



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

MSc Βιομηχανικά Συστήματα Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου

Βελτιστοποίηση Λεβήτων στη Βιομηχανία Αερίου και Πετρελαίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΔΡΑΚΟΝΤΑΕΙΔΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ
(AM 20200027)

Επιβλέπων: Κυριακοπούλου Δ., Δρ. Χημικός Μηχανικός

Αθήνα, Ιούνιος 2023

**ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Δρ Αιμιλία Κονδύλη, Καθηγήτρια, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

(ΟΝΟΜΑ)

(ΥΠΟΓΡΑΦΗ)

Δρ Κοσμάς Καββαδίας, Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

(ΟΝΟΜΑ)

(ΥΠΟΓΡΑΦΗ)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους χορηγούς Msc Oil and Gas Process Systems Engineering, ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ Α.Ε., στον Δήμο Ασπροπύργου και στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής για τη χρηματοδότηση και τη συνεχή υποστήριξή τους. Η παρακολούθηση και η επιτυχία αυτού του μαθήματος δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την ανεκτίμητη συμβολή τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Διονυσία Κυριακοπούλου, Καθηγήτρια του ΠΑΔΑ, για την ανάθεση της διπλωματικής και την πολύτιμη βοήθειά της.

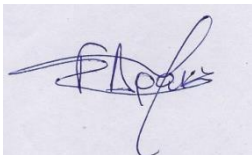
Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την βοήθεια και την υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια της ακαδημαϊκής μου πορείας και της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Η βοήθειά τους ήταν καθοριστική.

Δήλωση συγγραφής

Εγώ, ο Δρακονταειδής Γεώργιος επιβεβαιώνω ότι η εργασία με τίτλο «Βελτιστοποίηση Λεβήτων στη Βιομηχανία Αερίου και Πετρελαίου» είναι δική μου δουλειά. Δεν έχω αντιγράψει κατά λέξη άλλο υλικό, εκτός από ρητά εισαγωγικά, και έχω προσδιορίσει με σαφήνεια τις πηγές του υλικού.

Δρακονταειδής Γεώργιος

Αιγάλεω, Ιούνιος 2023

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Γ. Δρακονταειδής', written on a light-colored rectangular background.

Υπογραφή

Δήλωση συγγραφέα μεταπτυχιακής εργασίας

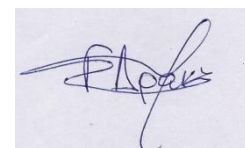
Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Δρακονταειδής Γεώργιος του Γερασίμου, με αριθμό μητρώου 20200027, φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Βιομηχανικά Συστήματα Πετρελαίου και Φυσικού αερίου του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Δρακονταειδής Γεώργιος



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΗΣ.....	
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	
ΑΚΡΩΝΥΜΙΟ	
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.2 ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	
1.3 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	
2.1 ΤΥΠΟΙ ΛΕΒΗΤΩΝ.....	
2.1.1 ΦΛΟΓΟΑΥΛΩΤΟΙ ΛΕΒΗΤΕΣ.....	
2.1.2 ΥΔΡΑΥΛΩΤΟΙ ΛΕΒΗΤΕΣ.....	
2.1.3 ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΛΕΒΗΤΕΣ ΧΩΡΙΣ ΣΩΛΗΝΑ.....	
2.2 ΚΑΥΣΤΗΡΕΣ.....	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	
3.1 ΚΑΥΣΙΜΑ ΛΕΒΗΤΩΝ.....	
3.1.1 ΑΝΘΡΑΚΑΣ.....	
3.1.1.1 ΛΙΓΝΙΤΗΣ	
3.1.1.2 ΥΠΟΑΣΦΑΛΤΟΕΙΔΕΙΣ ΑΝΘΡΑΚΕΣ	
3.1.1.3 ΑΣΦΑΛΤΟΥΧΟΙ ΑΝΘΡΑΚΕΣ	
3.1.1.4 ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΑΝΘΡΑΚΕΣ.....	
3.1.2 ΜΑΖΟΥΤ.....	
3.1.3 ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ.....	
3.1.4 ΒΙΟΜΑΖΑ.....	
3.1.5 ΑΠΟΡΡΙΜΑΤΑ RDF.....	
3.1.6 ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΚΑΥΣΙΜΑ.....	
3.1.7 ΑΝΑΜΙΚΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ.....	
3.2 ΑΕΡΙΟΙ ΡΥΠΟΙ	
3.2.1 ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ - NO _x	
3.2.1.1 ΘΕΡΜΙΚΑ NO _x (THERMAL NO _x).....	
3.2.1.2 ΑΖΩΤΟ-ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ (FUEL NO _x).....	
3.2.1.3 ΆΜΕΣΟ NO _x (PROMPT NO _x).....	
3.2.2 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ SO ₂	
3.2.3 ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΡΜ	
3.2.4 ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ CO.....	
3.3 ΟΡΙΑ ΡΥΠΩΝ.....	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	
4 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	
4.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ.....	
4.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΕΒΗΤΑ.....	

4.3 ΟΙΚΟΝΟΜΗΤΗΡΑΣ/ ΘΕΡΜΑΝΤΗΡΑΣ.....
4.4 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5.ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΑΕΡΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ.....
5.1 ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΚΑΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΕΣ.....
5.2 ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ.....
5.2.1 Τεχνικές ελέγχου οξειδίων του αζώτου NO_x
5.2.1.1 Μείωση μέγιστης θερμοκρασίας της φλόγας.....
5.2.1.2 Λειτουργικές τροποποιήσεις
5.2.1.3 Σταδιακή καύση SCA.....
5.2.1.4 Επανάκαυση φυσικού αερίου NGR
5.2.1.5 Καυστήρες χαμηλών NO_x (LNBS).....
5.2.1.6 Καυστήρες εξαιρετικά χαμηλών NO_x (ULNBs).....
5.2.2 Τεχνικές ελέγχου διοξειδίου του θείου SO₂.....
5.2.3 Τεχνικές ελέγχου σωματιδίων PM.....
5.3 ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΑΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΕΣ.....
5.3.1 Τεχνικές επεξεργασίας καυσαερίων για τα οξείδια του αζώτου NO_x.....
5.3.1.1 Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή SCR.....
5.3.1.2 Επιλεκτική μη καταλυτική αναγωγή SNCR.....
5.3.1.3 Αναδυόμενες τεχνολογίες επεξεργασίας καυσαερίων για NO_x
5.3.2 Τεχνικές επεξεργασίας καυσαερίων για το διοξείδιο του θείου SO₂.....
5.3.2.1 Μη ανανεώσιμες διεργασίες FGD
5.3.2.2 Ανανεώσιμες διεργασίες FGD.....
5.3.3 Τεχνικές επεξεργασίας καυσαερίων για τα σωματίδια PM.....
5.3.3.1 Μηχανικοί συλλέκτες σκόνης.....
5.3.3.2 Υγρές πλυντηρίδες (Wet scrubbers).....
5.3.3.3 Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές ESPs (Electrostatic precipitators).....
5.3.3.4 Υφασμάτινα φίλτρα (Fabric filters).....

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....
6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ (FUTURE WORK).....

ΛΙΣΤΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΑΝΑΦΟΡΩΝ.....

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....

ΑΚΡΩΝΥΜΙΟ

ABMA American Boiler Manufacturers Association
ASTM American Society for Testing and Materials
BOOS Burners Out Of Service
BT Burner Tuning
BFW Boiled Feed Water
CaO Calcium Oxide
CAA Clean Air Act
CCGT Combined Cycle Gas Turbine
CCS Carbon Capture and Storage
CCTs Clean Coal Technologies
CO Carbon Monoxide
CO₂ Carbon Dioxide
CH₄ Methane
C₂H₆ Ethane
DOE Department of Energy (U.S.)
ESP Electrostatic Precipitator
EPA Environmental Protection Agency (U.S.)
FBC Fluidized-Bed Combustion
FD Forced Draft Fan
FGD Flue-Gas Desulfurization
FGR Flue Gas Recirculation
FIR Fuel-Induced Recirculation and Forced-Internal Recirculation
H₂S Hydrogen Sulfide
H₂SO₃ Sulfurous Acid
H₂SO₄ Sulfuric Acid
HC Hydrocarbon
HCN Hydrogen Cyanide
HRSG Heat Recovery Steam Generator
HRT Horizontal Return Tubular
ICI Industrial/Commercial/Institutional
ID Induced Draft Fan
LEA Low Excess Air
LNB Low-NO_x Burner
LP Liquefied Petroleum
MCR Maximum Continuous Rating
MSW Municipal Solid Waste
NAAQS National Ambient Air Quality Standards (U.S.)
NG Natural Gas
NGR Natural Gas Reburning
NH₃ Ammonia
NI Nickel
NMVOCs Non-methane Volatile Organic Compounds
NO Nitric Oxide
NO₂ Nitrogen Dioxide
NO_x Nitrogen Oxides
N₂ Nitrogen
N₂O Nitrous Oxide
N₂O₂ Dinitrogen Dioxide

N₂O₃ Dinitrogen Trioxide
N₂O₄ Dinitrogen Tetroxide
N₂O₅ Dinitrogen Pentoxide
OFA Overfire Air
OT Oxygen Trim
O₂ Oxygen
PC Pulverized Coal
PM Particulate Matter
ppm Parts Per Million by weight or volume
RAP Reducing Air Preheat
RDF Refuse-Derived Fuel
SCA Staged Combustion Air
SCR Selective Catalytic Reduction
SI Steam Injection
SNCR Selective Non-catalytic Reduction
SO₂ Sulfur Dioxide
SO₃ Sulfur Trioxide
TDF Tire-Derived Fuel
UHCs Unburned Hydrocarbons
ULNB Ultra Low-NOx Burner
V Vanadium
VOCs Volatile Organic Compounds
WI Water Injection
ΑΕΠΟ Αποφάσεις Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων
ΒΔΤ Βέλτιστη Διαθέσιμη Τεχνική
ΕΣΕΚ Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα
ΚΥΑ Κοινή Υπουργική Απόφαση
Υ.Π.Ε.Κ.Α Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής
ΦΕΚ Φύλλο της Εφημερίδας της Κυβερνήσεως

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Διαμόρφωση φλογοαυλωτού λέβητα HRT (ABMA, 1997).....	
Σχήμα 2.2 Διαμόρφωση φλογοαυλωτού λέβητα συσκευασίας Scotch. (ABMA, 1997).....	
Σχήμα 2.3 Διαμόρφωση φλογοαυλωτού λέβητα firebox (ABMA, 1997).....	
Σχήμα 2.4 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα (σε πακέτο-συσκευασμένη μονάδα) (ABMA,1997)	
Σχήμα 2.5 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα (με συναρμολόγηση στην εγκατάσταση) (ABMA,1997).....	
Σχήμα 2.6 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα για καύση RDF (ABMA 1997).....	
Σχήμα 2.7 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα για καύση MSW (ABMA 1997).....	
Σχήμα 2.8 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα για καύση στερεών καυσίμων όπως ξύλο, βιομάζα ή άνθρακας (ABMA 1997).....	
Σχήμα 2.9 Διατομή τροφοδοσίας με σχάρα (stoker) (Elliot T., 1989)	
Σχήμα 2.10 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα για καύση PC (Stultz S. και Kitto J., 1992).....	
Σχήμα 2.11 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα FBC με φυσαλίδες (bubbling beds) (Stultz S. και Kitto J., 1992).....	
Σχήμα 2.12 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα FBC με ανακυκλοφορία (Stultz S. και Kitto J., 1992).....	
Σχήμα 2.13 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα FBC υπό πίεση (Stultz S. and Kitto J. ,1992)..	
Σχήμα 2.14 Υδραυλωτός λέβητας με κυρτούς αυλούς τύπου A (Elliot T. ,1989)....	
Σχήμα 2.15 Υδραυλωτός λέβητας με κυρτούς αυλούς τύπου D. (Elliot T. ,1989).....	
Σχήμα 2.16 Υδραυλωτός λέβητας με κυρτούς αυλούς τύπου O. (Elliot T. ,1989).....	
Σχήμα 2.17 Διαμόρφωση χυτοσίδηρου - μαντεμένιου λέβητα. (ABMA 1997).....	
Σχήμα 2.18 Διαμόρφωση κάθετου λέβητα χωρίς σωλήνα (tubeless). (AMBA ,1997)...	
Σχήμα 4.1 Κατά προσέγγιση αύξηση της απόδοσης λόγω εξοικονομητή και θερμαντήρα αέρα σε συμβατικούς λέβητες. (Stultz S. και Kitto J.,1992).....	
Σχήμα 4.2 Σωλήνες συγκολλημένοι με χαλύβδινες μεμβράνες. (Stultz S. και Kitto J.,1992).	
Σχήμα 4.3 Σύγκριση καυσαερίων καυσίμων με την αύξηση της περισσειας οξυγόνου.....	
Σχήμα 4.4 Σύγκριση αποδοτικότητας, κατανάλωσης καυσίμου, καυσαερίου CO με την αύξηση της περισσειας οξυγόνου.....	
Σχήμα 5.1 Διαμόρφωση θαλάμου αντίδρασης SCR. (DOE, 1997).....	
Σχήμα 5.2 Διαμόρφωση υγρού πλυντηρίου (scrubber). (DOE, 1995).....	
Σχήμα 5.3 Διαμόρφωση ξηρού πλυντηρίου (dry scrubber). (Kitto J.,1996).....	
Σχήμα 5.4 Διαμόρφωση Συλλέκτη σκόνης τύπου κυκλώνα.....	
Σχήμα 5.5 Διαμόρφωση Πλυντηρίδας Venturi (wet scrubber). (EPA, 2023).....	
Σχήμα 5.6 Διαμόρφωση του Ηλεκτροστατικού Κατακρημνιστή ESP. (Stultz S. και Kitto J., 1992).....	
Σχήμα 5.7 Απεικόνιση του συστήματος Rapping. (Stultz S. και Kitto J., 1992).....	
Σχήμα 5.8 Απεικόνιση του μηχανικού συστήματος τύπου Shaker.....	
Σχήμα 5.9 Διαμόρφωση υφασμάτινου φίλτρου ή σακούλας. (Stultz S. και Kitto J., 1992)...	
A1) Οξείδια του αζώτου (NO _x) ανά κλάδο στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2017.(ΦΕΚ 182/Β/22.01.2021).....	
A2) Διοξείδιο του θείου (SO ₂) ανά κλάδο στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2017.(ΦΕΚ 182/Β/22.01.2021).....	

- A3) Λεπτά αιωρούμενα σωματίδια ($PM_{2.5}$) ανά κλάδο στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2017.(ΦΕΚ 182/Β/22.01.2021).....
- A4) VOC εκτός του μεθανίου (NMVOC) ανά κλάδο στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2017.(ΦΕΚ 182/Β/22.01.2021).....
- A5) Αμμωνία (NH_3) ανά κλάδο στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2017.(ΦΕΚ 182/Β/22.01.2021).....

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 2.1 Καύσιμα που τροφοδοτούνται συνήθως σε φλογουλωτούς λέβητες. (ABMA, 1997).....
- Πίνακας 2.2 Καύσιμα που τροφοδοτούνται συνήθως σε υδραυλωτούς λέβητες. (ABMA, 1997).....
- Πίνακας 2.3 Ορολογία που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση καυστήρων. (EPA,1994)....
- Πίνακας 3.1 Καύσιμα που καίγονται σε λέβητες για την παραγωγή ζεστού νερού ή ατμού. (ABMA, 1997).....
- Πίνακας 3.2 Βασικές ιδιότητες επιλεγμένων καυσίμων. (Taplin H.,1991).....
- Πίνακας 3.3 Λιγνιτικοί άνθρακες. (ASTM 388-19a,2019).....
- Πίνακας 3.4 Υποασφαλτοειδείς άνθρακες.(ASTM 388-19a,2019).....
- Πίνακας 3.5 Ασφαλτούχοι άνθρακες.(ASTM 388-19a,2019).....
- Πίνακας 3.6 Ανθρακικοί άνθρακες.(ASTM D 388-19a,2019).....
- Πίνακας 3.7 Ποιότητες μαζούτ καθορισμένες από τον ASTM. (ASTM D 396 – 21,2021).....
- Πίνακας 3.8 Οξειδία του Αζώτου NO_x .(Soud H., 1995).....
- Πίνακας 3.9 Οι εθνικές δεσμεύσεις μείωσης των εκπομπών σε σύγκριση με το έτος αναφοράς 2005 (σε ποσοστό %).(ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΗΣ, 22/01/2021, αρ. φ. 182, σελ.1593).....
- Πίνακας 3.10 Προβλεπόμενες εκπομπές για μειώσεις εκπομπών και βελτίωση της ποιότητας του αέρα.(ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΗΣ, 22/01/2021, αρ. φ. 182, σελ.1597).....
- Πίνακας 3.11: Εκτίμηση ορίου εκπομπών NO_x (mg/Nm^3), εφαρμογή ΒΔΤ 57 (2014/738/ΕΕ). (ΑΕΠΟ, 2020).....
- Πίνακας 3.12: Εκτίμηση ορίου εκπομπών SO_x ως SO_2 (mg/Nm^3),εφαρμογή ΒΔΤ 58 (2014/738/ΕΕ). (ΑΕΠΟ, 2020).....
- Πίνακας 3.13 Συχνότητα ανάλυσης CO_x , NO_x , NH_3 για μονάδες καύσης >50MW. (Barthe P. , Chaugny M., Roudier S. και Sancho L. ,2015).....
- Πίνακας 5.1 Τεχνικές για τον έλεγχο των εκπομπών πριν από την καύση. (Clean Coal Technology , 1999).....
- Πίνακας 5.2 Τεχνικές για τον έλεγχο των εκπομπών κατά την καύση. (Clean Coal Technology ,1999).....
- Πίνακας 5.3 Τεχνικές για τον έλεγχο των εκπομπών μετά την καύση. (Clean Coal Technology ,1999).....

Περίληψη

Οι ιδιοκτήτες, διευθυντές εγκαταστάσεων, μηχανικοί σχεδιασμού και οι χειριστές λεβήτων που χρειάζονται πρόσθετη παραγωγική ικανότητα, αντιμετωπίζουν πολλές νομικές, πολιτικές, περιβαλλοντικές, οικονομικές και τεχνικές προκλήσεις. Το κλειδί της επιτυχίας, απαιτεί την επιλογή ενός επαρκούς μεγέθους λέβητα, χαμηλών αέριων εκπομπών και έναν κατάλληλο εξοπλισμό καύσης που μπορεί να λειτουργήσει σύμφωνα με συγκεκριμένα πρότυπα εκπομπών που καθορίζονται από κρατικούς και ομοσπονδιακούς ρυθμιστικούς φορείς.

Η διπλωματική αυτή εργασία παρουσιάζει θέματα που αφορούν τους βιομηχανικούς, εμπορικούς και θεσμικούς λέβητες (ICI Boilers). Παρέχονται πληροφορίες για διάφορους τύπους λεβήτων που διατίθενται στο εμπόριο σήμερα (φλογοαυλωτοί, υδραυλωτοί, χυτοσίδηρου, κ.α.), μαζί με θέματα σχετικά των υποκατηγοριών τους, των συστημάτων τροφοδοσίας καυσίμων, των καυσίμων που καταναλώνουν και των εκπομπών που παράγουν. Περιλαμβάνονται επίσης αναφορές, σχετικά με τα πρότυπα εκπομπών και ζητήματα συμμόρφωσης, τεχνικές λεπτομέρειες που σχετίζονται με τεχνικές ελέγχου των εκπομπών, και άλλα σημαντικά ζητήματα επιλογής για αύξηση της ενεργειακής απόδοσης σε έναν λέβητα. Αν και οι τεχνικές πληροφορίες που παρουσιάζονται είναι κυρίως για νέους λέβητες, ισχύουν και για υπάρχουσες εγκαταστάσεις λεβήτων που μπορούν να δεχτούν μετατροπή.

Παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ορυκτών και μη ορυκτών καυσίμων, με έμφαση στον άνθρακα, στο μαζούτ (fuel oil), στο φυσικό αέριο, στη βιομάζα και σε άλλα καύσιμα, όπως αυτά που προέρχονται από απορρίμματα (RDF). Για πληρότητα, περιγράφονται συνοπτικά επιπλέον και άλλα καύσιμα από υλικά όπως βαριά υπολείμματα προερχόμενα από διεργασίες πυρόλυσης του πετρελαίου, πίσσα λιθανθρακόπισσας και λάσπη μύλου χαρτοπολτού.

Οι τέσσερις βασικές εκπομπές που προέρχονται από την καμινάδα των λεβήτων, περιλαμβάνουν τα οξειδία του αζώτου (NO_x), το διοξείδιο του θείου (SO₂), τα σωματίδια (PM) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Οι μηχανισμοί με τους οποίους σχηματίζονται αυτές οι εκπομπές περιγράφονται εν συντομία ως βοήθημα στην κατανόηση των διαφόρων τεχνικών ελέγχου για τη μείωση των εκπομπών. Μετά τις συζητήσεις για τα καύσιμα και τις βασικές εκπομπές της καύσης, η έμφαση μετατοπίζεται στις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές αέριων ρύπων, οι οποίες ρυθμίζονται βάσει νόμου, τις αναφερόμενες ως ΑΕΠΟ για την Ελλάδα. Θεσπίζονται πρότυπα εκπομπών, με βάση τις αποδόσεις του βιομηχανικού λέβητα, για ορισμένους ατμοσφαιρικούς ρύπους, συμπεριλαμβανομένων των NO_x, SO₂, PM και CO.

Οι τεχνικές που είναι αποτελεσματικές στη μείωση των εκπομπών NO_x, SO₂ και PM υποδιαιρούνται σε τρεις γενικές κατηγορίες, ανάλογα με το στάδιο της διαδικασίας καύσης που εφαρμόζονται. Οι κατηγορίες περιλαμβάνουν τεχνικές ελέγχου εκπομπών κατά την διάρκεια του σταδίου της προ-καύσης, της καύσης και μετά την καύση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ιδιοκτήτες και οι χειριστές λεβήτων που χρειάζονται μια πρόσθετη ικανότητα ατμοπαραγωγής αντιμετωπίζουν μια σειρά από νομικές, πολιτικές, περιβαλλοντικές, οικονομικές και τεχνικές προκλήσεις. Το κλειδί της επιτυχίας απαιτεί την επιλογή ενός επαρκούς μεγέθους λέβητα, χαμηλών εκπομπών και κατάλληλου εξοπλισμού καύσης που μπορεί να λειτουργήσει σύμφωνα με τα πρότυπα εκπομπών που έχουν θεσπιστεί από κρατικούς και ομοσπονδιακούς ρυθμιστικούς φορείς. Αυτή η διπλωματική παρουσιάζει μια ευρεία επισκόπηση τεχνικών και κανονιστικών θεμάτων που ενδέχεται να προκύψουν σε διάφορα σημεία της διαδικασίας επιλογής για έναν λέβητα.

Οι λέβητες έχουν σχεδιαστεί ώστε να χρησιμοποιούν τη χημική ενέργεια από τα καύσιμα για να αυξήσουν το ενεργειακό περιεχόμενο του νερού έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές θέρμανσης και ηλεκτρισμού. Οι βιομηχανικοί λέβητες χρησιμοποιούνται ευρέως στις χημικές βιομηχανίες, τροφίμων, χαρτιού και πετρελαίου. Οι εμπορικοί και θεσμικοί λέβητες χρησιμοποιούνται και σε άλλες εφαρμογές, όπως εμπορικές επιχειρήσεις, κτίρια γραφείων, διαμερίσματα, ξενοδοχεία, εστιατόρια, νοσοκομεία, σχολεία, μουσεία, κυβερνητικά κτίρια και αεροδρόμια.

Οι πληροφορίες που αναπτύσσονται στην παρούσα διπλωματική ισχύουν κυρίως για νέους βιομηχανικούς, εμπορικούς και θεσμικούς λέβητες (ICI Boilers) με τον κατάλληλο εξοπλισμό καύσης, που πρέπει να συμμορφώνονται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις εκλύσεων εκπομπών, ενδέχεται όμως να ισχύουν και για υπάρχουσες εγκαταστάσεις λεβήτων.

Οι μέθοδοι ελέγχου των εκπομπών στους λέβητες στοχεύουν στη μείωση της απελευθέρωσης ρύπων στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καύσης. Αυτές οι μέθοδοι συμβάλλουν στον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των λειτουργιών του λέβητα ελαχιστοποιώντας τις εκπομπές επιβλαβών ουσιών όπως τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οξείδια του θείου (SO_x), τα σωματίδια (PM) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO).

Για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και την επίτευξη του οράματος της, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει μια ολοκληρωμένη πολιτική που βασίζεται σε τρεις πυλώνες: πρότυπα ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, μείωση των εκπομπών ατμοσφαιρικής ρύπανσης και πρότυπα εκπομπών για τις βασικές πηγές ρύπανσης (με στόχο την μηδενική ρύπανση, σε μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα, για το έτος 2050). Επίσης θα παρουσιαστούν εντός της Ελλάδος, τα πρότυπα που ασχολούνται με το επίπεδο εκπομπών από τις εκάστοτε ρυθμιστικές αρχές και της αδειοδότησης του λέβητα που απαιτείται για την εγκατάσταση και χρήση του βιομηχανικού λέβητα, βάση ΑΕΠΟ (Αποφάσεων Έγκρισης Περιβαλλοντικών Επιθεωρήσεων) του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΚΑ).

1.2 ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες για μια ευρεία κατηγορία μονάδων παραγωγής ατμού και ζεστού νερού, γνωστές ως λέβητες ICI. Παρέχονται γενικές συζητήσεις σχετικά με τους λέβητες που διατίθενται σήμερα στο εμπόριο, με τις αντίστοιχες διαμορφώσεις τους, καθώς και πληροφορίες σχετικά με τα καύσιμα που καίνε.

Θα παρουσιαστούν επίσης συζητήσεις για περιβαλλοντικούς κανονισμούς, συμπεριλαμβανομένων των διεθνών και εθνικών προτύπων εκπομπών και ζητημάτων συμμόρφωσης, τεχνικές λεπτομέρειες που σχετίζονται με βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές ελέγχου των εκπομπών και σημαντικά ζητήματα για την επιλογή του εξοπλισμού καύσης. Οι εκπομπές από λέβητες ρυθμίζονται από συγκεκριμένους εθνικούς φορείς, ΑΕΠΟ και θα διευρυνθούν λεπτομερώς.

Αυτές οι εκπομπές, είναι τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το διοξείδιο του θείου (SO_2), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και τα σωματίδια (PM). Τα συγκεκριμένα απελευθερώνονται ως προϊόντα καύσης από ορυκτά και μη ορυκτά καύσιμα. Για λόγους συζήτησης, οι τεχνικές για τη μείωση αυτών των εκπομπών από τους λέβητες υποδιαιρούνται σε τρεις κατηγορίες: προ-καύσης, κατά την διάρκεια της καύσης και μετά την καύση. Για μια πιο ολοκληρωμένη αναφορά των απαιτήσεων των εκπομπών και για άλλους τοξικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, παρέχεται μια σύντομη αναφορά σχετικά με αυτούς.

Οι πρωταρχικοί στόχοι της διπλωματικής εργασίας είναι :

1. Να παρουσιαστεί ένα ευρύ φάσμα θεμάτων που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή εγκατάστασης ενός νέου λέβητα και του εξοπλισμού καύσης χαμηλών εκπομπών (καυστήρες).
2. Να εντοπίσει επίσημες πηγές πληροφοριών που να περιέχουν τις σχετικές τεχνικές λεπτομέρειες που αφορούν την επεξεργασία των καυσαερίων κυρίως μετά την καύση.

Ζητήματα που σχετίζονται με HRSG (γεννήτριες ατμού ανάκτησης θερμότητας), αεριοστρόβιλων συνδυασμένου κύκλου (CCGT), οργάνων ελέγχου διεργασίας και τα συστήματα παρακολούθησης εκπομπών (CEMS), τα οποία βοηθούν στην παρακολούθηση των εκπομπών, αποτελούν βασικά λειτουργικά στοιχεία σε εγκαταστάσεις λεβήτων χαμηλών εκπομπών, δεν εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής της εργασίας αυτής. Επίσης, δεν θα αναφερθεί η τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης CO_2 που προωθείται ως καινοτομία στις μέρες μας, αναφερόμενη ως CCS, για την ενεργειακή μετάβαση της βιομηχανίας παγκοσμίως και έχει τοποθετηθεί εν συντομία στο τέλος ως μελλοντική εργασία (future work).

1.3 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Οι πληροφορίες της εργασίας οργανώνονται σε θέματα που αντιμετωπίζουν πολλές από τις θεμελιώδεις ανησυχίες που αντιμετωπίζονται κατά τον σχεδιασμό ενός νέου συστήματος λέβητα ατμού ή ζεστού νερού και πρέπει να συμμορφώνεται με τα καθιερωμένα πρότυπα εκπομπών. Θα παρουσιαστεί μια επισκόπηση των λεβήτων, των καυσίμων και των αέριων εκπομπών, τα οποία αποτελούν θεμελιώδεις παράγοντες κατά την διαδικασία σχεδιασμού.

Το 2^ο Κεφάλαιο οπότε επικεντρώνεται στους διάφορους τύπους λεβήτων που διατίθενται στο εμπόριο σήμερα. Δίνεται έμφαση στους φλογουαλωτούς και υδραυλωτούς λέβητες, αν και παρέχεται επίσης κάποια αναφορά και για άλλους τύπους λεβήτων, συμπεριλαμβανομένων των χυτοσιδήρων και των λεβήτων χωρίς σωλήνα (tubeless). Επίσης θα γίνει μια σύντομη αναφορά για τύπους καυστήρων που μπορεί να χρησιμοποιούνται στους λέβητες.

Στο πρώτο μέρος του 3^{ου} κεφαλαίου γίνονται οι περιγραφές των στερεών, υγρών και αέριων καυσίμων που καταναλώνονται συνήθως στους λέβητες. Θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά των ορυκτών και μη ορυκτών καυσίμων, με έμφαση στον άνθρακα, το μαζούτ, το φυσικό αέριο, την βιομάζα, καύσιμα που προέρχονται από απορρίμματα (RDF) και περιγράφονται συνοπτικά και άλλα καύσιμα όπως βαριά υπολείμματα από διεργασίες πυρόλυσης πετρελαίου, πίσσα λιθανθρακόπισσας και μίγματος λάσπης μύλου χαρτοπολτού, τα οποία μερικές φορές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο σε συγκεκριμένους τύπους λεβήτων.

Μετά τις συζητήσεις για τα καύσιμα, η έμφαση μετατοπίζεται στους αέριους ρύπους των στερεών και αερίων καυσίμων. Οι μηχανισμοί με τους οποίους σχηματίζονται αυτές οι αέριες εκπομπές περιγράφονται εν συντομία ως βοήθημα στην κατανόηση των διαφόρων τεχνικών ελέγχου των εκπομπών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση των εκπομπών.

Η νομική βάση για τη ρύθμιση των εκπομπών από λέβητες καύσης στο τέλος του 3^{ου} Κεφαλαίου επικεντρώνονται σε αυτό το περίπλοκο κομμάτι της περιβαλλοντικής νομοθεσίας που αντιμετωπίζει ανησυχίες σχετικά με το όζον στο επίπεδο του εδάφους, τη συσσώρευση λεπτών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, τους επικίνδυνους ατμοσφαιρικούς ρύπους (HAPs) και την όξινη βροχή. Αν και οι υποχρεωτικοί περιορισμοί εκπομπών είναι συνάρτηση του τύπου και του μεγέθους του λέβητα, η ποσότητα κάθε εκπομπής που μπορεί να εκλυθεί επηρεάζεται έντονα από τον τύπο του καυσίμου ή του μείγματος καυσίμου που καίγεται, τη μέθοδο καύσης. Επίσης αναφέρονται για τους λέβητες στην Ελλάδα τα αυστηρότερα όρια ρύπων που ισχύουν επί του παρόντος στην περιφέρεια Αττικής, που είναι συνοπτικά $\text{NO}_x \leq 300 \text{ mg/nm}^3$, $\text{SO}_2 \leq 600 \text{ mg/nm}^3$, $\text{CO} \leq 100 \text{ mg/nm}^3$, $\text{PM} \leq 20 \text{ mg/nm}^3$. Στο τέλος της εργασίας, στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται χρονικά διαγράμματα από το 1990 έως το 2017 που απεικονίζουν την μείωση των εκπομπών στην Ελλάδα, ανά ρύπο και ανά κλάδο, σύμφωνα με την ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΗΣ 22/01/2021, αρ. φ. 182, ώστε να γίνει μια σχετική χρονική σύγκριση σταδιακής μείωσης τους πιάνοντας τα όρια από Ε.Ε..

Στο 4^ο κεφάλαιο συζητείται το θέμα της αποδοτικότητας. Η απόδοση είναι ένα σημαντικό ζήτημα επιλογής, επειδή η εξαγωγή όσο το δυνατόν περισσότερης θερμικής ενέργειας από το καύσιμο, μειώνει την κατανάλωση καυσίμου και δύναται να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για τη μείωση της συνολικής ποσότητας των εκπομπών που εκλύονται στην ατμόσφαιρα. Αναλύονται οι απώλειες στο σύνολο τους από μεριάς καύσης και από απώλειες του λέβητα. Οι μέθοδοι περιλαμβάνουν συστήματα ανάκτησης θερμότητας και παρουσιάζονται ο εξοπλισμός οικονομητήρας και ο θερμαντήρας αέρα, οι οποίοι, μπορούν να

αυξήσουν 3-5% το ποσοστό της αποδοτικότητας του λέβητα (σε 90%). Αυτό επιτυγχάνεται προθερμαίνοντας το BFW και αντίστοιχα μειώνοντας την θερμοκρασία των καυσαερίων πριν αυτά εξέλθουν από την καμινάδα, πάντα με καλή σχεδίαση και προσέχοντας τις συνθήκες να μην είναι χαμηλότερες από το σημείο δρόσου, για αποφυγή σχηματισμού H_2SO_4 . Στο τέλος του κεφαλαίου αναφέρονται οι αποδοτικότητα καύσης και ο δείκτης αξιολόγησης της απόδοσης μαζί με τις αντίστοιχες εξισώσεις τους.

Στο 5^ο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τεχνικές για τη μείωση των εκπομπών από τα καυσαέρια πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την καύση. Μερικές φορές, οι μειώσεις των εκπομπών μπορούν να επιτευχθούν με την απλή μετάβαση σε διαφορετικό καύσιμο ή την επεξεργασία του καυσίμου πριν από την καύση. Το φυσικό αέριο, για παράδειγμα, θεωρείται καθαρότερο καύσιμο σε σύγκριση με τον άνθρακα ή το μαζούτ. Άλλο παράδειγμα είναι, οι εκπομπές SO_2 από την καύση του άνθρακα μπορούν απλά να μειωθούν, χρησιμοποιώντας έναν άλλο άνθρακα με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο αντί για άνθρακα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο ή ακόμα με την αφαίρεση κάποιων στοιχείων, όπως είναι οι πυρίτες στον άνθρακα. Αν και αυτές οι δύο τεχνικές ελέγχου εκπομπών πριν από την καύση είναι μερικές φορές πολύ αποτελεσματικές, οι ουσιαστικές μειώσεις ρύπων γενικά απαιτούν να εξοπλιστεί ένας λέβητας με κάποιον επιπρόσθετο ειδικό εξοπλισμό καύσης, που έχει σχεδιαστεί, για την εφαρμογή μιας συγκεκριμένης στρατηγικής ελέγχου αέριων εκπομπών. Οι μειώσεις των αέριων αυτών ρύπων μπορούν επίσης να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές που εμποδίζουν το σχηματισμό της εκάστοτε εκπομπής κατά την διάρκεια της καύσης ή της αφαίρεσης του μετά την καύση.

Μετά την καύση συγκεκριμένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές επεξεργασίας καυσαερίων για την απομάκρυνση των ρύπων. Μερικές κοινές μέθοδοι περιλαμβάνουν:

1. Αποθείωση καυσαερίων (FGD): Τα συστήματα FGD αφαιρούν το διοξείδιο του θείου (SO_2) από τα καυσαέρια χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως υγρούς καθαριστές, έγχυση ξηρού ροφητή ή απορροφητές ξηρού ψεκασμού.
2. Έλεγχος σωματιδίων: Οι ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές (ESP) και οι σάκοι χρησιμοποιούνται συνήθως για τη δέσμευση και την αφαίρεση σωματιδίων (PM) από τα καυσαέρια.
3. Επιλεκτική Καταλυτική Αναγωγή (SCR): Τα συστήματα SCR χρησιμοποιούν καταλύτες για να μετατρέψουν τα οξείδια του αζώτου (NO_x) σε άζωτο και νερό με έγχυση ενός αναγωγικού παράγοντα, όπως αμμωνία ή ουρία, στο ρεύμα καυσαερίων.
4. Επιλεκτική Μη Καταλυτική Αναγωγή (SNCR): Τα συστήματα SNCR μειώνουν τις εκπομπές NO_x με έγχυση αμμωνίας ή ουρίας στη ζώνη καύσης, όπου αντιδρά με οξείδια του αζώτου σε υψηλές θερμοκρασίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΛΕΒΗΤΕΣ

Οι λέβητες καύσης έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν τη χημική ενέργεια των καυσίμων για να αυξάνουν το ενεργειακό περιεχόμενο του νερού τροφοδοσίας του λέβητα (BFW), ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές θέρμανσης και παραγωγή έργου (π.χ. ηλεκτρικής ενέργειας).

Πολλά ορυκτά και μη ορυκτά καύσιμα καίγονται σε λέβητες, αλλά τα πιο συνηθισμένα είδη καυσίμων είναι ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της καύσης, το οξυγόνο αντιδρά με τον άνθρακα, το υδρογόνο και άλλα στοιχεία του καυσίμου για να παραχθεί φλόγα και καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας. Καθώς αυτά τα καυσαέρια έλκονται μέσω του λέβητα, ψύχονται καθώς η θερμότητα τους μεταφέρεται στο νερό.

Τελικά, τα καυσαέρια ρέουν μέσω της καμινάδας στην ατμόσφαιρα. Όσο το καύσιμο και ο αέρας είναι διαθέσιμα για να συνεχιστεί η διαδικασία της καύσης, θα παράγεται θερμότητα.

Οι λέβητες κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη και διαμορφώνονται ανάλογα με τις ιδιότητες του καυσίμου, την καθορισμένη απόδοση θερμότητας και τον απαιτούμενο έλεγχο εκπομπών.

