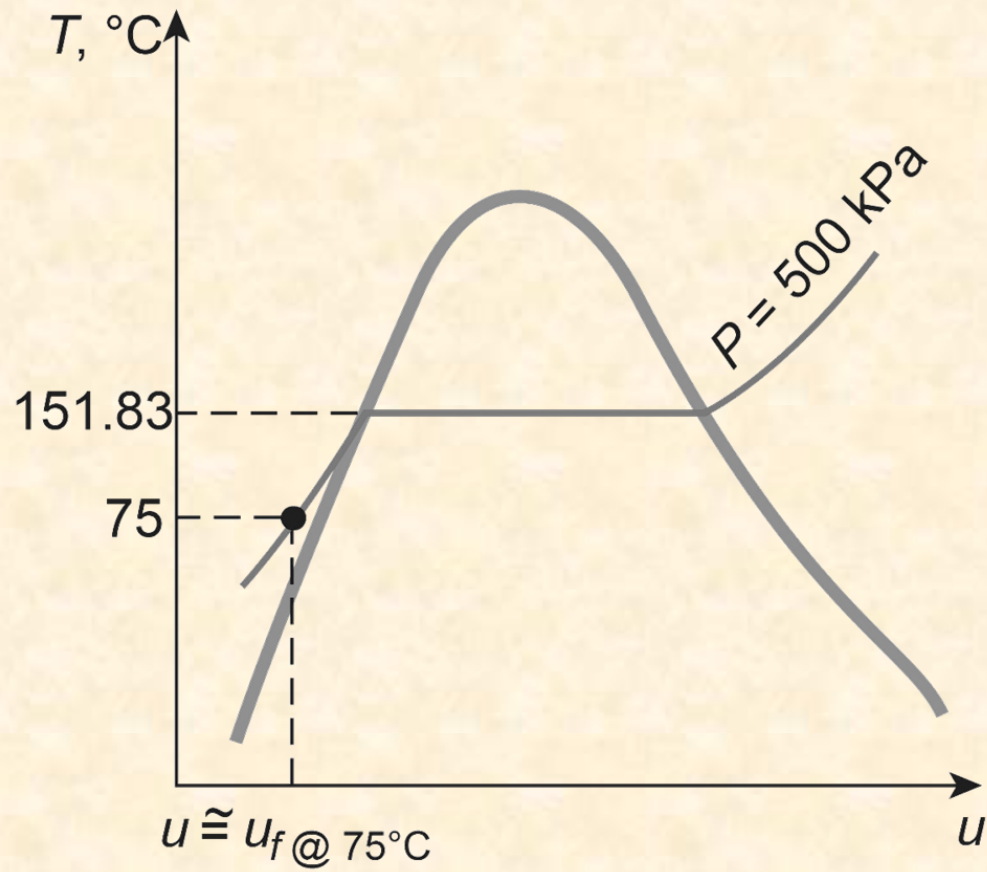
## Υπόψυκτο υγρό

Σε σχέση με το κορεσμένο υγρό, το υπόψυκτο χαρακτηρίζεται από:

- Υψηλότερες πιέσεις σε δεδομένη θερμοκρασία
- Χαμηλότερες θερμοκρασίες σε δεδομένη πίεση
- Χαμηλότερους ειδικούς όγκους σε δεδομένη πίεση ή θερμοκρασία
- Χαμηλότερες εσωτερικές ενέργειες σε δεδομένη πίεση ή θερμοκρασία
- Χαμηλότερες ενθαλπίες σε δεδομένη πίεση ή θερμοκρασία







