



“Energy resources: Technologies & Management”

Θεωρία της καύσης

Δρ Γεώργιος Σκόδρας
Αναπληρωτής Καθηγητής



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

- ❑ Σκοπός της **καύσης** είναι η μετατροπή της χημικής ενέργειας που περιέχεται στο καύσιμο σε θερμική ενέργεια
- ❑ Αυτό επιτυγχάνεται με την αντίδραση των στοιχείων του καυσίμου με οξυγόνο οπότε εκλύεται θερμότητα, που ονομάζεται **θερμότητα καύσης** και προέρχεται από τη διαφορά της χημικής ενέργειας που εμπεριέχεται στα προϊόντα καύσης
- ❑ Η καύση είναι μια αυθόρμητη διεργασία που γίνεται πάντα με αύξηση της εντροπίας
- ❑ Αυτό σημαίνει πως **ένα μέρος της εξέργειας του καυσίμου μετατρέπεται σε ενέργεια και η θερμική ενέργεια** που παραλαμβάνουμε κατά την καύση είναι οπωσδήποτε ενεργειακά υποβιβασμένη σε σχέση με την χημική ενέργεια που περιέχει το καύσιμο
- ❑ Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία στην οποία παραλαμβάνεται η θερμότητα τόσο καλύτερη ποιοτικά είναι η παραλαμβανόμενη θερμική ενέργεια, δηλαδή τόσο περισσότερη είναι η εξέργεια που περιέχει
- ❑ Για την μεγιστοποίηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης της καύσης, δηλαδή της μετατροπής της χημικής ενέργειας των καυσίμων σε θερμική ενέργεια, όλες οι προσπάθειες πρέπει να αποβλέπουν στην απόληψη όσο το δυνατόν περισσότερης θερμότητας σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη θερμοκρασία



Αντιδράσεις Καύσης

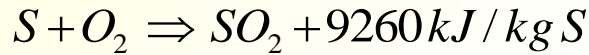
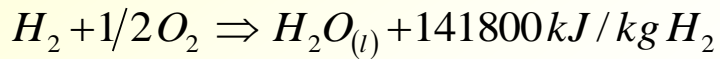
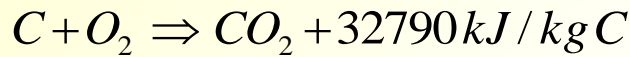
Αντιδράσεις καύσης

- ❑ Οι αντιδράσεις καύσης είναι πολύπλοκες
- ❑ Ο μηχανισμός όπως και τα προϊόντα εξαρτώνται κυρίως από:
 - **Τη διαθεσιμότητα οξυγόνου.** Στην περιοχή καύσης θα πρέπει να υπάρχει το απαιτούμενο οξυγόνο που εξασφαλίζεται όταν χρησιμοποιείται περίσσεια αέρα και γίνεται καλή ανάμιξη αέρα και καυσίμου
 - **Τη θερμοκρασία της φλόγας.** Από τη θερμοκρασία εξαρτάται η ταχύτητα παράλληλων ανταγωνιστικών αντιδράσεων και επομένως και η δημιουργία ανεπιθύμητων προϊόντων καύσης (πχ. NO_x)
- ❑ Η κινητική των αντιδράσεων καύσης είναι πολύ σημαντική για το σχεδιασμό του καυστήρα και του θαλάμου καύσης με στόχο τη βέλτιστη απόδοση και τον έλεγχο των ρυπαντών
- ❑ Εντούτοις δεν επηρεάζει τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας όπου μας ενδιαφέρει μόνο η κατάσταση των αντιδρώντων και των προϊόντων της καύσης

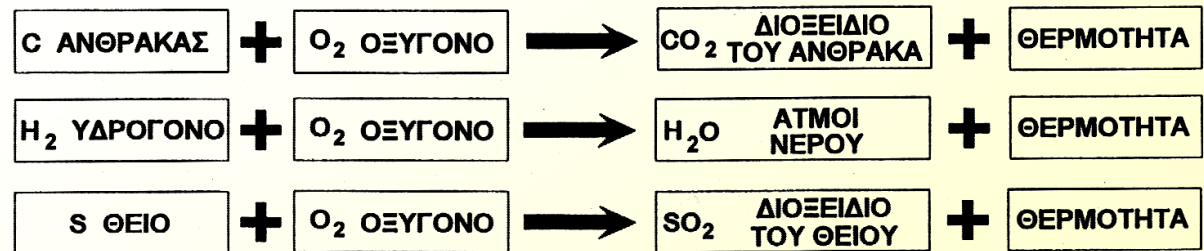
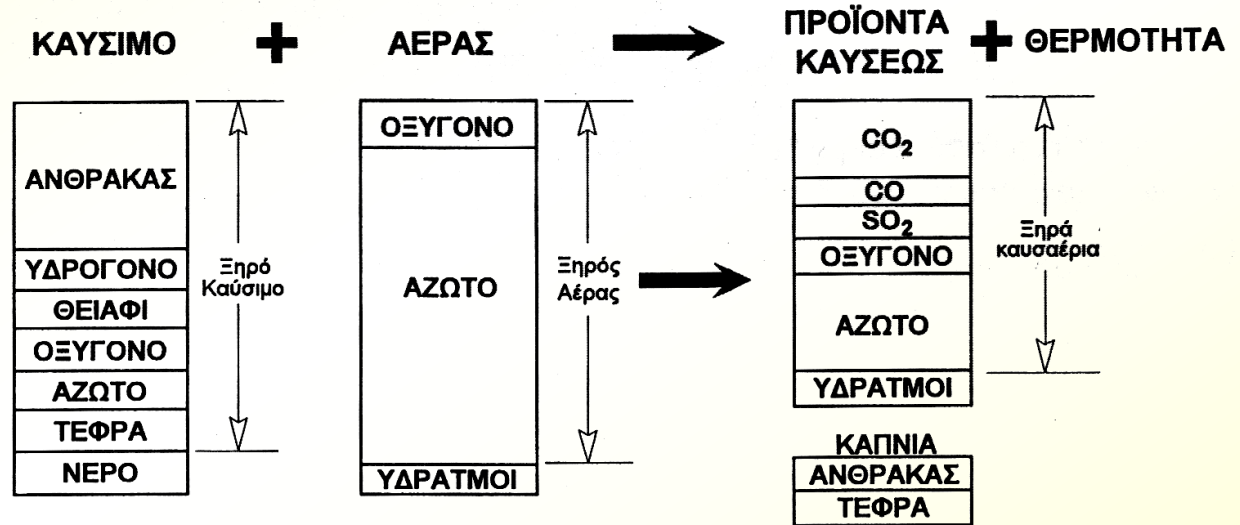


Αντιδράσεις Καύσης

- Κάθε καύσιμο περιέχει βασικά τρία καύσιμα στοιχεία: άνθρακα, υδρογόνο και θείο
- Οι βασικές αντιδράσεις της πλήρους καύσεως είναι



- Η εκλυόμενη θερμότητα αναφέρεται σε καύσιμο και προϊόντα καύσης στους 25°C και 1 atm πίεση
- Η θερμότητα αυτή εξαρτάται μόνο από τα τελικά προϊόντα και είναι ανεξάρτητη από τις ενδιάμεσες αντιδράσεις