Ένας λέβητας είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για την παραγωγή:

- α) ατμού για παραγωγή ενέργειας, χρήση διεργασίας ή σκοπούς θέρμανσης (ατμολέβητας).
- β) ζεστού νερού για θέρμανση (λέβητας νερού).

Πολλοί λέβητες με ισχύ εισόδου θερμότητας άνω των 70MW ορίζονται ως λέβητες κοινών παροχών, καθώς χρησιμοποιούνται και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε εγκαταστάσεις ή σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

Ορισμένοι λέβητες αυτού του μεγέθους, άνω των 70 MW, χρησιμοποιούνται επίσης και σε άλλα εργοστάσια και εγκαταστάσεις για άλλες βιομηχανικές εφαρμογές.

Οι εμπορικοί και βιομηχανικοί λέβητες χρησιμοποιούνται επίσης και σε πολλές άλλες εφαρμογές όπως εμπορικές εγκαταστάσεις, κτίρια γραφείων, διαμερίσματα, ξενοδοχεία, εστιατόρια, νοσοκομεία, σχολεία, μουσεία, κυβερνητικά κτίρια, αεροδρόμια και άλλα.

Στο παρελθόν, πολύ λιγότερη έμφαση δόθηκε στη διαχείριση των εκπομπών. Ήταν σύνηθες να ταιριάζουν περισσότερο στις απαιτήσεις διεργασίας, με την έξοδο του λέβητα ώστε να επιλέγεται ο σωστός λέβητας και ο κατάλληλος εξοπλισμός καύσης για μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

Το σωστό μέγεθος και επιλογή ενός λέβητα απαιτούσε γνώση των απαιτήσεων της διαδικασίας αιχμής και κατανόηση των προφίλ φορτίου. Αυτή η φιλοσοφία επιλογής λέβητα έδωσε έμφαση στη μετατροπή ενέργειας με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Η περιβαλλοντική ανησυχία για την ποιότητα του αέρα και του νερού έγινε πράξη με την θέσπιση ομοσπονδιακών, πολιτειακών και τοπικών κανονισμών. Ο τρέχων πλέον στόχος σχεδιασμού είναι η παροχή ενέργειας χαμηλού κόστους με αποδεκτές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ο έλεγχος των εκπομπών PM, NO_x, CO και SO_x αποτελεί σήμερα έναν σημαντικό παράγοντα σε όλη τη

διαδικασία σχεδιασμού και επιλογής του λέβητα καθώς και του εξοπλισμού καύσης του (καυστήρες). (ABMA, 1998).

2.1 ΤΥΠΟΙ ΛΕΒΗΤΩΝ

Οι πληροφορίες σε αυτή το κεφάλαιο επικεντρώνονται κυρίως στη μεγάλη ποικιλία μονάδων παραγωγής ατμού και ζεστού νερού γνωστές ως λέβητες ICI. Λόγω των διαφορετικών λειτουργιών και χαρακτηριστικών τους, οι λέβητες ICI μπορούν να ταξινομηθούν με τουλάχιστον τρεις τρόπους. (ABMA, 1998).

1. Οι λέβητες συνήθως υποδιαιρούνται σε φλογοαυλωτούς και υδραυλωτούς. Αυτές οι ονομασίες αντικατοπτρίζουν τον τρόπο με τον οποίο το νερό και τα καυσαέρια είναι σχεδιασμένα να περνούν μέσα από τον λέβητα.
2. Οι λέβητες μερικές φορές ταξινομούνται με βάση τις πηγές θερμότητας τους. Για παράδειγμα, αναφερόμαστε για τους λέβητες με καύση πετρελαίου, αερίου, άνθρακα ή στερεού καυσίμου. Οι λέβητες με καύση άνθρακα μπορούν να χωριστούν περαιτέρω με βάση τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την καύση του λέβητα. Οι τρεις κύριες υποκατηγορίες λεβήτων με καύση άνθρακα είναι οι λέβητες καύσης κονιοποιημένου άνθρακα (PC), λέβητες με καύση πετρελαίου και καύσης ρευστοποιημένης κλίνης (FBC).
3. Οι λέβητες διακρίνονται περιστασιακά από τη μέθοδο κατασκευής τους. Οι συσκευασμένοι λέβητες συναρμολογούνται σε ένα εργοστάσιο και μεταφέρονται στον χώρο ως ένα πακέτο έτοιμο για σύνδεση με βοηθητικές σωληνώσεις. Οι λέβητες που συναρμολογούνται σε μια εγκατάσταση κατασκευάζονται από έναν αριθμό μεμονωμένων τεμαχίων ή υποσυστημάτων. Μετά την ευθυγράμμιση, τη σύνδεση και τη δοκιμή αυτών των εξαρτημάτων, ολόκληρη η μονάδα αποστέλλεται στην τοποθεσία ως ένα κομμάτι. Οι επιτόπιοι λέβητες είναι πολύ μεγάλοι για να μεταφερθούν ως ολόκληρο συγκρότημα. Κατασκευάζονται στην εγκατάσταση από μια σειρά επιμέρους εξαρτημάτων. Μερικές φορές αυτά τα εξαρτήματα απαιτούν ειδικά μέτρα μεταφοράς και ανύψωσης λόγω του μεγέθους και του βάρους τους.

Ο βασικός σκοπός κάθε λέβητα είναι να μετατρέψει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε θερμική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού ή ζεστού νερού. Μέσα στον θάλαμο καύσης, δύο θεμελιώδεις διαδικασίες πρέπει να συμβούν για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος. Πρώτον, το καύσιμο πρέπει να αναμιχθεί με αρκετό οξυγόνο για να επιτραπεί η παρατεταμένη καύση. Τα θερμαινόμενα αέρια που παράγονται από τη διαδικασία της καύσης πρέπει στη συνέχεια να μεταφέρουν τη θερμική ενέργεια σε ένα ρευστό όπως το νερό ή ο ατμός. Απαιτούνται διάφορα εξαρτήματα στο εσωτερικό του λέβητα για την προώθηση της αποτελεσματικής καύσης και μεταφοράς της θερμότητας. Ο σχεδιασμός τους εξαρτάται από παράγοντες όπως το είδος του καυσίμου και η μέθοδος που επιλέγεται για τη μεταφορά θερμικής ενέργειας.

Οι λέβητες ICI κατασκευάζονται σε μεγάλη γκάμα μεγεθών για την καύση του άνθρακα, πετρελαίου, φυσικού αερίου, της βιομάζας, RDF καθώς και άλλων καυσίμων και συνδυασμών αυτών. Οι περισσότεροι λέβητες ταξινομούνται είτε ως υδραυλωτοί λέβητες είτε ως

φλογοαυλωτοί λέβητες, αλλά υπάρχουν και άλλοι τύποι όπως οι λέβητες από χυτοσίδηρο (cast iron), τύπου πηνίου (coil type) και λέβητες χωρίς σωλήνα (tubeless). Περιγραφές ορισμένων από τα πιο τυπικά σχέδια λέβητα παρουσιάζονται παρακάτω. Επιπλέον λεπτομέρειες σχετικά με τους λέβητες ICI, τον σχεδιασμό, την κατασκευή και την λειτουργία τους είναι διαθέσιμες από άλλες πηγές. (EPA, 1994).

2.1.1 ΦΛΟΓΟΑΥΛΩΤΟΙ ΛΕΒΗΤΕΣ

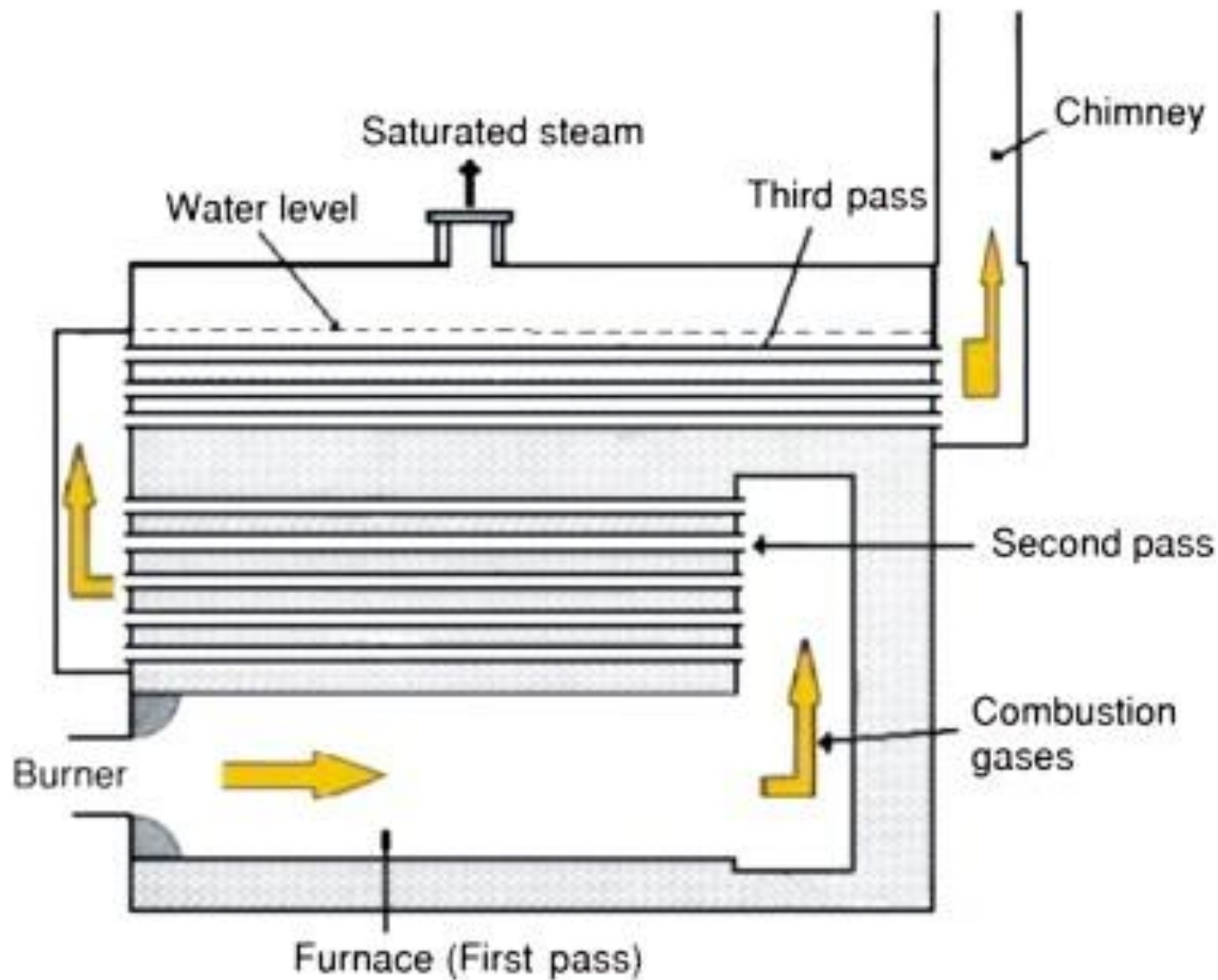
Οι φλογοαυλωτοί λέβητες (Firedtube boilers) αποτελούνται από μια σειρά ευθύγραμμων σωλήνων που είναι τοποθετημένοι μέσα σε ένα εξωτερικού κελύφους δοχείο γεμάτο με νερό. Οι σωλήνες είναι διατεταγμένοι έτσι ώστε τα θερμά καυσαέρια να ρέουν μέσα από αυτούς. (Gutierrez, 2011).

Καθώς τα θερμά καυσαέρια ρέουν μέσα από τους σωλήνες, θερμαίνουν το νερό που τους περιβάλλει. Το νερό περιορίζεται από το εξωτερικό κέλυφος του λέβητα. Για να αποφευχθεί η ανάγκη για ένα παχύ εξωτερικό κέλυφος, οι φλογοαυλωτοί λέβητες χρησιμοποιούνται γενικά για εφαρμογές χαμηλών πιέσεων. Γενικά, οι χωρητικότητες εισόδου θερμότητας για τους φλογοαυλωτούς λέβητες περιορίζονται σε 14,5 MW ή και λιγότερο, αλλά τα τελευταία χρόνια το μέγεθος των φλογοαυλωτών λεβήτων έχει αυξηθεί.

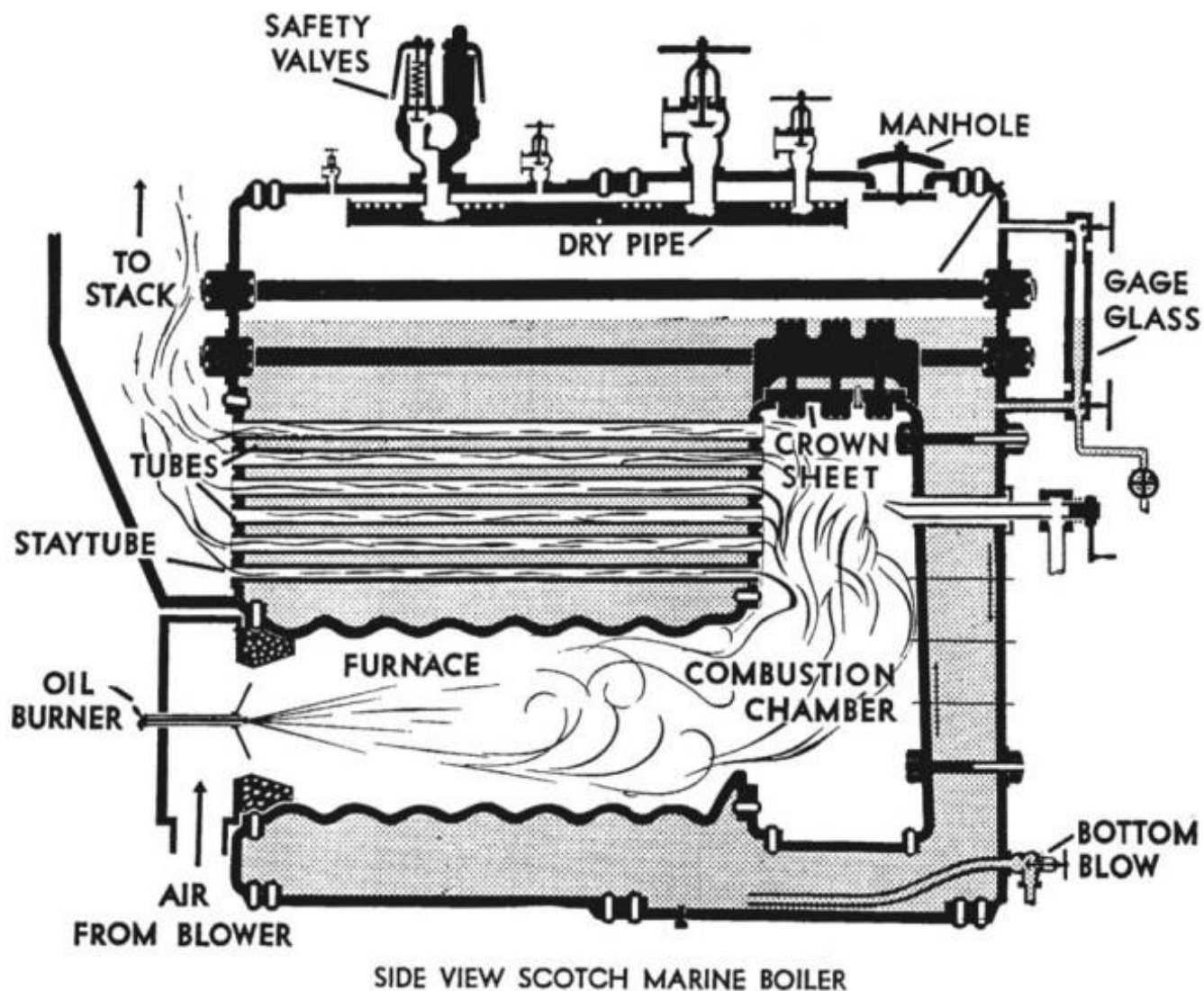
Οι φλογοαυλωτοί λέβητες υποδιαιρούνται σε τρεις ομάδες. Οι διαμορφώσεις λέβητα για κάθε τύπο φαίνονται στα παρακάτω σχήματα 2.1, 2.2, 2.3, αντίστοιχα.

1. Οι οριζόντιοι σωληνοειδείς λέβητες επιστροφής HRT (Horizontal Return Tubular) έχουν τυπικά οριζόντιους, αυτόνομους φλογοαυλούς με ξεχωριστό θάλαμο καύσης.
2. Οι λέβητες Scotch, Scotch marine ή shell έχουν τους φλογοαυλούς και τον θάλαμο καύσης στο ίδιο κέλυφος.
3. Οι λέβητες firebox διαθέτουν θάλαμο καύσης με έναν εξωτερικό μανδύα νερού και χρησιμοποιούν το πολύ, τρεις διόδους καυσαερίων.

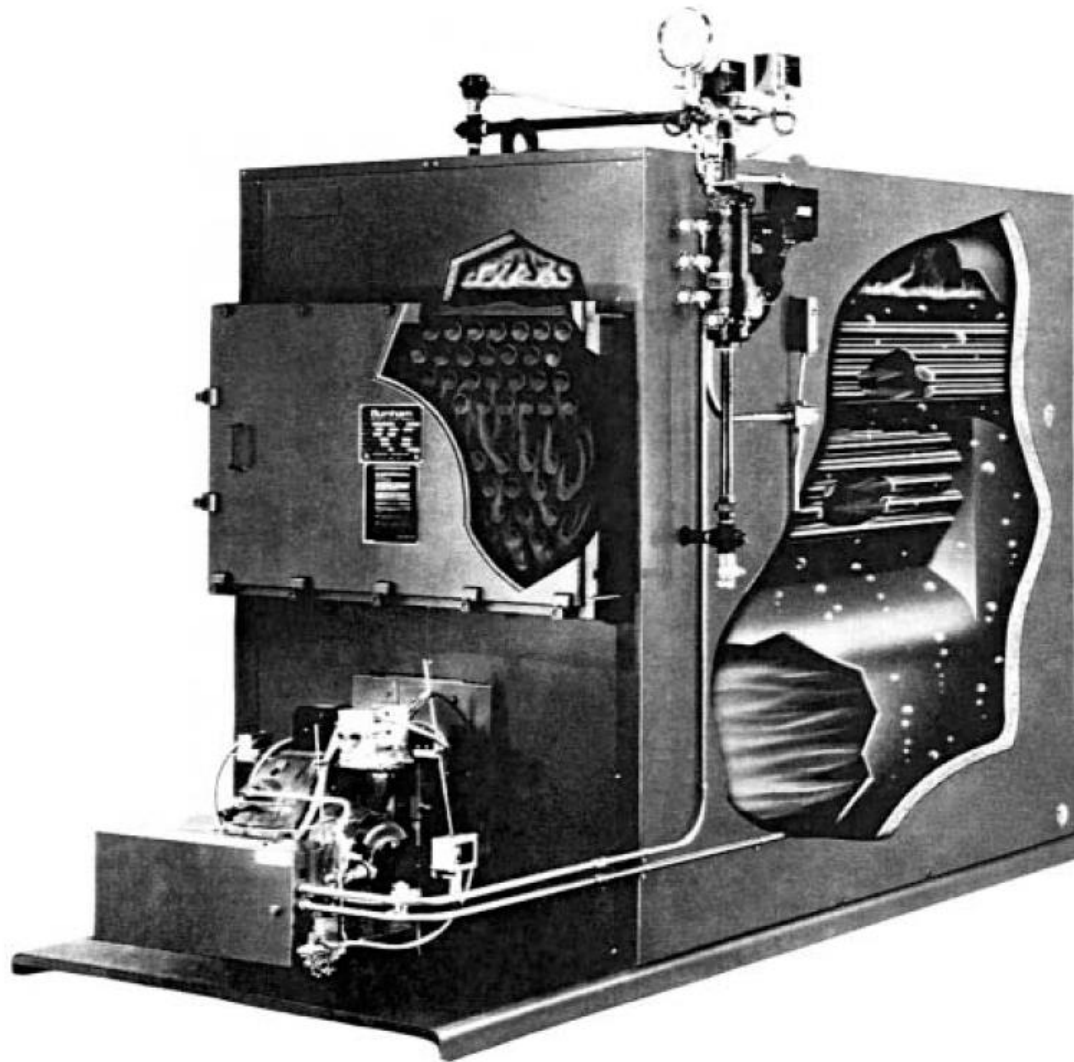
Οι περισσότεροι σύγχρονοι φλογοαυλωτοί λέβητες έχουν κυλινδρικά εξωτερικά κελύφη με ένα μικρό στρογγυλό θάλαμο καύσης που βρίσκεται στο κάτω μέρος του κελύφους. Ανάλογα με τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες, αυτοί οι λέβητες έχουν σωλήνες διαμορφωμένους είτε σε ένα, δύο, τρία ή τέσσερα περάσματα. Επειδή ο σχεδιασμός των φλογοαυλωτών λεβήτων είναι απλός, είναι εύκολο να κατασκευαστούν στο εργοστάσιο παραγωγής τους και να αποσταλούν πλήρως συναρμολογημένοι ως ένα κομμάτι.



