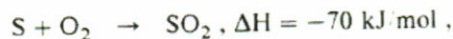
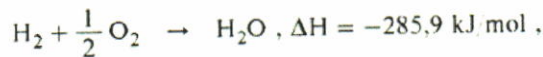
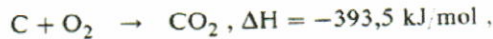


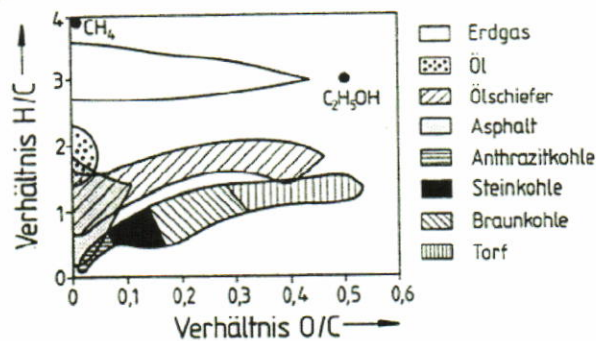
# 15 Παραγωγή θερμότητας με καύση ορυκτών καυσίμων

## 15.1 Γενικά περί καυσίμων

Στην ενεργειακή οικονομία της ανθρωπότητας αξιοποιούνται ποικίλα καύσιμα όπως ο λιθάνθρακας, ο λιγνίτης, προϊόντα της κλασματικής απόσταξης του πετρελαίου, καύσιμα αέρια, τύρφη και βιομάζα, (πχ ξύλο και άχυρα) κτλ. Κοντά σ'αυτά χρησιμοποιούνται και κάποια κατάλληλα βιομηχανικά δευτερογενή προϊόντα και απόβλητα. Οι σπουδαιότερες αντιδράσεις καύσης που αξιοποιούν τα παραπάνω καύσιμα, είναι οι παρακάτω μαζί με τις εξωθερμίες που τους αντιστοιχούν:



Ενα καύσιμο μπορεί να χαρακτηριστεί από τη στοιχειακή του ανάλυση, ή ακόμη απλούστερα με βάση την ενθαλπία αντίδρασης - θερμογόνο δύναμή του. Σχεδόν όλα τα καύσιμα περιέχουν C, H, S, O, N, H<sub>2</sub>O, καθώς και τέφρα τα στερεά. Το Σχήμα 15-1 δείχνει παραστατικά ότι ειδικά οι τιμές του λόγου H/C και O/C για τα πλιό σημαντικά ορυκτά καύσιμα βρίσκονται σε στενά περιορισμένες περιοχές.



Σχήμα 15-1 Περικεκτικότητα διάφορων σημαντικών καυσίμων σε υδρογόνο και οξυγόνο

Πίνακας 15-1 Σύσταση στερεών και υγρών καυσίμων (%κ.β.)

Brennstoff	Asche	Wasser	C	H	S	O	N	H <sub>0</sub> (kJ/kg)
Steinkohle (Anthrazit)	4	1	85,4	3,8	1,2	2,3	2,3	33 390
Steinkohle (Gasflammkohle)	3,7	3,5	77,3	5	1	8,5	1	30 000
Koks	9	1,8	84	0,8	1	1,7	1,7	29 310
Braunkohle, roh (Rheinbraun)	2,7	59,3	23	1,9	1	6	6,1	8000
Benzin	-	-	85,6	14,35	0,05	-	-	43 500
Heizöl, leicht	-	0,1	85,5	13,5	0,9	-	-	42 600
Heizöl, schwer	1	0,5	84	11,7	2,8	-	-	40 500

Ο ακριβής χαρακτηρισμός των επιμέρους καυσίμων γίνεται με βάση τη στοιχειακή τους ανάλυση, όπως δείχνει ο Πίνακας 15-1 (στερεά και υγρά καύσιμα), ή μέ βάση τη μοριακή σύσταση από συγκεκριμένες αέριες ουσίες (αέρια καύσιμα - Πίνακας 15-2).

Πίνακας 15-2 Σύσταση αερίων καυσίμων (%κ.ο.)

Brenngas	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> usw.	H <sub>0</sub> (kJ/kg)
Wasserstoff		100					10 760
Kohlenmonoxid			100				12 640
Methan	100						35 795
Erdgas (Niederlande, Sowjetunion)	80,9	-	-	0,8	14,4	3,9	32 000
Kokereigas	25	55	6	2	10	2	17 375
Gichtgas	0,3	2	30	8	59,7		3975

Οι συγκεκριμένες τιμές που δίδονται στους Πίνακες αυτούς θα πρέπει να ληφθούν ως ενδεικτικές, δεδομένου ότι η σύσταση των διαφόρων ορυκτών καυσίμων ποικίλλει αναλόγως χώρας και τόπου προελεύσεως. Οσον αφορά τα καυσόξυλα, αυτά περιέχουν κατά κανόνα από 10-37% υγρασία, 0.5% τέφρα και 62-75% υγρά συστατικά στο υπόλοιπο καθαρό καύσιμο μέρος. Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη βρίσκεται στην περιοχή από 10500 – 16800 kJ/kg. Οσον αφορά την καύση αποριμμάτων που υπέστησαν άλεση σε ειδικές εγκαταστάσεις, διεργασία με αυξανόμενο ενδιαφέρον στη σύγχρονη ενεργειακή οικονομία, η θερμογόνος δύναμη ποικίλλει εξαιτίας της ποικιλίας σύστασης των αποριμμάτων. Τα οικιακά απορίμματα συνήθως χαρακτηρίζονται από 25-60% κ.β. τέφρα, 10-50% υγρασία, και θερμογόνο δύναμη στην περιοχή από 3350 – 11700 kJ/kg. Η έννοια της κατώτερης θερμογόνου δυνάμεως, που έχει ήδη εισαχθεί στα προηγούμενα, χαρακτηρίζει την εκλυόμενη ενέργεια από την τέλεια καύση και μετατροπή του καυσίμου σε προϊόντα τέλει καύσης. Συνήθως υπολογίζουμε με βάση την κατώτερη θερμογόνο δύναμη  $H_u$ , η οποία προϋποθέτει ότι η υγρασία των καυσαερίων είναι σε αέρια μορφή, ενώ η ανώτερη θερμογόνος δύναμη  $H_0$  επιτυγχάνεται όταν όλη η υγρασία των καυσαερίων συμπυκνώνεται εντελώς μέσα στο λέβητα, οπότε γίνεται επιπλέον εκμετάλλευση και της ενθαλπίας εξάτμισης του νερού.

Συνεπώς, για στερεά και υγρά καύσιμα ισχύει η σχέση:

$$H_u = H_0 - r X_{H_2O} \quad (5.1)$$

όπου  $r=2443$  kJ/kg η ενθαλπία εξάτμισης του νερού στους 25°C και  $X_{H_2O}$  το κλάσμα μάζας του καυσίμου που αποτελείται από νερό με βάση τη στοιχειακή ανάλυση.

Για τα αέρια καύσιμα η αναγωγή της θερμογόνου δυνάμεως γίνεται σε κανονικούς όγκους. Εδώ ισχύει:

$$H_{uN} = H_{oN} - r_N X_{H_2O} \quad (5.2)$$

$r_N=1990$  kJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub> είναι η ενθαλπία εξάτμισης του νερού στους 25°C ανηγμένη σε κανονικούς όγκους, και  $X_{H_2O}$  ορίζεται κατ' αναλογία με το προηγούμενο, αλλά κατ' όγκον με βάση τις τιμές που δίνει ο Πίνακας 15-2.

Ενώ οι πίνακες αυτοί δίνουν έτοιμες ενδεικτικές τιμές για τη θερμογόνο δύναμη διαφόρων καυσίμων, είναι δυνατόν να γίνεται και εξαρχής υπολογισμός με βάση τη στοιχειακή ανάλυση. Ετσι, για στερεά καύσιμα ισχύει:

$$H_u = 34,8 C + 93,9 H + 10,5 S + 6,3 N - 10,8 O - 2,5 \text{ Wasser} \quad (5.3)$$

οπότε προκύπτει το  $H_u$  σε MJ/kg. Η ίδια σχέση ισχύει και για υγρά καύσιμα. Οσον αφορά τα αέρια καύσιμα, εδώ ο υπολογισμός γίνεται με όγκους (γραμμομοριακά κλάσματα), και η σχέση είναι η παρακάτω ( $H_u$  σε MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>):

$$H_{u,v} = 10,8 H_2 + 12,6 CO + 35,8 CH_4 + 60 C_2H_4 + 71,2 C_nH_m \quad (5.4)$$

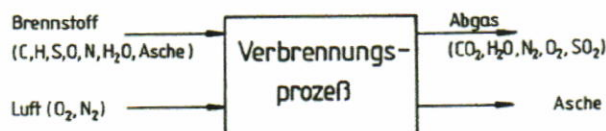
Σε παλαιότερα συγγράμματα εχρησιμοποιείτο και η μονάδα 1 t SKE (1 τόνος ισοδύναμου λιθάνθρακα):

$$1 \text{ t SKE} = 29\,400 \text{ MJ} = 8167 \text{ kWh} = 7000 \text{ Mcal} \quad (5.5)$$

## 15.2 Υπολογισμοί ποσοτήτων σε τέλεια καύση

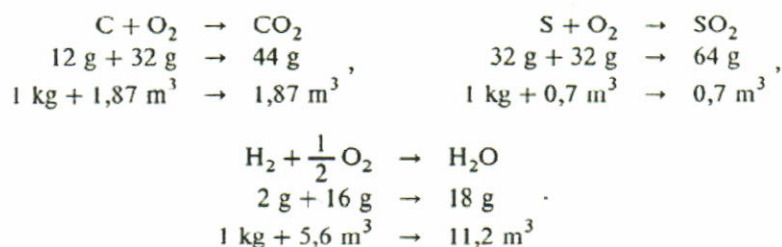
Η ποσοτική διερεύνηση των τεχνικών προβλημάτων καύσης γίνεται με βάση ισοζύγια μάζας και ενέργειας, διεργασίες ροής και κινητικών παραμέτρων των οικείων αντιδράσεων με λήψη υπόψη πολυάριθμων τεχνικών οριακών συνθηκών, και είναι εν γένει εξαιρετικά δυσχερής. Στη συνέχεια θα δώσουμε κάποιες χρήσιμες απλοποιημένες διαδικασίες για προσεγγιστικούς υπολογισμούς.

Ξεκινώντας από το απλό μοντέλο διεργασίας καύσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 15-2, μπορούμε να υπολογίσουμε τη στοιχειομετρική ποσότητα αέρα και καυσαερίου, καθώς και τη σύσταση του καυσαερίου.



Σχήμα 15-2 Αντιδρώντα και προϊόντα μιάς διεργασίας καύσης

Για τις τρεις κύριες αντιδράσεις τέλει καύσης σε στερεά και υγρά καύσιμα, ισχύει στη στοιχειομετρική περίπτωση:



Με βάση τη στοιχειακή ανάλυση των στερεών και υγρών καυσίμων, προκύπτει η στοιχειομετρική ποσότητα οξυγόνου από τη σχέση:

$$O_{\min}^* = 2,67 C + 8 H + S - O \text{ kg Sauerstoff/kg Brennstoff} \quad (5.6)$$

ή αντίστοιχα

$$O_{\min} = 1,867 C + 5,55 H + 0,7 S - 0,7 O \text{ m}^3 \text{ Sauerstoff/kg Brennstoff} \quad (5.7)$$

Στη στοιχειομετρική περίπτωση προκύπτει και η ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα αέρα με βάση την περιεκτικότητα του αέρα σε οξυγόνο 23.2% κατά μάζα, και την πυκνότητα αέρα 1.23 kg/m<sup>3</sup> σε κανονικές συνθήκες:

$$L_{\min} = 8,876 C + 26,44 H + 3,32 S - 3,32 O \text{ m}^3 \text{ Luft/kg Brennstoff} \quad (5.8)$$

Στις εστίες καύσης που χρησιμοποιούνται στην τεχνική για στερεά και υγρά καύσιμα, εφαρμόζεται περίσσεια αέρα, που υποδηλώνεται από το λόγο αέρα λ, οπότε η πραγματική ποσότητα αέρα είναι  $L = \lambda L_{\min}$  και  $\lambda > 1$ .