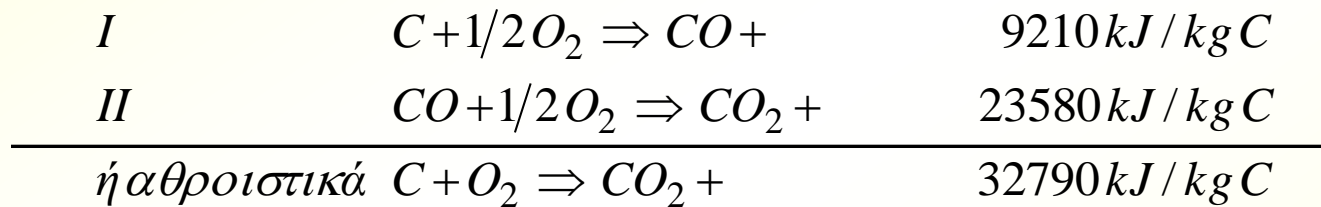


Σχηματική απεικόνιση της καύσης



Αντιδράσεις Καύσης

- ❑ Η εκλυόμενη θερμότητα αναφέρεται σε καύσιμο και προϊόντα καύσης στους 25°C και 1 atm πίεση
- ❑ Η θερμότητα αυτή εξαρτάται μόνο από τα τελικά προϊόντα και είναι ανεξάρτητη από τις ενδιάμεσες αντιδράσεις
- ❑ Παράδειγμα: η καύση του C προς CO και κατόπιν του CO προς CO₂



Δηλαδή, είτε θεωρήσουμε ότι ο άνθρακας καίγεται με τα δύο επιμέρους βήματα I και II, είτε απευθείας προς CO₂, η εκλυόμενη συνολικά θερμότητα είναι η ίδια



Αντιδράσεις Καύσης

Απαιτούμενο οξυγόνο και αέρας για την καύση

- Όταν μια καύσιμη ουσία καίγεται πλήρως με τόσο οξυγόνο όσο θεωρητικά χρειάζεται για τις χημικές αντιδράσεις, τότε έχουμε **Πλήρη Στοιχειομετρική Καύση**
 - **Πλήρη** επειδή δεν παραμένουν άκαυστα όπως άνθρακας, υδρογονάνθρακες ή μονοξείδιο του άνθρακα, και
 - **Στοιχειομετρική** επειδή δεν υπάρχει καθόλου περίσσεια οξυγόνου
- Εάν στα προϊόντα της καύσεως υπάρχουν άκαυστα, όπως άνθρακας, μονοξείδιο του άνθρακα ή υδρογονάνθρακες, τότε έχουμε **Ατελή Καύση**
- Εάν στην καύση παρέχεται περισσότερο οξυγόνο απ' όσο απαιτείται για την πλήρη καύση, τότε έχουμε **Περίσσεια οξυγόνου** ή **Περίσσεια αέρα**
- Σε βιομηχανικές συνθήκες καύσεως, όταν η ανάμιξη αέρα – καυσίμου δεν είναι καλή, είναι δυνατό να έχουμε ατελή καύση παρ' όλο ότι έχουμε περίσσεια οξυγόνου
- Για πλήρη καύση θα πρέπει να υπάρχει **Περίσσεια αέρα**



Αντιδράσεις Καύσης

- Αν η μάζα του αέρα που παρέχεται στην πραγματικότητα είναι M είναι M ενώ ο στοιχειομετρικά απαιτούμενος αέρας είναι M_0 , τότε η επί τοις εκατό περίσσεια του αέρα είναι:

$$\text{Περίσσεια αέρα \%} = \frac{M - M_0}{M_0} 100$$

- Η περίσσεια αέρα εκφράζεται και ως συντελεστής περισσειας n :

$$n = \frac{M}{M_0} \quad \text{ή} \quad M = n M_0$$

- Η σχέση μεταξύ επί τοις εκατό περισσειας και συντελεστού περισσειας αέρα είναι:

$$\text{Περίσσεια αέρα \%} = 100 (n - 1)$$

- Περίσσεια αέρα 25% πχ. σημαίνει ότι στην καύση τροφοδοτείται 25% περισσότερος αέρας από ότι θεωρητικά απαιτείται για πλήρη καύση
- Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής περισσειας θα ήταν $n = 1,25$



Αντιδράσεις Καύσης

Θερμογόνος δύναμη των καυσίμων

- ❑ Η θερμότητα που εκλύεται κατά την πλήρη καύση της μονάδας μάζας ενός καυσίμου ονομάζεται **θερμογόνος δύναμη** του καυσίμου
- ❑ Η θερμογόνος δύναμη ενός καυσίμου μπορεί να μετρηθεί απ' ευθείας με το θερμιδόμετρο
- ❑ Τα προϊόντα καύσης περιέχουν νερό, που προέρχεται από την καύση του υδρογόνου που περιέχει το καύσιμο και από την υγρασία που δυνατόν περιέχει το καύσιμο ή/και ο αέρας καύσης
- ❑ Κατά τον προσδιορισμό της θερμογόνου δύναμης με το θερμιδομετρικό όλμο, το νερό που περιέχεται στα καυσαέρια προέρχεται μόνο από το υδρογόνο του καυσίμου
- ❑ Το νερό αυτό συμπυκνώνεται αποδίδοντας τη **λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσεως** που, με τον τρόπο αυτό, συμπεριλαμβάνεται στη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου
- ❑ Αυτή η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου, που περιέχει και τη λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσεως του νερού, ονομάζεται **Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (ΑΘΔ)**



Αντιδράσεις Καύσης

Θερμογόνος δύναμη των καυσίμων

- ❑ Όταν χρησιμοποιούμε όμως το καύσιμο στην πραγματικότητα σε μία εστία, το νερό που περιέχουν τα καυσαέρια βρίσκεται ως ατμός, επειδή η θερμοκρασία τους είναι πάνω από το σημείο δρόσου
- ❑ Με τον τρόπο αυτό η θερμότητα που μπορούμε να στην πραγματικότητα να παραλάβουμε από ένα καύσιμο είναι μικρότερη από την Ανώτερη Θερμογόνο Δύναμη του καυσίμου
- ❑ Η θερμογόνος αυτή δύναμη, η οποία δεν περιλαμβάνει τη λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσεως του νερού που περιέχεται στα καυσαέρια, ονομάζεται **Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη** (ΚΘΔ) του καυσίμου
- ❑ Δηλαδή, **η διαφορά** μεταξύ ανώτερης και κατώτερης θερμογόνου δύναμης (ΑΘΔ – ΚΘΔ) είναι **η λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσεως** του νερού που προέρχεται από την καύση του υδρογόνου του καυσίμου (ανά μονάδα βάρους καυσίμου)
- ❑ Είναι προφανές ότι τα καύσιμα που δεν περιέχουν υδρογόνο, όπως πχ. καθαρός ξηρός άνθρακας, έχουν την ίδια ανώτερη και κατώτερη θερμογόνο δύναμη
- ❑ Η θερμότητα που παράγεται κατά την καύση εξαρτάται από την πίεση στην οποία γίνεται η καύση όπως επίσης και από τη θερμοκρασία του καυσίμου και των προϊόντων της καύσης



Αντιδράσεις Καύσης

Ισοζύγιο ενέργειας σε θάλαμο καύσης

- Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η θερμότητα που εκλύεται (ή απορροφάται) σε οποιαδήποτε χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα υπό σταθερή πίεση μπορεί να υπολογιστεί από τη διαφορά ενθαλπίας των προϊόντων της αντίδρασης (εξερχομένων) από την ενθαλπία των αντιδρώντων (εισερχομένων)
- Για μια αντίδραση που γίνεται συνεχώς σε μόνιμη κατάσταση υπό σταθερή πίεση όπως πχ. συμβαίνει κατά την καύση σε ένα κλίβανο, το ισοζύγιο ενέργειας (αν αμεληθούν οι μεταβολές κινητικής και δυναμικής ενέργειας) έχει τη μορφή:

$$H_{\epsilon\iota\sigma} - H_{\epsilon\xi} = W - Q$$

- $H_{\epsilon\iota\sigma}$ είναι η ενθαλπία των αντιδρώντων δηλαδή το άθροισμα της ενθαλπίας του καυσίμου και του αέρα καύσης. Υπολογίζεται είτε από το γινόμενο της μάζας (kg/s) επί την ειδική ενθαλπία ανά μονάδα μάζας (kJ/kg), είτε από το αντίστοιχο γινόμενο σε mol (δηλαδή [mol/s] [kJ/mol])