Σχήμα 2.1 Διαμόρφωση φλογοαυλωτού λέβητα HRT (Horizontal return tubular).
Πηγή: ABMA, 1997.



Σχήμα 2.2 Διαμόρφωση φλογοαυλωτού λέβητα συσκευασίας Scotch.
Πηγή: ABMA, 1997.



Σχήμα 2.3 Διαμόρφωση φλογοαυλωτού λέβητα firebox. Πηγή: ABMA, 1997.

Ο παρακάτω Πίνακας 2.1 προσδιορίζει διάφορους τύπους φλογοαυλωτών λεβήτων και τα καύσιμα που συνήθως καταναλώνουν.

Firetube boiler type	Fuel				
	Coal	Fuel oil	Natural gas	Biomass	Refuse-derived
HRT boilers	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Scotch boilers	Yes	Yes	Yes	No	No
Firebox boilers	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

Πίνακας 2.1 Καύσιμα που τροφοδοτούνται συνήθως σε φλογοαυλωτούς λέβητες.
Πηγή: ABMA, 1997.

Άλλοι τύποι - ονομασίες – λοιπά σχέδια φλογοαυλωτών λεβήτων για αναζήτηση:

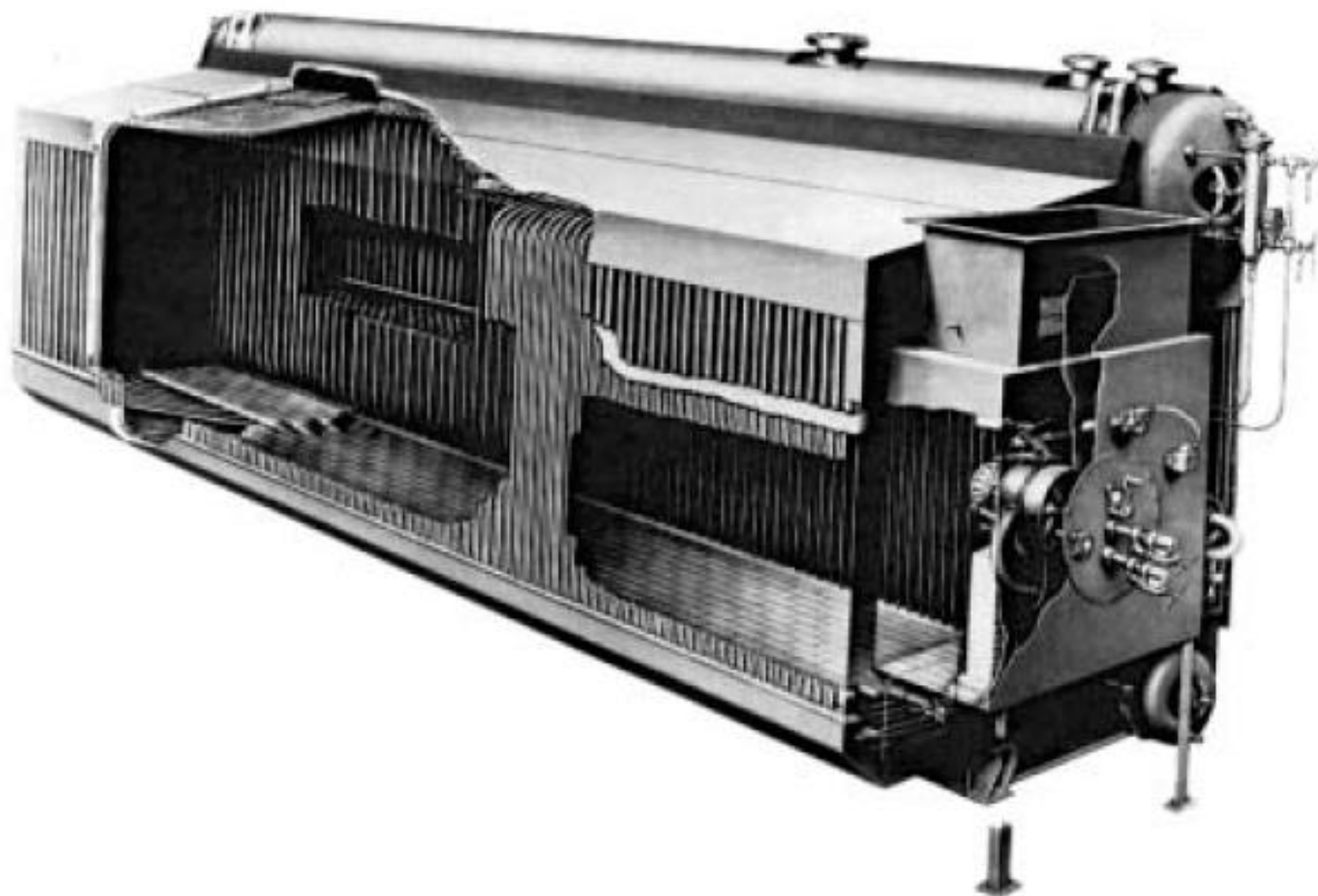
Lancashire, Locomotive, Cohran, Scotch marine, Cornish, Vertical fire-tube, Horizontal return tubular, Admiralty-Type direct tube and Immersion fired boiler.

2.1.2 ΥΔΡΑΥΛΩΤΟΙ ΛΕΒΗΤΕΣ

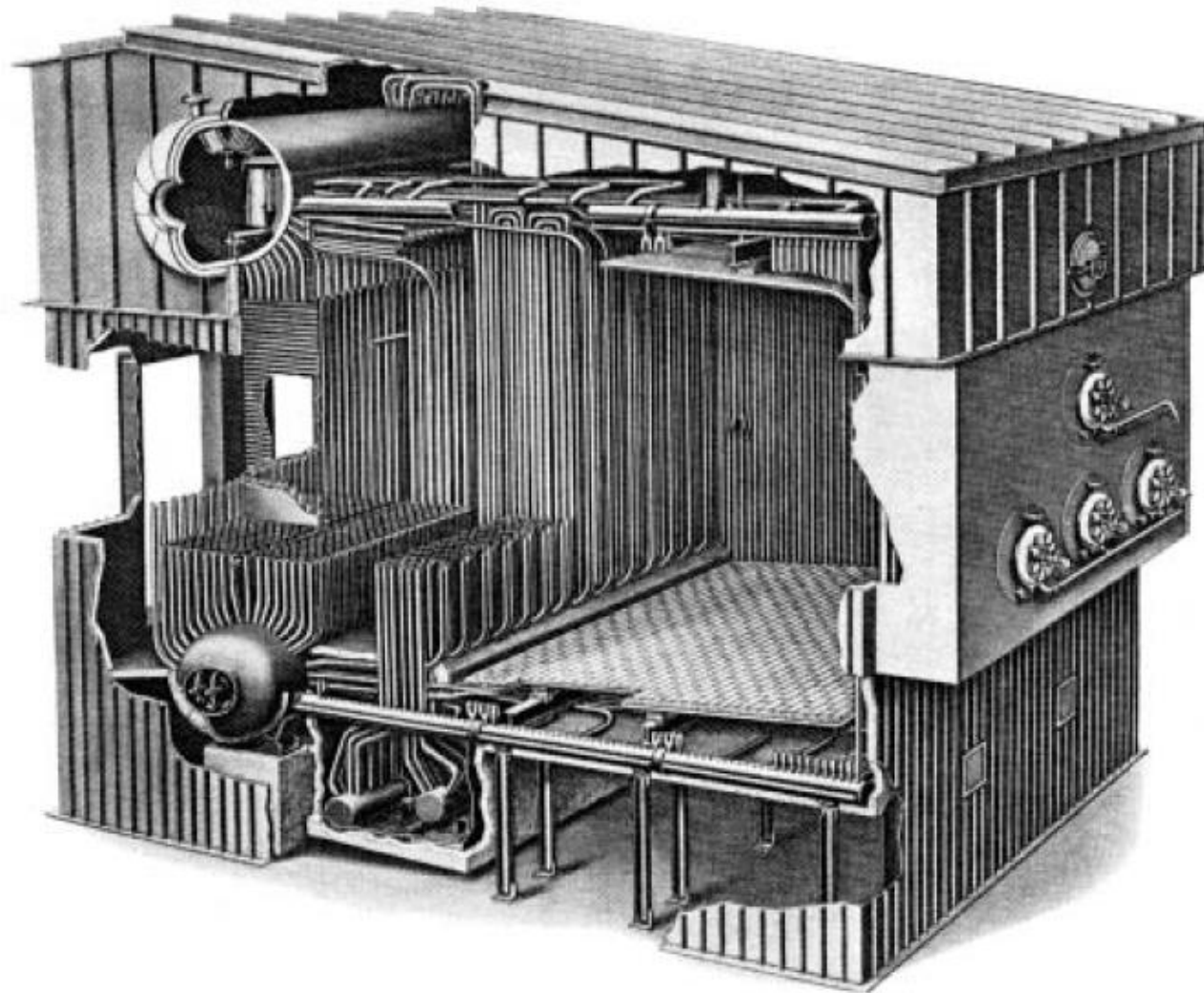
Οι υδραυλωτοί λέβητες έχουν σχεδιαστεί για να κυκλοφορούν τα θερμά καυσαέρια καύσης γύρω από το εξωτερικό περίβλημα μεγάλου αριθμού σωλήνων “αυλών ή τούμπων” γεμάτων με νερό. Οι σωλήνες εκτείνονται μεταξύ μιας άνω κεφαλής (upper header), που ονομάζεται τύμπανο ατμού (steam drum) και μιας ή περισσότερων κάτω κεφαλών ή τυμπάνων. (Wulfinghoff D., 1999).

Σε παλαιότερα σχέδια, οι σωλήνες είναι είτε ίσιοι είτε κυρτοί σε απλά σχήματα. Διακρίνονται σε ίσιων αυλών (straight-tube) και κυρτών αυλών (bent-tube). Οι κυρτοί χρησιμοποιούνται σε υψηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες και σταδιακά αντικαθιστούν τους ίσιους αυλούς. Επίσης έχουν υψηλότερη παραγωγή ατμού, παράγουν ξηρότερο ατμό (ακόρεστο), παρέχουν μεγαλύτερη προσβασιμότητα για επιθεώρηση, ευκολότερο καθαρισμό, λιγότερη συντήρηση λόγω πιο ευρύχωρης διάταξης των σωλήνων και προσφέρουν μεγαλύτερη οικονομία στην κατασκευή και λειτουργία έναντι των ίσιων αυλών. Ανάλογα με την κλίση του αυλού επίσης, ταξινομούνται σε οριζόντιους, κάθετους και κεκλιμένους λέβητες.

Οι νεότεροι λέβητες έχουν αυλούς με πολύπλοκες και ποικίλες κλίσεις. Επειδή η πίεση περιορίζεται μέσα στους αυλούς, οι υδραυλωτοί λέβητες μπορούν να κατασκευαστούν σε μεγαλύτερα μεγέθη και να χρησιμοποιηθούν για υψηλότερης πίεσης εφαρμογές. Οι μικροί υδραυλωτοί λέβητες με σωλήνες νερού, οι οποίοι έχουν έναν και μερικές φορές δύο καυστήρες, γενικά κατασκευάζονται και παρέχονται ως συσκευασμένες μονάδες. Λόγω του μεγέθους και του βάρους τους, οι μεγάλοι υδραυλωτοί λέβητες κατασκευάζονται συχνά απομακρυσμένα, όπου και συναρμολογούνται σε κομμάτια στην εγκατάσταση/πεδίο. Οι διαμορφώσεις για συσκευασμένους και επιτόπιους υδραυλωτούς λέβητες φαίνονται στα παρακάτω σχήματα 2.4 και 2.5, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.4 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα (σε πακέτο-συσκευασμένη μονάδα).
Πηγή: ABMA, 1997.



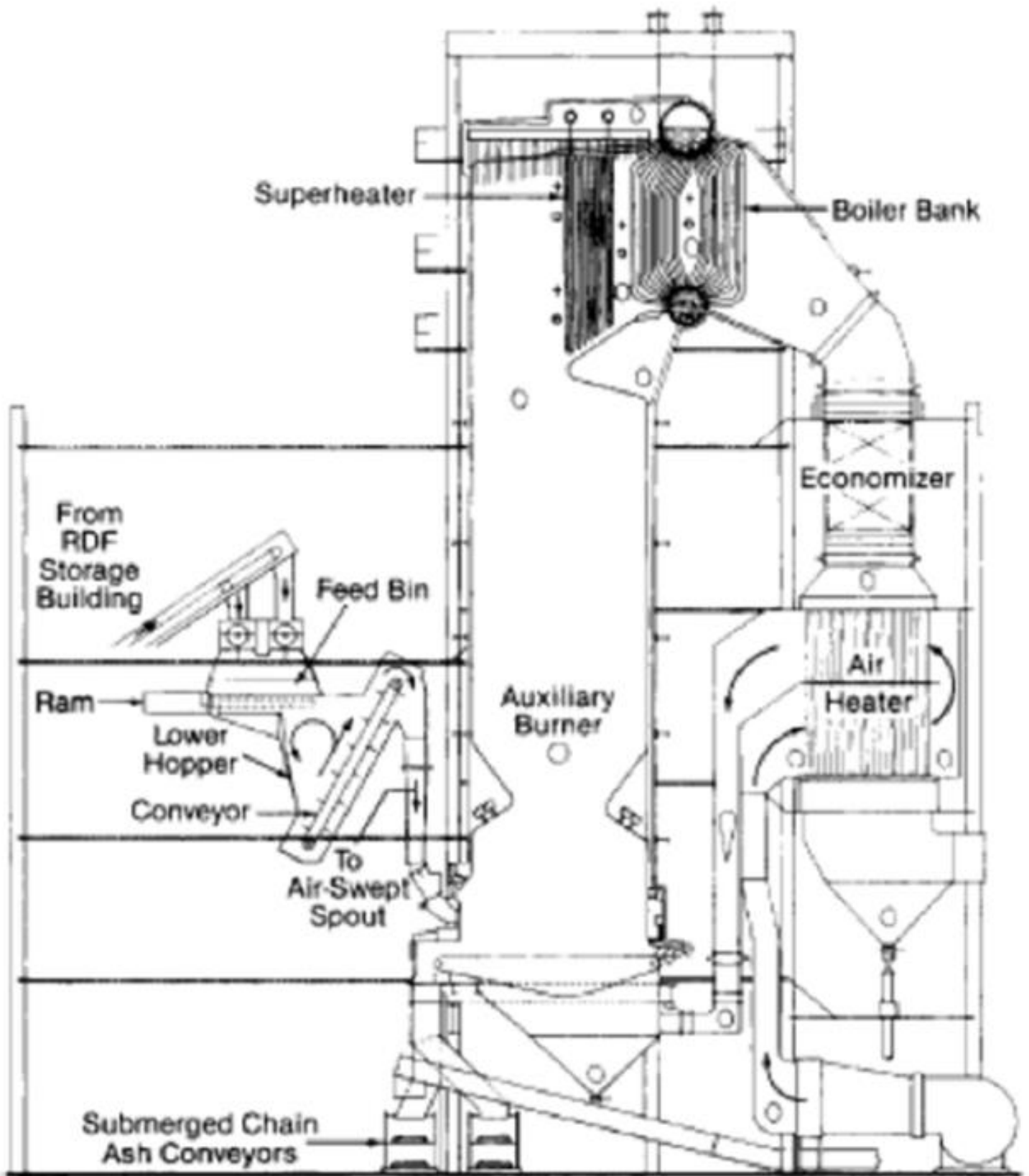
Σχήμα 2.5 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα (με συναρμολόγηση στο πεδίο/εγκατάσταση). Πηγή: ABMA, 1997.

Σχεδόν κάθε στερεό, υγρό ή αέριο καύσιμο μπορεί να καεί σε έναν υδραυλωτό λέβητα. Τα καύσιμα περιλαμβάνουν άνθρακα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, βιομάζα και άλλα στερεά καύσιμα όπως αστικά στερεά απόβλητα (MSW - Municipal Solid Waste), καύσιμα που προέρχονται από ελαστικά (TDF-Tire Derived Fuels) και άλλα απορριματογενή καύσιμα (RDF- Refused Derived Fuels). Τα σχέδια των υδραυλωτών λεβήτων που καίνε αυτά τα καύσιμα μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Τα καύσιμα που συνήθως καίνε οι υδραυλωτοί λέβητες προσδιορίζονται στον παρακάτω Πίνακα 2.2. Οι διαμορφώσεις των υδραυλωτών λεβήτων με καύση RDF, MSW και άλλων στερεών καυσίμων φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 2.6, 2.7, 2.8.