# Κατάσταση αναφοράς & Τιμές αναφοράς

- Οι τιμές των  $u$ ,  $h$  και  $s$  δε μπορούν να μετρηθούν άμεσα, επομένως υπολογίζονται με βάση μετρήσιμες ιδιότητες και σύμφωνα με τις μεταξύ τους σχέσεις.
- Ωστόσο, οι σχέσεις αυτές παρέχουν τις μεταβολές των ιδιοτήτων κι όχι τις τιμές τους υπό συγκεκριμένες καταστάσεις.
- Επομένως, θα πρέπει να εκλέξουμε μια εύχρηστη *κατάσταση αναφοράς* και να αντιστοιχίσουμε σε αυτήν το *μηδέν* για μια εύχρηστη μετρήσιμη τιμή.
- Η κατάσταση αναφοράς στους πίνακες για το νερό είναι και για το R-134a is  $-40^{\circ}\text{C}$ .
- Κάποιες ιδιότητες μπορεί να έχουν αρνητική τιμή, συνεπεία της επιλεγείσας κατάστασης αναφοράς.
- Καμιά φορά, διαφορετικοί πίνακες μπορεί να δίνουν διαφορετικές τιμές κάποιων ιδιοτήτων στην ίδια κατάσταση, επειδή έχουν συνταχθεί με βάση άλλη κατάσταση αναφοράς.
- Πάντως, στη Θερμοδυναμική εργαζόμαστε πολύ με τις μεταβολές των ιδιοτήτων, συνεπώς η κατάσταση αναφοράς που επιλέγεται κάθε φορά δεν επηρεάζει τους υπολογισμούς.

Saturated refrigerant-134a—Temperature table

| Temp.,<br>$T^{\circ}\text{C}$ | Sat.<br>press.,<br>$P_{\text{sat}}$ kPa | Specific volume,<br>$\text{m}^3/\text{kg}$ |                         | Internal energy,<br>kJ/kg |                    |                         | Enthalpy,<br>kJ/kg       |                    |                         | Entropy,<br>kJ/kg · K    |                    |                         |
|-------------------------------|---|--|-------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|
|                               |   | Sat.<br>liquid,<br>$v_f$                   | Sat.<br>vapor,<br>$v_g$ | Sat.<br>liquid,<br>$u_f$  | Evap.,<br>$u_{fg}$ | Sat.<br>vapor,<br>$u_g$ | Sat.<br>liquid,<br>$h_f$ | Evap.,<br>$h_{fg}$ | Sat.<br>vapor,<br>$h_g$ | Sat.<br>liquid,<br>$s_f$ | Evap.,<br>$s_{fg}$ | Sat.<br>vapor,<br>$s_g$ |
| -40                           | 51.25                                   | 0.0007054                                  | 0.36081                 | -0.036                    | 207.40             | 207.37                  | 0.000                    | 225.86             | 225.86                  | 0.00000                  | 0.96866            | 0.96866                 |

# Η καταστατική εξίσωση του ιδανικού αερίου

- **Καταστατική εξίσωση:** είναι κάθε εξίσωση που συνδέει την πίεση, τη θερμοκρασία και τον ειδικό όγκο μιας ουσίας.
- Η απλούστερη και γνωστότερη καταστατική εξίσωση για την αέρια φάση είναι η κ.ε. του ιδανικού αερίου. Αυτή η εξίσωση προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά ενός πραγματικού αερίου σε ένα σωστά επιλεγμένο εύρος τιμών.

$$P = R \left( \frac{T}{v} \right) \quad P v = R T \quad \text{Καταστατική εξίσωση του τελείου αερίου}$$

$$R = \frac{R_u}{M} \quad (\text{kJ/kg} \cdot \text{K})$$

$R$ : σταθερά αερίου

$M$ : μοριακό βάρος (kg/kmol)

$R_u$ : παγκόσμια σταθερά αερίων

$$R_u = \begin{cases} 8.31447 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \\ 8.31447 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K} \\ 0.0831447 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K} \\ 1.98588 \text{ Btu/lbmol} \cdot \text{R} \\ 10.7316 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3/\text{lbmol} \cdot \text{R} \\ 1545.37 \text{ ft} \cdot \text{lbf/lbmol} \cdot \text{R} \end{cases}$$

| Ουσία | $R$ , kJ/kg·K |
|-------|---------------|
| Αέρας | 0.2870        |
| Ήλιο  | 2.0769        |
| Αργό  | 0.2081        |
| Άζωτο | 0.2968        |

Διαφορετικές ουσίες έχουν διαφορετικές σταθερές αερίου.

$$[\text{Μάζα}] = [\text{Μοριακό βάρος}] \times [\text{Αριθμός mole}]$$

$$m = MN \quad (\text{kg})$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Εξίσωση ενός ιδανικού  
αερίου για δύο  
καταστάσεις ίδιας μάζας