Οι ειδικές ποσότητες καυσαερίων για  $\lambda = 1$ , προκύπτουν ομοίως με εξίσωση των οικείων συντελεστών στα ισοζύγια μάζας:

$$V_{\min} = 8,876 C + 32 H + 3,32 S - 2,62 O + 0,8 N + 1,22 \text{ Wasser} \quad (5.9)$$

$\text{m}^3 \text{ Rauchgas kg Brennstoff}$

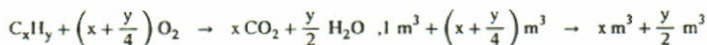
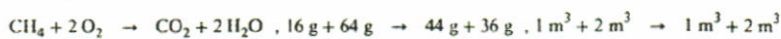
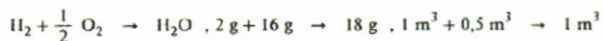
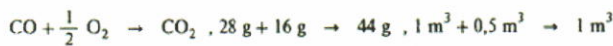
Για  $\lambda > 1$  υπολογίζονται οι πραγματικοί όγκοι καυσαερίων από τη σχέση:

$$V = V_{\min} + (\lambda - 1) L_{\min} \quad (5.10)$$

αφού ο περίσσιος αέρας διέρχεται απλά από την εστία αναλλοίωτος.

Σε πολλές τεχνικές εφαρμογές, για παράδειγμα σε υπολογισμούς συστημάτων αντιρρόπησης και επεξεργασίας καυσαερίου, ενδιαφέρει ο υπολογισμός της σύστασης των καυσαερίων. Εδώ χρησιμοποιούνται και πάλι τα στοιχειακά ισοζύγια και προκύπτουν οι σχέσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 15-3.

#### Reaktionen



#### stöchiometrischer Sauerstoffbedarf

$$O_{\min} = 0,5 \text{ CO} + 0,5 \text{ H}_2 + 2 \text{ CH}_4 + \left(x + \frac{y}{4}\right) \text{ C}_x\text{H}_y \quad (\text{m}^3/\text{m}^3)$$

#### stöchiometrischer Luftbedarf ( $\lambda = 1$ )

$$L_{\min} = 2,381(\text{CO} + \text{H}_2) + 9,524\text{CH}_4 + 4,76 \left(x + \frac{y}{4}\right) \text{ C}_x\text{H}_y \quad (\text{m}^3/\text{m}^3)$$

#### tatsächlicher Luftbedarf ( $\lambda > 1$ )

$$L = \lambda L_{\min}$$

#### Abgasmenge im stöchiometrischen Fall ( $\lambda = 1$ )

$$V_{\min} = \text{CO} + \text{H}_2 + 3 \text{ CH}_4 + \left(x + \frac{y}{2}\right) \text{ C}_x\text{H}_y + \text{N}_2 + \text{CO}_2 +$$

$$0,79 \left[ 2,381 (\text{CO} + \text{H}_2) + 9,524 \text{CH}_4 + 4,76 \left(x + \frac{y}{4}\right) \text{ C}_x\text{H}_y \right] \quad (\text{m}^3/\text{m}^3)$$

#### Abgasmenge im stöchiometrischen Fall ( $\lambda > 1$ )

$$V = V_{\min} + (\lambda - 1) L_{\min}$$

#### Gaszusammensetzung (Vol.-%)

Komponente	$\lambda = 1$	$\lambda > 1$
CO <sub>2</sub>	CO + CH <sub>4</sub> + x C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	CO + CH <sub>4</sub> + x C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>
H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> + 2 CH <sub>4</sub> + 0,5 y C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	H <sub>2</sub> + 2 CH <sub>4</sub> + 0,5 y C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>
N <sub>2</sub> (aus Gas)	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> (aus Gas)	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
O <sub>2</sub> (aus Luft)	-	( $\lambda - 1$ ) 0,21 L <sub>min</sub>
N <sub>2</sub> (aus Luft)	0,79 L <sub>min</sub>	$\lambda$ 0,79 L <sub>min</sub>

### Σχήμα 15-3 Καύση αερίων ουσιών

Από τη σύσταση των καυσαερίων μπορούμε να υπολογίσουμε το λόγο αέρα της καύσης, και μάλιστα με πολύ απλοποιημένες σχέσεις στην περίπτωση της τέλει καύσης:

$$\lambda = \frac{\text{CO}_2 (\text{max})}{\text{CO}_2 (\text{gemessen})} = \frac{1,867 C}{V_{\min} \text{CO}_2 (\text{gemessen})} , \quad (5.11)$$

$$\lambda = \frac{21}{21 - \text{O}_2 (\text{gemessen})} . \quad (5.12)$$

Βέβαια στα παραπάνω υποθέσαμε καύση με ξηρό αέρα. Ακριβέστεροι υπολογισμοί καύσης λαμβάνουν σπρωσδήποτε υπόψη και την υγρασία του αέρα, με πολλαπλασιασμό της απαιτούμενης ποσότητας ξηρού αέρα με τον παράγοντα  $f$

$$f = 1 + \phi \frac{p_s}{p - p_s} , \quad (5.13)$$

όπου  $\phi$  είναι η σχετική υγρασία,  $p$  η πίεση του αέρα,  $p_s$  η μερική πίεση των κορεσμένων ατμών.

Πίνακας 15-3 Σύσταση καυσαερίων ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

Komponente	$\lambda = 1$	$\lambda > 1$
CO <sub>2</sub>	1,867 C	1,867 C
H <sub>2</sub> O	11,2 H	11,2 H
SO <sub>2</sub>	0,7 S	0,7 S
N <sub>2</sub>	0,8 N + 0,79 L <sub>min</sub>	0,8 N + $\lambda$ 0,79 L <sub>min</sub>
H <sub>2</sub> O	1,22 Wasser	1,22 Wasser
O <sub>2</sub>	0	( $\lambda - 1$ ) 0,21 L <sub>min</sub>

Πίνακας 15-4 Εμπειρικές σχέσεις από στατιστική επεξεργασία, για εκτιμήσεις στοιχειομετρικών ποσοτήτων αέρα και καυσαερίου ( $H_u$  σε  $\text{kJ}/\text{kg}$ , αντ.  $\text{kJ}/\text{Nm}^3$ )

Brennstoff	stöchiometrischer Luftbedarf	stöchiometrische Abgasmenge
Stein- und Braunkohlen	$\frac{0,239 H_u + 550}{990} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$\frac{0,215 H_u + 1634}{990} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
Heizöl	$\frac{0,239 H_u - 1115}{808} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	$\frac{0,299 H_u - 3025}{808} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
Schwachgas	$\frac{0,207 H_u - 61,4}{1000} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$	$\frac{0,171 H_u + 929}{1000} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$
Reichgas	$\frac{0,239 H_u - 173}{1000} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$	$\frac{0,216 H_u + 757}{1000} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$

Συχνά οι υπολογισμοί ποσοτήτων με βάση τις σχέσεις στοιχειομετρίας σε μία εστία καύσης είναι χρονοβόροι. Έτσι μπορεί κανείς να βασίζεται και σε εμπειρικές σχέσεις όπως αυτές που δίνει ο Πίνακας 15-4. Τα σφάλματα που προκύπτουν δεν ξεπερνούν τις λίγες ποσοστιαίες μονάδες.

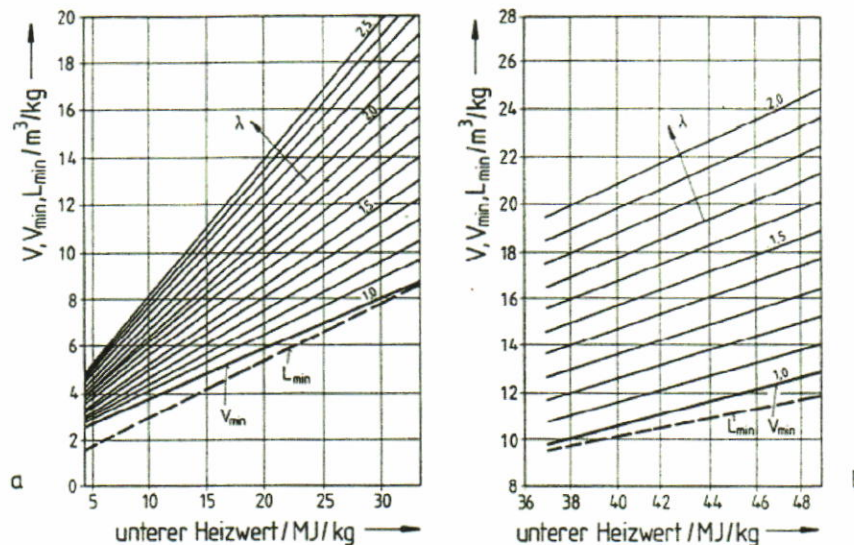
Ακόμη πίο παραστατική και γρήγορη είναι η χρήση διαγραμμάτων όπως αυτά στο Σχήμα 15-4. Εδώ οι παραμετρικές καμπύλες είναι ευθείες γραμμές που προκύπτουν από τις παρακάτω γραμμικές σχέσεις:

$$L_{\min} = C_1 H_u + C_2 , \quad (5.14)$$

$$V_{\min} = C_3 H_u + C_4 \quad (5.15)$$

Βέβαια, εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι η επιδίωξη ενός μέγιστου βαθμού απόδοσης στις τεχνικές εφαρμογές με καύση, ικανοποιείται με την κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση του λόγου αέρα ώστε αυτός να πλησιάζει τη μονάδα.

Από την άλλη μεριά βέβαια, κατά την καύση στερεών και υγρών καυσίμων απαιτείται πάντοτε κάποια περίσσεια αέρα για την επίτευξη της τέλει καύσης, δεδομένου ότι δεν είναι εφικτή η πλήρης ανάμιξη (σε μοριακό επίπεδο) του καυσίμου με τον αέρα.



Σχήμα 15-4 Συσχέτιση στοιχειομετρικών ποσοτήτων αέρα και καυσαερίου με την κατώτερη θερμογόνο δύναμη (a) για στερεά καύσιμα (b) για υγρά καύσιμα

### 15.3 Ειδικές όψεις των διεργασιών καύσης

Για μιά κατά το μέτρον του δυνατού τέλεια μετατροπή του εισαγόμενου καυσίμου θα πρέπει να ικανοποιούνται μεταξύ άλλων οι παρακάτω απαιτήσεις:

- ✓ Επαρκώς μεγάλη ποσότητα αέρα
- ✓ Επαρκώς μεγάλη περιεκτικότητα αέρα σε οξυγόνο
- ✓ Επαρκώς διαστασιοποιημένος θάλαμος καύσης
- ✓ Ικανή απαγωγή των καυσαερίων
- ✓ Επίτευξη της θερμοκρασίας ανάφλεξης για έναρξη της καύσης
- ✓ Επαρκώς υψηλή ταχύτητα αντίδρασης για μετατροπή του καυσίμου

Ιδιαίτερα η πρώτη απαίτηση είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επίτευξη τέλει καύσης. Όπως δείχνει ο Πίνακας 15-5, μπορούμε να διαχωρίσουμε τρεις πιθανές καταστάσεις όσον αφορά τη στοιχειομετρία της καύσης, στις οποίες προκύπτει διαφορετική σύσταση του καυσαερίου. Η τρίτη αναφερόμενη περίπτωση της ατελούς καύσης δέον όπως αποφεύγεται στις εστίες καύσης, αφού η παραγωγή CO δημιουργεί προβλήματα ρύπανσης της ατμόσφαιρας αλλά και χειροτερεύει το βαθμό απόδοσης.

