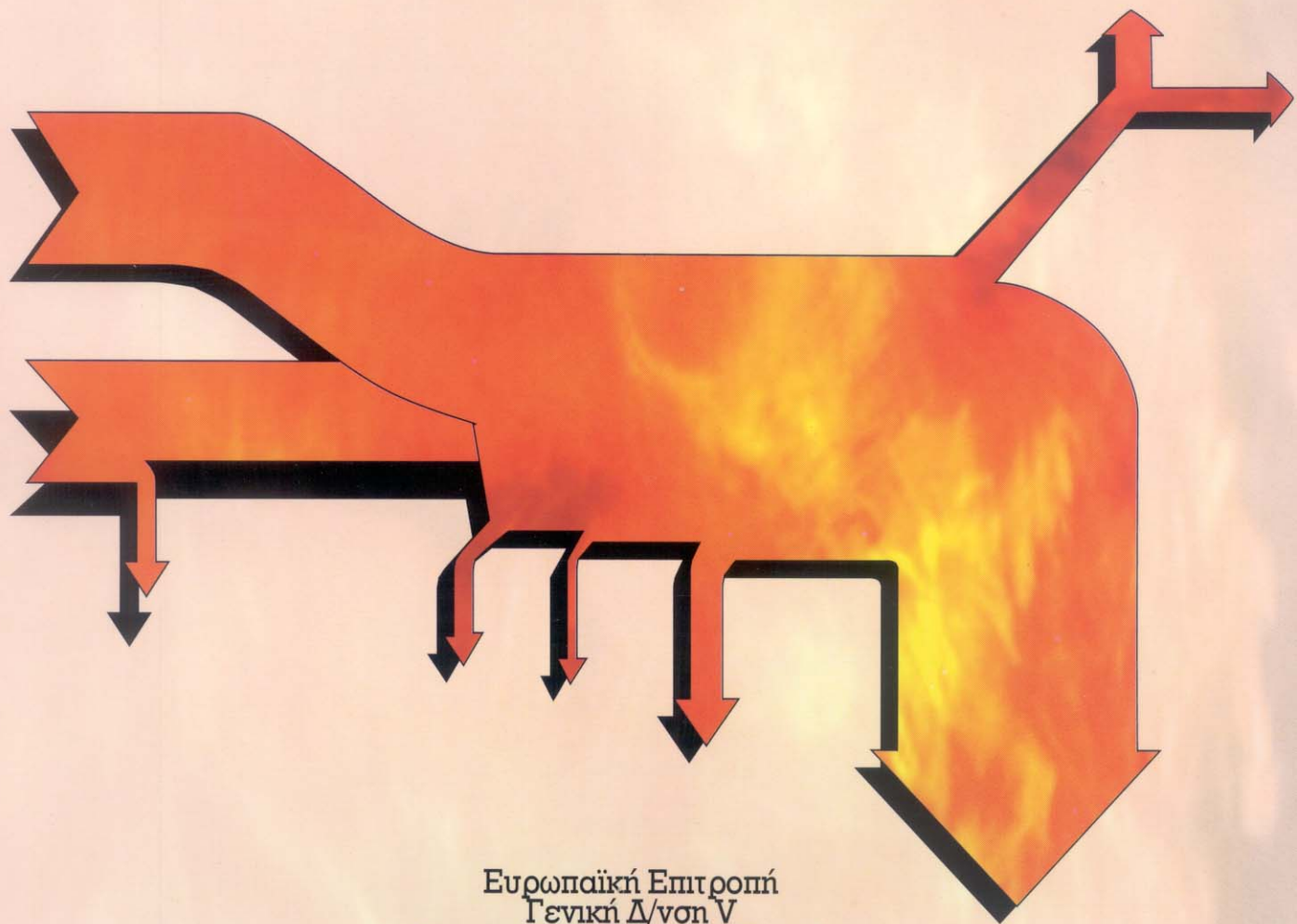




ΚΕΝΤΡΟ  
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ  
ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

# ΟΔΗΓΟΣ ΚΑΥΣΗΣ ΛΕΒΗΤΩΝ ΚΑΙ ΚΛΙΒΑΝΩΝ - ΦΟΥΡΝΩΝ



Ευρωπαϊκή Επιτροπή  
Γενική Δ/ση V  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Υπουργείο Εργασίας  
Δ/ση Κοινοτικών Πρωτοβουλιών

# ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

---

## ΟΔΗΓΟΣ ΚΑΥΣΗΣ, ΛΕΒΗΤΩΝ ΚΑΙ ΚΛΙΒΑΝΩΝ - ΦΟΥΡΝΩΝ

Τομέας

Ορθολογικής Χρήσης  
Ενέργειας

ΙΟΥΛΙΟΣ 1996

# Περιεχόμενα

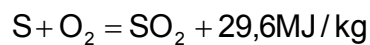
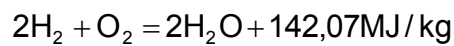
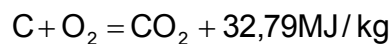
Περιεχόμενα .....	i
1. Καύση.....	1
1.1 Γενικά .....	1
1.2 Συντελεστής απόδοσης της καύσης .....	4
1.3 Ανάλυση Καυσαερίων .....	5
1.4 Δυνατότητες Εξοικονόμησης Ενέργειας από την Καύση.....	5
1.3.1 Απώλειες Ενέργειας .....	5
1.3.2 Ορθολογική διαχείριση ενέργειας .....	6
1.3.3 Αύξηση συντελεστή απόδοσης καύσης .....	7
1.3.4 Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μικρού κόστους .....	8
1.3.5 Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μεγάλης έκτασης: .....	9
2. Λέβητες .....	11
2.1 Προσδιορισμός απόδοσης λέβητα .....	12
2.2 Δυνατότητες Εξοικονόμησης σε λέβητες .....	14
2.2.1 Ορθολογική διαχείριση ενέργειας σε λέβητες: .....	14
2.2.2 Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μικρού κόστους σε λέβητες: .....	15
2.2.3 Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μεγάλης έκτασης σε λέβητες .....	17
3. Κλίβανοι - Φούρνοι .....	20
3.1 Γενικά .....	20
3.2 Δυνατότητες Εξοικονόμησης σε κλιβάνους και φούρνους.....	23
3.2.1 Ορθολογική διαχείριση σε κλιβάνους και φούρνους .....	23
3.2.2 Επεμβάσεις μικρού κόστους σε κλιβάνους και φούρνους .....	23
3.2.3 Επεμβάσεις μεγάλης έκτασης σε κλιβάνους και φούρνους .....	26
3.2.3.1 Τοποθέτηση εναλλάκτη θερμότητας .....	26
3.2.3.2 Τοποθέτηση νέας μόνωσης .....	27
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	31

# 1. Καύση

## 1.1 Γενικά

Σαν καύση ορίζουμε την εξώθερμη χημική αντίδραση κατά την οποία το οξυγόνο αντιδρά με κάποιο είδος καυσίμου εκλύοντας θερμότητα.

Οι βασικές αντιδράσεις που περιγράφουν τα παραπάνω φαινόμενα είναι:



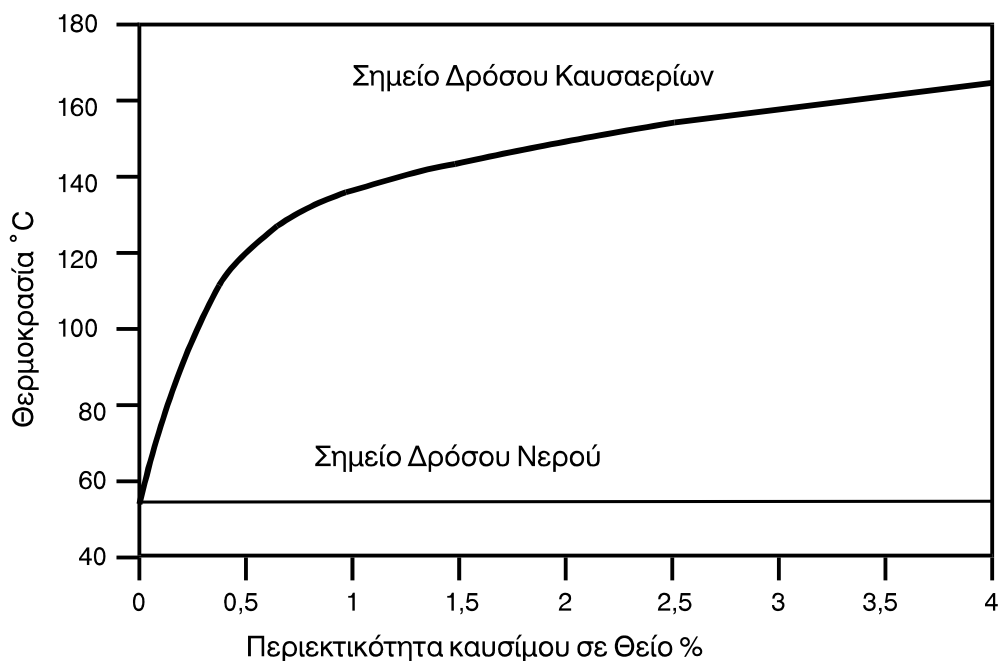
Σημαντική για την καύση είναι η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου, η θερμότητα δηλαδή που ελευθερώνει 1kg καυσίμου όταν καίγεται. Υπάρχει ανώτερη και κατώτερη θερμογόνος δύναμη και η σχέση που ισχύει μεταξύ τους είναι :

$$H_o = H_u - (h + w) 600kcal/kg$$

Όπου	$H_u$	= κατώτερη θερμογόνος δύναμη
	$H_o$	= ανώτερη θερμογόνος δύναμη
	$h$	= % αναλογία $H_2$
	$w$	= % αναλογία υγρασίας του καυσίμου
	600kcal/kg	= είναι η θερμότητα ατμοποίησης του νερού σε ατμοσφαιρική πίεση.

Στην  $H_o$  οι υδρατμοί έχουν υγροποιηθεί ενώ στην  $H_u$  υπάρχουν. Στην πράξη χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς η  $H_u$ .

Σημείο Δρόσου (Dew point) είναι η θερμοκρασία κάτω από την οποία υγροποιούνται τα συστατικά των καυσαερίων ( $SO_2$ ,  $P_2O_5$  κλπ.) Διάγραμμα 1.