Άλλες εκφράσεις της κ.ε. του ιδανικού αερίου

$$V = m v \longrightarrow P V = m R T$$

$$m R = (MN) R = N R_u \longrightarrow P V = N R_u T$$

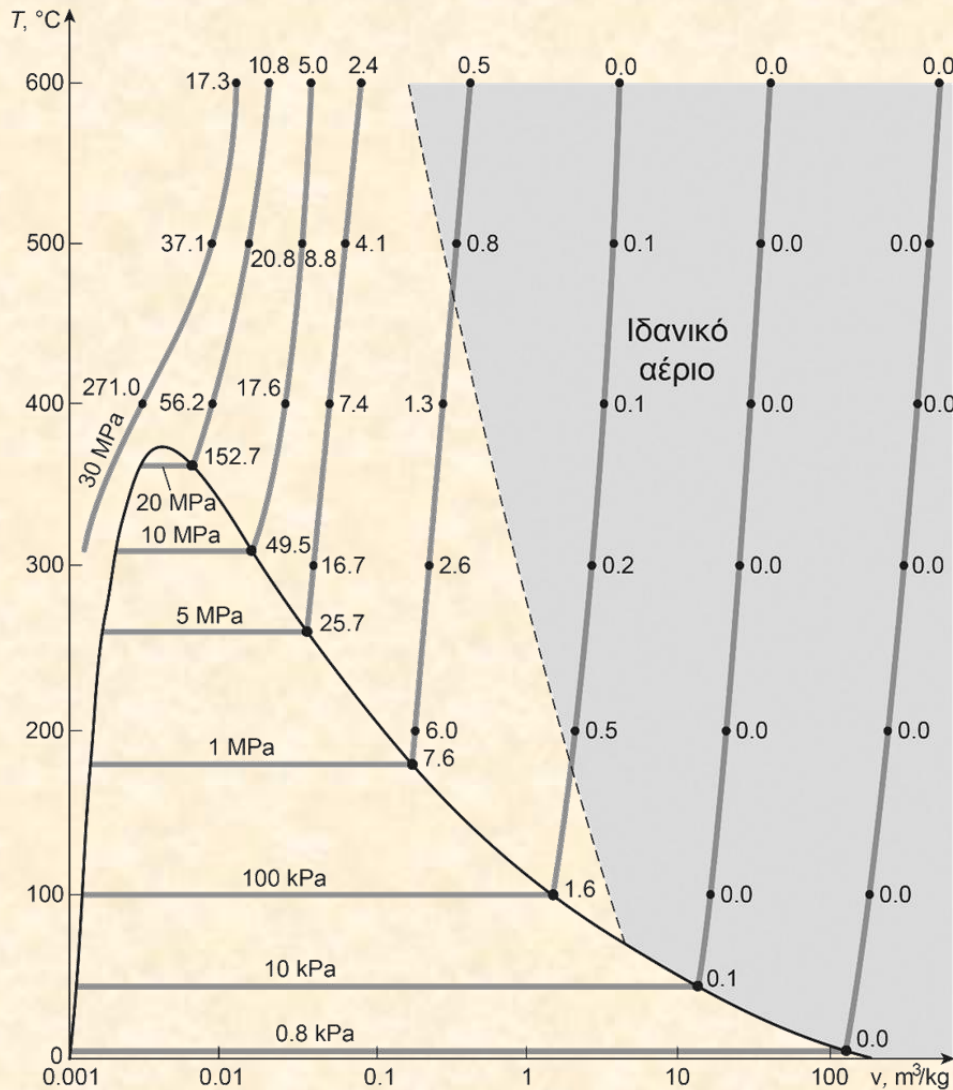
$$V = N \bar{v} \longrightarrow P \bar{v} = R_u T$$

**Τα πραγματικά αέρια συμπεριφέρονται ως ιδανικά υπό χαμηλές πυκνότητες (δηλαδή, υπό χαμηλή πίεση ή και υψηλή θερμοκρασία).**

| Ανά μονάδα μάζας          | Ανά μονάδα mole                   |
|---------------------------|-----------------------------------|
| $v, \text{m}^3/\text{kg}$ | $\bar{v}, \text{m}^3/\text{kmol}$ |
| $u, \text{kJ}/\text{kg}$  | $\bar{u}, \text{kJ}/\text{kmol}$  |
| $h, \text{kJ}/\text{kg}$  | $\bar{h}, \text{kJ}/\text{kmol}$  |

Οι γραμμομοριακές ιδιότητες φέρουν μια παύλα πάνω από το σύμβολό τους.