Πίνακας 15-5 Σύνοψη πιθανών καταστάσεων στοιχειομετρίας καύσης

Atmosphäre	λ-Wert	Verbrennung	Abgasanteile
oxidierend (luftrein)	$\lambda > 1$	ungestört	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
neutral (luftsatt)	$\lambda = 1$	stöchiometrisch	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
reduzierend (luftarm)	$\lambda < 1$	unvollständig	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>

Με έλεγχο των καυσαερίων σχετικά με το περιεχόμενό τους σε O<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub> και εισαγωγή των σημείων λειτουργίας της εστίας σε κατάλληλο διάγραμμα CO<sub>2</sub> – CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, (βλ. Σχήμα 15-5), μπορούμε μέσω του τριγώνου του Bunte να πάρουμε μία ιδέα για την ποιότητα της καύσης. Εάν η παράμετρος  $\lambda$  πάρει την τιμή 0 τότε έχουμε τέλεια καύση, ενώ όσο μεγαλύτερες τιμές  $\lambda > 0$  υπολογίζονται, τόσο πλιό ατελής είναι η καύση.

Μία σημαντική εννοια στους υπολογισμούς καύσης είναι η αδιαβατική, καθώς και η θεωρητική θερμοκρασία καύσης.

Ενα ισοζύγιο στην απλή εστία καύσης που παρουσιάσαμε στο Σχήμα 15-6, δίνει την παρακάτω σχέση για την περίπτωση της αδιαβατικής εστίας (ουδεμία εκμετάλλευση της θερμότητας καύσης!):

$$\dot{m}_B H_u + \dot{m}_B L c_{pL} (T_L - T_U) = \dot{m}_B V c_{pR} (T_R - T_U) \quad (5.16)$$

όπου  $\dot{m}_B$  η παροχή καυσίμου (kg/s),  $T_L$  η θερμοκρασία αέρα,  $T_R$  η θερμοκρασία των καυσαερίων και  $T_U$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

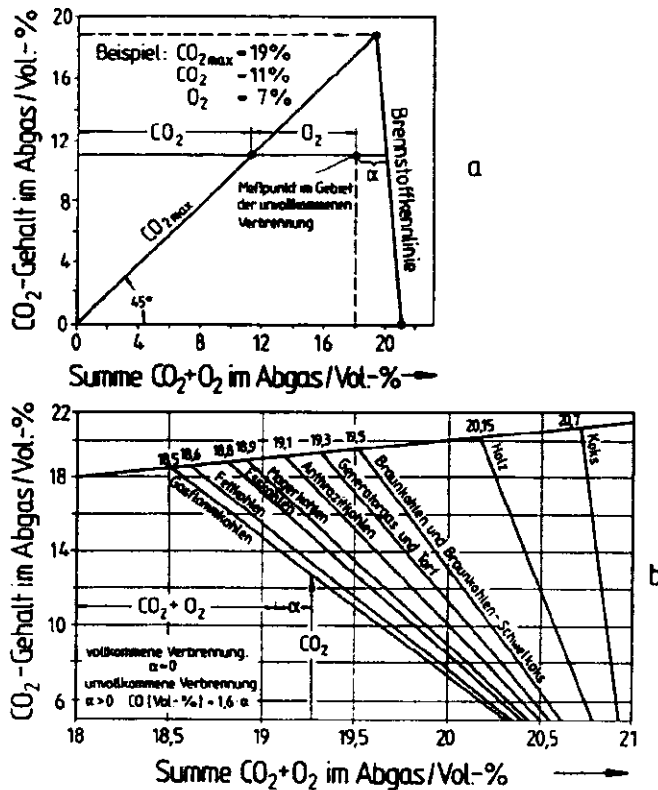
Εάν το καύσιμο προθερμαίνεται, πρέπει να προστεθεί στο αριστερό σκέλος ο όρος  $\dot{m}_B c_{pB} (T_B - T_U)$ .

Στην απλούστερη περίπτωση, χωρίς προθέρμανση αέρα και καυσίμου, προκύπτει για την αδιαβατική θερμοκρασία καύσης:

$$T_R = \frac{H_u}{V c_{pR}} + T_U \quad (5.17)$$

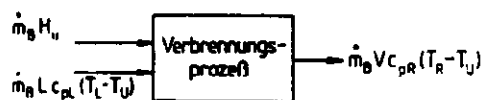
και για την περίπτωση  $\lambda=1$  έχουμε τον ελάχιστο (ειδικό) όγκο καυσαερίων,  $V=V_{min}$ , οπότε έχουμε τη μέγιστη θεωρητική θερμοκρασία καύσης:

$$T_V = \frac{H_u}{V_{min} c_{pL}} \quad (5.18)$$



Σχήμα 15-5 Τρίγωνο του Bunte για έλεγχο τελειότητας καύσης (a) αρχή λειτουργίας (b) τρίγωνα Bunte που αντιστοιχούν σε διάφορα είδη καυσίμων

Εδώ θα πρέπει να επεξηγηθεί ότι το  $V_{min}$  εξαρτάται από τη θερμογόνο δύναμη με μία συνάρτηση της μορφής  $V_{min} = C_3 H_u + C_4$ , οπότε και το ύψος της θεωρητικής θερμοκρασίας καύσης εξαρτάται άμεσα από την τιμή της θερμογόνου δυνάμεως. Ενδεικτικές τιμές για τα μεγέθη αυτά περιέχει ο Πίνακας 15-6, μαζί με τις επιτυγχανόμενες στην πράξη θερμοκρασίες καύσης για σύγκριση. Αυτές οι τελευταίες βέβαια είναι πολύ μικρότερες, αφενός λόγω της θερμότητας που μεταβιβάζεται στο εργαζόμενο μέσο του λέβητα και των απωλειών της εστίας, αφετέρου λόγω της αναπόφευκτης καύσης με  $\lambda > 1$  για στερεά και υγρά καύσιμα.



Σχήμα 15-6 Επεξήγηση της έννοιας της αδιαβατικής θερμοκρασίας καύσης

Οπότε η θερμοκρασία των καυσαερίων προκύπτει μειωμένη με βάση την παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned} m_B [H_u + c_{pR} (T_B - T_L) + c_{pL} L (T_L - T_U)] = \\ \dot{Q}_{\text{nutz}} + \dot{Q}_{\text{verd}} + m_B c_{pR} V (T_R - T_L) . \end{aligned} \quad (5.19)$$

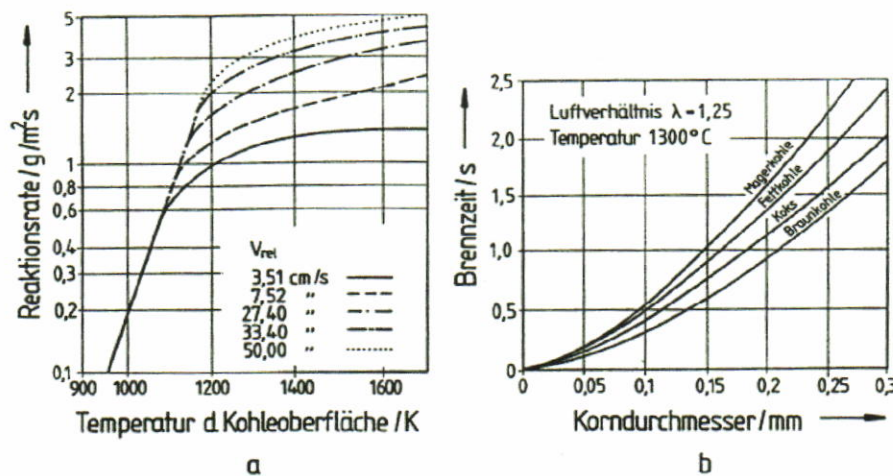
Ενα άλλο φαινόμενο που παρατηρείται στις εστίες καύσης σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες ( $> 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ), είναι αυτό της διάσπασης του  $\text{CO}_2$  και του υδρατμού προς  $\text{CO}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{H}$ , ακόμη και των υπόλοιπων μορίων  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  (dissociation), αντιδράσεις δηλαδή ενδόθερμες που μειώνουν τη θερμοκρασία της εστίας. Ετσι, άνω των  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$  απαιτούνται πιά πολύπλοκοι υπολογισμοί.



Πίνακας 15-6 Τιμές θεωρητικής θερμοκρασίας καύσης σε σύγκριση με τις επιτυγχανόμενες στην πράξη θερμοκρασίες θαλάμου καύσης

Brennstoff	Heizwert $H_u$ (kJ/kg)	theoretische Verbrennungs- temperatur (°C)	praktische Feuer- raumtemperatur (°C)
Steinkohle	30 000	2300	1200...1500
Braunkohle, trocken	20 000	1500	1000...1200
Heizöl	40 000	2000	1200...1500
Erdgas	36 000	2000	1200...1600

Τέλος, λίγα λόγια για την κινητική των αντιδράσεων: Ο ρυθμός μετατροπής του καυσίμου με τον αέρα σε καυσαέρια, πχ για την ειδική περίπτωση της καύσης του λιθάνθρακα, εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη θερμοκρασία και άνω των 900 °C επίσης και από την ταχύτητα ροής του αέρα στην εστία (βλ. Σχήμα 15-7).



Σχήμα 15-7 Ταχύτητες καύσης σε λιθάνθρακα (a) σε εξάρτηση από τη θερμοκρασία (b) χρόνος καύσης σε εξάρτηση από τη μέση τιμή διαμέτρου του κόκκου του καυσίμου

Η εξέλιξη της καύσης του λιθάνθρακα γίνεται έτσι, ώστε αρχικά οι κόκκοι του υφίστανται ένα διαχωρισμό των υγρών συστατικών από το κώκ. Τα υγρά συστατικά εξατμίζονται και διαχωρίζονται ενώ στη συνέχεια ολοκληρώνεται η μετατροπή του κώκ σε CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub> και τέλος μετατρέπονται τα αέρια στα τελικά προϊόντα.