Διάγραμμα 1. Σχέση σημείου δρόσου καυσαερίων με την περιεκτικότητα καυσίμου σε Θείο

Στοιχειομετρική καύση είναι η τέλεια καύση. Κατά την στοιχειομετρική καύση το σύνολο του  $O_2$  καίγεται προς  $CO_2$ . Στην πράξη όμως σπάνια συναντάται τέλεια καύση. Για να εξασφαλισθεί η καύση ολόκληρης της ποσότητας του υπάρχοντος καυσίμου, είναι συνήθως απαραίτητη μία επιπλέον ποσότητα αέρα, η οποία ονομάζεται περίσσεια αέρα (excess air). Η ποσότητα αυτή είναι απαραίτητη συνήθως λόγω της μη τέλειας μίξης καυσίμου - αέρα, εξαρτάται δε από:

- Το είδος του καυσίμου
- Την ποιότητα του καυσίμου
- Τον βαθμό ανάμιξης καυσίμου - αέρα

Η περίσσεια αέρα δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$\lambda = \frac{L}{L_0}$$

Όπου  $\lambda$  = περίσσεια αέρα  
 $L$  = πραγματικά χρησιμοποιούμενος αέρας  
 $L_0$  = Θεωρητικά αναγκαία ποσότητα αέρα

Ορισμένες ενδεικτικές τιμές περίσσειας αέρα για διαφορετικά καύσιμα δίνονται παρακάτω :

<b>Είδος Καυσίμου</b>	<b>Περίσσεια Αέρα</b>
Φυσικό αέριο	1,05
Πετρέλαιο	1,07-1,15
Λιγνίτης	1,25-1,3
Λιθάνθρακας	1,1-2

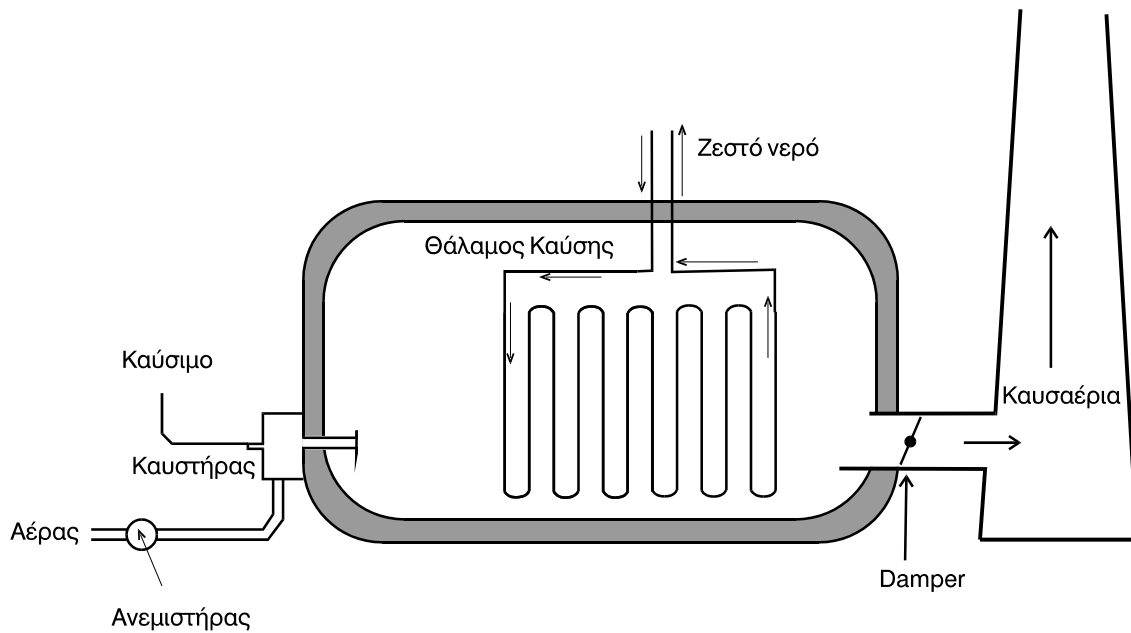
Από την άλλη πλευρά υπερβολική περίσσεια αέρα μειώνει την απόδοση. Οι απώλειες θερμότητας στα καυσαέρια, οι οποίες είναι και οι πιο βασικές, ελαχιστοποιούνται όταν υπάρχει στην καύση η μικρότερη δυνατή περίσσεια αέρα, σε σχέση πάντοτε με την στοιχειομετρική ποσότητα αέρα.

Η κυκλοφορία μέσα στον φούρνο πραγματοποιείται κυρίως με δύο τρόπους.

1. Με φυσική κυκλοφορία
2. Με εξαναγκασμένη κυκλοφορία

Φυσική κυκλοφορία: Χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρούς καυστήρες φούρνους και κλιβάνους, για λόγους κατασκευής. Δεν προσφέρει όμως την δυνατότητα ελέγχου αφ' ενός και αφ' ετέρου η δημιουργούμενη μίξη καυσίμου - αέρα, δεν είναι και τόσο αποδοτική. Το τελευταίο γεγονός απαιτεί μεγαλύτερη περίσσεια αέρα, αυξάνοντας, ως γνωστόν τις απώλειες.

Εξαναγκασμένη κυκλοφορία: Κάποια διάταξη ανεμιστήρα φροντίζει για την παροχή αέρα μέσα σε καυστήρες φούρνους και κλιβάνους. Ο τρόπος αυτός προσφέρει καλύτερη ανάμιξη καυσίμου - αέρα, λόγω της πτώσης πίεσης, του αέρα, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερο στροβιλισμό και τελικά καλύτερη μίξη. Επίσης είναι δυνατόν να ελεγχθεί χειροκίνητα ή αυτόματα η ποσότητα του παραπάνω αέρα μέσω μιας διάταξης αυξομείωσης της ροής (damper), σε συνδυασμό ή όχι με έλεγχο της παροχής καυσίμου, επηρεάζοντας έτσι άμεσα το καιγόμενο μίγμα καυσίμου - αέρα και ελέγχοντας άμεσα την πορεία και την ποιότητα της καύσης. Σχήμα 1.



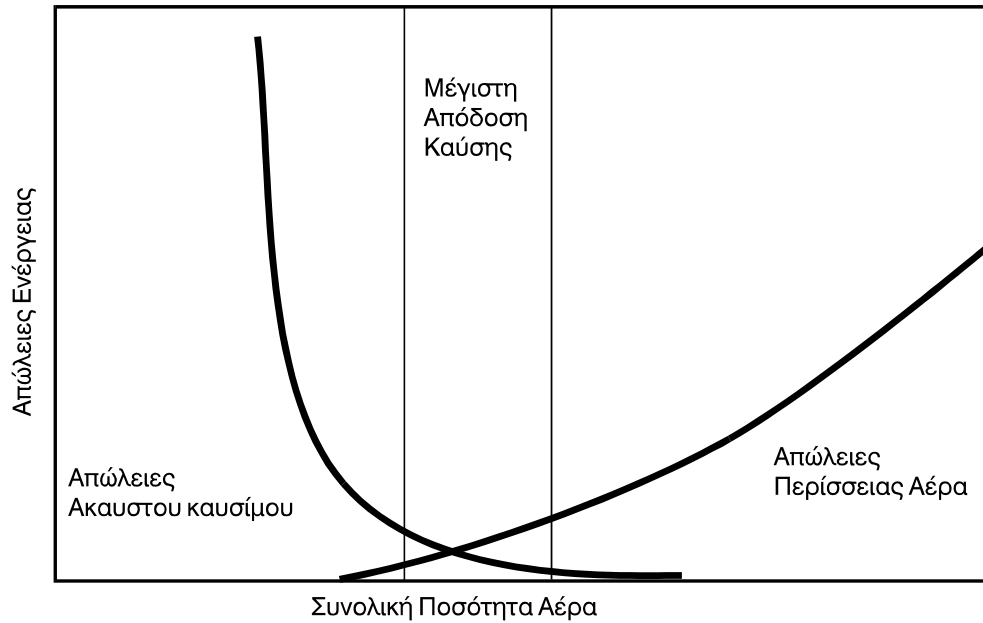
Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση λέβητα με τεχνητό ελκυσμό

## 1.2 Συντελεστής απόδοσης της καύσης

Ο συντελεστής απόδοσης της καύσης είναι ένα μέγεθος που προσδιορίζει την ποσότητα της ενέργειας που χρησιμοποιείται από το σύστημα σε σχέση με τη συνολική ποσότητα ενέργειας που παρέχεται στο σύστημα. Ο όρος Συντελεστής Απόδοσης Καύσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της απόδοσης λεβήτων, κλιβάνων, φούρνων καθώς και άλλων συστημάτων καύσης.

$$\text{Συντελεστής Απόδοσης} = \frac{\text{Εκμεταλλεύσιμη Θερμότητα}}{\text{Προσδιδόμενη Θερμότητα}} \times 100$$

Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζεται η σχέση περίσσειας αέρα με τις απώλειες ενέργειας. Η μεγαλύτερη απόδοση καύσης επιτυγχάνεται όταν αναμιχθεί πολύ καλά το καύσιμο με το παρεχόμενο αέρα καύσης.



Διάγραμμα 2. Σχέση περίσσειας αέρα, απωλειών ενέργειας

### 1.3 Ανάλυση Καυσαερίων

Για την ανάλυση των καυσαερίων χρησιμοποιείται κυρίως η μέθοδος ORSAT, μέθοδος η οποία προσδιορίζει την ποσοστιαία σύσταση των βασικών αερίων  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ , που εμφανίζονται στα καυσαέρια, δίνοντας σημαντικές πληροφορίες για την ποιότητα και την απόδοση της καύσης. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται ο βαθμός απόδοσης της καύσης. (στο Παράρτημα, διαγράμματα από 1 έως 8 όπου παρουσιάζονται οι θερμικές απώλειες σε σχέση με την περίσσεια αέρα, θερμοκρασία καυσαερίων, μονοξείδιο του άνθρακα και για διάφορα καύσιμα).