# Ο υδρατμός είναι ιδανικό αέριο;



- Σε πιέσεις κάτω των 10kPa, ο ατμός μπορεί να θεωρηθεί ιδανικό αέριο, ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας, με αμελητέο σφάλμα (<0,1%).
- Σε υψηλότερες πιέσεις, η παραδοχή του ιδανικού αερίου οδηγεί σε μεγάλα σφάλματα, ειδικά στην περιοχή της καμπύλης κορεσμένου ατμού κοντά στο κρίσιμο σημείο.
- Σε εφαρμογές κλιματισμού, ο υδρατμός του αέρα θεωρείται ιδανικό αέριο. Γιατί;
- Ωστόσο, σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς οι πιέσεις είναι συχνά πολύ υψηλές, οπότε οι σχέσεις του ιδανικού αερίου δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται.

Ποσοστιαίο σφάλμα, όπως υπεισέρχεται από τη θεώρηση του υδρατμού ως ιδανικό αέριο. Στη γκρι περιοχή, το σφάλμα είναι <1%

# Παράγοντας συμπίεστικότητας: μέτρο της απόκλισης από τη συμπεριφορά του ιδανικού αερίου

**Παράγοντας συμπίεστικότητας,  $Z$ :** είναι ένας συντελεστής που ποσοτικοποιεί την απόκλιση των πραγματικών αερίων από τα ιδανικά υπό δεδομένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας

Όσο ο  $Z$  αποκλίνει από τη μονάδα, τόσο περισσότερο η συμπεριφορά του μελετούμενου αερίου αποκλίνει από τη συμπεριφορά του ιδανικού αερίου.

*Τα αέρια συμπεριφέρονται ως ιδανικά υπό χαμηλές πυκνότητες (δηλαδή, υπό χαμηλή πίεση ή και υψηλή θερμοκρασία).*