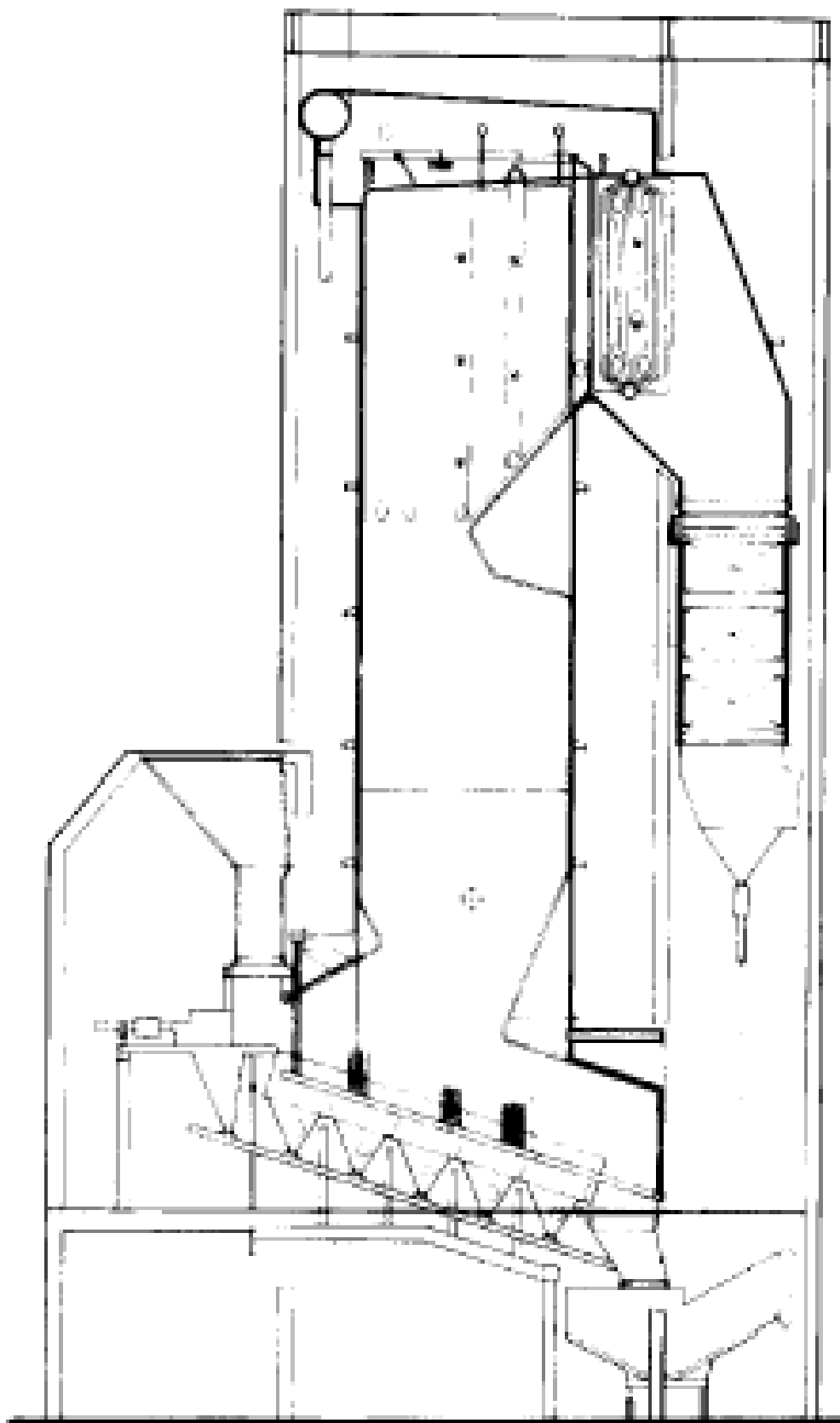
Watertube boiler	Fuel				
	Coal	Fuel oil	Natural gas	Biomass	Refuse-derived
Stoker-fired boilers	Yes for boilers with the following types of stokers	No	No	Yes for boilers with the following types of stokers	Yes for boilers with the following types of stokers
Underfeed stokers					
• Horizontal feed side-ash discharge					
• Gravity feed rear-ash discharge					
Overfeed stokers					
• Mass feed					
✓ Water-cooled vibrating grate					
✓ Moving (chain and traveling) grate					
• Spreader					
✓ Traveling grate					
✓ Air-cooled vibrating grate					
✓ Water-cooled vibrating grate					
PC-fired boilers	Yes for the following types of PC-fired boilers	<i>a</i>	<i>a</i>	No	No
• Single or opposed-wall					
• Tangential (corner)					
• Cyclone					
FBC boilers	Yes for the following types of FBC boilers	<i>a</i>	<i>a</i>	Yes for the following types of FBC boilers	Yes for the following types of FBC boilers
• Atmospheric					
✓ Bubbling					
✓ Circulating					
• Pressurized					
Package boilers	No	Yes for the following types of package boilers	Yes for the following types of package boilers	No	No
• "A"					
• "D"					
• "O"					

^aGas or oil is often used at start-up.

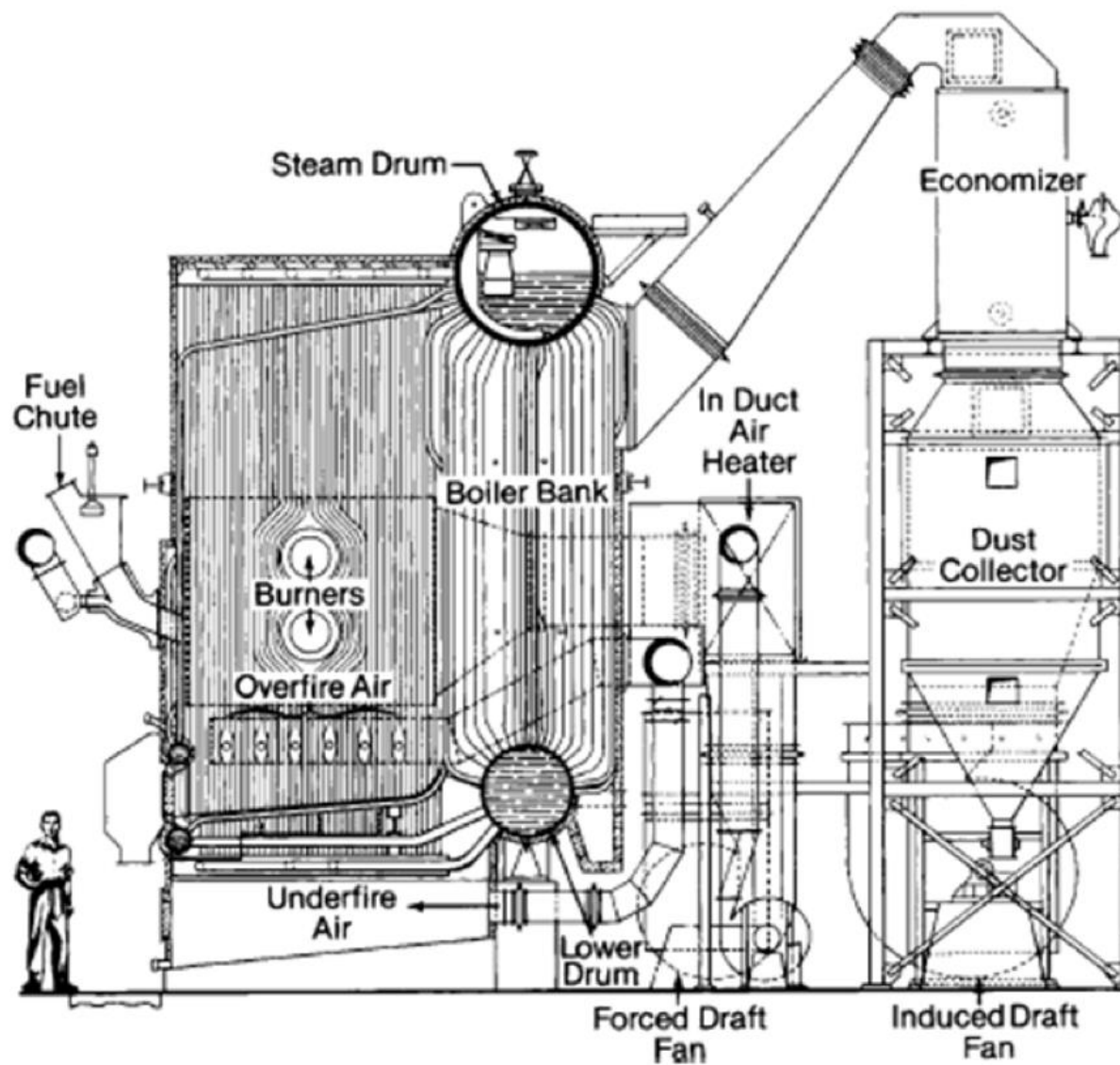
Πίνακας 2.2 Καύσιμα που τροφοδοτούνται συνήθως σε υδραυλωτούς λέβητες.
Πηγή: ABMA, 1997.



Σχήμα 2.6 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα για καύση RDF.
Πηγή: ABMA 1997.



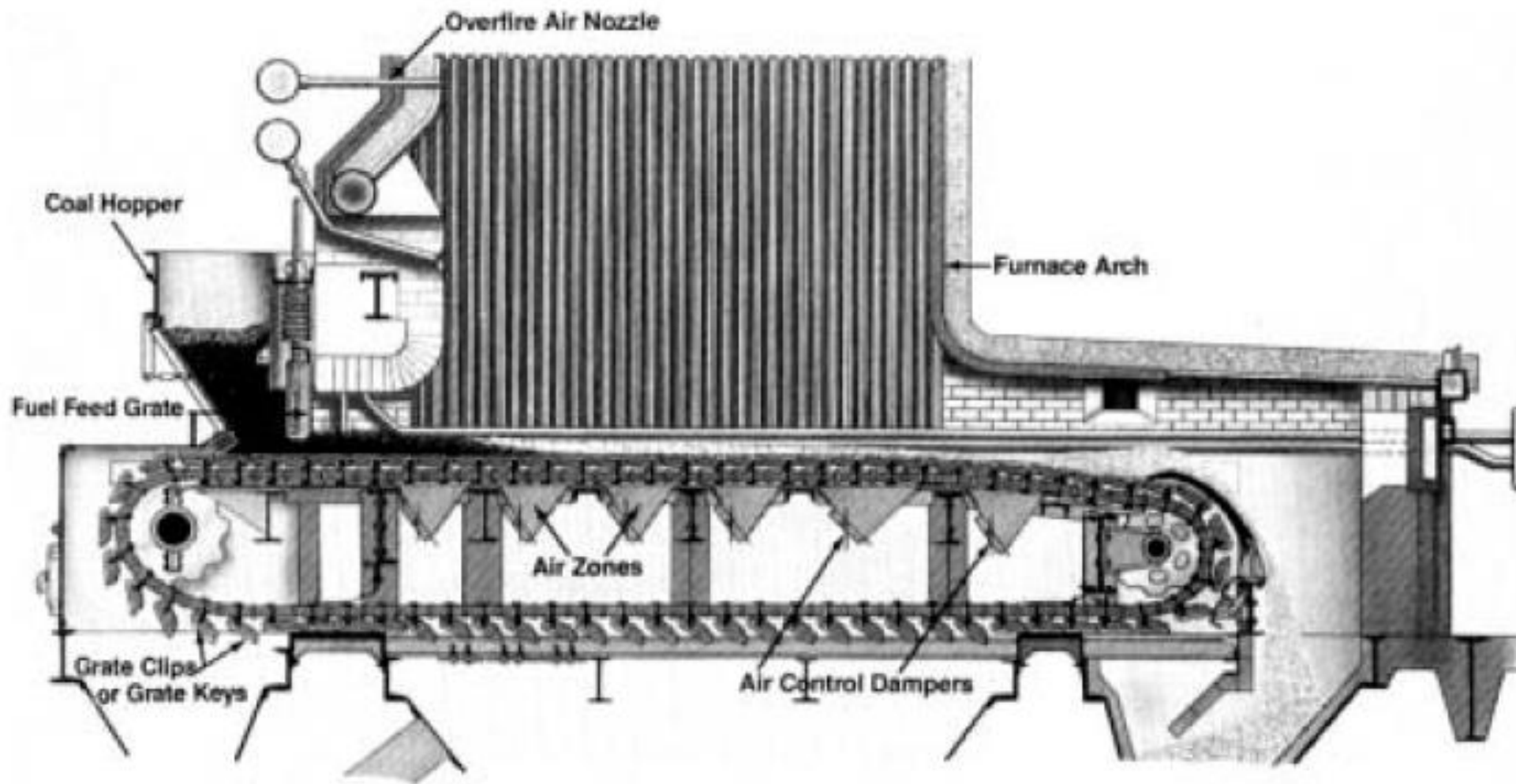
Σχήμα 2.7 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα για καύση MSW.
 Πηγή: ABMA 1997.



Σχήμα 2.8 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα για καύση στερεών καυσίμων όπως ξύλο, βιομάζα ή άνθρακας. Πηγή: ABMA 1997.

Οι υδραυλωτοί λέβητες με καύση των άνθρακα ταξινομούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: λέβητες με σύστημα τροφοδοσίας σχάρας (stoker), λέβητες με καύση κονιοποιημένου άνθρακα και λέβητες FBC.

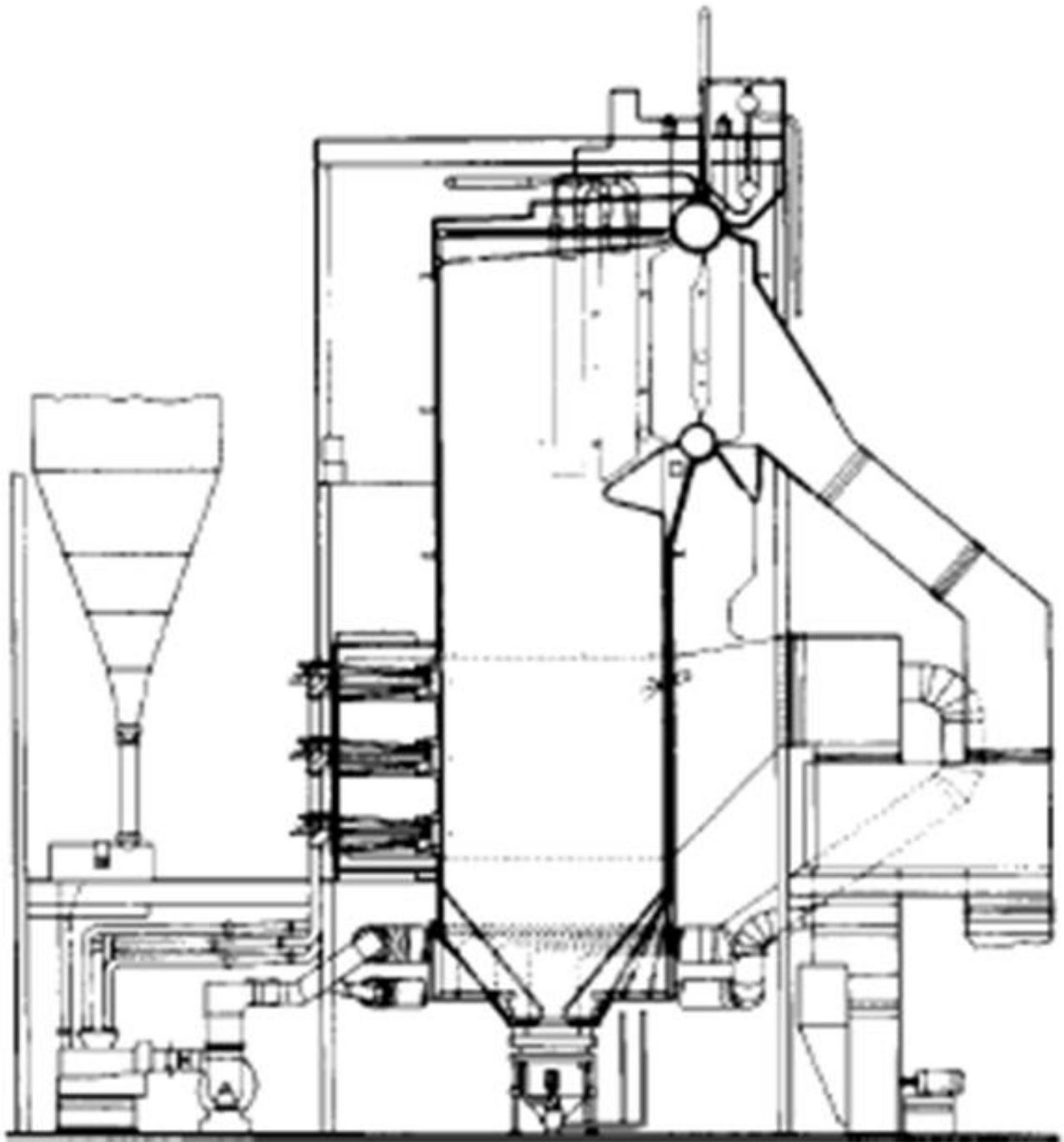
Οι λέβητες για καύση με σύστημα τροφοδοσίας stoker ,όπως στο παρακάτω σχήμα 2.9, περιλαμβάνουν ένα μηχανικό σύστημα που έχει σχεδιαστεί για να τροφοδοτεί το στερεό καύσιμο στον λέβητα. Αυτοί οι τροφοδότες καυσίμου έχουν σχεδιαστεί ώστε να υποστηρίζουν τη διαδικασία της καύσης και να απομακρύνουν την στάχτη καθώς αυτή συσσωρεύεται. Όλοι οι λέβητες με stoker λειτουργούν περίπου το ίδιο. Χρησιμοποιούν τόσο τον υπόγειο όσο και τον αέρα άνωθεν τους, για να καίνε το καύσιμο που βρίσκεται πάνω στην σχάρα.



Σχήμα 2.9 Διατομή τροφοδοσίας με σχάρα (stoker).
Πηγή: Elliot T., 1989.

Οι λέβητες κονιοποιημένου άνθρακα PC (pulverized coal) είναι γενικά μεγάλες σε όγκο μονάδες επιτόπιας εγκατάστασης, όπως αυτή που φαίνεται στο παρακάτω Σχ. 2.10. Κατά τη λειτουργία, ο κονιοποιημένος άνθρακας αναμιγνύεται με τον πρωτογενή αέρα καύσης και τροφοδοτείται στον καυστήρα ή στους καυστήρες όπου και αναφλέγεται. Στη συνέχεια παρέχεται ένας δευτερεύων αέρας καύσης για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της καύσης.