### 1.4 Δυνατότητες Εξοικονόμησης Ενέργειας από την Καύση.

#### 1.3.1 Απώλειες Ενέργειας

Οι κύριες αιτίες απωλειών ενέργειας είναι:

- Ατελής Καύση
- Απώλειες στα καυσαέρια
- Απώλειες λόγω ακτινοβολίας ή μεταφοράς
- Απώλειες λόγω υγρασίας στο καύσιμο



### 1.3.2 Ορθολογική διαχείριση ενέργειας

Για την Ορθολογική Χρήση της Ενέργειας θα πρέπει να γίνεται αποδοτικότερη χρήση των εγκαταστάσεων (καυστήρες, λέβητες, φούρνοι) με το σταθερό κατά το δυνατόν φορτίο, ώστε να αποφεύγονται ενεργοβόρες διακυμάνσεις φορτίου. Οι διακυμάνσεις φορτίου απαιτούν μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, λόγω των σχετικά μεγάλων φάσεων αναπροσαρμογής, οι οποίες γίνονται ακόμα σημαντικότερες όσο αυξάνει το μέγεθος της παραγωγικής μονάδος. Σε περίπτωση ύπαρξης πολλών καυστήρων, κυρίως σε κλιβάνους και λέβητες, υιοθετείται υπό το πρίσμα μίας ορθολογικότερης αποδοτικότερης εκμετάλλευσης, η μερική παύση λειτουργίας ενός ή περισσοτέρων καυστήρων με βάση τις πραγματικές απαιτήσεις.

Ανάλογα με το είδος καυσίμου απαιτείται μεγαλύτερος ή μικρότερος χρόνος προετοιμασίας για καύση. Το φυσικό αέριο για παράδειγμα είναι έτοιμο για επί τόπου καύση. Αντίθετα το μαζούτ 3500, χρειάζεται προθέρμανση. Το ξύλο σαν καύσιμο μπορεί κατά την φύλαξή του, να έχει απορροφήσει υγρασία, οπότε χρειάζεται ξήρανση.

Περιοδική ή ακόμη και συνεχής παρακολούθηση βασικών παραμέτρων λειτουργίας της μονάδας, όπως μετρήσεις θερμοκρασίας, μέτρηση περισσειας αέρα κ.λ.π. δίνουν μία καλή εικόνα της καύσης. Περιοδικά μία εκτίμηση της απόδοσης της καύσης, με την μέθοδο της ανάλυσης των καυσαερίων, συμπληρώνει την παραπάνω εικόνα.

Η πράξη έχει δείξει ότι εάν είναι δυνατή μία μείωση της περισσειας αέρα κατά 15% θα βελτιώνε κατά 1,5% τον συντελεστή απόδοσης της καύσης, γι' αυτόν τον λόγο η περισσεια του αέρα καύσης θα πρέπει να περιορίζεται στα κατώτερα εφικτά επίπεδα.

Στα πλαίσια της ορθολογικής διαχείρισης περιλαμβάνεται και η διαδικασία συντήρησης. Οι βασικές καθώς και οι δευτερεύουσες ρυθμίσεις του καυστήρα θα πρέπει να ελέγχονται και να συμφωνούν απόλυτα με τις συστάσεις του κατασκευαστή. Η στεγανότητα στους αγωγούς αέρα καθώς και στους αγωγούς των καυσαερίων, θα πρέπει να ελέγχεται περιοδικά με σχολαστικότητα, για αποφυγή απωλειών ή ροής δευτερεύοντα αέρα μέσα στα παραπάνω κυκλώματα, γεγονός που αλλοιώνει τις συνθήκες της καύσης εις βάρος της αποδοτικότητας. Θυρίδες επιθεώρησης οι οποίες δεν καλύπτονται ή δεν ασφαλίζουν τελείως, πρέπει να αντικαθιστώνται ή να επισκευάζονται, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη στεγανότητα. Διατάξεις στεγανοποίησης οι οποίες παρουσιάζουν διαρροές πρέπει να επισκευάζονται επίσης. Σε εναλλάκτες θερμότητας πρέπει επίσης να δίνεται προσοχή, για την περίπτωση διαρροών.

Στις εσωτερικές επιφάνειες του καυστήρα, έχουμε συνήθως εναπόθεση καταλοίπων της καύσης, τα οποία εξαρτώνται από την φύση του καυσίμου. Περιοδικός καθαρισμός των εσωτερικών επιφανειών του καυστήρα και των ακροφυσίων θα βοηθούσε στην διατήρηση υψηλού συντελεστή απόδοσης. Εξωτερικός λεπτομερής οπτικός και όχι μόνο έλεγχος, θα εντόπιζε "θερμές εστίες", οι οποίες είναι ενδείξεις τοπικών προβλημάτων. Στις εξωτερικές επιφάνειες, οι θερμοκρασίες δεν θα έπρεπε ξεπερνούν τους 50°C, για λόγους ασφάλειας των εργαζομένων. Η συμβολή μίας θερμογραφικής κάμερας σε ένα αναλυτικό Energy Audit, θα εντόπιζε και τις πιο ασήμαντες εστίες απωλειών.

### 1.3.3 Αύξηση συντελεστή απόδοσης καύσης

Στα πλαίσια της εξοικονόμησης ενέργειας πρέπει κατ' αρχήν να εστιαστεί η προσοχή στην αύξηση του συντελεστή απόδοσης του εξεταζόμενου συστήματος. Από τον ορισμό του τελευταίου προκύπτει ότι η μείωση των απωλειών στο σύστημα παίζει πρωταρχικό ρόλο.

Περίσσεια αέρα σε σχέση με την στοιχειομετρικά απαιτούμενη ποσότητα μέχρι κάποιο βαθμό, προσφέρει καλύτερες συνθήκες καύσης, αλλά αυξάνει και την θερμοκρασία των καυσαερίων, αυξάνοντας παράλληλα τις απώλειες θερμότητας στα τελευταία που παίζουν το σημαντικότερο ρόλο.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων αποτελεί μια αρκετά καλή πηγή πληροφοριών για την ποιότητα της καύσης. Ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες καυσαερίων προειδοποιούν για μεγάλες απώλειες σε αυτά. Μεγάλη δηλαδή ποσότητα της προσφερόμενης θερμότητας διοχετεύεται στα καυσαέρια και κατά συνέπεια χάνεται στο περιβάλλον, χωρίς να αξιοποιείται για τον συγκεκριμένο επιθυμητό σκοπό. Η εμπειρία δείχνει ότι μια μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων κατά 25° C αυξάνει κατά 1% τον συντελεστή απόδοσης της καύσης σε ένα λέβητα. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία των καυσαερίων δεν πρέπει να πέσει κάτω από μια συγκεκριμένη (ανάλογα με το καύσιμο και την περιεκτικότητα του σε Θείο) θερμοκρασία, λόγω υγροποίησης συστατικών και δημιουργίας οξέων με αποτέλεσμα διαβρώσεις (Διάγραμμα 1)

Εγκατάσταση ή βελτίωση της ήδη υπάρχουσας θερμομόνωσης, του θαλάμου καύσης συμβάλει σημαντικά στη μείωση των απωλειών λόγω ακτινοβολίας θερμότητας στο περιβάλλον.

### 1.3.4 Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μικρού κόστους

Στη συνέχεια εξετάζονται μικρού κόστους επεμβάσεις όπως, προσαρμογή και επανατοποθέτηση της εισόδου του αέρα καύσης. Αξίζει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο, ότι στα παραδείγματα που ακολουθούν ενδιαφέρει κυρίως η μεθοδολογία του υπολογισμού. Το κόστος των καυσίμων, καθώς και οι τιμές θερμογόνου δύναμης είναι καθαρά ενδεικτικές, χωρίς να απέχουν όμως πολύ από αυτές που συναντώνται στον ελληνικό χώρο.

#### Παράδειγμα:

Καυστήρας λειτουργεί με φυσικό αέριο 10000kg/h και θερμοκρασία αέρα 20°C. Υποθέτουμε ότι μετακινούμε την εισαγωγή αέρα σε χώρο όπου επικρατούν θερμοκρασίες της τάξης των 35°C. Έστω ότι  $C_p=1,01\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ . Η ανακτώμενη θερμότητα, λόγω αυτής της μετατροπής, θα ήταν:

$$Q_{\text{ανακτ.}} = 10000\text{kg/h} \times (35-20)^\circ\text{C} \times 1,01\text{kJ/kg}^\circ\text{C} = 151500\text{kJ/kg}$$

Δεχόμενοι ότι ο παραπάνω κλίβανος λειτουργεί 6000 h/έτος και το κόστος του καυσίμου (φυσικού αερίου) ανέρχεται σε 1290 δρχ /GJ, η εξοικονόμηση σε ετήσια βάση θα ήταν:

$$\text{Εξοικονόμηση σε ετήσια βάση} = \frac{151500 \times 6000 \times 1290}{1000000} = 1172610 \text{ δρχ.}$$

Εάν το κόστος της παραπάνω επέμβασης ανέρχεται σε 2214000 δρχ τότε η απόσβεση της παραπάνω επένδυσης θα ολοκληρωνόταν σε:

$$\text{Απόσβεση} = \frac{2214000 \text{ δρχ}}{1172610 \text{ δρχ}} = 1,8 \text{ έτη}$$

γεγονός το οποίο ενισχύει σοβαρά την ανάγκη αυτής της μετατροπής.

Όπως προαναφέρθηκε, μια σειρά μετρήσεων, βασικών παραμέτρων λειτουργίας σε συνεχή ή σε περιοδική βάση, δίνει μία πολύ καλή εικόνα για την ποιότητα της καύσης. Μέτρηση της θερμοκρασίας καυσαερίων δίνει πληροφορίες για την περίσσεια αέρα, π.χ. υψηλές θερμοκρασίες, αποδεικνύουν σχετικά μεγάλη περίσσεια αέρος. Αντίθετα πολύ χαμηλές θερμοκρασίες καυσαερίων, λόγω κάποιας διάταξης ανάκτησης θερμότητας εγκυμονούν κινδύνους για διάβρωση στα εσωτερικά τοιχώματα της καμινάδας, λόγω δημιουργίας οξέων.

Η ανάλυση καυσαερίων δίνει ακριβείς πληροφορίες για την σύνθεση τους. Τα επιμέρους ποσοστά του O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, δίνουν μία πολύ καλή εικόνα για την ποιότητα της καύσης.

### **1.3.5 Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μεγάλης έκτασης:**

Επεμβάσεις και μετατροπές μεγάλης έκτασης θεωρούνται οι επεμβάσεις στον εξοπλισμό που συνδέονται άμεσα με αντικαταστάσεις εξοπλισμού και υψηλό κόστος. Στην συνέχεια εξετάζονται τα οικονομικά οφέλη από την εγκατάσταση προθερμαντήρα και την μετατροπή της εγκατάστασης για χρήση φυσικού αερίου αντί μαζούτ 1500.