Στις εστίες που καίνε κονιοποιημένο λιθάνθρακα, η μέση διάμετρος των κόκκων είναι περί τα 10  $\mu$ m, σε ρευστοποιημένες κλίνες περί το 1 cm και σε απλές εστίες (σόμπες κτλ) οι κόκκοι μπορεί να φτάνουν και αρκετά cm διάμετρο. Έτσι προκύπτουν για τυπικές θερμοκρασίες τάξης 1300 °C σε εστίες αλεσμένου λιθάνθρακα χρόνοι καύσης κόκκου μερικών δευτερολέπτων, σε εστίες με ρευστοποιημένη κλίνη (900 °C) χρόνοι καύσης κόκκου τάξης 20 min και σε απλές εστίες (1200 °C), διάρκειες καύσης τάξης μίας ώρας.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

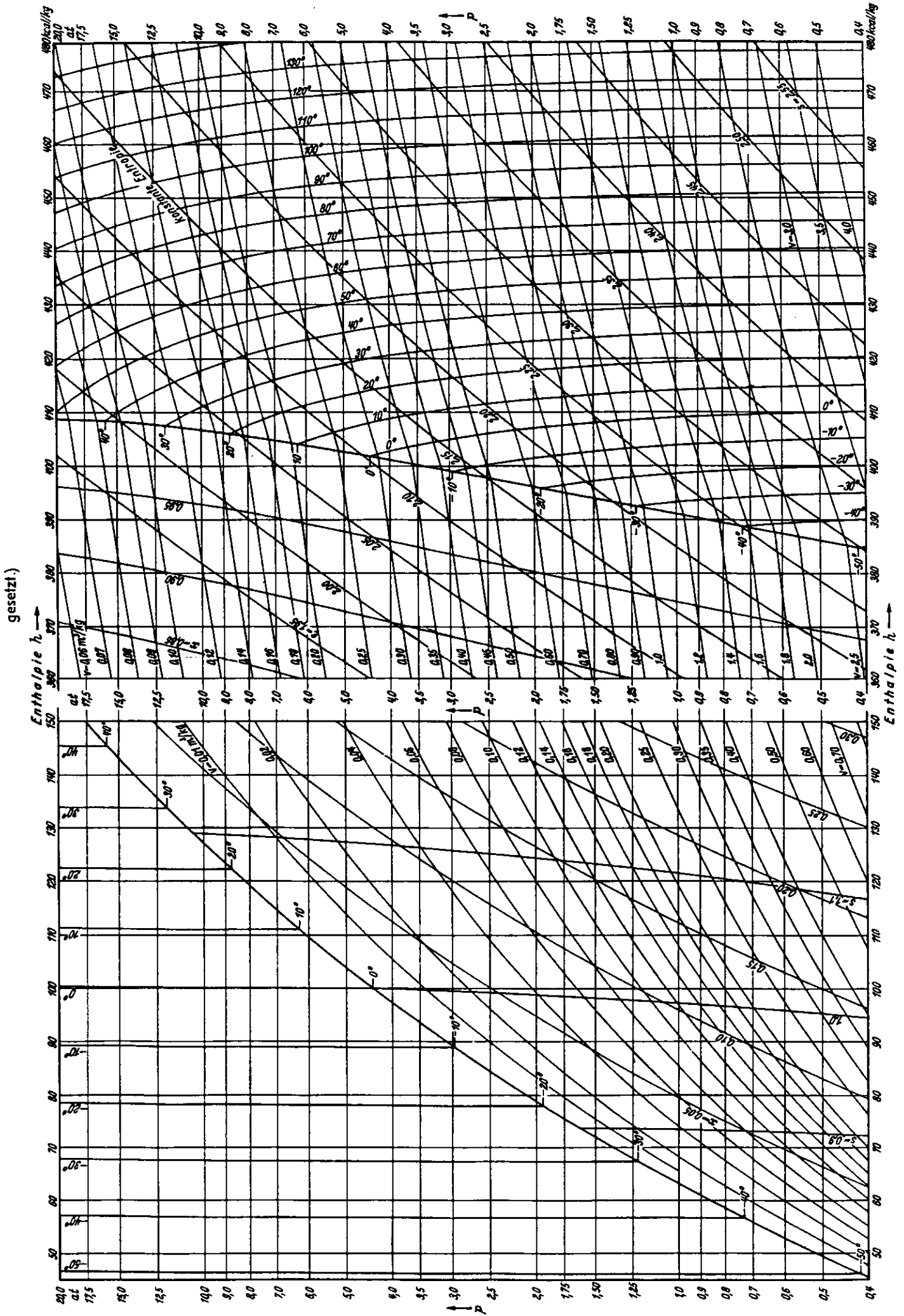
### Συντελεστές Μετατροπής Μεταξύ Αγγλοσαξωνικού Συστήματος Μονάδων και SI

Φυσικό μέγεθος	Σύμβολο	Συντελεστής μετατροπής
Area	$A$	1 ft <sup>2</sup> = 0.0929 m <sup>2</sup> 1 in <sup>2</sup> = 6.452 × 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup>
Density	$\rho$	1 lb <sub>m</sub> /ft <sup>3</sup> = 16.018 kg/m <sup>3</sup> 1 slug/ft <sup>3</sup> = 515.379 kg/m <sup>3</sup>
Heat, energy, or work	$Q$ or $W$	1 Btu = 1055.1 J 1 cal = 4.186 J 1 ft·lb <sub>f</sub> = 1.3558 J 1 hp/h = 2.685 × 10 <sup>6</sup> J
Force	$F$	1 lb <sub>f</sub> = 4.448 N
Heat flow rate	$q$	1 Btu/h = 0.2931 W 1 Btu/s = 1055.1 W
Heat flux	$q/A$	1 Btu/(h·ft <sup>2</sup> ) = 3.1525 W/m <sup>2</sup>
Heat transfer coefficient	$h$	1 Btu/(h·ft <sup>2</sup> ·°F) = 5.678 W/(m <sup>2</sup> ·K)
Length	$L$	1 ft = 0.3048 m 1 in = 2.54 cm 1 mile = 1.6093 km
Mass	$m$	1 lb <sub>m</sub> = 0.4536 kg 1 slug = 14.594 kg
Mass flow rate	$\dot{m}$	1 lb <sub>m</sub> /h = 0.000126 kg/s 1 lb <sub>m</sub> /s = 0.4536 kg/s
Power	$\dot{W}$	1 hp = 745.7 W 1 ft/(lb <sub>f</sub> ·s) = 1.3558 W 1 Btu/s = 1055.1 W 1 Btu/h = 0.293 W
Pressure	$p$	1 lb <sub>f</sub> /in <sup>2</sup> = 6894.8 Pa (N/m <sup>2</sup> ) 1 lb <sub>f</sub> /ft <sup>2</sup> = 47.88 Pa (N/m <sup>2</sup> ) 1 atm = 101.325 Pa (N/m <sup>2</sup> )
Radiation	$I$	1 langley (Ly) = 41.860 J/m <sup>2</sup>
Specific heat capacity	$c$	1 Btu/(lb <sub>m</sub> ·°F) = 4187 J/kg·K
Internal energy or enthalpy	$e$ or $h$	1 Btu/lb <sub>m</sub> = 2326.0 J/kg 1 cal/g = 4184 J/kg
Temperature	$T$	$T(^{\circ}\text{R}) = (\frac{9}{5})T(\text{K})$ $T(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} [T(^{\circ}\text{C})] + 32$ $T(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} [T(\text{K}) - 273.15] + 32$
Thermal conductivity	$k$	1 Btu/(h·ft·°F) = 1.731 W/(m·K)
Thermal resistance	$R_{th}$	[Btu/(h·ft <sup>2</sup> ·°F)] <sup>-1</sup> = 1.8958 W/(m <sup>2</sup> ·K)
Velocity	$V$	1 ft/s = 0.3048 m/s 1 mile/h = 0.44703 m/s
Viscosity, dynamic	$\mu$	1 lb <sub>m</sub> /(ft·s) = 1.488 N/(s·m <sup>2</sup> ) 1 cP = 0.00100 N/(s·m <sup>2</sup> )
Viscosity, kinematic	$\nu$	1 ft <sup>2</sup> /s = 0.09029 m <sup>2</sup> /s 1 ft <sup>2</sup> /h = 2.581 × 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s
Volume	$V$	1 ft <sup>3</sup> = 0.02832 m <sup>3</sup> 1 in <sup>3</sup> = 1.6387 × 10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> 1 gal (U.S. liq.) = 0.003785 m <sup>3</sup>
Volumetric flow rate	$\dot{Q}$	1 ft <sup>3</sup> /min = 0.000472 m <sup>3</sup> /s

Tafel B

Mollier log p,h-Tafel von Ammoniak

(Nach dem Diagramm des Bureau of Standards. In der Mitte ist aus dem Naßdampfgebiet ein Stück fortgelassen. Bei 0°C ist  $h' = 1,000 \text{ kcal/kg}$ ,  $s' = 1,000 \text{ kcal/kg K}$  gesetzt.)