**Ερώτηση:** Ποιο είναι το κριτήριο για να χαρακτηριστεί μια πίεση ως χαμηλή και μια θερμοκρασία ως υψηλή;

**Απάντηση:** Να είναι χαμηλότερη ή ψηλότερη από την αντίστοιχη κρίσιμη τιμή.

$$Z = \frac{Pv}{RT}$$

$$Pv = ZRT$$



$$P_R = \frac{P}{P_{cr}}$$

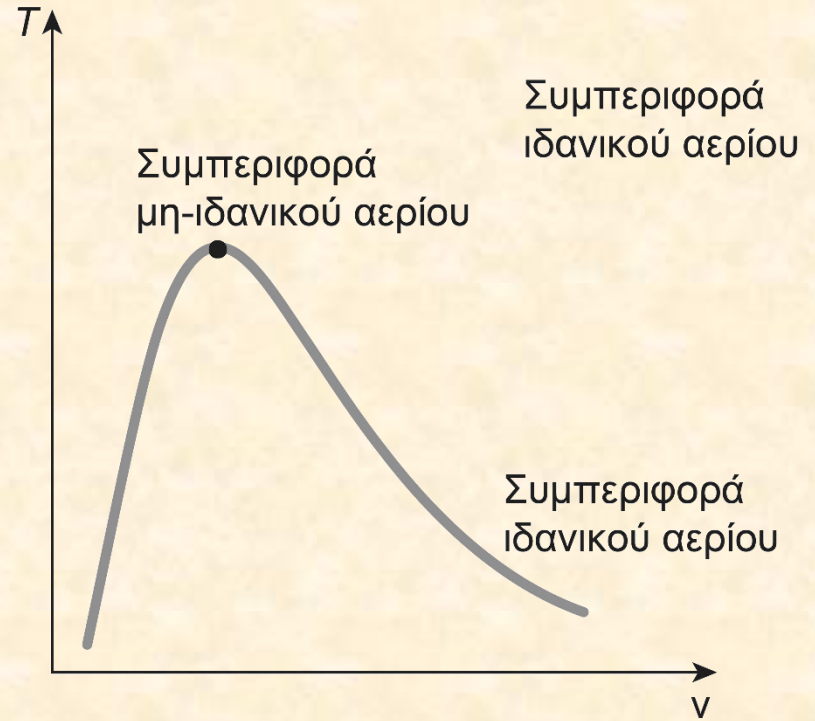
Ανηγμένη  
πίεση

$$T_R = \frac{T}{T_{cr}}$$

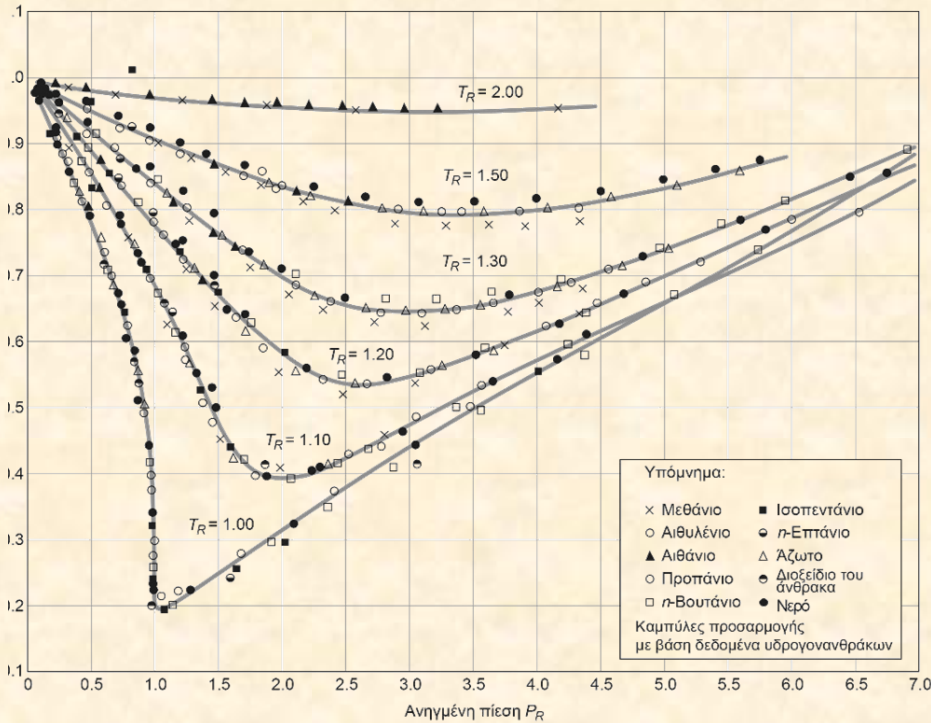
Ανηγμένη  
θερμοκρασία

$$V_R = \frac{V_{actual}}{RT_{cr}/P_{cr}}$$

Ψευδοανηγμένος  
ειδικός όγκος



Η μέγιστη απόκλιση των πραγματικών αερίων από τη συμπεριφορά των ιδανικών αερίων παρατηρείται περίξ του κρίσιμου σημείου.



Σύγκριση των τιμών του Z για διάφορα αέρια

# Άλλες καταστατικές εξισώσεις

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς των πραγματικών αερίων σε εκτενέστερες περιοχές και χωρίς περιορισμούς, έχουν προταθεί διάφορες άλλες καταστατικές εξισώσεις.

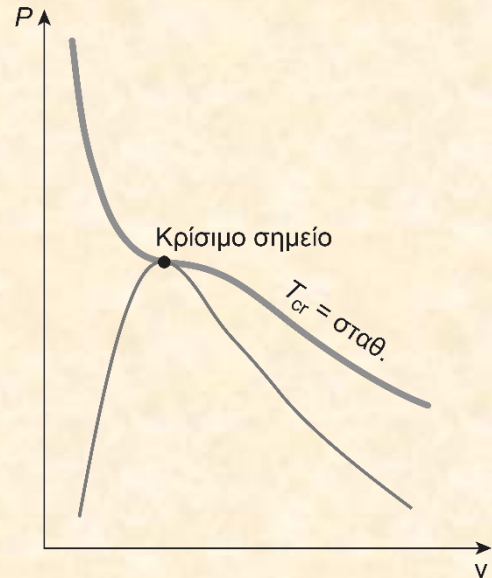
## Κ.ε. Van der Waals

$$\left( P + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT$$

$$a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64P_{cr}} \quad b = \frac{RT_{cr}}{8P_{cr}}$$