#### ***Εγκατάσταση προθερμαντήρα***

Μετά την εγκατάσταση ενός προθερμαντήρα σε βιομηχανία γυαλιού, έχει σημειωθεί ετήσια εξοικονόμηση σε φυσικό αέριο 4438 GJ, λειτουργώντας κατά μέσο όρο 50 εβδομάδες ετησίως. Δεχόμενοι ότι η τιμή του φυσικού αερίου είναι 1290 δρχ /GJ τότε η εξοικονόμηση σε ετήσια βάση θα ήταν:

Εξοικονόμηση σε ετήσια βάση = 4438 GJ X 1290 δρχ /GJ = 5725020 δρχ

Εάν το κόστος εγκατάστασης του προθερμαντήρα ανέρχεται σε 4920000 δρχ, τότε η απόσβεση της παραπάνω επένδυσης θα ολοκληρωνόταν σε:

$$\text{Απόσβεση} = \frac{4920000 \text{ δρχ}}{5725020 \text{ δρχ}} = 0,89 \text{ έτη}$$

#### ***Μετατροπή για χρήση φυσικού αερίου***

Ένας λέβητας καταναλώνει 10000kg/h μαζούτ 1500 του οποίου η τιμή είναι 74 δρχ /lt. Η ετήσια κατανάλωση του λέβητα ανέρχεται σε 2,2 εκατομμύρια lt. Το κόστος μετατροπής του λέβητα για χρήση φυσικού αερίου κοστίζει 29520000 δρχ, με νέο σύστημα αυτομάτου ελέγχου του καυστήρα, δίκτυο σωληνώσεων κ.λ.π. Οι αρχικές συνθήκες λειτουργίας αντιστοιχούν σε 40% περίσσεια αέρα και θερμοκρασία 240°C. Η τιμή του φυσικού αερίου είναι 1290 δρχ /GJ. Για την καύση του μαζούτ έχουμε απώλειες 18% στα καυσαέρια και 2 % λόγω ακτινοβολίας. (Διάγραμμα 3 και 4 του Παραρτήματος)

$$\text{Συντελεστής απόδοσης του λέβητα} = 100 - (18 + 2) = 80 \%$$

Αντίστοιχα για την καύση του φυσικού αερίου έχουμε απώλειες 20,7% στα καυσαέρια και 2 % λόγω ακτινοβολίας. (Διαγράμματα 7 και 8 του Παραρτήματος)

$$\text{Συντελεστής απόδοσης του λέβητα για φυσικό αέριο} = 100 - (20,7 + 2) = 77,3 \%$$

Λόγω της μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε υδρατμούς στα καυσαέρια που προέρχονται από την καύση φυσικού αερίου σε σχέση με το μαζούτ η παραπάνω μείωση του συντελεστή απόδοσης του λέβητα από περίπου 80 % σε 77,3 %, μετά την μετατροπή, είναι αναμενόμενη.

Τα ετήσια έξοδα για μαζούτ θα ήταν:

$$\text{Ετήσια έξοδα μαζούτ} = 74 \text{ } \delta\rho\chi/\text{lt} \times 2200000\text{lt} = 162800000 \text{ } \delta\rho\chi$$

Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια θα ήταν:

$$\text{Ετήσια παραγόμενη ενέργεια (μαζούτ)} = \frac{2200000 \text{ lt} / \text{έτος} \times 36,98 \text{ MJ} / \text{lt}}{1000 \text{ MJ} / \text{GJ}} = 81356 \text{ GJ}$$

$$\text{Ετήσια παραγόμενη ενέργεια (φυσικό αέριο)} = \frac{81356 \text{ GJ} \times 80}{77,3} = 84198 \text{ GJ}$$

$$\text{Ετήσια έξοδα φυσικού αερίου} = 1290 \text{ } \delta\rho\chi / \text{GJ} \times 84198 \text{ GJ} = 108615420 \text{ } \delta\rho\chi$$

$$\text{Ετήσια εξοικονόμηση} = 162800000 \text{ } \delta\rho\chi - 108615420 \text{ } \delta\rho\chi = 54184580 \text{ } \delta\rho\chi$$

Η απόσβεση της παραπάνω επένδυσης θα ολοκληρωνόταν σε:

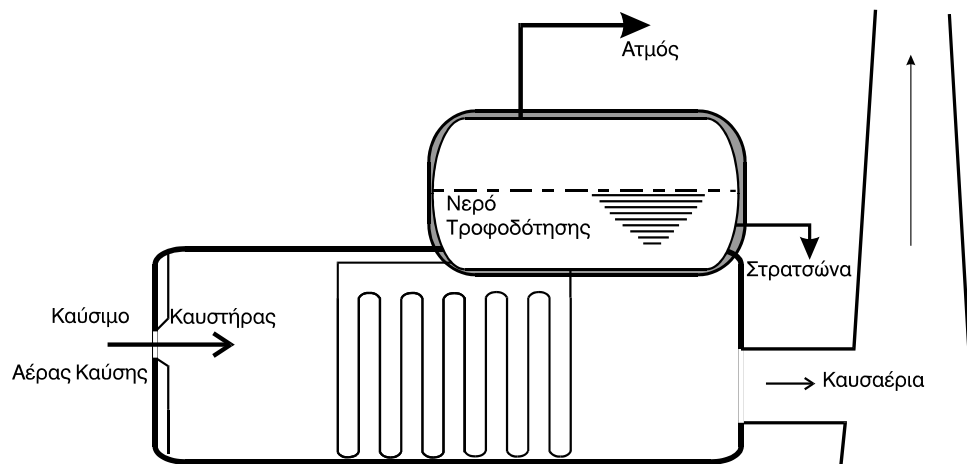
$$\text{Απόσβεση} = \frac{29520000 \text{ } \delta\rho\chi}{54184580 \text{ } \delta\rho\chi} = 0,54 \text{ } \acute{\epsilon}\tau\eta \text{ (6 } \mu\acute{\eta}\nu\epsilon\varsigma \text{ περίπου)}$$

## 2. Λέβητες

Οι λέβητες χρησιμοποιούνται ευρέως στις βιομηχανίες, στις μικρομεσαίες επιχειρήσεις καθώς και στο τριτογενή τομέα για την παραγωγή ατμού ή ζεστού νερού. Η λειτουργία των λεβήτων απαιτεί σημαντικές καταναλώσεις καυσίμων για την παραγωγή θερμικής ενέργειας υπό μορφή ατμού ή ζεστού νερού. Αυτό σημαίνει ότι η λειτουργία τους με υψηλό βαθμό απόδοσης είναι σημαντική παράμετρος για την εξοικονόμηση ενέργειας.

Υπάρχουν δύο βασικά είδη λεβήτων: οι υδραυλωτοί και αεριαυλωτοί. Στους υδραυλωτούς το νερό κυκλοφορεί μέσα στους αυλούς και τα καυσαέρια περνούν εξωτερικά, ενώ στους αεριαυλωτούς τα καυσαέρια κινούνται μέσα στους αυλούς που βρισκονται μέσα σε νερό.

Στο παρακάτω Σχήμα 2 παρουσιάζονται σχηματικά τα βασικά στοιχεία ενός λέβητα. Το καύσιμο (με την απαιτούμενη ποσότητα αέρα) καίγεται και αποδίδει την θερμότητα του. Τα παραγόμενα από την καύση θερμά αέρια θερμαίνουν το νερό τροφοδοσίας που μετατρέπεται σε ατμό (ή θερμό νερό). Οι απώλειες από την στρατσώνα (blowdown), είναι αναγκαίες για την επίτευξη ικανοποιητικής απόδοσης του λέβητα για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 2. Βασική λειτουργία λέβητα.

## 2.1 Προσδιορισμός απόδοσης λέβητα

Για να προσδιορισθεί ο συντελεστής απόδοσης ενός λέβητα, χρησιμοποιείται μία από τις παρακάτω μεθόδους:

### α) Άμεση Μέθοδος:

Η μέθοδος αυτή προσδιορίζει τον συντελεστή απόδοσης με βάση την διαθέσιμη - αξιοποιήσιμη ενέργεια (θερμότητα) προς την προσφερόμενη. Προσδιορίζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$\text{Απόδοση λέβητα} = \frac{\text{Αποδιδόμενη Θερμότητα Λέβητα}}{\text{Προσφερόμενη Θερμότητα Καυσίμου}} \times 100$$

ή

$$\text{Απόδοση λέβητα} = \frac{\text{Προσφερόμενη θερμότητα στο νερό Παροχής}}{\text{Προσφερόμενη θερμότητα στον λέβητα}} \times 100$$

### Παράδειγμα

Υπολογισμός συντελεστή απόδοσης λέβητα, με την άμεση μέθοδο προσδιορισμού:

Έστω ότι ατμολέβητας παραγωγής υπέρθερμου ατμού, έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά λειτουργίας:

---

Τροφοδοτούμενο νερό στον προθερμαντήρα	12500kg/h
Θερμοκρασία τροφοδοτούμενου νερού	80° C
Στρατσώνα	500kg/h
Πίεση λειτουργίας λέβητα	12 kg/cm <sup>2</sup> (απόλ.)
Θερμοκρασία λειτουργίας	187° C
Θερμοκρασία υπέρθερμου ατμού	240° C
Καύσιμο μαζούτ	905kg/h
Ειδική ενθαλπία ατμού (240° C, 12 kg/cm <sup>2</sup> )	696Kcal/kg
Ειδική ενθαλπία νερού τροφοδοσίας (80° C)	80Kcal/kg

---

Ειδική ενθαλπία νερού στρατσώνας (187° C, 12 kg/cm<sup>2</sup>) 190Kcal/kg

Θερμογόνος δύναμη μαζούτ 3500 9603kcal/kg

---

Παραγόμενος ατμός = Νερό τροφοδοσίας - Στρατσώνα  
= 12500kg/h - 500kg/h = 12000kg/h

Θερμότητα παραγ. ατμού = 965Kcal/kg X 12000kg/h = 8340000Kcal/h

Θερμότητα στρατσώνας = 190Kcal/kg X 500kg/h = 95000Kcal/h

Θερμότητα νερού τροφοδοσίας = 80Kcal/kg X 12500kg/h = 1000000Kcal/h

Θερμότητα που μεταβιβάζεται στο νερό = 8340000 + 95000 + 1000000 = 7435000Kcal/h

Θερμότητα που εκλύει το καύσιμο = 905kg/h X 9603 kcal/kg = 8690715 kcal/h

$$\text{Θερμικός βαθμός απόδοσης} = \frac{7435000}{8690715} \times 100 = 85,55\%$$

### β) Έμμεση Μέθοδος:

Η έμμεση μέθοδος προσδιορισμού της απόδοσης των λέβητων γίνεται μέσω της ανάλυσης των καυσαερίων και προσδιορίζεται από την περιεκτικότητα των καυσαερίων σε CO<sub>2</sub>. (Διαγράμματα 1 έως 8 στο Παράρτημα)

Αποτελέσματα από ανάλυση οργάνου -αναλυτή καυσαερίων- δίνεται παρακάτω :

ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΟ ΜΕΓΕΘΟΣ	Λέβητας Νο 1	Λέβητας Νο 2
ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΥΣΗΣ	78,5 %	79,2%
ΠΕΡΙΣΣΕΙΑ ΑΕΡΑ λ	1,27	1,16
ΠΟΣΟΣΤΟ O <sub>2</sub>	6,4%	4,4%
ΠΟΣΟΣΤΟ CO <sub>2</sub>	10,3%	12,3%
ΠΟΣΟΤΗΤΑ CO	1 ppm	0 ppm
ΠΟΣΟΤΗΤΑ NO	107 ppm	105 ppm
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	359 <sup>0</sup> C	243 <sup>0</sup> C
ΠΟΣΟΤΗΤΑ SO <sub>2</sub>	6 ppm	0 ppm
ΚΑΠΝΟΣ (Κλίμακα Bacharach)	5	1
ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ	21,5%	20,8%

Πίνακας 1. Αποτελέσματα Ανάλυσης Καυσαερίων καυστήρα λέβητα Νο1.