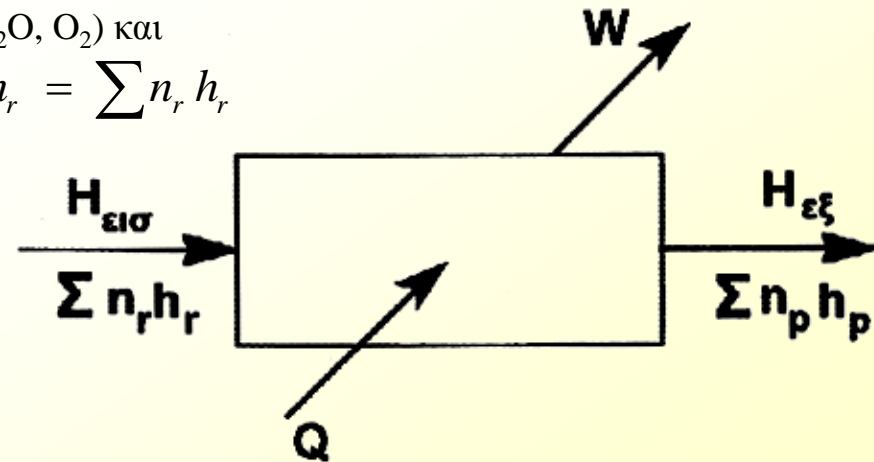
$$H_{\epsilon\iota\sigma} = \sum m_r h_r = \sum n_r h_r$$

- $H_{\epsilon\xi}$ είναι η ενθαλπία των προϊόντων της καύσης ($N_2, CO_2, SO_2, H_2O, O_2$) και υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο ως ανωτέρω

$$H_{\epsilon\iota\sigma} = \sum m_r h_r = \sum n_r h_r$$

- W είναι το έργο που παραλαμβάνουμε από το σύστημα. Για την περίπτωση της καύσης σε ένα κλίβανο δεν παράγεται έργο και $W = 0$
- Η θερμότητα Q , σύμφωνα με τη συμβατική παραδοχή, έχει θετικό πρόσημο όταν προσδίδεται στο σύστημα δηλαδή όταν η αντίδραση είναι ενδόθερμη και εισρέει θερμότητα από το περιβάλλον. Όταν η αντίδραση είναι ενδόθερμη, όπως η καύση, σε μόνιμη κατάσταση το σύστημα δίδει θερμότητα στο περιβάλλον και το Q που υπολογίζεται έχει αρνητικό πρόσημο

Όλες οι ενθαλπίες (αντιδρώντων και προϊόντων) πρέπει να έχουν υπολογιστεί ξεκινώντας από μια κοινή κατάσταση αναφοράς



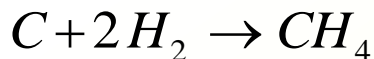
Ενεργειακό ισοζύγιο συστήματος καύσης



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

Πρότυπη κατάσταση αναφοράς

- ❑ Ενθαλπία ίση με μηδέν θεωρείται ότι έχουν τα καθαρά στοιχεία στην σταθερότερη μορφή τους σε θερμοκρασία 25°C και πίεση 760 mmHg
- ❑ Πχ. για το υδρογόνο η ενθαλπία μηδέν όταν βρίσκεται σε μορφή διατομικού αερίου στους 25°C και 760 mmHg ενώ για τον άνθρακα είναι μηδέν όταν σε μορφή στερεού καθαρού άνθρακα
- ❑ Για τις χημικές ενώσεις η ενθαλπία στις πρότυπες συνθήκες υπολογίζεται ως η ενθαλπία της αντίδρασης σχηματισμού τους από τα στοιχεία από τα οποία αποτελούνται (ενθαλπία σχηματισμού) πχ. για το μεθάνιο η αντίδραση σχηματισμού είναι



- ❑ Το Δh της αντίδρασης είναι -74900 kJ/mol και επομένως η ενθαλπία του μεθανίου στις πρότυπες συνθήκες είναι -74900 kJ/mol δεδομένου ότι οι ενθαλπίες άνθρακα και υδρογόνου είναι μηδέν



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

Πρότυπη κατάσταση αναφοράς

- Η θερμότητα που εκλύεται (ή απορροφάται) όταν η αντίδραση γίνεται σε πρότυπες συνθήκες μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από τις πρότυπες ενθαλπίες σχηματισμού όλων των αντιδρώντων και των προϊόντων:

$$Q^0 = n_f \Delta h^0 = \sum n_p h_p^0 - \sum n_r h_r^0$$

όπου $-\Delta h^0$ είναι η θερμότητα καύσης ή θερμογόμος δύναμη, δηλαδή η θερμότητα που εκλύεται κατά την καύση 1 mol καυσίμου σε πρότυπες συνθήκες, n_f τα mol του καυσίμου, h_p^0 και h_r^0 είναι οι πρότυπες ενθαλπίες σχηματισμού ανά mol και n_p , n_r τα mol προϊόντων και αντιδρώντων αντίστοιχα

- Συνήθως στους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται μεταβολές ενθαλπίας και όχι απόλυτες τιμές, για τον λόγο αυτό συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις το ισοζύγιο ενέργειας παίρνει την μορφή:

$$\sum n_r (h_r - h_r^0) - \sum n_p (h_p - h_p^0) - n_r \Delta h^0 = W - Q$$

Ο δείκτης r αναφέρεται στα αντιδρώντα (καύσιμο και αέρας) και ο δείκτης p στα προϊόντα (καυσαέρια)



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

Πρότυπη κατάσταση αναφοράς

- Αν θεωρηθεί ότι το H_2O εξέρχεται ως ατμός (οπότε $-\Delta h^0$ είναι η κατώτερη θερμογόνοος δύναμη του καυσίμου) δεν υπάρχει αλλαγή φάσης των υδρατμών στα καυσαέρια και η διαφορά ενθαλπίας μπορεί να υπολογιστεί ως το γινόμενο της ειδικής θερμότητας επί τη διαφορά θερμοκρασίας

$$h-h^0 = \int c_p dT = \bar{c}_p (T-T_0)$$

όπου T_0 είναι η πρότυπη θερμοκρασία ($25^\circ C$) και c_p η μέση τιμή της ειδικής θερμότητας υπό σταθερή πίεση μεταξύ των θερμοκρασιών T και T_0

- Για τα αντιδρώντα T είναι η θερμοκρασία εισόδου (του αέρα και του καυσίμου) και για τα προϊόντα η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων. Οπότε, μετά από αντικατάσταση, προκύπτει

$$-n_f \Delta h^0 + \sum [n \bar{c}_p (T-T^0)]_r - \sum [n c_p (T-T^0)]_p = W - Q$$

- Δηλαδή η ενθαλπία εισόδου σε ένα σύστημα καύσης με σημείο αναφοράς τις πρότυπες συνθήκες είναι

$$H_{\text{εισ}} = -n_r \Delta h^0 + \sum [n c_p (T_{\text{εισ}} - T_0)]_r = -n_r \Delta h^0 + [n \bar{c}_p (T_{\text{εισ}} T_0)]_{\text{καυσίμου}} + [n \bar{c}_p (T_{\text{εισ}} - T_0)]_{\text{αέρα}}$$