Στο μοντέλο αυτό έχουν ενσωματωθεί δύο φαινόμενα που δε χαρακτηρίζουν ένα ιδανικό αέριο: **οι ελκτικές ενδομοριακές δυνάμεις και ο όγκος που καταλαμβάνουν τα μόρια του αερίου**. Η ακρίβεια της κ.ε. Van der Waals είναι συχνά ανεπαρκής.

Η ισοθερμοκρασική καμπύλη της κρίσιμης θερμοκρασίας μιας καθαρής ουσίας παρουσιάζει ένα σημείο καμπής στο κρίσιμο σημείο.



van der Waals  
Berthelet  
Redlich-Kwang  
Beattie-Bridgeman  
Benedict-Webb-Rubin  
Strobridge  
Virial

$$\left( \frac{\partial P}{\partial v} \right)_{T=T_{cr}=\text{const}} = 0 \quad \left( \frac{\partial^2 P}{\partial v^2} \right)_{T=T_{cr}=\text{const}} = 0$$



## Καταστατική εξίσωση Beattie – Bridgeman

$$P = \frac{R_u T}{\bar{v}^2} \left( 1 - \frac{c}{\bar{v} T^3} \right) (\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2}$$

$$A = A_0 \left( 1 - \frac{a}{\bar{v}} \right) \quad B = B_0 \left( 1 - \frac{b}{\bar{v}} \right)$$

## Καταστατική εξίσωση Benedict – Webb – Rubin

The constants are given in Table 3–4. This equation can handle substances at densities up to about  $2.5 \rho_{cr}$ .

## Καταστατική εξίσωση Virial

$$P = \frac{RT}{v} + \frac{a(T)}{v^2} + \frac{b(T)}{v^3} + \frac{c(T)}{v^4} + \frac{d(T)}{v^5} + \dots$$