## 2.2 Δυνατότητες Εξοικονόμησης σε λέβητες

Τα πεδία εξοικονόμησης εντοπίζονται σε:

1. Ορθολογική διαχείριση σε λέβητες
2. Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μικρού κόστους.
3. Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μεγάλης έκτασης

### 2.2.1 Ορθολογική διαχείριση ενέργειας σε λέβητες:

Στα πλαίσια της ορθολογικής διαχείρισης ενέργειας ενός λέβητα θα πρέπει να δοθεί προσοχή στα παρακάτω:

- Διαδικασίες για την προετοιμασία του νερού
- Διατήρηση των διαλυμένων στο νερό στερεών στο μικρότερο χαμηλό επίπεδο
- Διατήρηση της χαμηλότερης αποδεκτής πίεσης λειτουργίας στο σύστημα, ανάλογα με τις ανάγκες
- Κατάλληλη προετοιμασία του καυσίμου για την μέγιστη δυνατή απόδοση
- Περιορισμός μεγάλων διακυμάνσεων του φορτίου
- Συχνός έλεγχος της αποδοτικότητας του λέβητα
- Συστηματικός έλεγχος των πραγματικών μεγεθών λειτουργίας σε σύγκριση με τα ιδανικά
- Περιοδικός έλεγχος της περιόδου αέρα του καυστήρα

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε την επίδραση τέτοιων επεμβάσεων, υπολογίζοντας τα αναμενόμενα οφέλη:

#### Παράδειγμα:

Ένας λέβητας παράγει 10000kg/h ατμού πίεσης 1500kPa, θερμοκρασίας 240° C, πού προέρχεται από νερό παροχής με θερμοκρασία 105°C, καίγοντας μαζούτ 1500 με παροχή 805lt/h με θερμογόνο δύναμη 36,98MJ/lt. Η απόλυτη πίεση είναι 1600kPa. Η ελάχιστη απαιτούμενη στρατσώνα (blowdown) για καλή λειτουργία θα ήταν 5%, ενώ στο συγκεκριμένο παράδειγμα, οι πραγματικές τιμές αγγίζουν το 10 %.

Η ενθαλπία του νερού του λέβητα είναι 858,6kJ/kg, για απόλυτη πίεση 1600kPa.

Η ενθαλπία του νερού παροχής (θερμοκρασίας 105°C) είναι 440,17kJ/kg.

Οι θερμικές απώλειες λόγω του υπερβολικού blowdown υπολογίζονται:

$$\text{Θερμικές απώλειες} = 10000 \times (0,10 - 0,05) \times (858,6 - 440,17) = 209215 \text{kJ/kg}$$

$$\text{Θερμικές απώλειες} = \frac{209215}{805 \times 36,98 \times 1000} \times 100 = 0,703 \%$$

## 2.2.2 Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μικρού κόστους σε λέβητες:

Στα πλαίσια αυτών των επεμβάσεων, επιδιώκεται:

- Βελτίωση και επέκταση του εξοπλισμού ελέγχου.
- Εγκατάσταση και βελτίωση της θερμικής μόνωσης.
- Ανάκτηση θερμότητας από την στρατσώνα.
- Επανατοποθέτηση της εισόδου του αέρα καύσης.
- Περιορισμός της άσκοπης περίσσειας αέρα.

### Παράδειγμα:

Για την λειτουργία του λέβητα χρησιμοποιείται αέρας 14500kg/h θερμοκρασίας 20°C. Υποθέτουμε ότι μετακινούμε την εισαγωγή αέρα στην οροφή του κτιρίου όπου στεγάζεται ο καυστήρας και όπου επικρατούν θερμοκρασίες της τάξης των 30°C. Έστω ότι η ειδική θερμότητα του αέρα είναι:  $C_p=1,01\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ . Η ανακτώμενη θερμότητα λόγω αυτής της μετατροπής θα ήταν:

$$\text{Qανακτ.} = 14500 \text{kg/h} \times (30-20)^\circ\text{C} \times 1,01 \text{kJ/kg}^\circ\text{C} = 146450 \text{kJ/kg}$$

Δεχόμενοι ότι ο παραπάνω λέβητας λειτουργεί 6000h/έτος και το κόστος του καυσίμου ανέρχεται σε 1230δρχ /GJ, η εξοικονόμηση σε ετήσια βάση θα ήταν:

$$\text{Εξοικ. σε ετήσια βάση} = \frac{146450 \times 6000 \times 1230 \text{ δρχ}}{1000000} = 1054320 \text{ δρχ/έτος}$$

Εάν το κόστος της παραπάνω επέμβασης ανέρχεται σε 2400000 δρχ τότε η απόσβεση της παραπάνω επένδυσης θα ολοκληρωνόταν σε:

$$\text{Απόσβεση} = \frac{2400000 \text{ δρχ}}{1054320 \text{ δρχ}} = 2,3 \text{ έτη}$$

γεγονός το οποίο ενισχύει σοβαρά την ανάγκη αυτής της μετατροπής.

### Παράδειγμα:

Ανάκτηση θερμότητας από την στρατσώνα Ένας λέβητας παράγει 13500kg/h κεκορεσμένο ατμό απόλυτης πίεσης 1400kPa, με στρατσώνα (blowdown) 5 %. Το νερό παροχής με θερμοκρασία 105°C, έχει πίεση 1500kPa.

Η ενθαλπία του νερού του λέβητα είναι 830,1kJ/kg, για απόλυτη πίεση 1400kPa

Η απώλεια θερμότητας λόγω του blowdown υπολογίζεται:

$$\text{Θερμότητα blowdown} = 13500 \times 0,05 \times 830,1 = 560317 \text{kJ/kg}$$

Μελέτες αποδεικνύουν, ότι συνήθως περίπου 75 % της θερμότητας του blowdown, είναι ανακτήσιμη. Έστω ότι ο παραπάνω λέβητας λειτουργεί 5000h/έτος και το κόστος του καυσίμου ανέρχεται σε 1230 δρχ /GJ. Η εξοικονόμηση σε ετήσια βάση θα ήταν:

$$\text{Εξοικονόμ. σε ετήσια βάση} = \frac{560317 \times 0,75 \times 6000 \times 1230}{1000000} = 2584476 \text{ δρχ / έτος}$$

Εάν το κόστος εγκατάστασης της διάταξης ανάκτησης θερμότητας, είναι 3600000 δρχ τότε η απόσβεση της παραπάνω επένδυσης θα ολοκληρωνόταν σε:

$$\text{Απόσβεση} = \frac{3600000 \text{ δρχ}}{2584476 \text{ δρχ}} = 1,4 \text{ έτη}$$

### Παράδειγμα:

Λέβητας λειτουργεί με φυσικό αέριο με 60% περίσσεια αέρα. Μετά από έλεγχο η πραγματική τιμή που μετρήθηκε ήταν 77%. Η ετήσια δαπάνη καυσίμου ανέρχεται σε 96000000 δρχ. Μια νέα ρύθμιση στον καυστήρα και προσθήκη διαφράγματος (damper) στην εισαγωγή του αέρα θα κόστιζε 480000 δρχ. Οι παραπάνω ρυθμίσεις θα επέτρεπαν λειτουργία με 60% περίσσεια αέρα, γεγονός που θα μείωνε τις απώλειες στα καυσαέρια από 21% σε 19% (βάσει του Διαγράμματος 3 του Παραρτήματος για θερμοκρασία 210°C). Δεχόμενοι ότι στα καυσαέρια δεν θα είχαμε άλλες ουσιαστικές μεταβολές, η απόδοση του λέβητα θα ήταν 79%, οπότε:

$$\text{Ετήσια δαπάνη καυσίμου (40 % περ. αέρα)} = 96000000 \times \frac{77}{79} = 93569520 \text{ δρχ}$$

Ετήσια εξοικονόμηση = 96000000 δρχ - 93569520 δρχ = 2430480 δρχ

$$\text{απόσβεση} = \frac{480000 \text{ δρχ}}{2430480 \text{ δρχ}} = 0,2 \text{ έτη (2,4 μήνες)}$$

### 2.2.3 Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μεγάλης έκτασης σε λέβητες

**Παράδειγμα:**

Εγκατάσταση Economizer. Λέβητας με δυνατότητα παραγωγής 20000kg/h υπέρθερμου ατμού πίεσης 3100kPa (από ένδειξη), καίει φυσικό αέριο με 10% περίσσεια αέρα. Η θερμοκρασία καυσαερίων είναι 300° C, ενώ η υπολογιζόμενη απόδοση του λέβητα είναι 80 %, πριν την μετατροπή. Την ίδια εποχή η ετήσια κατανάλωση ήταν κατανάλωση 292780 GJ με κόστος 1290δρχ/GJ. Το υπολογιζόμενο κόστος μετατροπής υπολογίζεται σε 38868000 δρχ.