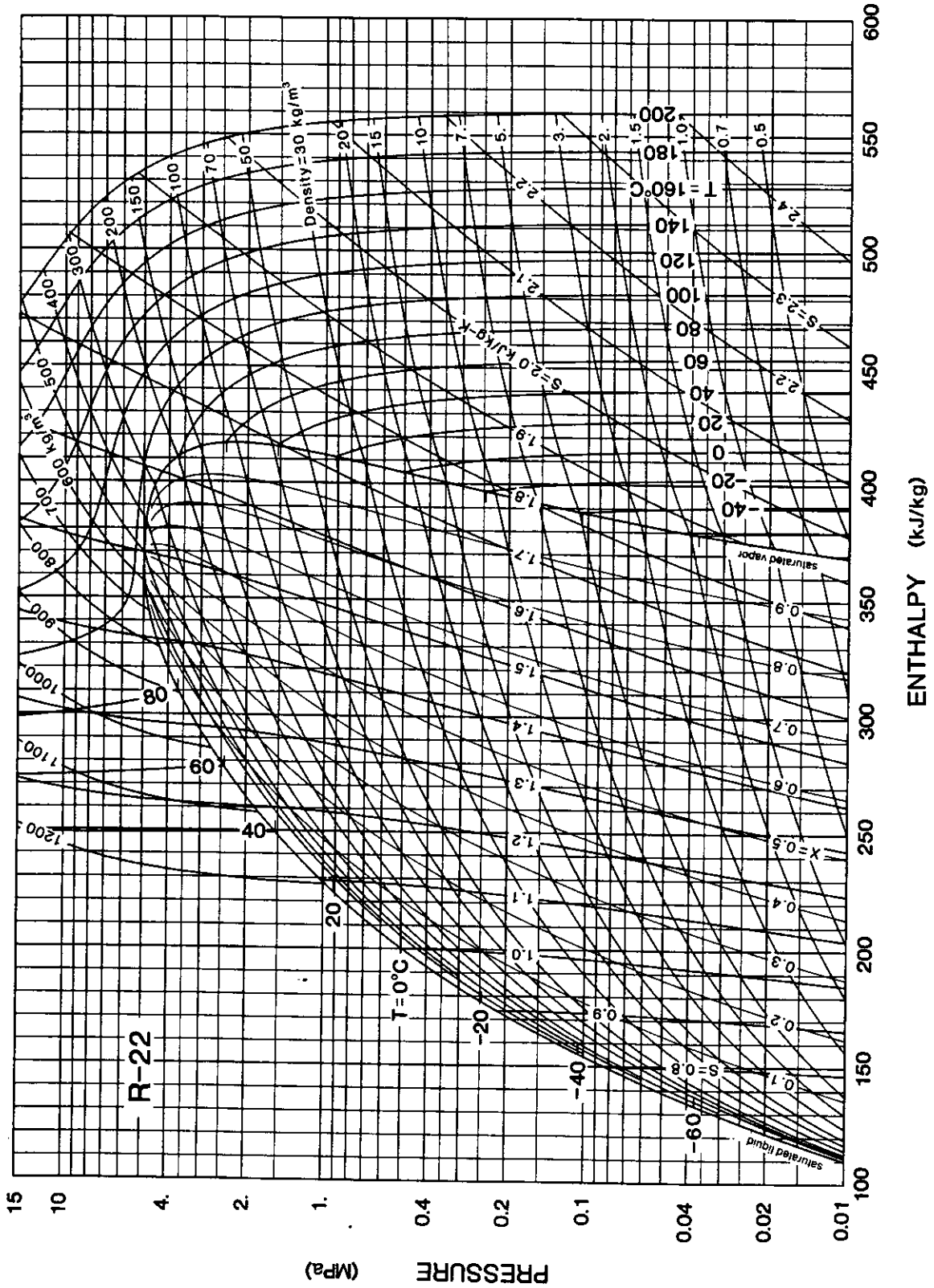


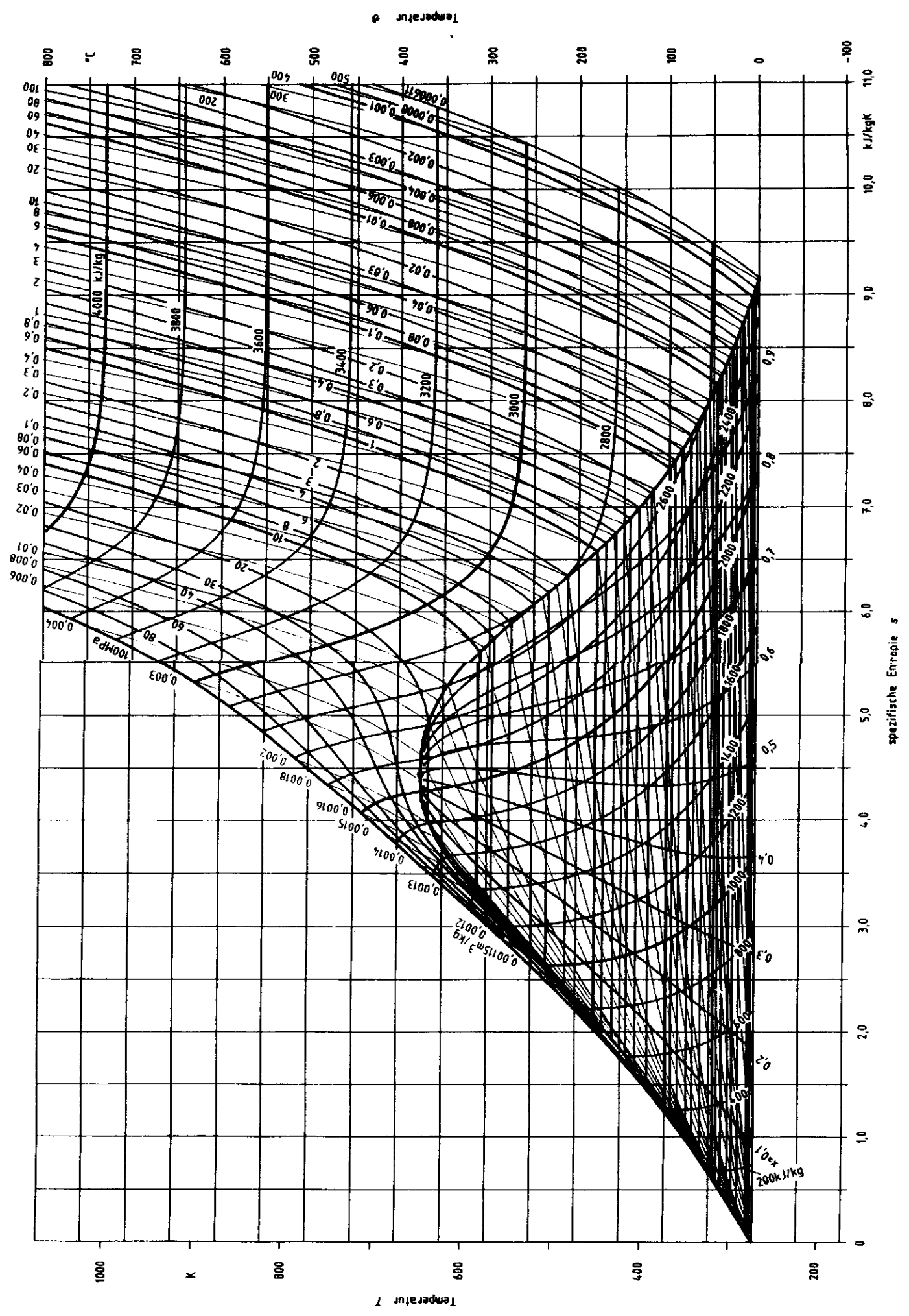
Fig. 4 Pressure-Enthalpy Diagram for Refrigerant 22

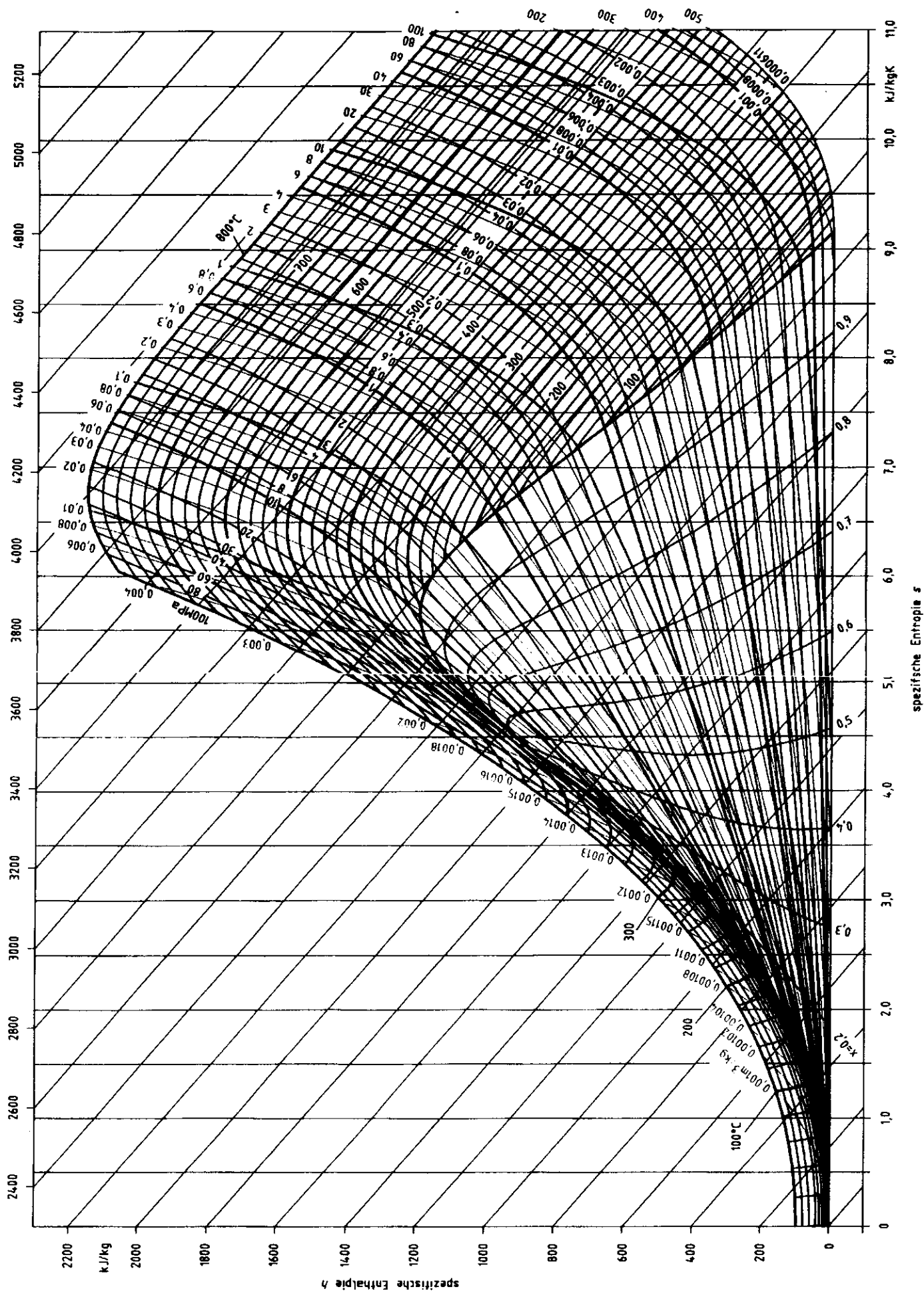
Temperature scale on the right edge of the page:

- 1.96
- 0.50
- 10.00
- 20.00
- 30.00
- 40.00
- 50.00
- 60.00
- 70.00
- 80.00
- 90.00
- 100.00
- 110.00
- 120.00
- 130.00
- 140.00
- 150.00
- 160.00
- 170.00
- 180.00
- 190.00
- 200.00



7. s-Diagramm für Wasser und Wasserdampf





**Γραπτή δοκιμασία στη  
ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΟΥΣΙΩΝ**

Τρίτη 28.1.1992, ώρα 13:00  
Διάρκεια εξέτασης 3:00 ώρες

1. Ο συμπιεστής μίας ψυκτικής μηχανής με αμμωνία, συμπιέζει ατμό αμμωνίας από τους  $-25^{\circ}\text{C}$  και  $x=0.95$ , μέχρι τα 12.5 bar, με ισεντροπικό βαθμό απόδοσης 0.85. Ο συμπιεσμένος ατμός ψεκάζεται σε ένα συμπυκνωτή, όπου συμπυκνώνεται εντελώς και η υγρή πλέον αμμωνία υποψύχεται στους  $+15^{\circ}\text{C}$ . Μέσα από μία στραγγαλιστική βαλβίδα, οδηγείται το υγρό στον εξατμιστήρα, όπου ατμοποιείται στους  $-25^{\circ}\text{C}$ . Ο ατμός αναρροφάται και πάλι από το συμπιεστή. Μ'αυτή την ψυκτική διάταξη θα πρέπει να παράγονται 360 kg πάγος την ώρα από νερό θερμοκρασίας  $+20^{\circ}\text{C}$  (περιβάλλοντος).

Ειδική θερμοχωρητικότητα νερού  $c_p = 4.186 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ , ενθαλπία τήξης πάγου  $r = 333 \text{ kJ/kg}$ .

- Να παρασταθεί η διεργασία σε διάγραμμα  $T-s$ . Πόσο είναι το περιεχόμενο σε ατμό της αμμωνίας στο τέλος του στραγγαλισμού; (2 μον.)
- Πόση είναι η ψυκτική ισχύς και ποιά η ροή μάζας της αμμωνίας μέσα από τη διάταξη; (1 μον.)
- Πόση θερμότητα αποδίδεται στο νερό ψύξης στο συμπυκνωτή, και πόση είναι η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα του συμπιεστή, αν ληφθεί υπόψη μηχανικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή 90%; (1 μον.)
- Ποιός ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης και ποιές οι απώλειες εξεργειας στα επι μέρους τμήματα; (1 μον.)

2. Μία διάταξη ατμοστροβίλου λειτουργεί με ατμό 150 bar και  $500^{\circ}\text{C}$  και απορρίπτει ατμό στο συμπυκνωτή σε πίεση 0.25 bar. Η διάταξη λειτουργεί με βάση τον βελτιωμένο κύκλο Clausius-Rankine με δύο τουρμπίνες και μία ενδιάμεση υπερθέρμανση στους  $500^{\circ}\text{C}$ , όταν φτάνει ο ατμός την οριακή καμπύλη ( $x=1$ ), εξερχόμενος από την τουρμπίνα υψηλής πίεσης.

Να θεωρηθεί ότι οι εκτονώσεις στις δύο τουρμπίνες είναι ισεντροπικές ( $\eta_{sT} = 1$ ), όπως και η συμπίεση του συμπυκνώματος από την αντλία ( $\eta_{sV} = 1$ ).

Ο λέβητας λειτουργεί με πετρέλαιο, θερμογόνου δύναμης  $H_u = 10,000 \text{ kcal/kg}$   
Θερμοκρασία περιβάλλοντος  $20^{\circ}\text{C}$ .

- Να γίνει παράσταση της διεργασίας σε διαγράμματα  $T,s$  και  $h,s$ . Πόσο περιεχόμενο νερού έχει ο ατμός κατά την είσοδο στο συμπυκνωτή; (2.5 μον.)
- Ποιός ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης και ποιές οι απώλειες εξεργειας στα επι μέρους τμήματα; (1.5 μον.)
- Πόση βελτίωση στον εξεργειακό βαθμό απόδοσης έχουμε σε σχέση με μια απλή εγκατάσταση που λειτουργεί με τον συνήθη κύκλο Clausius-Rankine (χωρίς δηλ. ενδιάμεση υπερθέρμανση); (1 μον.)