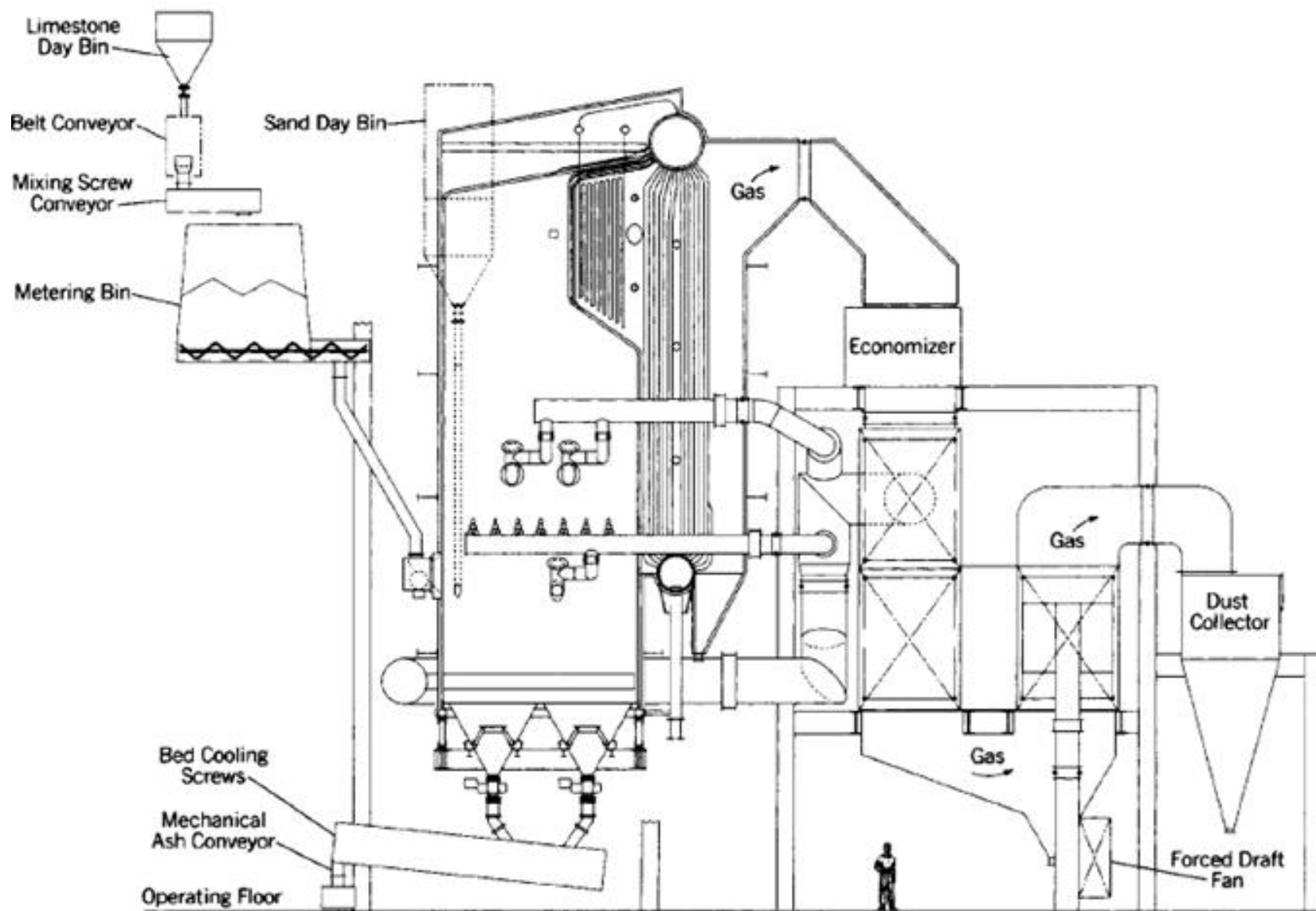
Ανάλογα με τη θέση των καυστήρων και την κατεύθυνση της έγχυσης του άνθρακα, οι λέβητες με καύση κονιοποιημένου άνθρακα μπορούν να ταξινομηθούν σε μονού (single) ή αντίθετου τοιχώματος (opposed wall), εφαπτόμενους (tangential) ή κυκλώνα (cyclone) λέβητες. Οι λέβητες που λειτουργούν με κονιοποιημένο άνθρακα ταξινομούνται επίσης βάση του πυθμένα τους ως ξηροί (dry) ή υγροί (wet) πάτου ανάλογα με το αν η τέφρα αφαιρείται σε στερεή ή λιωμένη κατάσταση αντίστοιχα. Οι λέβητες αντίθετου τοιχώματος έχουν συνήθως πολύ μεγάλη ικανότητα θερμότητας (>70MW). Χρησιμοποιούνται κυρίως για κοινές παροχές, αλλά μπορεί να είναι κατάλληλοι για ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές. Ο άνθρακας που καίγεται σε λέβητες κυκλώνα συνθλίβεται αντί να κονιοποιείται.



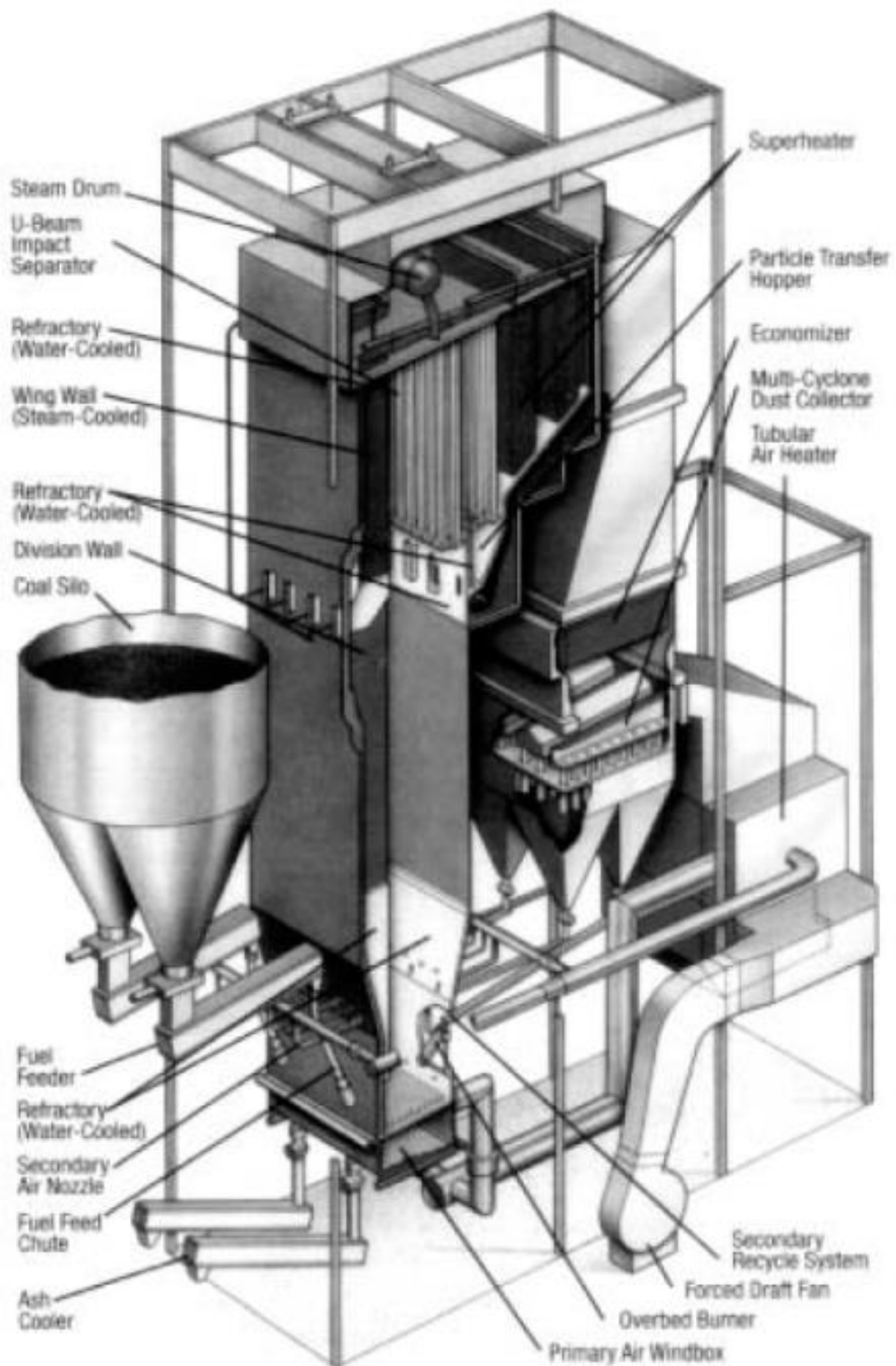
Σχήμα 2.10 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα για καύση ΡC.
Πηγή: Stultz S. και Kitto J., 1992.

Οι λέβητες με καύση ρευστοποιημένης κλίνης FBC (fluidized bed combustion) είναι ικανοί να καίνε ένα ευρύ φάσμα στερεών καυσίμων. Σε αυτή τη μέθοδο καύσης, το καύσιμο καίγεται σε ένα στρώμα καυτών άκαυστων σωματιδίων που αιωρούνται προς τα πάνω όπως ο αέρας. Τα καύσιμα που περιέχουν υψηλή συγκέντρωση τέφρας, θείου και αζώτου μπορούν να καούν αποτελεσματικά ενώ πληρούν τους αυστηρότερους περιορισμούς εκπομπών. Σύμφωνα με τον Singer J. (1991) όταν δεν απαιτείται δέσμευση θείου, μπορούν να προστεθούν αδρανή υλικά όπως η αλούμινα για να συμπληρώσουν την τέφρα του καυσίμου και να διατηρήσουν την κλίνη. Σε εφαρμογές όπου απαιτείται δέσμευση του θείου, ο ασβεστόλιθος (limestone) ενσωματώνεται στην κλίνη και χρησιμοποιείται ως απορροφητικό του θείου.

Οι λέβητες FBC κατηγοριοποιούνται είτε ως ατμοσφαιρικοί (atmospheric) είτε ως μονάδες υπό πίεση (pressurized). Οι λέβητες ατμοσφαιρικού FBC χωρίζονται περαιτέρω ανάλογα στις κλίνες με φυσαλίδες (bubbling beds) και σε κλίνες με ανακυκλοφορία (circulating beds). Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ αυτών των δύο είναι η ταχύτητα ρευστοποίησης. Ο άνθρακας καίγεται συχνά σε λέβητες FBC, αλλά είναι επίσης δυνατή η καύση βιομάζας και άλλων στερεών καυσίμων. Το φυσικό αέριο ή το μαζούτ χρησιμοποιείται κυρίως ως καύσιμο εκκίνησης για την προθέρμανση της ρευστοποιημένης κλίνης ή ως βοηθητικό καύσιμο όταν απαιτείται πρόσθετη θερμότητα. Οι διαμορφώσεις διαφόρων τύπων λεβήτων FBC φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 2.11, 2.12, 2.13.

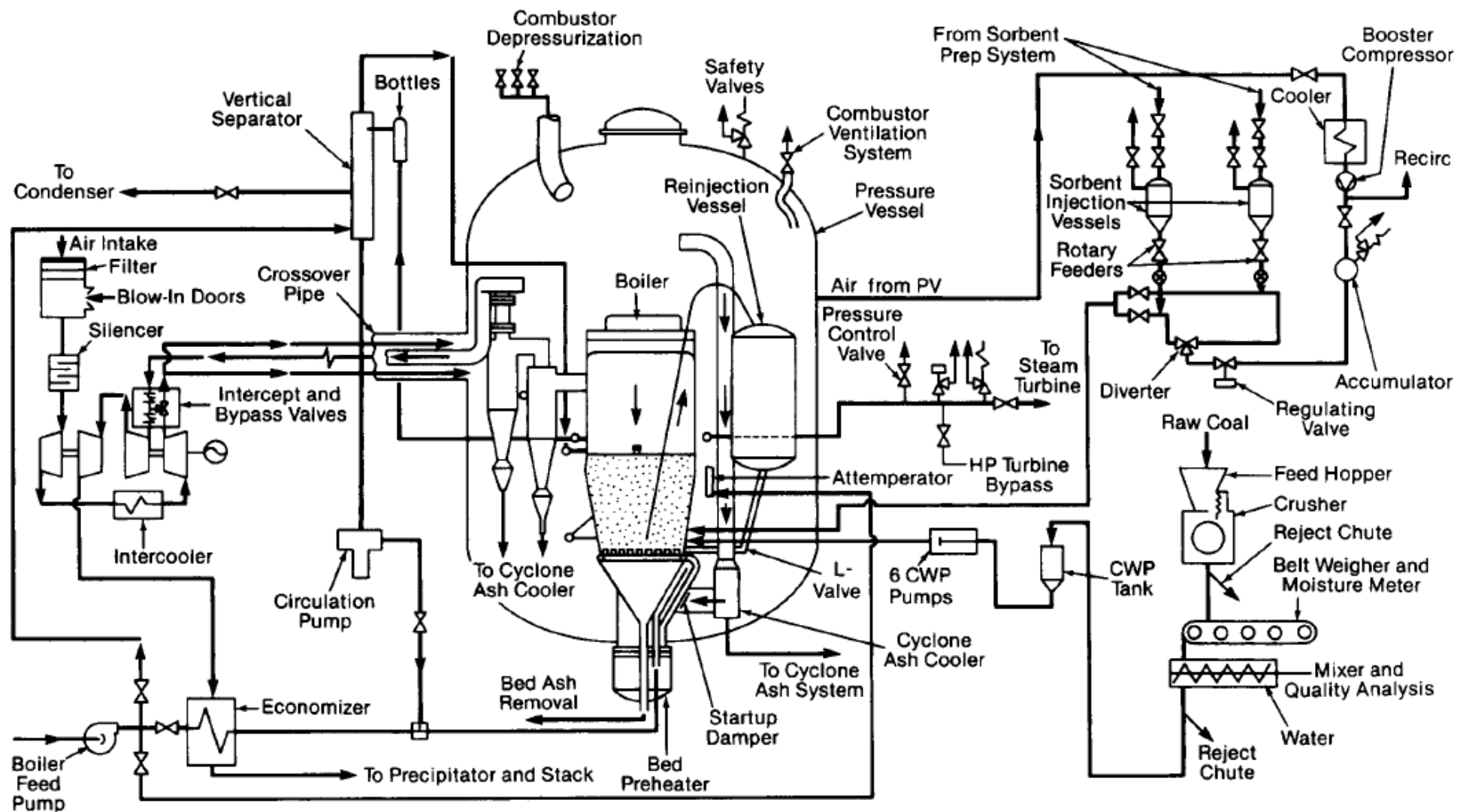


Σχήμα 2.11 Διαμόρφωση υδραλωτού λέβητα FBC με φουσαλίδες (bubbling beds). Πηγή: Stultz S. και Kitto J., 1992.



Σχήμα 2.12 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα FBC με ανακυκλοφορία.

Πηγή: Stultz S. και Kitto J., 1992.



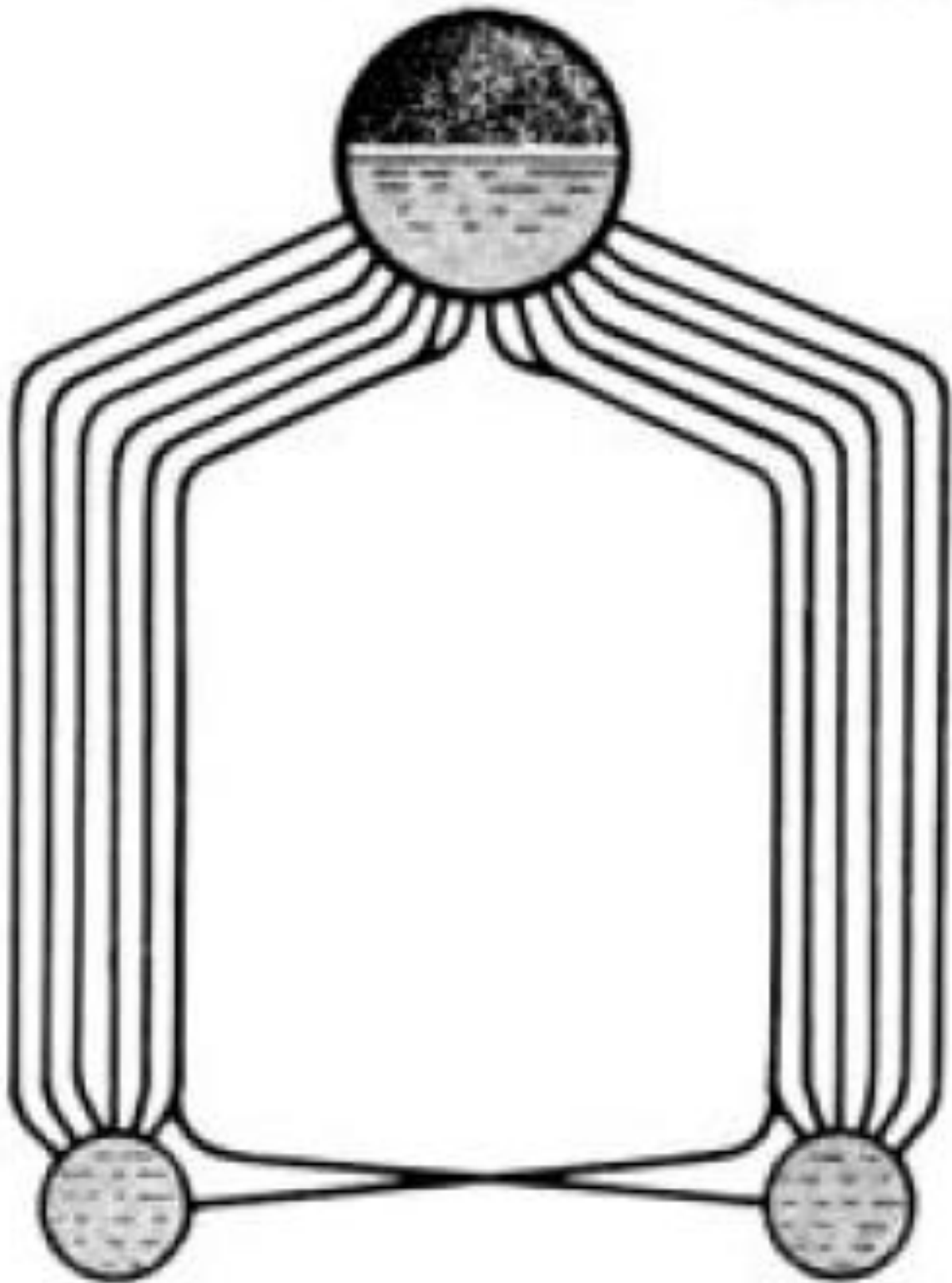
Σχήμα 2.13 Διαμόρφωση υδραυλωτού λέβητα FBC υπό πίεση. Πηγή: Stultz S. and Kitto J. (1992).

Η καύση άλλων στερεών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων των αστικών στερεών αποβλήτων MSW (Municipal Solid Waste) και καυσίμων προερχόμενα από απορρίμματα RDF (Refuse Derived Fuel), τροφοδοτούνται συχνά σε λέβητα με χρήση stoker. Οι λέβητες με καύσιμα αυτού του τύπου έχουν ειδικά σχεδιασμένα συστήματα τροφοδοσίας για την παροχή και τη διανομή του στερεού αυτού καυσίμου. Οι λέβητες αυτοί, επίσης είναι ειδικά σχεδιασμένοι για να διασυνδέονται με το σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου και να καίνε το καύσιμο όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά. Πολλοί λέβητες που καίνε στερεά μη ορυκτά καύσιμα έχουν κάποιο είδος ικανότητας καύσης ταυτόχρονα και των ορυκτών καυσίμων. Αυτά ως βοηθητικά καύσιμα χρησιμοποιούνται κατά την εκκίνηση ή ως συμπληρωματικό καύσιμο ή μόνα τους όταν το κύριο καύσιμο δεν είναι διαθέσιμο.