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

Πρότυπη κατάσταση αναφοράς

- ❑ Το Δh^0 είναι η διαφορά ενθαλπίας της αντίδρασης καύσης και έχει αρνητικό πρόσημο δηλαδή το $n_f \Delta h^0$ είναι η θερμότητα που παρέχει το καύσιμο (θετική)
- ❑ Η ενθαλπία εισόδου του καυσίμου και του αέρα είναι θετικές όταν το καύσιμο ή-και ο αέρας εισέρχονται προθερμασμένα σε θερμοκρασία άνω των 25°C και αρνητικές όταν εισέρχονται σε θερμοκρασία κάτω των 25°C
- ❑ Η ενθαλπία εξόδου των καυσαερίων πάλι σε σχέση με τις πρότυπες συνθήκες είναι

$$H_{\varepsilon\xi} = \sum [n \bar{c}_p (T_{\varepsilon\xi} - T_0)]_p = (T_{\varepsilon\xi} - T_0) \sum (n \bar{c}_p)_p$$

- ❑ Όταν το καύσιμο και ο αέρας εισέρχονται στους 25°C δεν επηρεάζουν την ενθαλπία εισόδου και το ισοζύγιο ενέργειας είναι

$$W - Q = H_{\varepsilon\sigma} - H_{\varepsilon\xi} = -n_f \Delta h^0 - (T_{\varepsilon\xi} - T_0) \sum (n \bar{c}_p)_p$$

- ❑ Σε ένα κλίβανο δεν παράγεται έργο ($W = 0$) και ο βαθμός απόδοσης -δηλαδή ο λόγος της θερμότητας που παραλαμβάνεται από το θερμαινόμενο υλικό προς τη θερμότητα που παρέχεται από το καύσιμο- είναι

$$\eta = \frac{Q_{\text{κλιβάνου}}}{H_{\text{eis}}} = \frac{H_{\varepsilon\sigma} - H_{\varepsilon\xi}}{H_{\text{eis}}} = 1 - \frac{H_{\varepsilon\xi}}{H_{\varepsilon\sigma}}$$



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

Αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας

- Αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας λέγεται η θερμοκρασία των προϊόντων της καύσης όταν τα αντιδρώντα εισέρχονται σε πρότυπες συνθήκες και η καύση είναι αδιαβατική, δηλαδή δεν ανταλλάσσεται θερμότητα ή/και έργο με το περιβάλλον. Στην περίπτωση αυτή

$$H_{\text{εισ}} = H_{\text{εξ}} = -n_r \Delta h^0$$

και η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων υπολογίζεται από τη σχέση

$$(T_{ad} - T_0) \sum (n \bar{c}_p)_p = -n_r \Delta h^0$$

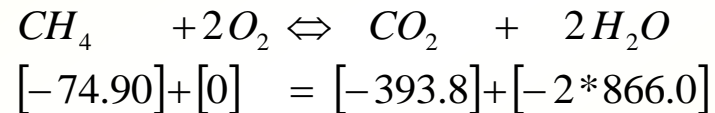
- Η αδιαβατική θερμοκρασία της φλόγας υπολογίζεται με δοκιμή – σφάλμα, δεδομένου ότι η μέση ειδική θερμότητα (c_p) είναι εν γένει συνάρτηση της θερμοκρασίας με την παραδοχή της πλήρους καύσης με το στοιχειομετρικό οξυγόνο η T_{ad} έχει συγκεκριμένη τιμή, χαρακτηριστική του καυσίμου
- Για απλούς υδρογονάνθρακες πίνακες του T_{ad} δίδονται στη βιβλιογραφία



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

Προσδιορισμός της θερμογόνου δύναμης καυσίμων

- ❑ Η θερμομετρική μέθοδος προσδιορισμού της θερμογόνου δύναμης είναι δύσκολο να εφαρμοστεί με ακρίβεια, απαιτεί ειδικές ακριβές συσκευές, ειδικευμένο προσωπικό και παίρνει πολύ χρόνο για να ολοκληρωθεί. Επιπλέον, η επαναληψιμότητα της μεθόδου είναι σχετικά μικρή
- ❑ Για τους λόγους αυτούς είναι προτιμότερος ο υπολογισμός της θερμογόνου δύναμης από τη σύσταση του καυσίμου με βάση την ενθαλπία των αντιδράσεων καύσης που είναι γνωστή. Πχ. το μεθάνιο που καίγεται σύμφωνα με την αντίδραση



έχει $\Delta h_0 = - [393.8 + 2 * 286.0] - [-74.90] = -890.1 \text{ kJ/mol}$ ή -55.542 kJ/kg μεθανίου. Οι τιμές στις αγκύλες είναι οι ενθαλπίες σχηματισμού των CH_4 , CO_2 και H_2O αντίστοιχα. Η ενθαλπία σχηματισμού του νερού (-286 kJ/mol) είναι για νερό σε υγρή κατάσταση, επομένως υπολογίστηκε η ανώτερη θερμογόνος δύναμη του μεθανίου

- ❑ Αν χρησιμοποιηθεί η πρότυπη ενθαλπία σχηματισμού του H_2O σε κατάσταση ατμού ($h_0 = -242 \text{ kJ/mol}$) υπολογίζεται η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του μεθανίου:

$$K\Theta\Delta = [393,8 + 2 * 242] - 74.90 = 802.7 \text{ kJ/mol} \text{ ή } 50.044 \text{ kJ/kg}$$

Σημειώνεται ότι η ανώτερη και κατώτερη θερμογόνος δύναμη των καυσίμων δίδονται συνήθως στις τεχνικές εφαρμογές με θετικό πρόσημο



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης



Προσδιορισμός της θερμογόνου δύναμης καυσίμων

- ❑ Για αέρια καύσιμα που είναι μίγματα ελαφρών υδρογονανθράκων (από 1 έως 5 άτομα άνθρακα) η θερμογόνος δύναμη μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από την κατά βάρος σύσταση του αερίου και τη θερμογόνο δύναμη των επιμέρους υδρογονανθράκων που δίδεται στη βιβλιογραφία
- ❑ Στα υγρά καύσιμα που είναι μίγματα υδρογονανθράκων με μεγαλύτερο αριθμό ατόμων άνθρακα η θερμότητα σχηματισμού του καυσίμου έχει μικρή επίδραση στον υπολογισμό του Δh_0 των επιμέρους αντιδράσεων καύσης
- ❑ Επιπλέον, υπάρχουν ακόρεστες ή κυκλικές ενώσεις με θετική ενθαλπία σχηματισμού (που αθροίζεται με την αρνητική ενθαλπία σχηματισμού των κορεσμένων υδρογονανθράκων) με αποτέλεσμα η ενθαλπία σχηματισμού του καυσίμου να μπορεί να παραληφθεί χωρίς μεγάλο σφάλμα
- ❑ Έτσι, η θερμογόνος δύναμη υπολογίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια μόνο από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε άνθρακα, υδρογόνο και θείο (που μπορούν να υπολογιστούν από την ανάλυση των καυσαερίων) από την σχέση:

$$A\Theta\Delta = 33.890 C + 144.180 H + 9414 S \text{ kJ/kg καυσίμου}$$

όπου C, H και S είναι το κατά βάρος ποσοστό (κλάσμα βάρους) του άνθρακα, υδρογόνου και θείου στο καύσιμο. Οι συντελεστές στην παραπάνω εξίσωση είναι εμπειρικοί και δεν αντιστοιχούν απόλυτα στο Δh_0 των αντιδράσεων καύσης. Αναφέρεται ότι η παραπάνω σχέση δίνει την θερμογόνο δύναμη με ακρίβεια 3%. Όταν το καύσιμο περιέχει οξυγόνο αντί του ποσοστού υδρογόνου χρησιμοποιείται το ισοδύναμο υδρογόνο

$$H^* = H - O / 8$$

Όπου $O / 8$ είναι το ένα όγδοο του ποσοστού οξυγόνου του καυσίμου, δηλαδή από το ποσοστό υδρογόνου αφαιρείται αυτό που ενώνεται με το οξυγόνο του καυσίμου