**Γραπτή δοκιμασία στη  
ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΟΥΣΙΩΝ**

Παρασκευή 31.1.1992, ώρα 09:00  
Διάρκεια εξέτασης 2:00 ώρες

Σε μία συνδυασμένη διεργασία ατμού νερού - ατμού αμμωνίας, οδηγείται στην τουρμπίνα ατμού νερού υπέρθερμος ατμός 150 bar και 500°C, ο οποίος εκτονώνεται μέχρι τα 10 bar με  $\eta_{sT}=0.82$

Ο ατμός που εξέρχεται από την τουρμπίνα ατμού νερού, αποδίδει θερμότητα μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, σε υγρή αμμωνία πίεσης 15 bar, την οποία θερμαίνει στη θερμοκρασία βρασμού, την ατμοποιεί, και στη συνέχεια υπερθερμαίνει τον ατμό της μέχρι τους 140°C.

Ο ατμός της αμμωνίας εκτονώνεται στη συνέχεια σε μία τουρμπίνα μέχρι τα 5 bar με  $\eta_{sT}=0.70$  και στη συνέχεια συμπυκνώνεται εντελώς σε ένα ψύκτη με νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος (0°C). Στη συνέχεια, η υγρή αμμωνία συμπιέζεται μέχρι τα 15 bar από την αντλία συμπυκνώματος της αμμωνίας.

Στην έξοδο του από τον εναλλάκτη, ο ατμός νερού έχει συμπυκνωθεί εντελώς ( $x=0$ ).

Οι δύο τουρμπίνες μαζί αποδίδουν συνολικά ισχύ 400 MW. Οι δύο αντλίες συμπυκνώματος να θεωρηθεί ότι συμπιέζουν ισεντροπικά ( $\eta_{sV}=1$ ), για απλοποίηση.

- Να παρασταθούν οι διεργασίες στα δύο εργαζόμενα μέσα σε διαγράμματα T-s. (2 μον.)
- Να παρασταθεί ο κύκλος της αμμωνίας στο διάγραμμα  $\log p - h$  που επισυνάπτεται. (1 μον.)
- Πώς κατανέμεται η ισχύς των 400 MW στις τουρμπίνες ατμού νερού και ατμού αμμωνίας; (1 μον.)
- Ποιό θεωρητικό βαθμό απόδοσης έχει η διάταξη; (να ληφθούν υπόψη και οι καταναλώσεις των δύο αντλιών συμπυκνώματος) (1 μον.)
- Ποιές οι παροχές μάζας και όγκου των δύο μέσων στην έξοδο των αεριοστροβίλων; (1 μον.)
- Ποιές παροχές όγκου θα απέδιδαν οι τουρμπίνες, εάν η συμπύκνωση γινόταν σε σταθερή πίεση συμπυκνωτή 0.04 bar; (1 μον.)
- Ποιός ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης της διάταξης, και ποιές οι επι μέρους απώλειες εξέργειας στα διάφορα τμήματα; (Να θεωρηθεί ότι ο ατμολέβητας θερμαίνεται με πετρέλαιο, θερμογόνου δύναμης  $H_u = 10,000 \text{ kcal/kg}$ ). (2 μον.)
- Να γίνει το διάγραμμα T-s του εναλλάκτη, και να παρασταθούν επάνω οι απώλειες εξέργειας. (1 μον.)

**Εξετάσεις για Κατάταξη Πτυχιούχων στο Π.Θ.  
Μάθημα: ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΟΥΣΙΩΝ**

Παρασκευή 4.12.1992, ώρα 14:00  
Διάρκεια εξέτασης 2:00

Παρακάτω περιγράφεται η λειτουργία μιάς διάταξης ατμοστροβίλου:

Νερό θερμοκρασίας  $45.8^{\circ}\text{C}$  συμπιέζεται μέχρι την κρίσιμη πίεση, ατμοποιείται και ο ατμός του υπερθερμαίνεται μέχρι τους  $400^{\circ}\text{C}$ .

Ο ατμός που προκύπτει στραγγαλίζεται στα 100 bar και στη συνέχεια υπερθερμαίνεται και πάλι στους  $400^{\circ}\text{C}$ , οπότε οδηγείται στο τμήμα υψηλής πίεσης της τουρμπίνας. Εκεί υφίσταται εκτόνωση μέχρι τα 15 bar, με ισεντροπικό βαθμό απόδοσης 0.82 .

Στη συνέχεια ο ατμός υφίσταται ακόμη μιὰ υπερθέρμανση στους  $400^{\circ}\text{C}$  και μετά εκτονώνεται στο τμήμα χαμηλής πίεσης της τουρμπίνας, με ισεντροπικό βαθμό απόδοσης 0.72. Από την έξοδο της τουρμπίνας, ο ατμός εισέρχεται στο συμπυκνωτή, όπου συμπυκνώνεται εντελώς σε πίεση 0.1 bar.

- Να γίνει σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας της εγκατάστασης (0.5 μον).
- Να παρασταθεί η διεργασία σε διάγραμμα T-s, με τις τιμές των μεταβλητών  $p, T, s, h, u$  στα οριακά σημεία (3 μον).
- Πόση θερμότητα προσδίδεται σε κάθε kg ατμού στο λέβητα και τους δύο υπερθερμαντήρες; (1 μον)
- Πόση θερμότητα απορρίπτεται στο συμπυκνωτή (0.5 μον).
- Ποιός είναι ο θερμικός και ποιός ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης; (1 μον)
- Πόσο επι πλέον έργο θα μπορούσε να κερδηθεί αν αντικατασταθεί ο στραγγαλισμός από την κρίσιμη πίεση μέχρι τα 100 bar, από εκτόνωση με κατάλληλη τουρμπίνα με  $\eta_{sT}=0.72$ , και στη συνέχεια υπερθέρμανση στους  $400^{\circ}\text{C}$ . (1 μον)
- Ποιές οι απώλειες εξέργειας στα επιμέρους τμήματα; (παράσταση στο διάγραμμα T-s). (2 μον)
- Ποιά είναι η πρώτη παραπέρα βελτίωση που θα προτεινάτε για την παραπάνω διάταξη; (1 μον)

1. Με τη διάταξη ψυγείου - αντλίας θερμότητας του σχήματος, επιδιώκεται η ταυτόχρονη ικανοποίηση των θερμικών αναγκών ενός κτιρίου γραφείων, και των ψυκτικών αναγκών μίας εγκατάστασης αποθήκευσης πάγου. Η θερμοκρασία της εγκατάστασης αποθήκευσης πάγου ( $T_1$ ) και η θερμοκρασία του εσωτερικού του κτιρίου γραφείων ( $T_2$ ), υπαγορεύονται από το σχεδιασμό και είναι σταθερές. Σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η θερμορροή από το περιβάλλον προς το εσωτερικό της εγκατάστασης αποθήκευσης πάγου δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_1 = C_1 (T_0 - T_1)$$

και αντίστοιχα η θερμορροή απωλείν από το εσωτερικό του κτιρίου προς το περιβάλλον:

$$\dot{Q}_2 = C_2 (T_2 - T_0)$$

όπου  $T_0$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος, και  $C_1, C_2$  γνωστές σταθερές (θερμοπερατότητες).

Το σύστημα ψυγείου - αντλίας θερμότητας θεωρείται ότι λειτουργεί αντιστρεπτά, και ευρίσκεται σε θερμική επαφή με το περιβάλλον, από το οποίο δέχεται τη θερμορροή  $\dot{Q}_0$ .

- (i) Να προσδιορίσετε την απαιτούμενη ισχύ  $\dot{W}$  σαν συνάρτηση των  $T_0, T_1, T_2, C_1, C_2$ .
- (ii) Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_0$  μπορεί να μεταβάλλεται ημερησίως και εποχιακά, ενώ οι  $T_1$  και  $T_2$  παραμένουν σταθερές, να προσδιορίσετε τη βέλπστη θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_{0,opt}$  που ελαχιστοποιεί την απαιτούμενη ισχύ  $\dot{W}$ .
- (iii) Να δείχθει ότι η βέλπστη κατάσταση που περιγράφηκε παραπάνω, αντιστοιχεί στην ειδική περίπτωση όπου το σύστημα ψυγείου - αντλίας θερμότητας δεν εναλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον ( $\dot{Q}_0 = 0$ ).
- (iv) Ποιός είναι ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας  $\dot{S}_{gen}$  του συνολικού συστήματος, που συμπεριλαμβάνει τη διάταξη ψυγείου - αντλίας θερμότητας, το κτίριο και την εγκατάσταση αποθήκευσης πάγου;
- (v) Να δείχθει ότι ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών ( $T_0$ ), η απαιτούμενη ισχύς  $\dot{W}$  είναι ευθέως ανάλογη του ρυθμού παραγωγής εντροπίας  $\dot{S}_{gen}$ .

2. Ένα ιδανικό αέριο διαφεύγει από ένα μεγάλο δοχείο πίεσεως του οποίου η πίεση διατηρείται σταθερή (τροφοδοτώντας το με συμπιεστή), οπότε το αέριο στο εσωτερικό του δοχείου ευρίσκεται στην κατάσταση  $p_0, u_0, T_0$  και ταχύτητα αερίου  $w_0 = 0$ . Η οπή διαφυγής είναι διαμορφωμένη σε ένα ιδανικά σχεδιασμένο συγκλίνον ακροφύσιο με τελική διατομή  $A_e$ , (που είναι και η στενότερη διατομή), και οδηγεί σε ένα χώρο χαμηλότερης πίεσης  $p_a$ .

- (i) Με εφαρμογή του 1ου Θ.Α. και θεωρώντας αντιστρεπτή αδιαβατική εκτόνωση του αερίου στην οπή διαφυγής, να υπολογίσετε την ταχύτητα  $w_e$  στη στενότερη διατομή.
- (ii) Να δείχθει ότι η ροή μάζας που περνά από την οπή διαφυγής δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{M} = A \psi \sqrt{2 \frac{\rho_0}{v_0}}$$

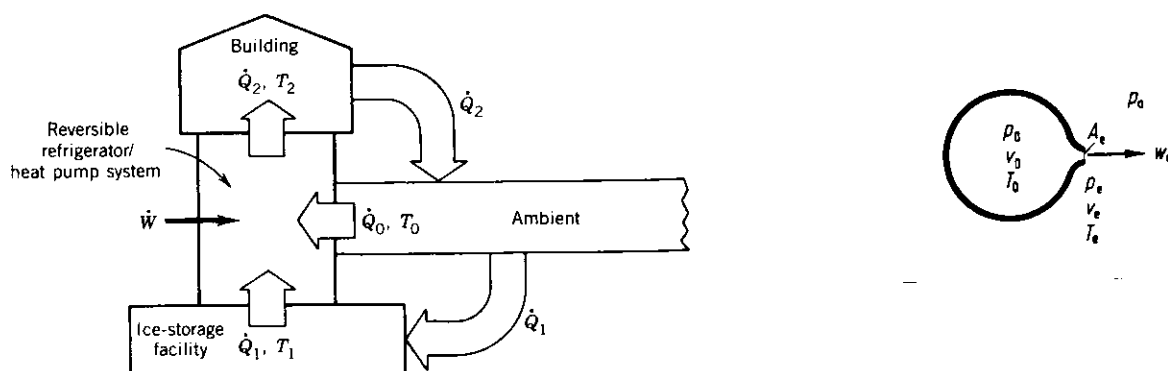
όπου

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}$$

- (iii) Για ποιά (κρίσιμο) λόγο πιέσεων  $p/p_0$ , μεγιστοποιείται η ροή μάζας μέσα από το ακροφύσιο; Να δείχθει ότι τότε η ταχύτητα στη στενότερη διατομή δίδεται από τη σχέση:

$$w_s = \sqrt{\kappa p_s v_s}$$

- (iv) Είναι δυνατόν να πέσει η πίεση  $p_s$  στη στενότερη διατομή κάτω από την τιμή που αντιστοιχεί στον κρίσιμο λόγο πιέσεων; εξηγήστε.