Ετήσια δαπάνη καυσίμου (πριν την μετατροπή)= 1290 X 292780 = 377686200 δρχ / GJ

Μετά την μετατροπή κρατώντας την παραπάνω περίσσεια αέρα (10%), η θερμοκρασία των καυσαερίων μειώθηκε στους 180° C. Από το Διάγραμμα 3 του Παραρτήματος παρατηρούμε μείωση των θερμικών απωλειών από τα καυσαέρια κατά 4,8 %. Οι απώλειες από ακτινοβολία εκτιμώνται σε 0,2 %. Δεχόμενοι ότι ο εξοικονομητής αποδίδει κατά 96 %, η ανακτώμενη ενέργεια θα ήταν 4,8 - 0,2 = 4,6 % οπότε:

Ετήσια ποσότητα θερμότητας ατμού = 292780 GJ X 0,8 = 234224 GJ

$$\text{Θερμική ενέργεια του καυσίμου} = \frac{292780 \text{ GJ}}{(0,8 + 0,046)} = 276860 \text{ GJ}$$

Ετήσια δαπάνη καυσίμου (μετά την μετατροπή)= 276860 X 1290 δρχ = 357149400 δρχ

Εξοικονόμηση σε ετήσια βάση = 377686200 - 357149400 = 20536800 δρχ

$$\text{Απόσβεση} = \frac{38868000 \text{ δρχ}}{20536800 \text{ δρχ}} = 1,9 \text{ έτη}$$

**Παράδειγμα:**

Εγκατάσταση νέου λέβητα. Σε λέβητα με δυνατότητα παραγωγής 15000kg/h κεκορεσμένου ατού πίεσης 2200kPa (απόλυτο), θερμοκρασίας 105°C, εάν μειωθεί το φορτίο σε 5000kg/h για 6000 ώρες ετησίως, μειώνεται και η απόδοση του συγκεκριμένου λέβητα σε 71 %. Ένας νέος λέβητας σχεδιασμένος απ' αρχής για 5000kg/h, κάτω από τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας θα είχε απόδοση 80 %, ενώ το κόστος εγκατάστασης θα ήταν 12000000 δρχ.

Η ενθαλπία του νερού του λέβητα είναι 858,6kJ/kg, για απόλυτη πίεση 1600kPa.

Η ενθαλπία του κεκορεσμένου ατμού, απόλυτης πίεσης 2200kPa είναι 2799,1kJ/kg.

Η ενθαλπία του νερού παροχής (θερμοκρασίας 105°C) είναι 440,17kJ/kg.

Οι θερμικές απώλειες λόγω του υπερβολικού blowdown υπολογίζονται:

$$\text{Ενέργεια καυσίμου παλαιού λέβητα} = \frac{5000 \times (2799,1 - 440,17)}{0,71 \times 1000000} = 16,61 \text{ GJ / h}$$

$$\text{Ετήσια δαπάνη καυσίμου} = 16,61 \times 6000 \times 1290 = 128561400 \text{ δρχ}$$

$$\text{Ετήσια δαπάνη καυσίμου νέου λέβητα} = 128561400 \text{ δρχ} \times \frac{71}{80} = 114098242,5 \text{ δρχ}$$

$$\text{Ετήσια εξοικονόμηση} = 128561400 \text{ δρχ} - 114098242 \text{ δρχ} = 14463157,5 \text{ δρχ}$$

$$\text{Απόσβεση} = \frac{12000000 * \text{δρχ}}{14463157,5 * \text{δρχ}} = 0,83 \text{ έτη}$$

### **Παράδειγμα:**

Αναβάθμιση καυστήρα. Καυστήρας καίει φυσικό αέριο με περίσσεια αέρα 40 %, χωρίς να υπάρχουν περιθώρια μείωσης της περισσειας αέρα, λόγω μη αποδοτικής μίξης. Ένας νέος καυστήρας με πολύ καλύτερη μίξη είναι δυνατόν να λειτουργεί με περίσσεια αέρα μόνο 10 %, η εγκατάσταση του οποίου θα κόστιζε 11070000 δρχ. Το ετήσιο κόστος καυσίμου ανέρχεται σε 98000000 δρχ. Η θερμοκρασία καυσαερίων είναι 250°C.

Με την μείωση της περισσειας αέρα από 40% σε 10% μειώνονται οι απώλειες στα καυσαέρια από 22% σε 19%. Η αποδοτικότητα του λέβητα αυξάνεται από 76% σε 79%, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας ανέρχονται σε 2 %.

Ετήσιο κόστος καυσίμου μετά την μετατροπή =  $98000000 \text{ } \delta\rho\chi \times \frac{76}{79} = 94278478 \text{ } \delta\rho\chi$

Ετήσια εξοικονόμηση =  $98000000 \text{ } \delta\rho\chi - 94278478 \text{ } \delta\rho\chi = 3721522 \text{ } \delta\rho\chi$

$$\text{Απόσβεση} = \frac{11070000 \text{ } \delta\rho\chi}{3721522 \text{ } \delta\rho\chi} = 2,96 \text{ } \acute{\epsilon}\tau\eta$$

### **Παράδειγμα:**

Εγκατάσταση δινογεννήτριας (turbulator) Σε λέβητες ισχύος μικρότερης από 75kW, μετά από μετατροπή για καύση φυσικού αερίου αντί για μαζούτ τείνει να μειωθεί η απόδοση. Μια απλή διάταξη ενίσχυσης της τύρβης, δηλ. μια περιστρεφόμενη σπιράλ διάταξη, προσθέτει επιπλέον περιστροφή στο καύσιμο μείγμα, εξασφαλίζοντας έτσι καλύτερη μίξη. Η θερμική απόδοση αυξάνεται κατ' αυτόν τον τρόπο κατά 3 έως 4 %.

Ας εξετάσουμε την περίπτωση ενός λέβητα ισχύος 50kW, με ετήσιο κόστος καυσίμου 15600000  $\delta\rho\chi$ . Εάν το κόστος εγκατάστασης ανέρχεται σε 600000  $\delta\rho\chi$ , τότε έχουμε:

Ετήσια εξοικονόμηση =  $15600000 \text{ } \delta\rho\chi \times 0,03 = 468000 \text{ } \delta\rho\chi$

$$\text{Απόσβεση} = \frac{600000 \text{ } \delta\rho\chi}{468000 \text{ } \delta\rho\chi} = 1,3 \text{ } \acute{\epsilon}\tau\eta$$

## 3. Κλίβανοι - Φούρνοι

### 3.1 Γενικά

Οι φούρνοι και οι κλίβανοι βρίσκουν κυρίως εφαρμογές στη βιομηχανία σε:

- Θέρμανση μετάλλων
- Τήξη μετάλλων
- Έψηση τούβλων
- Έψηση κεραμικών
- Αφύγρανση ξύλου
- Ξήρανση βαφής
- Παραγωγή άσβεστου

Τα πιθανά καύσιμα μπορεί να είναι:

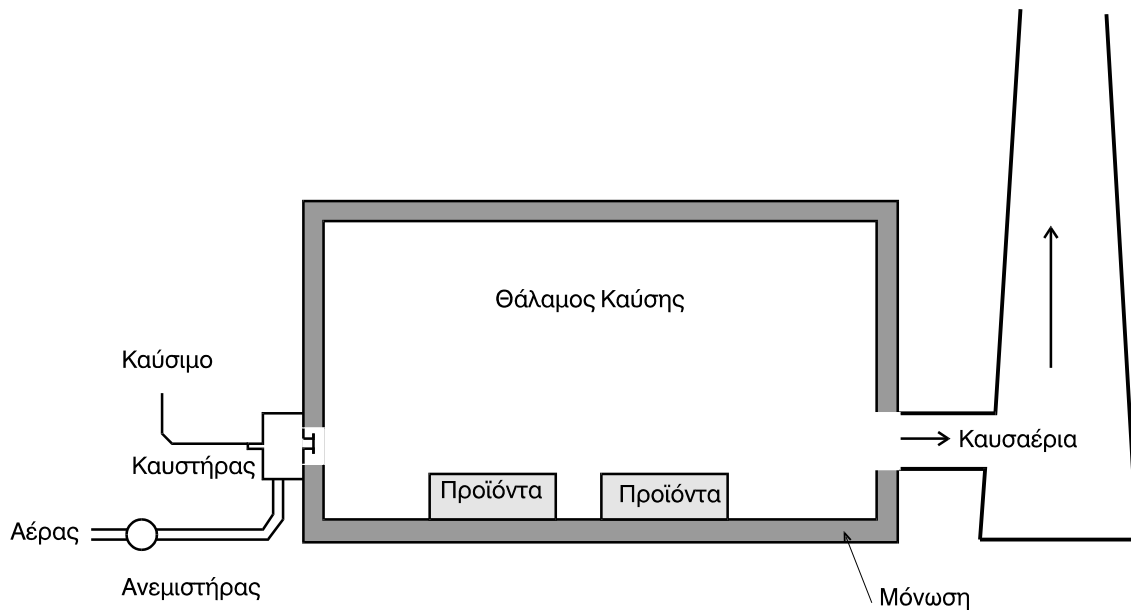
- Μαζούτ
- Φυσικό αέριο
- Κώκ

ενώ το προϊόν μπορεί να θερμαίνεται άμεσα με μετάδοση θερμότητας, μέσω αγωγής, μεταφοράς, ακτινοβολίας ή και με συνδυασμό αυτών.

Μετάδοση θερμότητας με αγωγή παρουσιάζεται μόνο σε φούρνους όπου το προϊόν χωρίζεται από την φλόγα με μια επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας.

Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή παρουσιάζεται στα όρια μεταξύ τοιχώματος και ρευστού. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης είναι πολύ σημαντικός για φούρνους που λειτουργούν κάτω από 600°C.

Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία είναι σημαντική σε φούρνους που λειτουργούν πάνω από 600°C. Σε ηλεκτρικό φούρνο για παράδειγμα, τα τοιχώματα τα οποία θερμαίνονται από ηλεκτρόδια εκπέμπουν ακτινοβολία στο περιεχόμενο του φούρνου.



Σχήμα 3. Σχηματική απεικόνιση φούρνου (με φυσικό ελκυσμό)

### Παράδειγμα

Φούρνος θερμαίνει 1800 kg/h χάλυβα από τους 40°C στους 900°C χρησιμοποιώντας φυσικό αέριο 125 m<sup>3</sup>/h. Η θερμογόνος δύναμη του φυσικού αερίου είναι 9000 kcal/m<sup>3</sup>. Η θερμοκρασία καυσαερίων είναι 1100°C με 15% περίσσεια αέρα.

Για τον υπολογισμό του ισοζυγίου θερμότητας είναι απαραίτητη η προσδιοσμένη θερμότητα, η εκμεταλλεύσιμη θερμότητα και οι θερμικές απώλειες.