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης



Προσδιορισμός της θερμογόνου δύναμης καυσίμων

- Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του καυσίμου υπολογίζεται αν από την ανώτερη αφαιρεθεί η θερμότητα εξάτμισης του νερού:

$$ΚΘΔ = ΑΘΔ - 21.820 H \text{ kJ/kg καυσίμου}$$

όπου 21.820 είναι η θερμότητα εξάτμισης του νερού που παράγεται από κάθε κιλό υδρογόνου ($2442 \text{ kJ/kg H}_2\text{O} * 8.936 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kgH}_2$) και H είναι κλάσμα βάρους του υδρογόνου στο καύσιμο.



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

Προσδιορισμός της θερμογόνου δύναμης καυσίμων

- Όταν δεν είναι γνωστή η σύσταση του καυσίμου, προκειμένου περί υγρών καυσίμων, το ειδικό βάρος είναι ενδεικτικό του μεγέθους των μορίων, επομένως και της σχέσης υδρογόνου / άνθρακα από την οποία εξαρτάται η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου. Στην περίπτωση αυτή δεν είναι απαραίτητη η γνώση της σύστασης του καυσίμου. Οι ΑΘΔ και ΚΘΔ υπολογίζονται από το ειδικό βάρος του καυσίμου με την βοήθεια εμπειρικών σχέσεων (BS 2869/1970)

$$ΑΘΔ = 51894 (1 - 0,17 *d^2) (1 - Y - T - S) + 9418*S \text{ kJ/kg καυσίμου}$$

$$ΚΘΔ = 46371*(1 - 0.19*d^2 + 0,0686*d) (1 - Y - T - S) + 9418* S - 2448*Y \text{ kJ/kg καυσίμου}$$

όπου d είναι το ειδικό βάρος του καυσίμου στους $15,6^{\circ}\text{C}$ (αδιάστατο: το βάρος του καυσίμου δια του βάρους ίσου όγκου νερού) και Y , T , S είναι αντίστοιχα το κλάσμα βάρους του ελεύθερου νερού, της τέφρας και του θείου που περιέχει το καύσιμο.

- Για την συσχέτιση ΑΘΚ με ΚΘΔ προτείνεται η σχέση:

$$ΚΘΔ = ΑΘΔ - 5079 (1 - 0,624 d) \text{ kJ / kg}$$

Αναφέρεται ότι αυτοί οι τύποι δίνουν αποτελέσματα το ίδιο ικανοποιητικά με το θερμιδόμετρο



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

Προσδιορισμός της θερμογόνου δύναμης καυσίμων

- ❑ Η περιεκτικότητα σε νερό, τέφρα και θείο (Y, T, S) προσδιορίζονται με ανάλυση του καυσίμου
- ❑ Εάν τα Y και T δεν είναι γνωστά μπορούμε να τα παραλείψουμε χωρίς σημαντικό σφάλμα
- ❑ Αν η περιεκτικότητα σε θείο δεν είναι επίσης γνωστή μπορεί να παραλειφθεί, πλην όμως το σφάλμα αυξάνει όσο η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο είναι μεγαλύτερη
- ❑ Για το Μαζούτ της Ελληνικής αγοράς πχ. που με τις σημερινές προδιαγραφές περιέχει κατά μέγιστο 4% κβ. θείο, υπολογίζοντας τη θερμογόνο δύναμη από τους παραπάνω τύπους με μόνο δεδομένο το ειδικό βάρος (αγνοώντας τα Y, T, S) το σφάλμα είναι της τάξης του 3,5%
- ❑ Στον πίνακα δίδεται ενδεικτικά η κατά βάρος περιεκτικότητα σε άνθρακα, υδρογόνο, θείο και τέφρα καθώς και οι ΑΘΔ και ΚΘΔ μερικών τύπων καυσίμων

	% κατά βάρος				Λόγος H/C	ΑΘΔ	ΚΘΔ
	C	H	S	Τέφρα			
Φυσικό αέριο	75	25	-	-	0.33	55570	50076
Προπάνιο	82	18	-	-	0.22	50244	46260
Νάφθα	85	15	0.03	-	0.18	48231	44624
Κεροζίνη	86	13.7	0.07	-	0.16	46134	43240
Πετρέλαιο Θέρμανσης	86	13.2	0.3	-	0.15	45631	42821
Κωκ	85	0.5	1.0	12	0.006	29358	29148

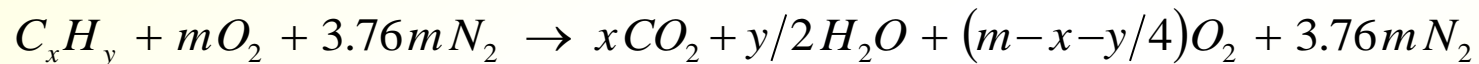
Όπως παρατηρείται στον πίνακα, όσο λιγότερο υδρογόνο έχει το καύσιμο, τόσο μικρότερη είναι η θερμογόνο δύναμη και τόσο η ΑΘΔ πλησιάζει την ΚΘΔ



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

Στοιχειομετρικοί υπολογισμοί

- Για τους στοιχειομετρικούς υπολογισμούς ο αέρας θεωρείται ως ιδανικό αέριο με σύσταση (σε mol) 21% οξυγόνο και 79% άζωτο. Επομένως, για κάθε mol O_2 που απαιτείται για την καύση αντιστοιχούν 3,76 mol N_2 ή 4,76 mol αέρα.
- Η αντίδραση πλήρους καύσης ενός υδρογονάνθρακα με τυπική σύσταση C_xH_y είναι:



Όπου m είναι τα mol οξυγόνου που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε mol καυσίμου (4,76m είναι τα mol του αέρα που χρησιμοποιήθηκε). Αν θεωρηθεί ως βάση 1 mol καυσίμου:

Το θεωρητικό οξυγόνο είναι:

$$m_\theta = x + y/4 \text{ [mol } O_2/\text{mol καυσίμου]}$$

Ο θεωρητικός αέρας είναι:

$$M_\theta = 4,76 m_\theta \text{ [mol αέρα/mol καυσίμου]}$$

ή

$$28,97 * 4,76 m_\theta \text{ [g αέρα/mol καυσίμου]}$$

Η περίσσεια οξυγόνου είναι:

$$ΠO = m - m_\theta \text{ [mol } O_2/\text{mol καυσίμου]}$$

Ο πραγματικός αέρας είναι:

$$ΜΠO = 4,76 m \text{ [mol αέρα/mol καυσίμου]}$$

ή

$$28.97 * 4.76 m \text{ [g αέρα/mol καυσίμου]}$$

Η περίσσεια αέρα % είναι:

$$\% ΠA = 100 * (m - m_\theta) / m_\theta$$

Ο συντελεστής περίσσειας:

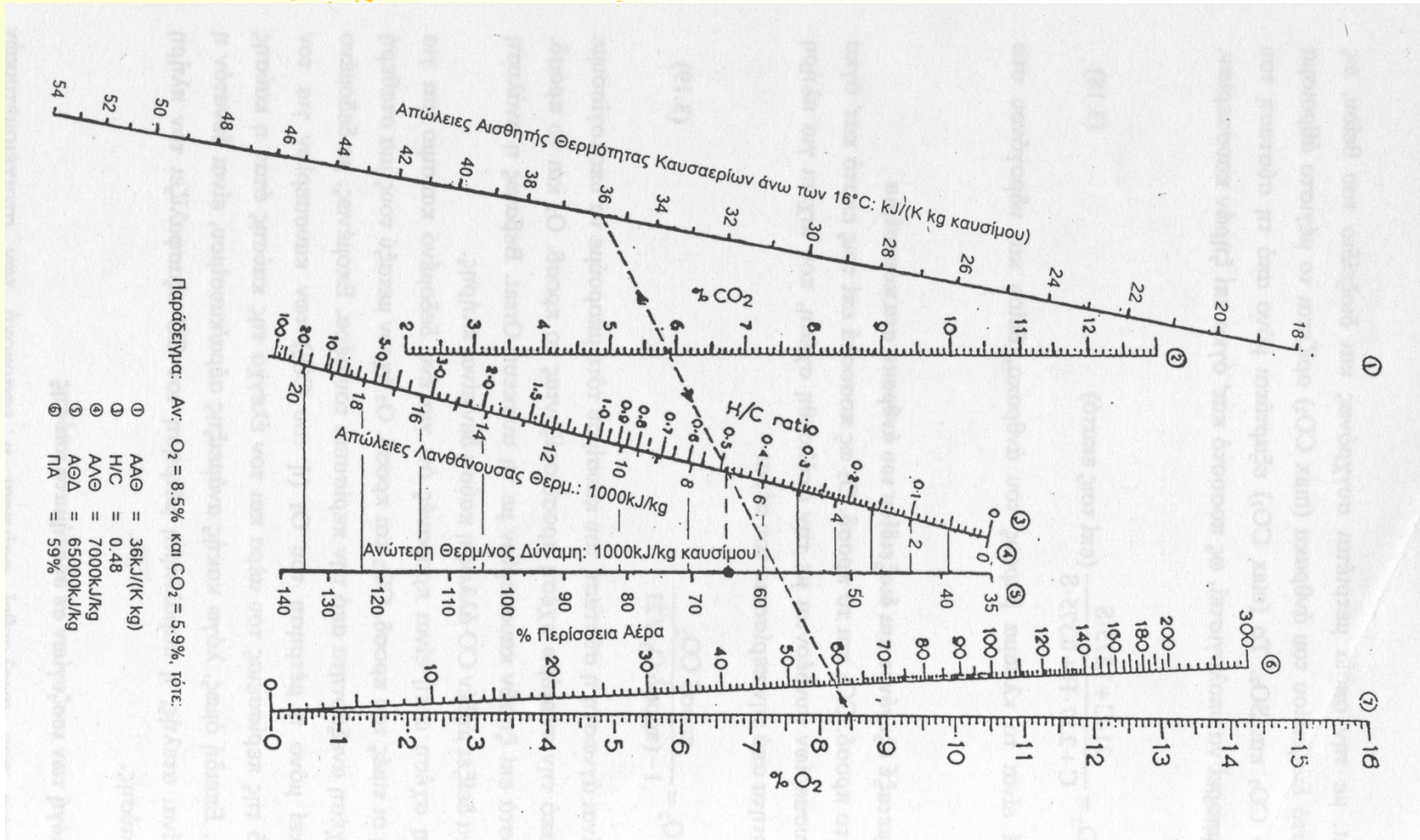
$$n = m / m_\theta = 1 + ΠA / 100$$

Ο λόγος αέρα / καυσίμου είναι:

$$A/K = 4,76 * 28,97 m / MB_{\text{καυσίμου}} \text{ [kg αέρα / kg καυσίμου]}$$



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης



Νομογράφημα που συνδέει το λόγο H/C του καυσίμου και την περίσσεια του αέρα καύσης με την σύσταση των καπναερίων, την ΑΘΔ και τις απώλειες λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας των καυσαερίων



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης



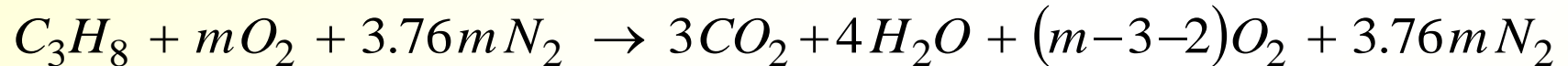
□ *Παράδειγμα 1*

Προπάνιο καίγεται με 20% περίσσεια αέρα. Να υπολογιστεί ο λόγος αέρα / καυσίμου και η σύσταση των καυσαερίων



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

Για το προπάνιο (C_3H_8) είναι $x = 3$ και $y = 8$, συνεπώς η εξίσωση καύσης του προπανίου είναι:



Όπου m είναι τα mol οξυγόνου που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε mol καυσίμου (4,76m είναι τα mol του αέρα που χρησιμοποιήθηκε). Αν θεωρηθεί ως βάση 1 mol καυσίμου:

Το θεωρητικό οξυγόνο είναι:

Ο θεωρητικός αέρας είναι:

ή

Το πραγματικό οξυγόνο είναι:

Ο πραγματικός αέρας είναι:

ή

Το μοριακό βάρος του C_3H_8 είναι:

Ο λόγος αέρα / καυσίμου είναι:

$$m_0 = x + y/4 = 3 + 2 = 5 \text{ [mol } O_2/\text{mol καυσίμου]}$$

$$M_0 = 4,76 m_0 \text{ [mol αέρα/mol καυσίμου]}$$

$$28,97 * 4,76 m_0 \text{ [g αέρα/mol καυσίμου]}$$

$$m = 1,2 * m_0 = 1,2 * 5 = 6 \text{ [mol } O_2/\text{mol καυσίμου]}$$

$$M\Pi_0 = 4,76 m = 4,76 * 6 = 28,56 \text{ [mol αέρα/mol καυσίμου]}$$

$$28,97 * 28,56 = 827,4 \text{ [g αέρα/mol καυσίμου]}$$

$$MB_{\text{καυσίμου}} = 44$$

$$A/K = 4,76 * 28,97 m / MB_{\text{καυσίμου}} = 827,4 / 44 = 18,8$$

$$\text{[kg αέρα / kg καυσίμου]}$$



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

□ *Παράδειγμα 2*

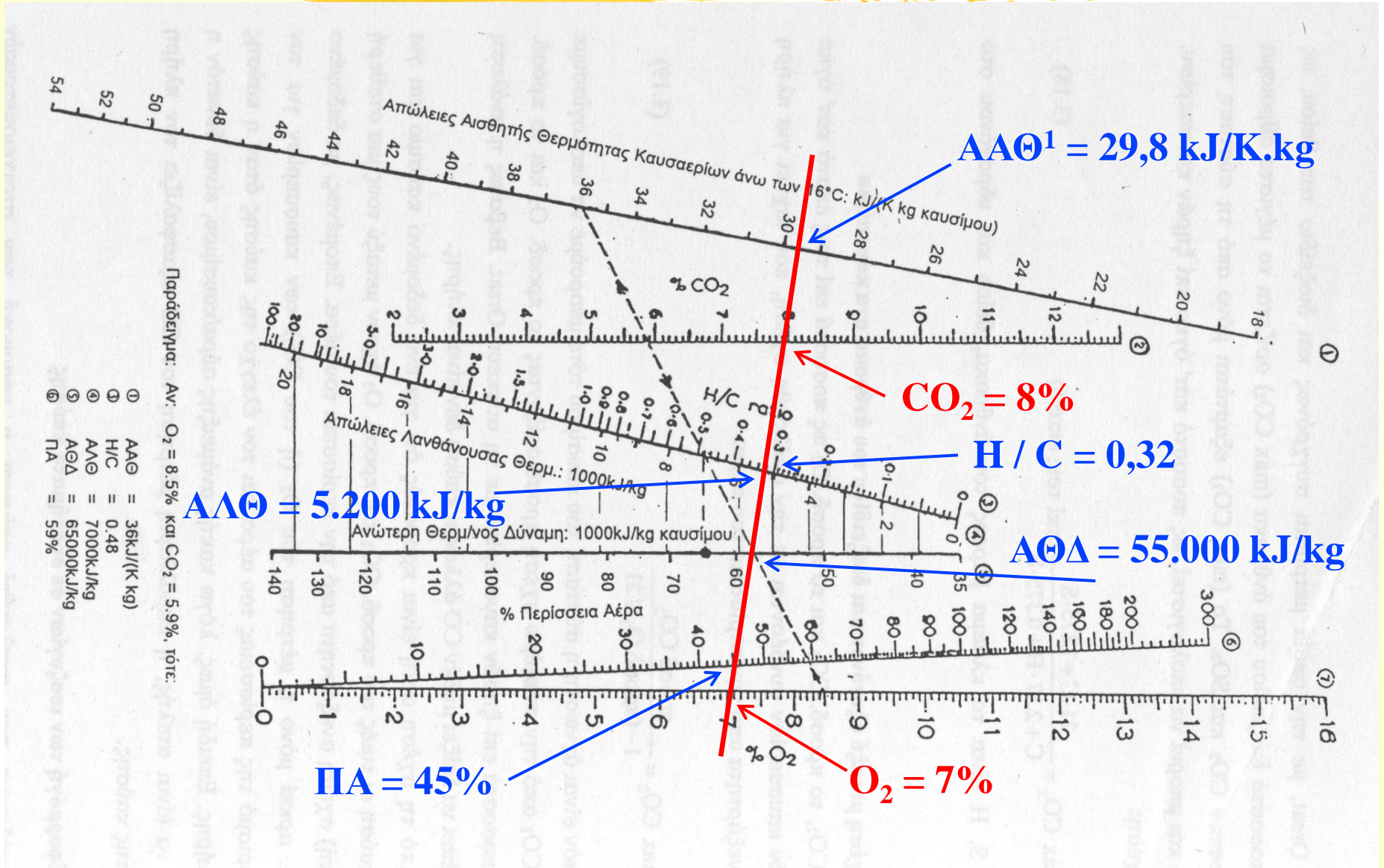
Η ανάλυση καυσαερίων θερμοκρασίας 500°C έδωσε: $O_2 = 7\%$ και $CO_2 = 8\%$ κό. Να βρεθούν με την βοήθεια του νομογραφήματος:

- Η σχέση H / C
- Η ΑΘΔ
- Η περίσσεια αέρα
- Οι απώλειες λανθάνουσας θερμότητας
- Η ΚΘΔ
- Οι απώλειες αισθητής θερμότητας



$$K\Theta\Delta = A\Theta\Delta - A\Lambda\Theta = 49.800 \text{ kJ/kg}$$

$$A\Lambda\Theta = A\Lambda\Theta^1 * \Delta T = 55.000 \text{ kJ/kg}$$





Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης



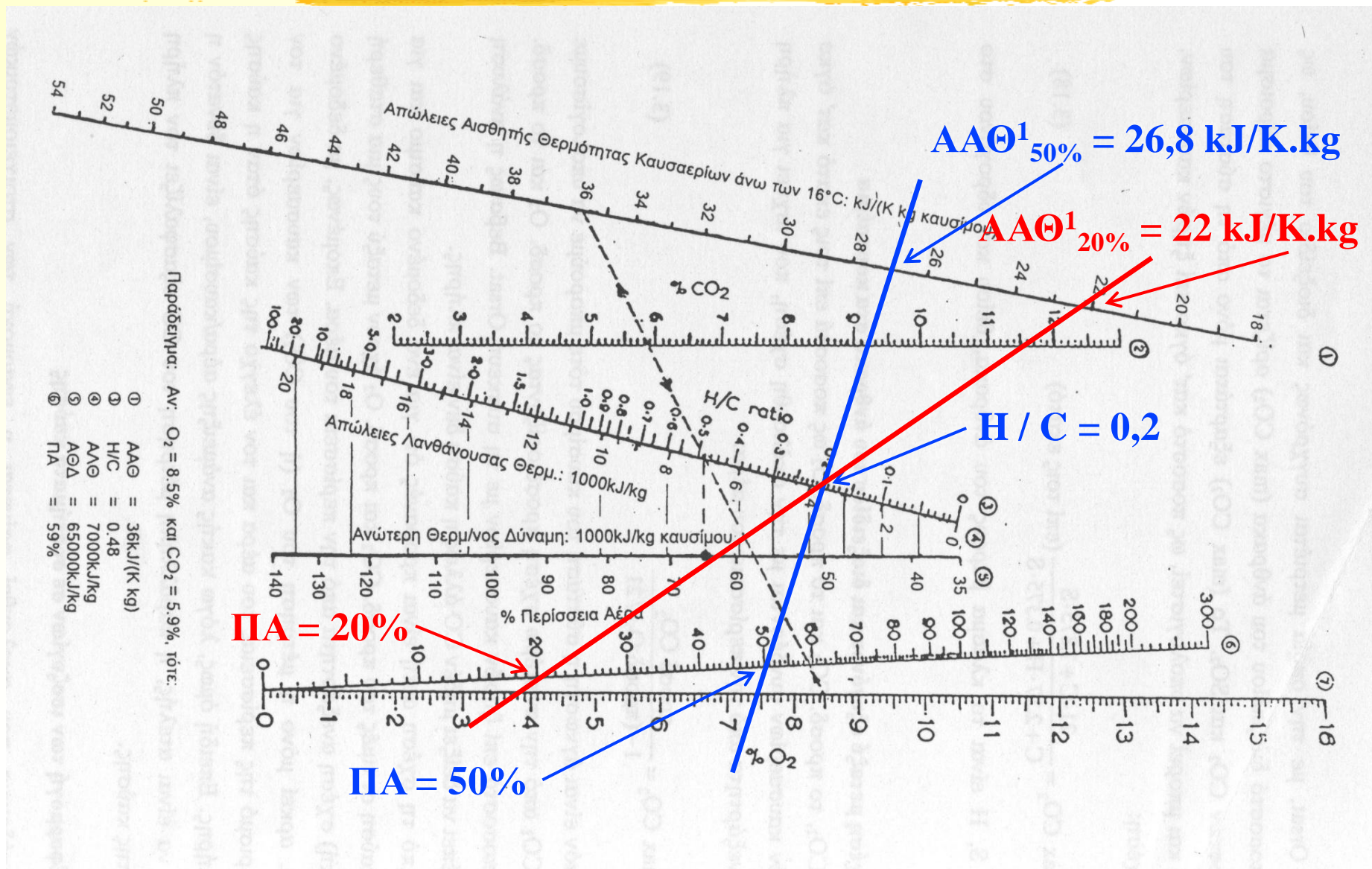
□ *Παράδειγμα 3*

Καύσιμο με σχέση $H / C = 0,2$ καίγεται με περίσσεια αέρα 50%.