Γραπτή Δοκιμασία στη  
**ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΟΥΣΙΩΝ**

Βόλος, Δευτέρα 31.1.1994, ώρα 10:00-13:00

1. Μία διάταξη αεριοστροβίλου απορρίπτει καυσαέρια ροής μάζας  $\dot{m}=10^6$  kg/h, θερμοκρασίας  $T_{gi}=533^{OK}$  και πίεσης  $p_{gi}=1$  bar. Για να αυξηθεί ο συνολικός θερμικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης, προτείνεται να χρησιμοποιηθούν τα καυσαέρια για να παράγει ατμό στο λέβητα μίας εγκατάστασης ατμοστροβίλου με βάση τον κύκλο Rankine. Τα καυσαέρια εισέρχονται στο λέβητα με θερμοκρασία  $T_{gi}=533^{OK}$ , και εξέρχονται με θερμοκρασία  $T_{go}$ . Στο λέβητα (κύκλωμα νερού - ατμού), εισέρχεται συμπιεσμένο νερό πίεσης  $p$  (κατάσταση 1), το οποίο θερμαίνεται μέχρι την αντίστοιχη θερμοκρασία βρασμού, ατμοποιείται, και ο ατμός υπερθερμαίνεται σε θερμοκρασία  $T_{so}$  (κατάσταση 2). Η ελάχιστη εφικτή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο μέσων (ατμού και καυσαερίου) στο λέβητα, είναι  $\Delta T_{min}=10$  K.

- (i) Σχεδιάστε προσεγγιστικά τα θερμοκρασιακά προφίλ των δύο μέσων στο λέβητα.
- (ii) Ποιά είναι η ροή εξέργειας του καυσαερίου; Να θεωρηθεί το καυσαέριο ιδανικό αέριο ( $c_p=1$  kJ/kgK), και θερμοκρασία περιβάλλοντος  $15^{\circ}C$ .
- (iii) Ποιά είναι η μέγιστη ισχύς που θα μπορούσε να κερδηθεί με την παραπάνω διάταξη από το καυσαέριο, εάν, όπως προαναφέρθηκε, δεν μπορεί να αποφευχθεί μία ελάχιστη διαφορά θερμοκρασιών στον εναλλάκτη (λέβητα)  $\Delta T_{min}=10$  K.
- (iv) Να σχεδιαστεί σκαρίφημα της διάταξης, καθώς και τα διαγράμματα  $T-s$  και  $h-s$ .
- (v) Να υπολογίσετε την ισχύ που παράγει η διάταξη ατμοστροβίλου, εάν η πίεση του ατμού είναι 3.4 bar. Να υποθέσετε ισεντροπική εκτόνωση και συμπίεση (στον ατμοστροβίλο και την αντλία νερού αντίστοιχα). Ο συμπυκνωτής ψύχεται με νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος, και η διαφορά θερμοκρασίας στο συμπυκνωτή είναι  $15^{\circ}C$ . Αγνοήστε την ισχύ που καταναλώνει η αντλία νερού.

2. Στο πρόβλημα αυτό θα συγκριθούν δύο μέσα μεταφοράς: το ποδήλατο και το υπεραστικό λεωφορείο. Ένας ποδηλάτης κινούμενος με ταχύτητα 30 km/h, (συνολική αντίσταση του αέρα 15 N), καταναλώνει το ισοδύναμο 10 g γλυκόζης ανά km. Στον ανθρώπινο οργανισμό, το μηχανικό έργο παράγεται με οξειδωση γλυκόζης ( $C_6H_{12}O_6$ ). Η ειδική εξέργεια της γλυκόζης σε περιβάλλον  $25^{\circ}C$  είναι ίση με  $e=15.6$  MJ/kg. Κατά την ποδηλασία, το σώμα απορρίπτει θερμότητα με την εφίδρωση και εξάτμιση του ιδρώτα στο ρεύμα αέρα που δημιουργείται γύρω από το σώμα. Έτσι διατηρείται η θερμοκρασία του σώματος στους  $37^{\circ}C$ .

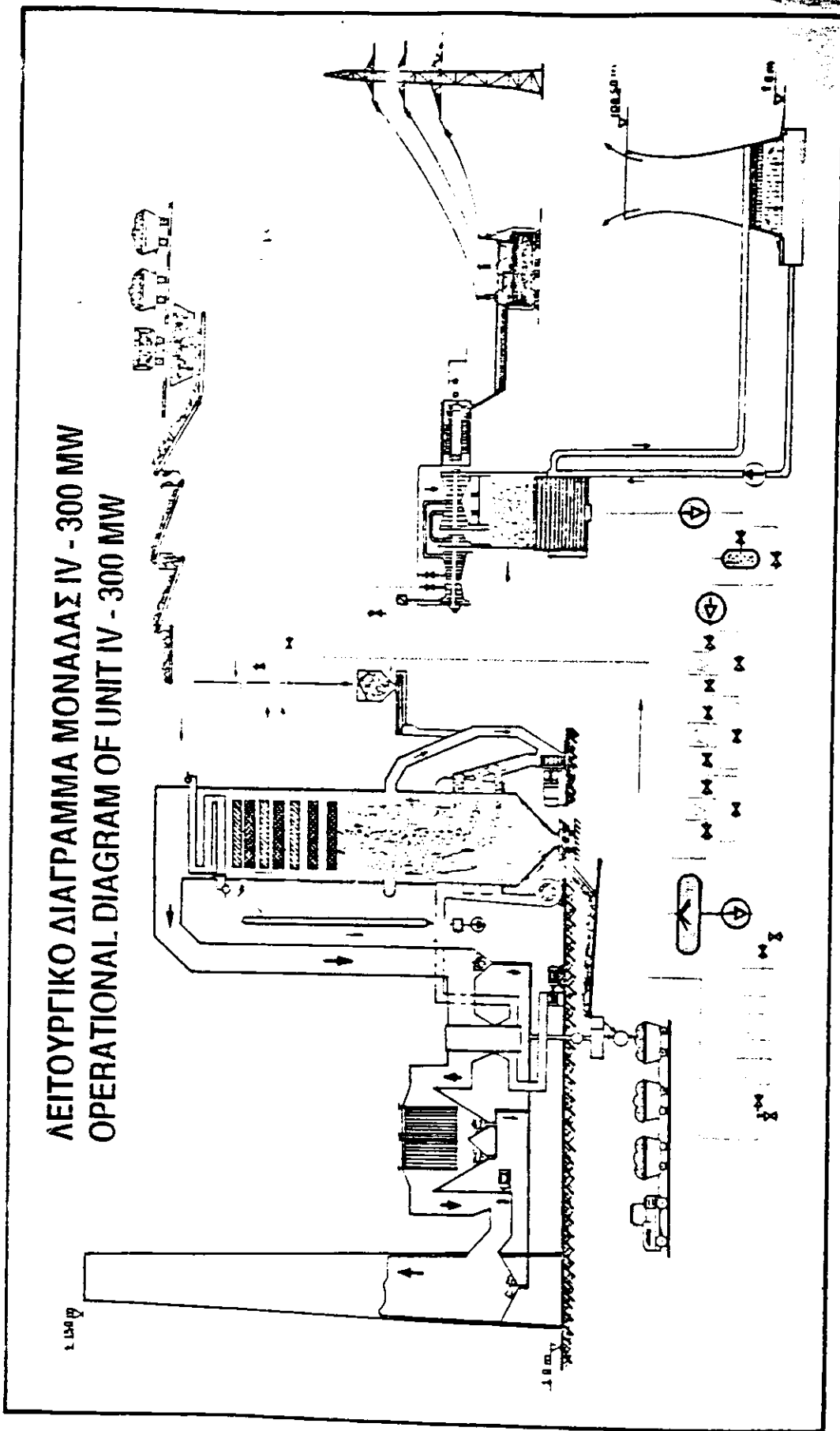
Ένα φορτωμένο υπεραστικό λεωφορείο 120 επιβατών, κινούμενο με ταχύτητα 30 km/h, αντιμετωπίζει συνολική δύναμη αντίστασης του αέρα περί τα 2.7 kN, και καταναλώνει περίπου 0.25 kg πετρελαίου diesel/km. Η ειδική εξέργεια του πετρελαίου (σε περιβάλλον  $25^{\circ}C$ ) είναι ίση με  $e=44$  MJ/kg (κατά προσέγγιση ίση με την κατώτερη θερμογόνο δύναμη).

- (i) Πόση εξέργεια καταναλώνει ο ποδηλάτης ανά διανυόμενο km;
- (ii) Ποιός ο θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης του ποδηλάτη στα 30 km/h;
- (iii) Πόσος ιδρώτας εξατμίζεται από το δέρμα του ποδηλάτη ανα km όταν κινείται με 30 km/h σε μια συννεφιασμένη μέρα; Να υποτεθεί ότι η γλυκόζη έχει αμελητέα εντροπία, και η εντροπία που παράγεται από τις μη αντιστρεπτότητες των λειτουργιών του ανθρώπινου σώματος απορρίπτεται εξ ολοκλήρου με την εξάτμιση.
- (iv) Πόση εξέργεια καταναλώνει το υπεραστικό λεωφορείο ανά επιβάτη και ανα km, όταν κινείται με 30 km/h;
- (v) Ποιός ο θερμικός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης του λεωφορείου στα 30km/h