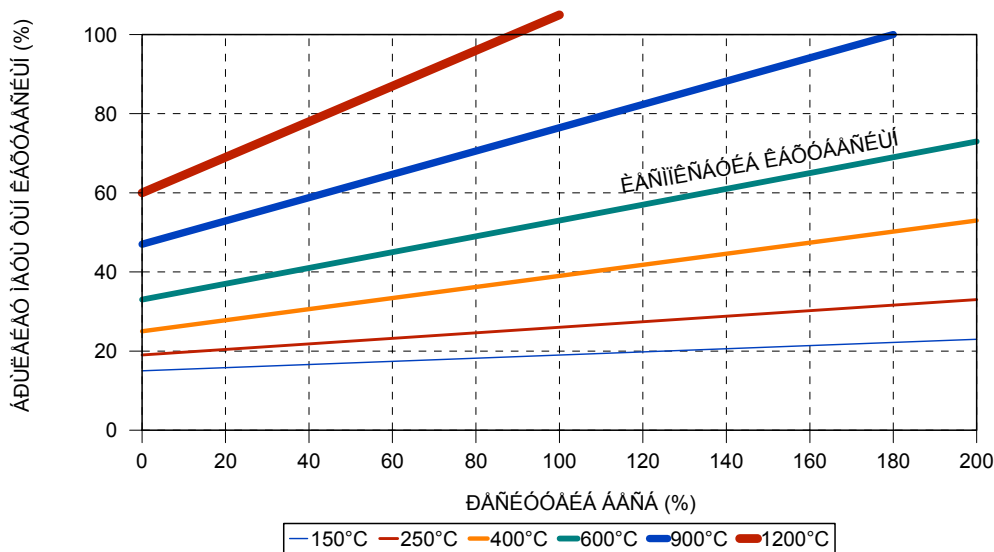
Προσδιοσμένη θερμότητα = 125 m<sup>3</sup>/h X 9000 kcal/m<sup>3</sup> = 1125 Mcal/h = 4710 MJ/h.

Η εκμεταλλεύσιμη θερμότητα είναι αυτή που απαιτείται για να επιτευχθεί η θερμοκρασία των 900°C στον χάλυβα. Από τον πίνακα 1 του Παραρτήματος η ειδική θερμότητα του χάλυβα είναι 0,5 kJ/kg °C.

Εκμεταλλεύσιμη θερμότητα = 1800 kg/h X 0,5 kJ/kg°C X (900 - 40) °C = 774 MJ/h.

Θερμικές απώλειες είναι το σύνολο των απωλειών μέσω των καυσαερίων, των απωλειών θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας.





Διάγραμμα 3. Απώλειες μέσω των καυσαερίων (Καύσιμο : Φυσικό αέριο)

Απώλειες μέσω των καυσαερίων: από το Διάγραμμα 3 με θερμοκρασία καυσαερίων 1100°C και 15% περίσσεια αέρα οι απώλειες είναι 62% .

$$4710 \text{ MJ/h} \times 62\% = 2920 \text{ MJ/h}$$

Οι απώλειες μέσω μεταφοράς και ακτινοβολίας είναι δύσκολο να μετρηθούν ακριβώς και για το λόγο αυτό υπολογίζονται από την διαφορά μεταξύ προσδοκώμενης θερμότητας και του αθροίσματος εκμεταλλεύσιμης θερμότητας και απωλειών μέσω καυσαερίων, δηλαδή:

$$4710 \text{ MJ/h} - (774 + 2920) \text{ MJ/h} = 1016 \text{ MJ/h.}$$

Άρα το θερμικό ισοζύγιο του συγκεκριμένου φούρνου είναι:

Προσδοκώμενη θερμότητα	4710 MJ/h	100%
Εκμεταλλεύσιμη θερμότητα	774 MJ/h	16,4%
Απώλειες μέσω καυσαερίων	2920 MJ/h	62%
Απώλειες μεταφοράς και ακτινοβολίας	1016 MJ/h	21,6%

## **3.2 Δυνατότητες Εξοικονόμησης σε κλιβάνους και φούρνους**

Τα πεδία εξοικονόμησης εντοπίζονται για κλιβάνους και φούρνους σε:

1. Ορθολογική διαχείριση ενέργειας.
2. Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μικρού κόστους
3. Επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας μεγάλης έκτασης.

### **3.2.1 Ορθολογική διαχείριση σε κλιβάνους και φούρνους**

Στα πλαίσια της ορθολογικής διαχείρισης θα πρέπει να δοθεί έμφαση στα παρακάτω σημεία:

- Ρυθμίσεις λειτουργίας στον καυστήρα
- Έλεγχος της περίσσειας αέρα μέσω ανάλυσης καυσαερίων
- Διατήρηση των επιφανειών των εναλλακτών θερμότητας καθαρών
- Επισκευή ή τοποθέτηση μόνωσης
- Επισκευή ή επανεγκατάσταση θυρών και καλυμμάτων
- Έλεγχος της πίεσης του φούρνου περιοδικά
- Συστηματικός προγραμματισμός της παραγωγής

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε την επίδραση μιας τέτοιας επέμβασης όπως, επανατοποθέτηση της εισόδου του αέρα καύσης, υπολογίζοντας τα αναμενόμενα οφέλη:

### **3.2.2 Επεμβάσεις μικρού κόστους σε κλιβάνους και φούρνους**

Στα πλαίσια αυτών των επεμβάσεων, είναι απαραίτητη η περιοδική ή ακόμη και συνεχής παρακολούθηση βασικών παραμέτρων λειτουργίας της μονάδας, όπως μετρήσεις θερμοκρασίας, ανάλυση καυσαερίων, μέτρηση περίσσειας αέρα κ.λ.π. Περιοδικά μία εκτίμηση της απόδοσης της καύσης, με την μέθοδο του έμμεσου προσδιορισμού, θα συμπλήρωνε την παραπάνω εικόνα. Συνοψίζοντας έχουμε:

- Συντήρηση ανοιγμάτων θυρών και καλυμμάτων
- Εγκατάσταση οργάνων παρακολούθησης της καύσης
- Ανάκτηση θερμότητας από την πιθανή εγκατάσταση ψύξης

- Επανατοποθέτηση της εισόδου του αέρα καύσης

**Παράδειγμα:**

Σε φούρνο ο οποίος καίει φυσικό αέριο, κατά την ανάλυση των καυσαερίων παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα:

$$O_2 = 9,8 \%$$

$$CO_2 = 6,2 \%$$

$$CO = 0 \%$$

Από το Διάγραμμα 5 του Παραρτήματος η περίσσεια αέρα η οποία προκύπτει για την παραπάνω σύσταση, θα ήταν 79 %. Άρα η ποσότητα του  $N_2$  υπολογίζεται:

$$N_2 = 100\% - (9,8 \% + 6,2 \% + 0 \%) = 84 \%$$

$$\text{απαιτούμενη περίσσεια αέρα} = \frac{9,8 \% - (0,5 \times 0 \%)}{(0,2682 \times 84 \%) - (9,8 \% - (0,5 \times 0,5 \%))} \times 100 = 77 \%$$

**Παράδειγμα:**

Σε φούρνο ο οποίος καίει Coke, κατά την ανάλυση των καυσαερίων παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα:

$$O_2 = 2,1 \%$$

$$CO_2 = 10 \%$$

$$CO = 0 \%$$

$$N_2 = 87,9 \% \text{ (βάση διαφοράς)}$$

$$\text{απαιτούμενη περίσσεια αέρα} = \frac{2,1 \% - (0,5 \times 0 \%)}{(0,2682 \times 87,9 \%) - 2,1 \%} \times 100 = 9,8\%$$

**Παράδειγμα:**

Σε φούρνο ο οποίος καίει φυσικό αέριο, κατά την ανάλυση των καυσαερίων παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα:

$$O_2 = 0 \%$$

$$CO_2 = 11 \%$$

$$CO = 2 \%$$

$$N_2 = 87 \% \text{ (βάση διαφοράς)}$$

$$\text{απαιτούμενη περίσσεια αέρα} = \frac{0 \% - (0,5 \times 2 \%)}{(0,2682 \times 87 \%) - (0 \% - (0,5 \times 2 \%))} = \times 100 = -4,1 \%$$

Το μείον αναφέρεται σε έλλειψη αέρος σε σχέση με την στοιχειομετρική καύση. Παράδοξο στο παραπάνω παράδειγμα είναι ότι για τον συγκεκριμένο φούρνο και τις συγκεκριμένες συνθήκες καύσης, απαιτείται περίπου 4 % λιγότερο αέρας απ' ό τι θα χρειαζόταν σε στοιχειομετρική καύση, ενώ πετυχαίνουμε πλήρη καύση ( $O_2 = 0 \%$ ), με σχετικά υψηλά όμως επίπεδα CO. Μια περαιτέρω μείωση του αέρα θα μείωνε το CO, εφ' όσον οι συνθήκες το επιτρέπουν.

Παράλληλη ύπαρξη υψηλών ποσοστών  $O_2$  και CO στα καυσαέρια, είναι μια ένδειξη κακής ανάμειξης καυσίμου - αέρα.

#### **Παράδειγμα:**

Έστω ότι ένας φούρνος, λειτουργεί με 5000 kg/h αέρα θερμοκρασίας 20°C. Υποθέτουμε ότι μετακινούμε την εισαγωγή αέρα στην οροφή του κτιρίου όπου στεγάζεται ο φούρνος και όπου επικρατούν θερμοκρασίες της τάξης των 30°C. Έστω ότι η ειδική θερμότητα του αέρα είναι 1,006 kJ/kg°C. Η ανακτώμενη θερμότητα, λόγω αυτής της μετατροπής, θα ήταν:

$$Q_{\text{ανακτ.}} = 5000 \text{ kg/h} \times (30-20) \text{ }^\circ\text{C} \times 1,006 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C} = 50300 \text{ kJ/kg}$$

Δεχόμενοι ότι ο παραπάνω κλίβανος λειτουργεί 6000 h/έτος και το κόστος του καυσίμου (φυσικού αερίου) ανέρχεται σε 1230 δρχ /GJ, η εξοικονόμηση σε ετήσια βάση θα ήταν:

$$\text{Εξοικονόμηση σε ετήσια βάση} = \frac{50300 \times 6000 \times 1230 \text{ δρχ}}{1000000} = 371214 \text{ δρχ/έτος}$$

Εάν το κόστος της παραπάνω επέμβασης ανέρχεται σε 369000 δρχ τότε η απόσβεση της παραπάνω επένδυσης θα ολοκληρωνόταν σε:

$$\text{Απόσβεση} = \frac{369000 \text{ δρχ}}{371214 \text{ δρχ}} = 1 \text{ έτος}$$

γεγονός το οποίο ενισχύει σοβαρά την ανάγκη αυτής της μετατροπής.