Πόση θερμότητα θα κερδίσουμε

(α) αν μειώσουμε τη θερμοκρασία των καυσαερίων από τους 500°C στους 300°C ;

(β) αν ελαττώσουμε την περίσσεια αέρα από 50% σε 20%;





(α) Αν $T = 500^{\circ}\text{C}$ τότε $\text{AA}\Theta_{50\%}^{500^{\circ}\text{C}} = \text{AA}\Theta_{50\%}^1 * \Delta T = 26,8 * (500 - 20) = 12.900 \text{ kJ/kg}$
όταν το T μειωθεί στους 300°C τότε είναι

$$\text{AA}\Theta_{300^{\circ}\text{C}} = \text{AA}\Theta_{50\%}^1 * \Delta T = 26,8 * (300 - 20) = 7.500 \text{ kJ/kg}$$

Συνεπώς το ενεργειακό όφελος είναι:

$$\text{AA}\Theta_{50\%}^{500^{\circ}\text{C}} - \text{AA}\Theta_{50\%}^{300^{\circ}\text{C}} = 12.900 - 7.500 = 5.400 \text{ kJ/kg}$$

(β) Αν $\text{ΠΑ} = 50\%$ τότε $\text{AA}\Theta_{50\%}^{500^{\circ}\text{C}} = \text{AA}\Theta_{50\%}^1 * \Delta T = 26.8 * (500 - 20) = 12.900 \text{ kJ/kg}$

$$\text{Αν } \text{ΠΑ} = 20\% \text{ τότε } \text{AA}\Theta_{20\%}^{500^{\circ}\text{C}} = \text{AA}\Theta_{20\%}^1 * \Delta T = 22 * (500 - 20) = 10.560 \text{ kJ/kg}$$

Δηλαδή, ελαττώνοντας την περίσσεια αέρα από 50% σε 20% εξοικονομούνται:

$$\text{Εξοικονόμηση} = \text{AA}\Theta_{50\%}^{500^{\circ}\text{C}} - \text{AA}\Theta_{20\%}^{500^{\circ}\text{C}} = 12.900 - 10.560 = 2.340 \text{ kJ/kg}$$

Σημειώνεται ότι αυτή η εξοικονόμηση επιτυγχάνεται χωρίς ανέξοδα, ενώ αντίθετα για την μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων απαιτούνται δαπάνες εγκατάστασης συστήματος εναλλαγής θερμότητας



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης



Έλεγχος της καύσης με ανάλυση των καυσαερίων

- ❑ Από την ανάλυση των καυσαερίων μπορούν να υπολογιστούν, με την βοήθεια των στοιχειομετρικών σχέσεων ή/και νομογραφημάτων που προκύπτουν από αυτές, χαρακτηριστικά της καύσης όπως η περίσσεια του αέρα, η σχέση υδρογόνου / άνθρακα του καυσίμου και εξ αυτής η ανώτερη και κατώτερη θερμογόνο δύναμη
- ❑ Η ανάλυση των καυσαερίων γίνεται με την συσκευή Orsat με την οποία προσδιορίζονται το CO₂, CO, O₂ και από διαφορά το N₂. Τα αποτελέσματα εκφράζονται ως επί τοις εκατό κατ' όγκο στα ξηρά καυσαέρια
- ❑ Τα αποτελέσματα που παίρνουμε από την συσκευή Orsat ως προσδιορισθέν CO₂ είναι το άθροισμα των ποσοστών CO₂ και SO₂

$$\text{προσδ. CO}_2 = \text{CO}_2 + \text{SO}_2 \% \text{ στα ξηρά καυσαέρια}$$

- ❑ Εκτός της συσκευής Orsat έχουν αναπτυχθεί, για τις ανάγκες των σύγχρονων συστημάτων αυτομάτου έλεγχου, αισθητήρες συνεχούς μέτρησης, καταγραφής και μετάδοσης σήματος για τον προσδιορισμό του οξυγόνου ή/και του CO στα καυσαέρια



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

Μέγιστο CO₂ στα καυσαέρια

- ❑ Το μέγιστο ποσοστό CO₂ στα καυσαέρια, για ένα δεδομένο καύσιμο, επιτυγχάνεται όταν η καύση γίνεται πλήρης με τον στοιχειομετρικό αέρα. Επειδή ο προσδιορισμός του CO₂ στα καυσαέρια γίνεται με τη συσκευή Orsat, με την οποία μετράται ταυτόχρονα και SO₂, ως μέγιστο ποσοστό CO₂ (max CO₂) ορίζεται το μέγιστο άθροισμα των ποσοστών CO₂ και SO₂.
- ❑ Το (max CO₂) εξαρτάται μόνο από την σύσταση του καυσίμου και μπορεί να υπολογιστεί ως ποσοστό κατ' όγκο επί ξηρών καυσαερίων, από την σχέση:

$$\max CO_2 = \frac{21C + 7.875 S}{C + 2.37 H + 0.375 S}$$

Όπου C, S, H είναι το κλάσμα βάρους των άνθρακα, θείου και υδρογόνου στο καύσιμο



Στοιχεία από την Θεωρία της Καύσης

Σχέση μεταξύ O_2 και CO_2 στα καυσαέρια

- Το $\max CO_2$, το προσδ. CO_2 και το προσδ. O_2 ως ποσοστά επί τοις εκατό κατ' όγκο επί ξηρών καυσαερίων συνδέονται με την ακόλουθη σχέση, που ισχύει για πλήρη καύση ανεξάρτητα από την περίσσεια του αέρα:

$$\max CO_2 = \frac{\text{προσδ. } CO_2}{1 - (\text{προσδ. } O_2)/21}$$

- Εάν λοιπόν είναι άγνωστη η σύσταση του καυσίμου τότε μπορούμε να υπολογίσουμε το $\max CO_2$ από την παραπάνω σχέση προσδιορίζοντας το προσδ. O_2 και το προσδ. CO_2 ως ποσοστό επί ξηρών καυσαερίων με τη συσκευή Orsat. Βεβαίως η ανάλυση πρέπει να δείξει CO μηδέν, άλλως η καύση δεν είναι πλήρης
- Από τη σχέση αυτή είναι προφανές ότι για ένα δεδομένο καύσιμο και για πλήρη καύση οι τιμές του προσδ. CO_2 και προσδ. O_2 έχουν μεταξύ τους μια σταθερή (γραμμική) σχέση ανεξάρτητα από την περίσσεια του αέρα
- Επομένως, με δεδομένο καύσιμο, αρκεί μόνο η μέτρηση του O_2 (ή του CO_2) των καυσαερίων για τον προσδιορισμό της περιόσσειας του αέρα και τον έλεγχο της καύσης, όταν η καύση είναι πλήρης.
- Επειδή όμως, λόγω κακής ανάμιξης αέρα /καυσίμου, είναι δυνατόν η καύση να είναι ατελής, η παράλληλη μέτρηση του CO εξασφαλίζει τον πλήρη έλεγχο της καύσης



□ *Παράδειγμα 4*

Σε ένα κλίβανο αέριο καύσιμο σύστασης $H_2 = 50\%$, $CH_4 = 0,5\%$, $CO = 41\%$, $CO_2 = 5\%$, $N_2 = 3,5\%$ καίγεται με περίσσεια αέρα 30%. Το καύσιμο εισέρχεται στο θάλαμο καύσης σε θερμοκρασία $20^\circ C$, πίεση 1 bar, κορεσμένο σε υδρατμούς και ο αέρας σε θερμοκρασία $20^\circ C$, πίεση 1 bar και σχετική υγρασία 80%. Το θερμικό φορτίο του κλιβάνου είναι 1 MW, τα δε καυσαέρια εξέρχονται σε θερμοκρασία $350^\circ C$. Ζητούνται:

(α) Ο λόγος αέρα / καυσίμου και η σύσταση των καυσαερίων

(β) Το απαιτούμενο καύσιμο και ο αέρας καύσης



Θεωρία της Καύσης



ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!