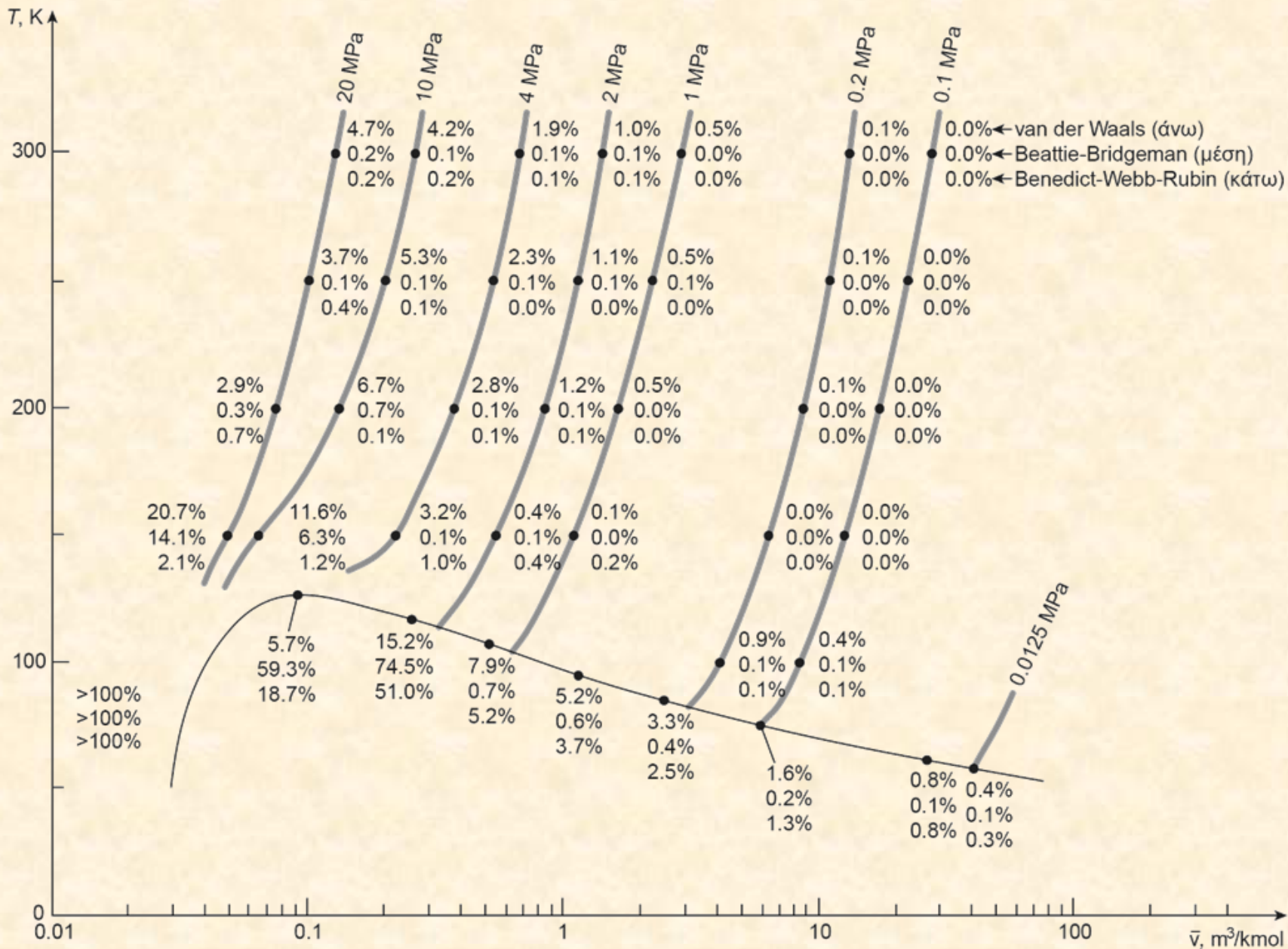
*van der Waals*: 2 σταθερές.  
Ακριβείς για περιορισμένες αποστάσεις.

*Beattie-Bridgeman*: 5 σταθερές.  
Ακριβής για  $r \leq 0.8r_{cr}$ .

*Benedict-Webb-Rubin*: 8 σταθερές.  
Ακριβής για  $r \leq 2.5r_{cr}$ .

*Strobridge*: 16 σταθερές.  
Καταλληλότερη για αριθμητικούς  
υπολογισμούς

*Virial*: Κυμαινόμενο πλήθος σταθερών.  
Ακρίβεια εξαρτώμενη από το  
πλήθος των όρων που  
χρησιμοποιούνται



# Περίληψη

- Καθαρές ουσίες
- Φάσεις των καθαρών ουσιών
- Διεργασίες αλλαγής φάσης των καθαρών ουσιών
  - ✓ Υπόψυκτο υγρό, Κορεσμένο υγρό, Κορεσμένος ατμός, Υπέρθερμος ατμός
  - ✓ Θερμοκρασία κορεσμού & Πίεση κορεσμού
- Διαγράμματα ιδιοτήτων με παράσταση της διεργασίας αλλαγής φάσης
  - ✓ Διάγραμμα  $T-v$ , Διάγραμμα  $P-v$ , Διάγραμμα  $P-T$ , Επιφάνεια  $P-v-T$
- Πίνακες ιδιοτήτων
  - ✓ Ενθαλπία
  - ✓ Κορεσμένο υγρό, Κορεσμένος ατμός, Διφασικά μείγματα, Υπέρθερμος ατμός, Υπόψυκτο υγρό
  - ✓ Καταστάσεις αναφοράς και τιμές αναφοράς
- Η καταστατική εξίσωση του ιδανικού αερίου
  - ✓ Ο υδρατμός είναι τέλειο αέριο;
- Παράγοντας συμπιεστότητας
- Άλλες καταστατικές εξισώσεις
  - ✓ Καταστατική εξίσωση van der Waals, Καταστατική εξίσωση Beattie-Bridgeman
  - ✓ Καταστατική εξίσωση Benedict-Webb-Rubin, Καταστατική εξίσωση Virial