### 3.2.3 Επεμβάσεις μεγάλης έκτασης σε κλιβάνους και φούρνους

Αναφερόμενοι σε ριζικές επεμβάσεις, ειδικά σε φούρνους ή κλιβάνους, θα μπορούσαμε να αντιληφθούμε επεμβάσεις όπως την εγκατάσταση εναλλάκτη θερμότητας για προθέρμανση του αέρα καύσης και την εγκατάσταση θερμικής μόνωσης σε φούρνο.

#### 3.2.3.1 Τοποθέτηση εναλλάκτη θερμότητας

Για παράδειγμα μετά την εγκατάσταση ενός εναλλάκτη θερμότητας, σε φούρνο φυσικού αερίου πολλών καυστήρων, λειτουργώντας κατά μέσο όρο, 6 ημέρες την εβδομάδα, σε εικοσιτετράωρη βάση με μερικό φορτίο (15%). Η τιμή του φυσικού αερίου είναι 1290 δρχ/GJ. Ο κάθε καυστήρας καταναλώνει 193000kJ/h. Η συνολική ωριαία κατανάλωση υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την παραπάνω τιμή με τον συνολικό αριθμό των καυστήρων, 24 σε αυτόν τον φούρνο, άρα 4,63GJ/h.

ετήσιο κόστος πριν την μετατροπή =

$$\frac{(100 - 15) \times 24\text{h} \times 6\text{days} \times 52\text{weeks} \times 4,63 \text{ GJ/h} \times 1290 \text{ δρχ/ GJ}}{100}$$

$$= 38015040\text{δρχ}$$

Για να εκτιμηθούν τα ενεργειακά οφέλη, θα πρέπει πρώτα να υπολογισθεί η απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας. Τα καυσαέρια θερμοκρασίας 1100°C εισέρχονται στον εναλλάκτη και τον εγκαταλείπουν σε θερμοκρασία 650°C, ανεβάζοντας την θερμοκρασία του αέρα της καύσης από θερμοκρασία περιβάλλοντος σε 500°C. Δεχόμενοι ότι η περίσσεια αέρα παραμένει η ίδια ( 20 % σε 1000°C) έχουμε 64% απώλειες στα καυσαέρια.

$$\text{Απώλειες καυσαερίων ανά καυστήρα} = \frac{64}{100} \times 193000\text{kJ/h} = 123500\text{kJ/h}$$

Το υπόλοιπο της θερμότητας 193000kJ/h - 123500kJ/h = 69500kJ/h συνεχίζει μέσα στον φούρνο.

$$\text{Θερμότητα καυστήρα} = 69500 / 0,6 = 115800\text{kJ/h}$$

$$\text{Απώλειες καυσαερίων ανά καυστήρα} = 115800 - 69500 = 46300\text{kJ/h}$$

$$\text{Ενεργειακά οφέλη} = 24 \times (123500 - 46300) = 1852800\text{kJ/h}$$

$$\text{Εξοικονόμηση} = \frac{1,85 \text{ GJ/h}}{4,63 \text{ GJ/h}} \times 100 = 40 \%$$

Πραγματικές τιμές εξοικονόμησης πλησιάζουν το 48 %. Η παραπάνω διαφορά προκύπτει λόγω της αδυναμίας ακριβούς προσδιορισμού των θερμοκρασιών της ροής.

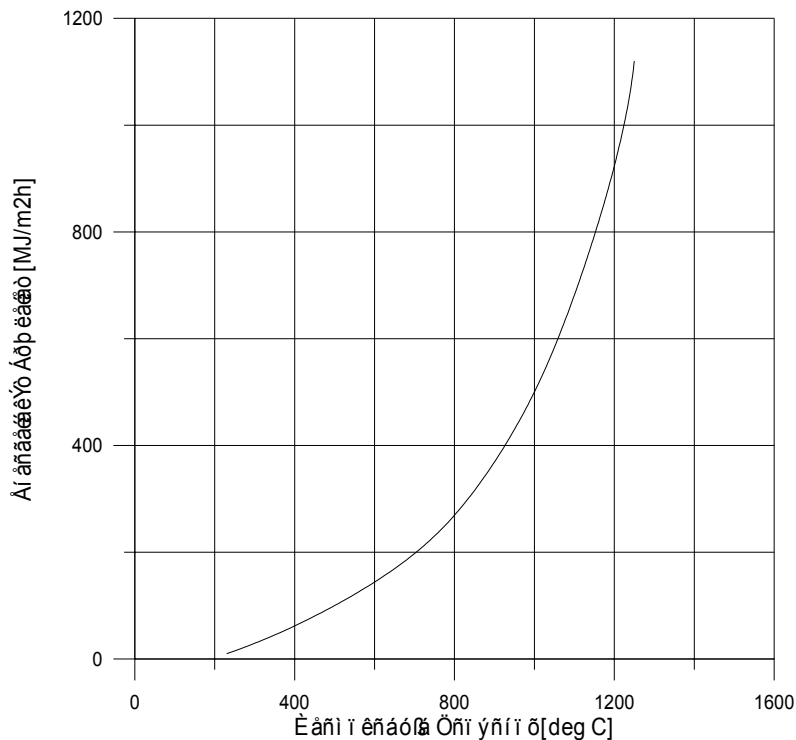
Με τις παραπάνω τιμές εξοικονόμησης θα φθάναμε σε μία ετήσια εξοικονόμηση 18247219 δρχ περίπου. Εάν το κόστος εγκατάστασης ανέρχεται σε 28800000 δρχ, τότε η απόσβεση της δαπάνης θα ήταν:

$$\text{Απόσβεση} = \frac{28800000 \text{ δρχ}}{18247219 \text{ δρχ}} = 1,58 \text{ έτη}$$

### **3.2.3.2 Τοποθέτηση νέας μόνωσης**

Το είδος της μόνωσης του φούρνου, καθώς και η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η τελευταία, παίζουν μεγάλο ρόλο στον περιορισμό άσκοπων απωλειών, από ακτινοβολίες.

Έστω ότι σε μία επιθεώρηση φούρνου, συνοδευόμενη από μετρήσεις έδειξαν θερμοκρασίες 200°C στις επιφάνειες των τοιχωμάτων και 250°C στην οροφή του φούρνου. Εάν οι εξωτερικές διαστάσεις του φούρνου είναι 2m X 2m X 6m και στοχεύοντας στην μείωση των θερμοκρασιών των παραπάνω επιφανειών σε 50°C, για λόγους ασφάλειας του προσωπικού και περιορισμού των θερμικών απωλειών, λόγω ακτινοβολίας, τότε υπολογίζουμε στην συνέχεια τα αναμενόμενα από την παραπάνω επέμβαση οφέλη.



Από το παραπάνω διάγραμμα υπολογίζονται οι θερμικές απώλειες σε 21,5 MJ/(m<sup>2</sup>.h) στους 250°C , 11,6 MJ/( m<sup>2</sup>.h) στους 200 ° C και 1,7 MJ/( m<sup>2</sup>.h) στους 50°C, οπότε:

$$\text{Επιφάνεια οροφής} = 2 \text{ m} \times 6 \text{ m} = 12 \text{ m}^2$$

$$\text{Επιφάνεια τοιχωμάτων} = (2 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 2 \text{ m}) + (2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}) = 32 \text{ m}^2$$

$$\text{Θερ. απώλειες πριν} = [21,5 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{h}) \times 12 \text{ m}^2] + [11,6 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{h}) \times 32 \text{ m}^2] = 692,2 \text{ MJ/h}$$

$$\text{Θερ. απώλειες μετά} = 1,7 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{.h}) \times (12 \text{ m}^2 + 32 \text{ m}^2) = 74,8 \text{ MJ/h}$$

$$\text{Εξοικονόμηση ενέργειας} = 692,2 \text{ MJ/h} - 74,8 \text{ MJ/h} = 617,4 \text{ MJ/h}$$

Με ετήσια χρήση 4000 ώρες και τιμή καυσίμου 1230 δρχ /GJ, η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας, θα ήταν:

$$\begin{aligned} \text{ετήσια εξοικονόμ. ενέργειας} &= \frac{617,4 \text{ MJ/h} \times 4000 \text{ ώρες/έτος} \times 1230 \text{ δρχ /GJ}}{1000 \text{ MJ /GJ}} \\ &= 3037608 \text{ δρχ} \end{aligned}$$

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Combustion, Energy Management Series, for industry commerce and institutions, Volume. 5 Minister of Supply and Services Canada 1989
2. Boiler plant equipment, Energy Management Series, for industry commerce and institutions, Vol. 6 Minister of Supply and Services Canada 1987
3. Process furnaces, dryers and kilns, Energy Management Series, for industry commerce and institutions, Vol. 7 Minister of Supply and Services Canada 1985
4. Energy efficient operation of industrial boiler plant, best practice programme, good practice guide ETSU 1992
5. Βαθμός απόδοσης ατμολεβήτων, Επιτροπή Εξοικονόμησης Ενέργειας στην Βιομηχανία, ΥΒΕΤ Αυγ. 1978
6. Βελτιστοποίηση της καύσης υγρών και αερίων καυσίμων, Επιτροπή Εξοικονόμησης Ενέργειας στην Βιομηχανία, Αυγ. 1978



## Μετατροπές μονάδων

---

1 HP	= 0,746 kW
1 Kelvin	= (deg C + 273,15)
1 Celsius	= (deg F - 32)1,8
1 kcal	=4,1868 kJ
1 kWh	= 3600 kJ
1 Nt	= 1 kg*m/s <sup>2</sup>
1 W(att)	= 1 J/s
1 in Hg	= 3,386 kPa
1 in H <sub>2</sub> O	= 0,2491 kPa
1 atm	= 101,325 kPa

---

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΞΗΣ ΔΙΑΦΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ		
Είδος υλικού	Ειδική (kJ/(kg.°C))	Θερμότητα Τήξης από 0°C kJ/kg
Χάλυβας	0,5	1360
Αλουμίνιο	0,92	1095
Χαλκός	0,40	710
Γυαλί	0,84	
Νερό	4,19	755
Ψευδάργυρος	,039	300
Μόλυβδος	0,13	70
Λευκοσίδηρος	0,23	130
Ορείχαλκος	0,39	595