---

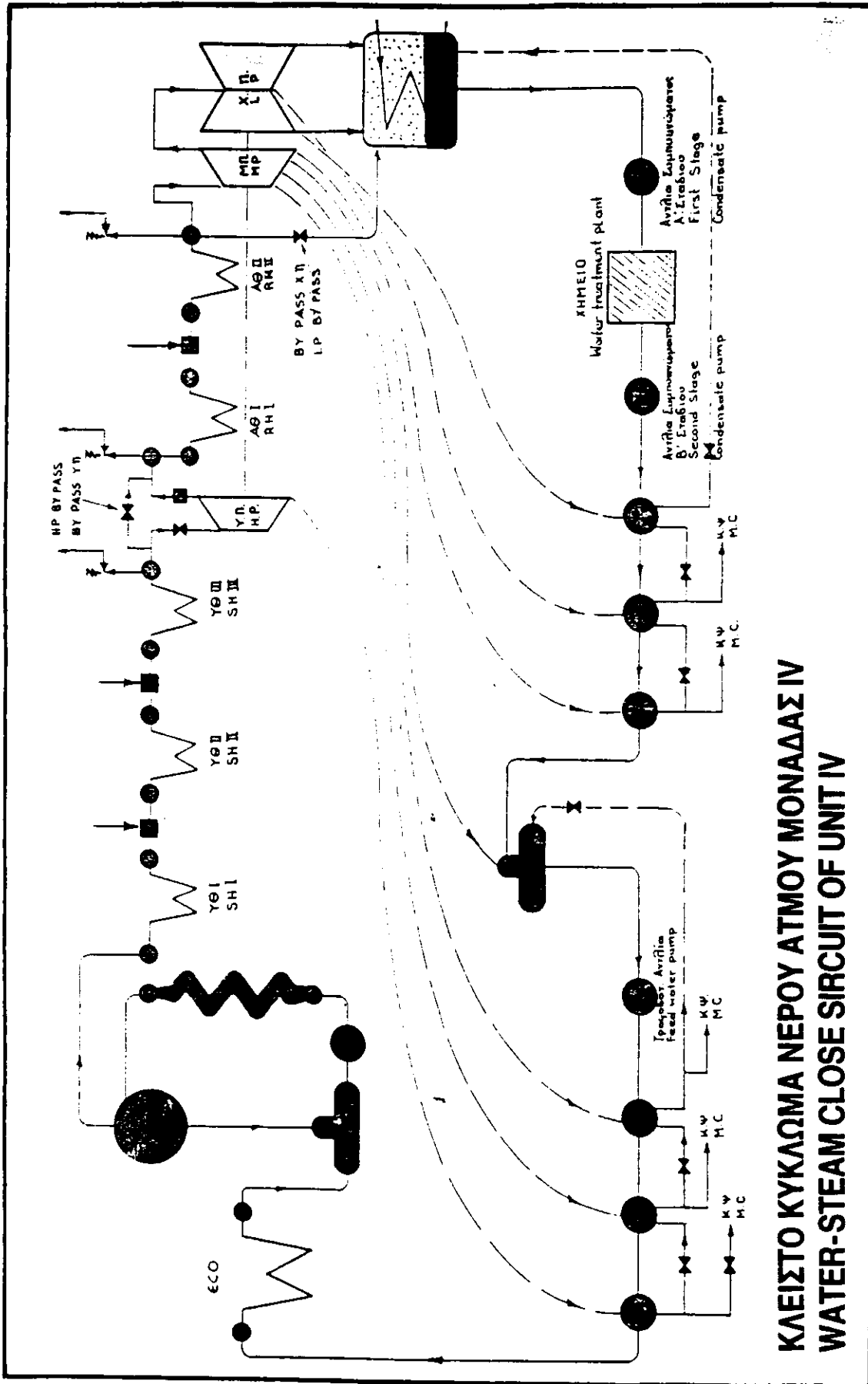
Θα εφαρμοστεί συγκριτική βαθμολόγηση. Ο καλύτερος θα βαθμολογηθεί με 10.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΟΝΑΔΑΣ IV - 300 MW  
 OPERATIONAL DIAGRAM OF UNIT IV - 300 MW



located in the town of Kardaras. The station is situated in the mountains of the Peloponnese, near the town of Kardaras. The station is a coal-fired power station with a capacity of 300 MW. It is one of the largest power stations in Greece.

located in the town of Kardaras. The station is situated in the mountains of the Peloponnese, near the town of Kardaras. The station is a coal-fired power station with a capacity of 300 MW. It is one of the largest power stations in Greece.



**ΚΛΕΙΣΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΝΕΡΟΥ ΑΤΜΟΥ ΜΟΝΑΔΑΣ IV**  
**WATER-STEAM CLOSE CIRCUIT OF UNIT IV**

**Λέβητες**

Οι Μονάδες έχουν λέβητες καύσης λιγνίτη σε αποξηραμένη κατάσταση σκόνης με διάλυμα καθαρού νερού που προέρχεται από

**Boilers**

All Units are equipped with boilers burning lignite in pulverized condition with clean water that comes from the



Benennung	Symbol
Dampf	
Ölhaltiger Dampf	
Kreislaufwasser	
Ölhaltiges Wasser	
Rohwasser	
Schlammwasser, Schmutzwasser	
Lösungen, Chemikalien	
Öl	
Flüssigmetall	
Luft	
Brennbare Gase	
Nicht brennbare Gase	
Feste Brennstoffe	
Absperrarmatur, allgemein	
Absperrarmatur mit Sicherheitsfunktion	
Rückschlagarmatur, allgemein	
Absperrventil	
Rückschlagventil	
Kugelrückschlagventil	
Kugelschwimmerventil	
Druckminderventil	
Dampfdruckventil	
Absperrschieber	
Durchgangshahn	
Absperrklappe	
Rückschlagklappe	
Absperrarmatur mit Handantrieb	
Absperrarmatur mit Motorantrieb	

Benennung	Symbol
Brennbare Abfälle	
Sonstige Stoffe	
Steuerleitung Signalleitung	
Rohrleitung mit Heizung o. Kühlung	
Rohrleitung mit Dampf beheizt	
Rohrleitung elektrisch beheizt	
Wärmedämmung (Isolierung)	
Kreuzung zweier Leitungen ohne Verbindungsstelle	
Kreuzung zweier Leitungen mit Verbindungsstelle	
Abzweigstelle	
Trichter	
Reduzierstück	
Auspuff	
Absperrarmatur mit Magnetantrieb	
Absperrarmatur mit Antrieb durch Fluide	
Absperrarmatur mit Kolbenantrieb	
Absperrarmatur mit Membranantrieb	
Sicherheitsventil, gewichtsbelastet	
Sicherheitsventil, federbelastet	
Absperrarmatur, geschlossen	
Absperrarmatur, geöffnet	
Schalldämpfer	
Blindscheibe	
Umsteckscheibe	
Druckprobenverschluss	
Drosselscheibe	
Berstscheibe	
Kondensatableiter	



Benennung	Symbol
Wärmeaustauscher mit Kreuzung der Stoffflüsse. Durch den gezackten Linienzug fließt der wärmeaufnehmende Stoff.	
Wärmeaustauscher, rauchgasbeheizt	
Speisewasservorwärmer, beheizt durch kondensierenden Dampf.	
Enthitzer	
Kondensatkühler	
Wärmeaustauscher ohne Kreuzung der Stoffflüsse. Durch den gezackten Linienzug fließt der wärmeaufnehmende Stoff.	
Luftvorwärmer, rauchgasbeheizt	
Wasserdampfkondensator	
Kondensator mit Luftkühlung	
Wärmeaustauscher durch Mischen der Stoffe	
Dampfkühler mit Wassereinspritzung	
Mischvorwärmer - Entgaser	
Dampferzeuger ohne Überhitzer	
Stetigförderer, allgemein	
Zuteiler für feste Brennstoffe	
Kupplung, allgemein	
Hydraulische Kupplung	
Getriebe, allgemein	
Abscheider, allgemein	
Elektrostatischer Abscheider	
Fliehkraftabscheider	
Entspanner	
Sieb, Siebapparat	
Grobrechen	
Feinrechen	
Filterapparat, allgemein	
Luftfilter, Gasfilter	
Flüssigkeitsfilter	

Benennung	Symbol
Dampferzeuger, elektrisch beheizt	
Dampfumformer	
Dampferzeuger mit Überhitzer	
Dampferzeuger mit rauchgas-beheiztem Zwischenüberhitzer	
Dampferzeuger, gasgefeuert	
Dampferzeuger, ölgefeuert	
Dampferzeuger, kohlenstaubgefeuert	
Dampferzeuger, kohlenstaubgefeuert mit flüssigem Schlackeabzug	
Dampferzeuger mit Rostfeuerung	
Dampferzeuger, müllgefeuert	
Gaserzeugungsanlage	
Brennkammer	
Wärmeverbraucher	
Wärmeverbraucher mit Heizfläche	
Becken, allgemein	
Rührer, allgemein	
Anlage zur chemischen Behandlung von Betriebswasser, allgemein	
Wasseraufbereitungsbehälter	
Dosiereinrichtung	
Kühlturm, allgemein	
Naßkühlturm mit natürlichem Zug	
Naßkühlturm mit saugendem Lüfter	
Naßkühlturm mit drückendem Lüfter	
Trockenkühlturm mit natürlichem Zug	
Trockenkühlturm mit saugendem Lüfter	
Trockenkühlturm mit drückendem Lüfter	
Naß-Trockenkühlturm mit natürlichem Zug	

Benennung	Symbol
Behälter, allgemein	
Behälter mit Rieselentgasung, z.B. Speisewasserbehälter	
Behälter mit Rieselentgasung und unterer Dampfeinführung	
Gefällespeicher	
Antriebsmaschine mit Expansion des Arbeitsstoffes	
Dampfturbine	
Dampfturbine mit Anzapfung (ungeregelt)	
Dampfturbine mit geregelter Entnahme	
Gasturbine	
Antriebsmaschine mit Hubkolben	
Kolbendampfmaschine	
Dieselmotor, Ottomotor	
Elektromotor	
Wechselstrommotor	
Gleichstrommotor	
Dampfkühler mit Wassereinspritzung und Temperaturregelung zur Erzielung einer konstanten Dampftemperatur	
Wirkungshinweis für Druckminderventil, öffnet bei sinkendem Druck in Leitung b.	
Wirkungshinweis für Druckminderventil mit Dampfkühler, öffnet bei sinkendem Druck in Leitung b, öffnet aber unabhängig hiervon, wenn der Druck in Leitung a einen bestimmten Wert überschreitet. Das Wassereinspritzventil regelt selbsttätig die Dampftemperatur hinter dem Kühler.	
Generator, allgemein	
Gleichstrom-Generator, allgemein	
Drehstrom-Generator, allgemein	
Motor, allgemein	
Gleichstrom-Motor, allgemein	
Drehstrom-Motor, allgemein	
Synchronmotor	
Motor mit zweisträngigem Schleifringläufer, Ständerwicklung in Sternschaltung	

Benennung	Symbol
Stromerzeuger, umlaufend	
Flüssigkeitspumpe, allgemein	
Kreiselpumpe	
Hubkolbenpumpe	
Strahlflüssigkeitspumpe, z.B. Ejektor	
Verdichter, Ventilatoren, Gebläse	
Laufschaufel-Verstelleinrichtung	
Leitschaufel-Verstelleinrichtung	
Zerkleinerungsmaschine, allgemein	
Brecher	
Mühle, allgemein	
Schlägermühle, Schlagradmühle	
Kugelmühle	
Rohrmühle	
Walzenmühle	
Motor mit Käfigläufer, Ständerwicklung in Sternschaltung	
Motor mit Käfigläufer und Anlaufkondensator	
Drosselspule	
Transformator mit 2 getrennten Wicklungen	
Transformator mit 3 getrennten Wicklungen	
Spartransformator	
Drosselspule stetig verstellbar	
Transformator stufig verstellbar	
Einschaltglied, Schließer	
Ausschaltglied, Öffner	
Umschaltglied, Wechsler	
Trennstelle	
Stromwandler mit 1 Kern	
Stromwandler mit 2 Kernen	
Spannungswandler	

Benennung	Symbol			
	Messung		Kennbuchstabe	Meßgerät
	Form A	Form B		
Durchflußmessung, allgemein			F	
Niveaumessung			L	
Feuchtemessung			M	
Druckmessung			P	
pH-Wert Messung		-	Q	-
Leitfähigkeitsmessung		-	Q	-
Drehzahlmessung			S	
Temperaturmessung			T	
Dehnungsmessung				
Schwingungsmessung				
Benennung	Symbol	Benennung	Symbol	
Hauptimpuls, öffnet bei Zunahme der Regelgröße		Grenzimpuls, schließt beim Erreichen des oberen Grenzwertes		
Hauptimpuls, öffnet bei Abnahme der Regelgröße		Grenzimpuls, schließt beim Erreichen des unteren Grenzwertes		
Grenzimpuls, öffnet beim Erreichen des oberen Grenzwertes		Ablaufregelung zur Konstanthaltung des Wasserstandes		
Grenzimpuls, öffnet beim Erreichen des unteren Grenzwertes				

### Schrifttum

Handbuchreihe Energie, herausgegeben von Prof. Dr. *Thomas Bohn*. Band 6: Fossil beheizte Dampfkraftwerke. Technischer Verlag, Resch-Verlag, TÜV Rheinland 1986.

DIN 2481: Wärmekraftanlagen, 1979.