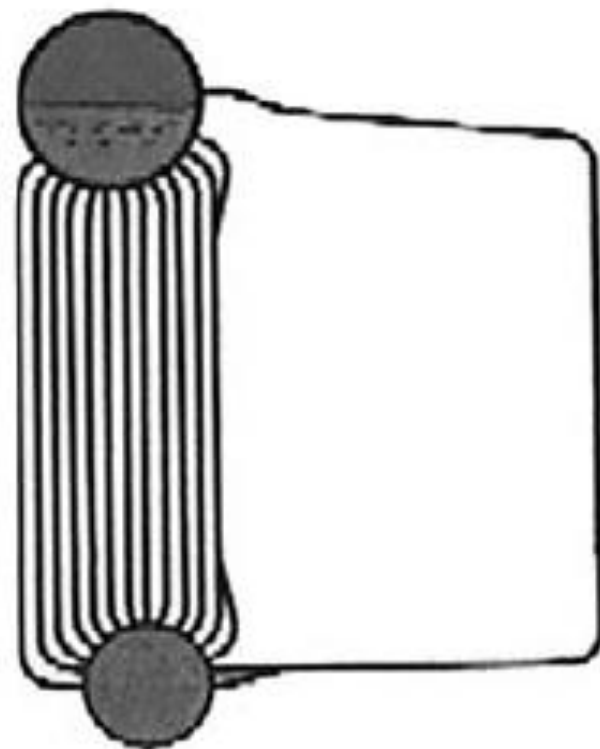
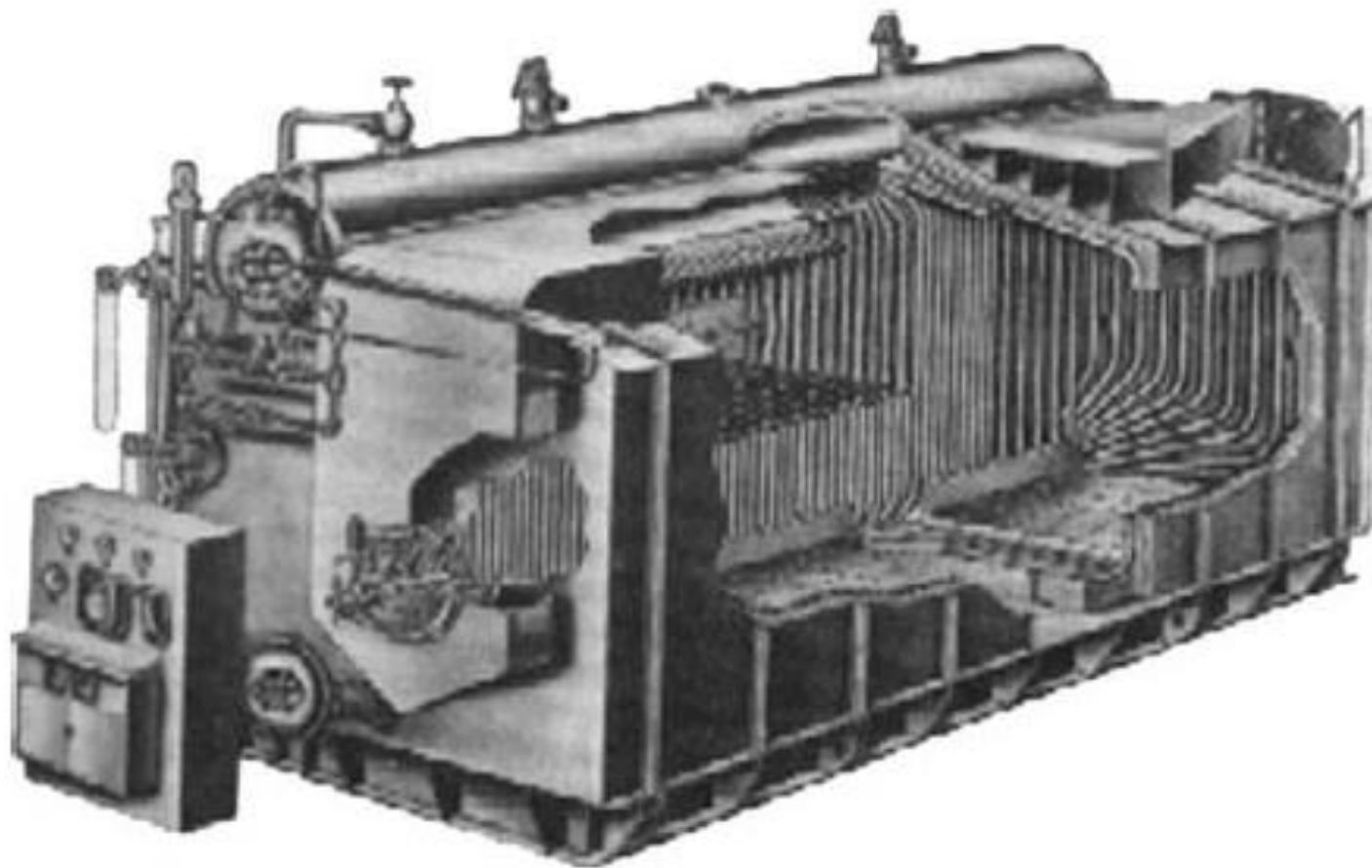
Μη ορυκτά αέρια καύσιμα που είναι πλούσια σε μονοξειδία του άνθρακα CO και υδρογόνο μπορούν επίσης να καούν σε υδραυλωτούς λέβητες. Αυτά τα καύσιμα μπορούν να παραχθούν με τη μερική καύση βιομάζας χρησιμοποιώντας τεχνικές αεριοποίησης ή πυρόλυσης.

Οι υδραυλωτοί λέβητες πακέτου με καύση μαζούτ και φυσικού αερίου υποδιαιρούνται σε τρεις κατηγορίες με βάση τη γεωμετρία των τούμπων-σωλήνων.

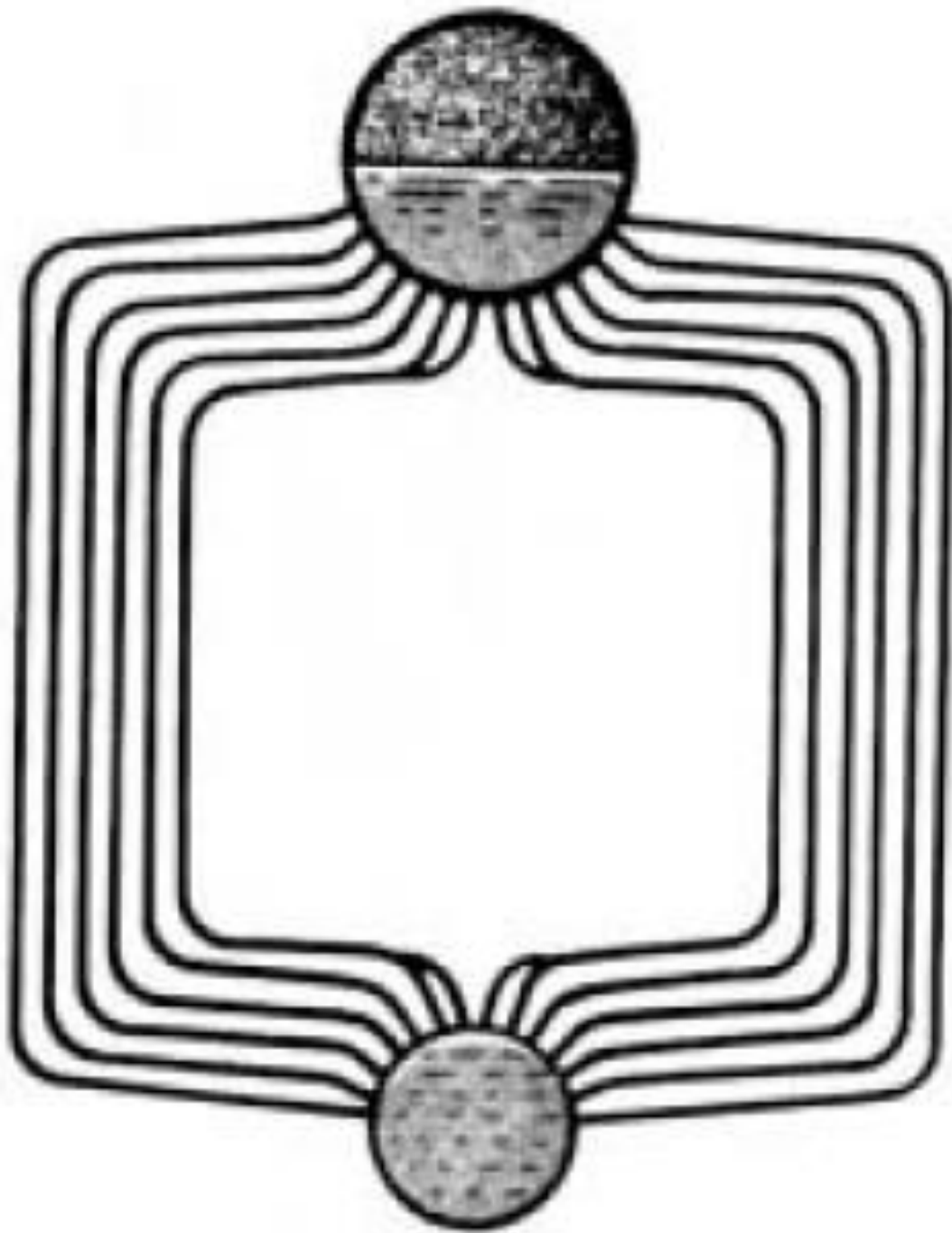
1. Ο σχεδιασμός A έχει δύο μικρά κάτω τύμπανα λέβητα και ένα μεγαλύτερο άνω τύμπανο λέβητα για διαχωρισμό ατμού-νερού.
2. Στον σχεδιασμό D, που είναι και ο πιο συνηθισμένος, ο λέβητας έχει δύο τύμπανα και έναν μεγάλο όγκου θάλαμο καύσης. Ο προσανατολισμός των σωλήνων σχηματίζει το αγγλικό κεφαλαίο γράμμα D. Ο λέβητας δημιουργεί είτε σε αριστερόστροφη είτε δεξιόστροφη διαμόρφωση.
3. Για τον σχεδιασμό O, η διαμόρφωση του σωλήνα στον λέβητα εκθέτει τη μικρότερη ποσότητα επιφάνειας τούμπων στην ακτινοβολούμενη θερμότητα. Οι ενοικιαζόμενοι λέβητες σε βιομηχανίες συχνά παρατηρούμε να είναι τέτοιου τύπου γιατί έχουν καλή γεωμετρία για την μεταφορά. Τα σχήματα 2.14, 2.15, 2.16 δείχνουν τις διαμορφώσεις των αυλών για καθένα από αυτά τα σχέδια υδραυλωτού λέβητα.



Σχήμα 2.14 Υδραυλωτός λέβητας με κυρτούς αυλούς τύπου Α.
Πηγή: Elliot T. (1989).



Σχήμα 2.15 Υδραλωτός λέβητας με κυρτούς αυλούς τύπου D.
Πηγή: Elliot T. (1989).



Σχήμα 2.16 Υδραυλωτός λέβητας με κυρτούς αυλούς τύπου Ο.
Πηγή: Elliot T. (1989).

- ✓ Ο D type έχει περισσότερα πλεονεκτήματα όπως ότι είναι πιο αξιόπιστος, καλύτερη απόδοση παραγωγής ατμού, πιο οικονομικός σε κανονικό φορτίο, συμπαγής και ελαφρύς, απαιτεί λιγότερο χρόνο για συντήρηση και ελέγχει καλύτερα την θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού.

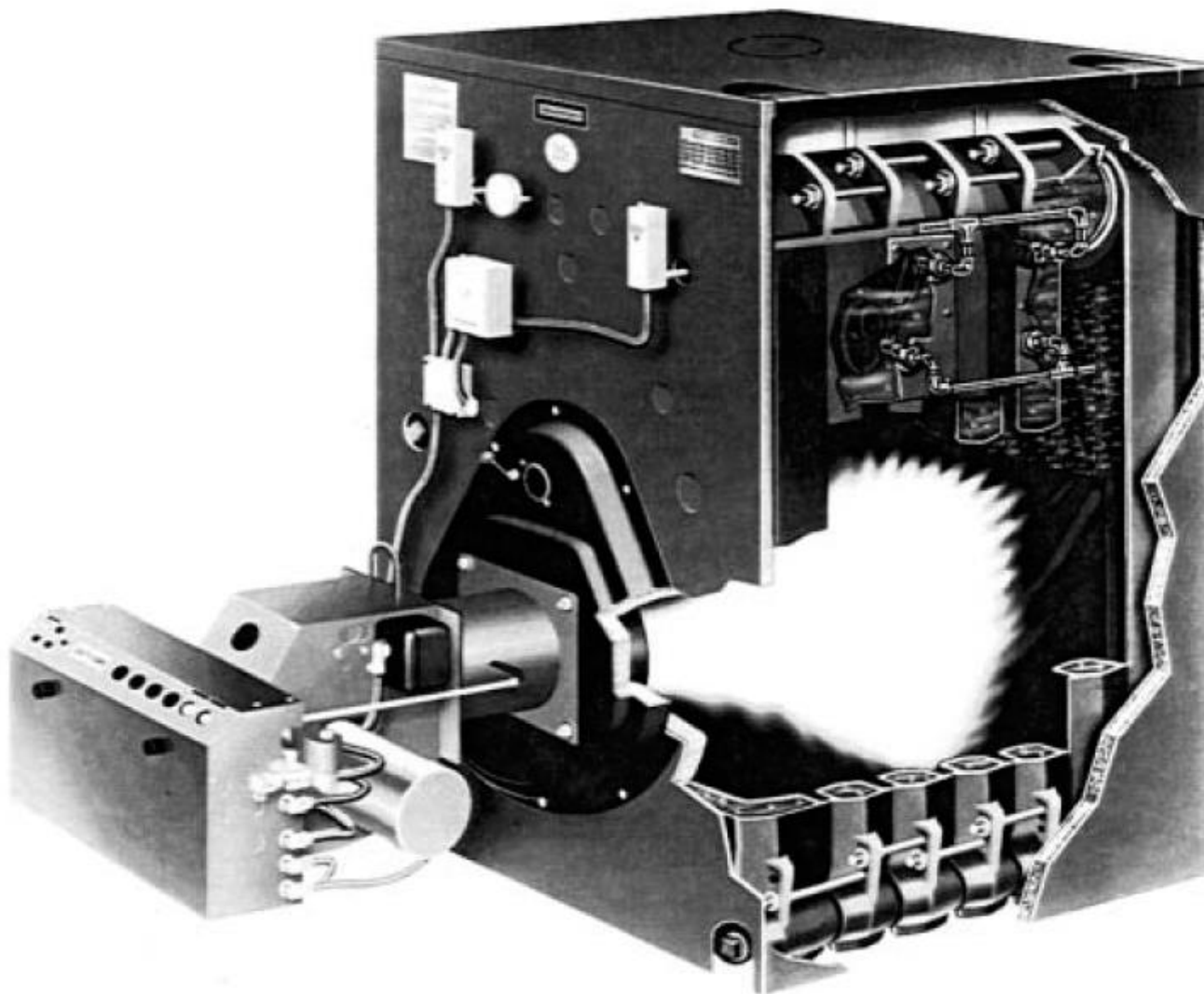
Τύποι - ονομασίες – λοιπά σχέδια υδραυλωτών λεβήτων για αναζήτηση:

Babcock and Wilcox, Simple vertical, Yarrow, Loeffler, Stirling, LaMont, Benson λέβητες.

2.1.3 ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΛΕΒΗΤΕΣ ΧΩΡΙΣ ΣΩΛΗΝΑ

Οι λέβητες από χυτοσίδηρο-μαντέμι (cast iron) κατασκευάζονται από διάφορα τμήματα που είναι βιδωμένα μεταξύ τους. Ο σχεδιασμός του κάθε τμήματος περιλαμβάνει ενσωματωμένες διόδους του νερού και των καυσαερίων. Όταν συναρμολογηθούν πλήρως, οι δίοδοι διασύνδεσης δημιουργούν θαλάμους όπου η θερμότητα μεταφέρεται από τα θερμά καυσαέρια στο νερό. Αυτοί οι λέβητες παράγουν γενικά ατμό χαμηλής πίεσης (15 psig) ή ζεστό νερό (30 psig) και καίνε είτε πετρέλαιο είτε φυσικό αέριο.

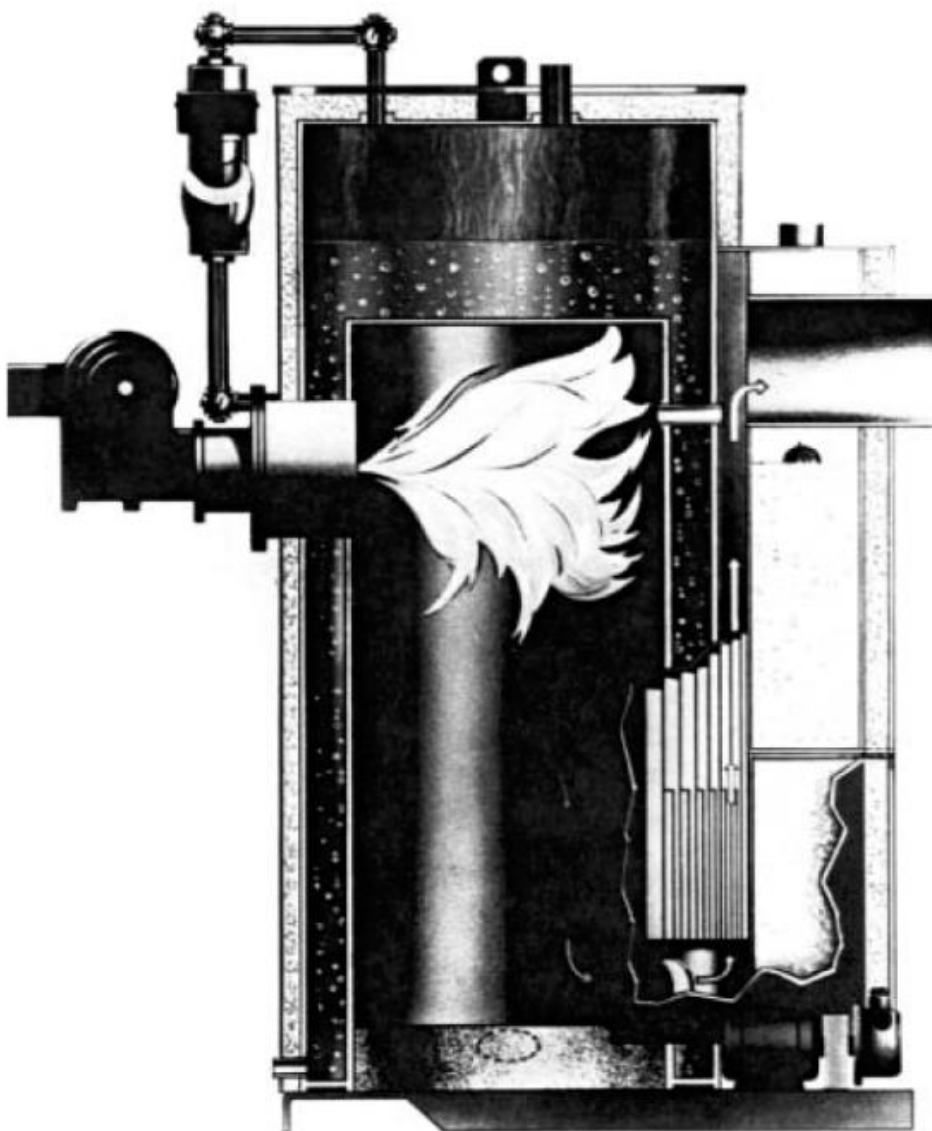
Λόγω της κατασκευής τους, οι χυτοσίδηροι λέβητες περιορίζονται σε μικρά μεγέθη. Επειδή τα εξαρτήματα αυτών των λεβήτων είναι σχετικά μικρά και εύκολα στη μεταφορά τους, μπορούν να συναρμολογηθούν ακόμα μέσα και σε ένα δωμάτιο με πρόσβαση από μια πόρτα συμβατικού μεγέθους. Αυτό το χαρακτηριστικό σημαίνει ότι οι χυτοσίδηροι λέβητες χρησιμοποιούνται συχνά ως μονάδες αντικατάστασης, οι οποίες εξαλείφουν την ανάγκη για προσωρινή αφαίρεση ενός τοίχου για πρόσβαση σε σχέση με μεγαλύτερες μονάδες λεβήτων συσκευασίας. Η διαμόρφωση ενός χυτοσιδήρου λέβητα φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.17.



Σχήμα 2.17 Διαμόρφωση χυτοσίδηρου - μαντεμένιου λέβητα. Πηγή: ABMA (1997).

Ένας άλλος λέβητας που μερικές φορές χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού ή ζεστού νερού, είναι γνωστός ως λέβητας χωρίς σωλήνα (tubeless). Ο σχεδιασμός των λεβήτων χωρίς σωλήνα ενσωματώνει ένθετα δοχεία πίεσης με νερό που βρίσκονται ανάμεσα στα κελύφη. (EPA 1994).

Τα καυσαέρια εκλύονται στο εσωτερικό δοχείο όπου η θερμότητα μεταφέρεται στο νερό που βρίσκεται μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του εσωτερικού κελύφους και της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού κελύφους. Για κάθετους λέβητες χωρίς σωλήνα με καύση πετρελαίου και φυσικού αερίου, ο καυστήρας βρίσκεται συνήθως στο κάτω μέρος του λέβητα και αναφλέγεται προς το εσωτερικό δοχείο πίεσης. Η διαμόρφωση ενός κατακόρυφου λέβητα χωρίς σωλήνα φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.18.



Σχήμα 2.18 Διαμόρφωση κάθετου λέβητα χωρίς σωλήνα (tubeless).
Πηγή: AMBA (1997).

2.2 ΚΑΥΣΤΗΡΕΣ

Τα συστήματα τροφοδοσίας καυσίμου διαδραματίζουν έναν κρίσιμο ρόλο στην απόδοση των λεβήτων χαμηλών εκπομπών. Οι κύριες λειτουργίες τους περιλαμβάνουν:

1. την μεταφορά του καυσίμου στον λέβητα.
2. την διανομή του καυσίμου εντός του λέβητα για την προώθηση της ομοιόμορφης και της πλήρους καύσης.

Ο τύπος του καυσίμου και το αν το καύσιμο είναι στερεό, υγρό ή αέριο επηρεάζει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος τροφοδοσίας του.

Τα αέρια καύσιμα μεταφέρονται και χειρίζονται σχετικά εύκολα. Οποιαδήποτε διαφορά πίεσης θα επιτρέψει την ροή του αερίου καυσίμου καθώς αναμιγνύονται και εύκολα με τον αέρα. Επειδή η επιτόπια αποθήκευση αερίου καυσίμου σε εγκαταστάσεις δεν είναι πάντα εφικτή, οι λέβητες πρέπει να συνδέονται και με μια εναλλακτική πηγή καυσίμου όπως ένας αγωγός φυσικού αερίου. Η ροή του αερίου καυσίμου σε έναν λέβητα μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια χρησιμοποιώντας μια ποικιλία συστημάτων ελέγχου. Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν αυτόματες βαλβίδες που ρυθμίζουν τη ροή του αερίου καυσίμου στον καυστήρα, ανάλογα με την ζήτηση ατμού ή ζεστού νερού. Ο σκοπός του καυστήρα είναι να αυξήσει τη σταθερότητα της φλόγας σε ένα ευρύ φάσμα ρυθμών ροής, δημιουργώντας ευνοϊκές συνθήκες για την ανάφλεξη του καυσίμου και δημιουργώντας αεροδυναμικές συνθήκες που εξασφαλίζουν καλή ανάμειξη μεταξύ του πρωτογενούς αέρα καύσης και του καυσίμου. Οι καυστήρες είναι τα κεντρικά στοιχεία ενός αποτελεσματικού συστήματος καύσης. Άλλα στοιχεία του σχεδιασμού και της εφαρμογής τους περιλαμβάνουν εξοπλισμό για την προετοιμασία του καυσίμου και τη διανομή αέρα-καυσίμου καθώς και ένα ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχων της καύσης.

Όπως τα αέρια καύσιμα, έτσι και τα υγρά καύσιμα είναι επίσης σχετικά εύκολα για την μεταφορά και τον χειρισμό τους, χρησιμοποιώντας αντλίες και δίκτυα σωλήνων που συνδέουν τον λέβητα με μια κεντρική παροχή καυσίμου, όπως μια δεξαμενή αποθήκευσης μαζούτ (fuel oil). Για την προώθηση της πλήρους καύσης, τα υγρά καύσιμα πρέπει να ψεκάζονται για να επιτρέπεται η πλήρης ανάμειξη με τον αέρα καύσης. Ο ψεκασμός με αέρα, ατμό ή με άλλη μορφή πίεσης παράγει μικροσκοπικά σταγονίδια που καίγονται περισσότερο σαν αέριο παρά ως υγρό. Ο έλεγχος των λεβήτων που καίνε υγρά καύσιμα μπορεί επίσης να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μια ποικιλία συστημάτων ελέγχου που μετρούν τη ροή του καυσίμου.

Τα στερεά καύσιμα είναι πολύ πιο δύσκολο να διαχειριστούν σε σχέση με τα αέρια και τα υγρά καύσιμα. Η προετοιμασία του καυσίμου για καύση είναι γενικά απαραίτητη και μπορεί να περιλαμβάνει τεχνικές όπως σύνθλιψη ή τεμαχισμό. Πριν συμβεί η καύση, τα μεμονωμένα σωματίδια καυσίμου πρέπει να μεταφερθούν από έναν χώρο αποθήκευσης στον λέβητα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται συχνά μηχανικές συσκευές όπως μεταφορείς (conveyors), κοχλίες (augers), χοάνες (hoppers), συρόμενες πύλες (slide gates), δονητές (vibrators) και φυσητήρες (blowers). Η επιλεγμένη μέθοδος εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος των μεμονωμένων σωματιδίων καυσίμου, τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του καυσίμου. Υπάρχουν stokers που χρησιμοποιούνται συνήθως για την τροφοδοσία στερεών σωματιδίων καυσίμων όπως θρυμματισμένος άνθρακας, TDF, MSW, ροκανίδια ξύλου και άλλες μορφές βιομάζας στους λέβητες. Οι μηχανικές αυτές σχάρες εξελίχθηκαν από την εποχή του λέβητα με το χέρι και τώρα περιλαμβάνουν εξελιγμένα ηλεκτρικά και μηχανολογικά εξαρτήματα που ανταποκρίνονται γρήγορα στις αλλαγές της ζήτησης ατμού. Ο σχεδιασμός αυτών των εξαρτημάτων παρέχει καλή ικανότητα απόσβεσης και διαχείρισης του καυσίμου. Σε αυτό το πλαίσιο, το turndown ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ροής καυσίμου προς την ελάχιστη ροή

καυσίμου. Μολονότι οι τροφοδοτικές συσκευές χρησιμοποιούνται για τα περισσότερα στερεά καύσιμα, η καύση κονιοποιημένου άνθρακα (PC), η οποία αποτελείται από πολύ λεπτά κονιοποιημένα σωματίδια, δεν περιλαμβάνει κάποιον τροφοδότη σχάρας. Ο άνθρακας σε αυτή τη μορφή μπορεί να μεταφερθεί μαζί με τον πρωτογενή αέρα καύσης μέσω σωλήνων που συνδέονται στους ειδικά σχεδιασμένους καυστήρες.

Οι αναφορές σχετικά με τους καυστήρες προορίζονται μόνο για την παροχή βασικών πληροφοριών σχετικά με τον εξοπλισμό καύσης. Επειδή τα χαρακτηριστικά των καυστήρων και των stokers είναι αρκετά περίπλοκα και υψηλής τεχνικής, οι πληροφορίες που θα παρατεθούν δεν εξετάζουν τα λεπτομερή ζητήματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη θεωρία λειτουργίας ή την απόδοσή τους. Πιο συγκεκριμένες λεπτομέρειες σχετικά με ένα προϊόν ή κάποιο σχέδιο θα πρέπει να ληφθούν από τον εκάστοτε κατασκευαστή.

Ο καυστήρας ορίζεται ως μια συσκευή ή μια ομάδα συσκευών για την εισαγωγή καυσίμου και αέρα σε έναν κλίβανο στις απαιτούμενες ταχύτητες, αναταράξεις και συγκέντρωση για τη διατήρηση της ανάφλεξης και της καύσης του καυσίμου μέσα στον κλίβανο. Οι καυστήρες για αέρια καύσιμα είναι λιγότερο περίπλοκοι από εκείνους για υγρά ή στερεά καύσιμα επειδή η ανάμειξη αερίου και αέρα καύσης είναι σχετικά απλή σε σύγκριση με τον ψεκασμό υγρού καυσίμου ή τη διασπορά σωματιδίων στερεών καυσίμων. (EPA, 1994).

Δεν υπάρχει επίσημο σύστημα ταξινόμησης για τους καυστήρες, αλλά οι προσπάθειες συνδυασμού επιθυμητών χαρακτηριστικών καυστήρων οδήγησαν σε μια πλούσια ποικιλία στα σχέδια καυστήρων. (EPA, 1994). Η ορολογία που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των καυστήρων που υπάρχουν εδώ και αρκετό καιρό καθώς και των προηγμένων καυστήρων που βασίζονται σχετικά με την αναδυόμενη τεχνολογία παρατίθεται στον Πίνακα 2.3.

Air-atomizing oil burner
Atmospheric gas burner
Dual-fuel burner
Forced internal recirculation (FIR) burner
Low-NO_x burner (LNB)
Modulating gas power burner
Modulating pressure-atomizing oil burner
Multistage pressure-atomizing oil burner
On-off burner
Premix burner
Premix radiant burner
Premix surface burner
Premix surface-stabilized burner
PC burner
Rapid-mix burner
Rotary cup oil burner
Single-stage gas power burner
Single-stage pressure-atomizing oil burner
Staged gas power burner
Steam-atomizing oil burner
Ultra low-NO_x burner (ULNB)

Πίνακας 2.3 Ορολογία που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση καυστήρων.

Πηγή: EPA (1994).

Η ικανότητα ενός καυστήρα να αναμειγνύει τον αέρα καύσης με το καύσιμο είναι ένα μέτρο για την απόδοσή του. Ένας καλός καυστήρας αναμειγνύει καλά και απελευθερώνει μια μέγιστη ποσότητα θερμότητας από το καύσιμο. Οι βέλτιστοι καυστήρες έχουν σχεδιαστεί για να απελευθερώνουν τη μέγιστη ποσότητα θερμότητας από το καύσιμο και να περιορίζουν την ποσότητα αέριων ρύπων όπως το CO, NO_x και των σωματιδίων PM που απελευθερώνονται. Οι καυστήρες με αυτές τις δυνατότητες χρησιμοποιούνται πλέον τακτικά σε λέβητες που πρέπει να συμμορφώνονται με τους υποχρεωτικούς περιορισμούς βάση εκπομπών των ρύπων. Οι τεχνικές ελέγχου των εκπομπών που είναι αποτελεσματικές στη μείωση των εκπομπών αυτών (NO_x, CO, SO₂ και PM) περιγράφονται σε παρακάτω κεφάλαιο.

Ένας αποτελεσματικός τρόπος για την ελαχιστοποίηση των εκπομπών NOx είναι η χρήση καυστήρα χαμηλών NOx (LNB). Αυτοί οι καυστήρες χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές για την ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα καύσης με στόχο την μείωση του σχηματισμού NOx.

Δύο τεχνικές που χρησιμοποιούνται συχνά για το σκοπό αυτό περιλαμβάνουν:

1. Την εισαγωγή του καυσίμου και του αέρα σε διαφορετικά στάδια.
2. Την ανακυκλοφορία καυσαερίων με φρέσκο αέρα καύσης.

Τα LNBs μπορούν να τοποθετηθούν εκ των υστέρων, σε υπάρχον λέβητες. Έχουν αναπτυχθεί και κυκλοφορούν για αγορά. Διατίθενται επίσης ολοκληρωμένα συστήματα που ενσωματώνουν LNBs καυστήρες σε νέα και αποδοτικά σχέδια λεβήτων.

Οι καυστήρες εξαιρετικά χαμηλών NOx (ULNBs- Ultra-Low -NOx Burners) χρησιμοποιούν την πιο νέα τεχνολογία για τη μείωση των εκπομπών NOx και επίσης για μονοξείδια του άνθρακα CO, σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα. Αυτοί οι καυστήρες είναι ειδικά σχεδιασμένοι για να καίνε καθαρά αέρια καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο, που είναι ουσιαστικά απαλλαγμένα από άζωτο και θείο. Συζητήσεις σχετικά με τα ULNBs και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ελαχιστοποίηση του θερμικού και άμεσου σχηματισμού NOx παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο.

Γενικά, τεχνικές πληροφορίες σχετικά με τη σχεδίαση ενός LNB ή ULNB καυστήρα και τις επιδόσεις του κατά τη λειτουργία μπορούν να ληφθούν μόνο από τον κατασκευαστή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η μετατροπή του νερού σε ατμό απαιτεί επαρκή θερμότητα για να προκαλέσει βρασμό του νερού. Αν και μια ποικιλία πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της πυρηνικής ενέργειας και της ηλιακής ακτινοβολίας, μπορούν να παράγουν την απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας, η καύση ενός καυσίμου παρουσία οξυγόνου είναι η πιο κοινή πηγή. Η καύση είναι μια ταχεία χημική αντίδραση μεταξύ του οξυγόνου και ενός στερεού, υγρού ή αερίου καυσίμου. Το οξυγόνο που απαιτείται για αυτή την αντίδραση είναι άμεσα διαθέσιμο στον αέρα. Καθώς ο αέρας και το καύσιμο αναμιγνύονται σε υψηλές θερμοκρασίες, το οξυγόνο αντιδρά με τον άνθρακα, το υδρογόνο και άλλα στοιχεία του καυσίμου για να παράγει θερμότητα. Όσο τα καύσιμα και ο αέρας είναι διαθέσιμα, η καύση θα συνεχιστεί και θα παράγεται θερμότητα.

Η θερμότητα που παράγεται κατά την καύση είναι χρήσιμη για μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Ωστόσο, οι ατμοσφαιρικές εκπομπές, οι οποίες παράγονται επίσης ως υποπροϊόντα της διαδικασίας καύσης, πρέπει να ελέγχονται. Οι κοινές αέριες εκπομπές περιλαμβάνουν διοξείδιο του θείου (SO₂), άζωτο οξειδία (NO_x), υδρατμούς, διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Το κύριο στερεό παραπροϊόν της καύσης είναι η τέφρα, ένα ανόργανο υπόλειμμα που παραμένει μετά την ανάφλεξη των εύφλεκτων υλικών.

Παρακάτω θα επικεντρωθούμε στα καύσιμα που συνήθως καίγονται σε λέβητες για την παραγωγή ατμού ή ζεστού νερού, στις ατμοσφαιρικές εκπομπές που σχετίζονται με την καύση του καυσίμου και σε παράγοντες που επηρεάζουν το πόσο αποτελεσματικά μεταφέρεται το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου σε χρησιμοποιήσιμη θερμότητα.

Πολλά διαφορετικά στερεά, υγρά και αέρια καύσιμα είναι αυτά που καίγονται στους λέβητες. Μερικές φορές, συνδυασμοί καυσίμων χρησιμοποιούνται για τη μείωση των εκπομπών ή τη βελτίωση της απόδοσης του λέβητα. Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται συνήθως σε λέβητες μπορεί να περιλαμβάνουν ορυκτά, βιομάζα και RDF καθώς και άλλους τύπους καυσίμων και συνδυασμούς αυτών.

Ο άνθρακας, τα πετρελαιοειδή και το φυσικό αέριο είναι ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται συνήθως σε λέβητες. Ωστόσο, άλλες μορφές στερεών, υγρών ή αερίων καυσίμων που προέρχονται από αυτά τα ορυκτά καύσιμα περιλαμβάνονται μερικές φορές σε αυτήν την κατηγορία. Ένα από αυτά τα καύσιμα, το οποίο αναφέρεται ως καύσιμο από ελαστικά (TDF), αποτελείται από τεμαχισμένα ελαστικά οχημάτων.

Ένα άλλο καύσιμο λέβητα αναφέρεται ως βιομάζα. Η βιομάζα είναι ανανεώσιμη οργανική ύλη. Παραδείγματα βιομάζας περιλαμβάνουν τα ταχέως αναπτυσσόμενα δέντρα και φυτά, απόβλητα από ξύλο, γεωργικές καλλιέργειες και υπολείμματα, υδρόβια φυτά και φύκια, ζωικά απόβλητα και οργανικά αστικά και βιομηχανικά απόβλητα.

Το RDF είναι μια δυνητικά πολύτιμη πηγή ενέργειας. Αποτελείται από αστικά στερεά απόβλητα MSW (Municipal Solid Waste) που έχουν υποστεί επεξεργασία χρησιμοποιώντας τεχνικές μείωσης μεγέθους τους και ανάκτησης υλικών όπως το αλουμίνιο, χάλυβας, γυαλί, πλαστικό.

Οι συνήθεις τύποι καυσίμων που τροφοδοτούνται σε λέβητες παρατίθενται στον Πίνακα 3.1 με βασικές ιδιότητες που παρέχονται στον Πίνακα 3.2. Πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με ορισμένα από τα πιο κοινά καύσιμα παρουσιάζονται στο υπόλοιπο αυτής της ενότητας.

Fuel	Description
By-product/waste	Any liquid or gaseous substance produced at chemical manufacturing plants or petroleum refineries (except natural gas, distillate oil, or residual oil) and combusted in a steam generating unit for heat recovery or for disposal.
Biomass	Organic matter that is used as fuel is called biomass, biomass is a nonfossil fuel that includes materials such as wood, bagasse, nut hulls, rice hulls, corncobs, coffee grounds, and tobacco stems
Coal	Coal is a brown-to-black combustible sedimentary rocklike material composed principally of consolidated and chemically altered plant material that grew in prehistoric forests, it includes all solid fuel classified as anthracite, bituminous, subbituminous, or lignite coal, coal refuse, or petroleum coke.
Coal refuse	Waste products of coal mining, physical coal cleaning, and coal preparation operations containing coal, matrix material, clay, and other organic and inorganic materials.
Distillate oil	Fuel oils that contain 0.05 wt % nitrogen or less and comply with the specifications for fuel oil Nos. 1 and 2 as defined in ASTM D 396
Municipal-type solid waste and RDF	Refuse, more than 50% of which is waste containing a mixture of paper, wood, yard waste, food wastes, plastics, leather, rubber, and other noncombustible materials such as metal, glass, and rock, which are usually removed prior to combustion.
Natural gas	A naturally occurring mixture of hydrocarbon gases found in geologic formations beneath the earth's surface, of which the principal constituent is methane, or LP gas as defined in ASTM D 1835
Oil	Crude oil or petroleum or a liquid fuel derived from crude oil or petroleum, including distillate and residual oil.
Propane	Propane is a heavy gaseous fossil fuel processed from crude petroleum and natural gas.
Residual oil	Crude oil and fuel oil Nos. 1 and 2 that have nitrogen content greater than 0.05 wt %, and all fuel oil Nos. 4, 5, and 6 as defined in ASTM D 396
Solvent-derived fuel	Any solid, liquid, or gaseous fuel derived from solid fuel for the purpose of creating useful heat and includes, but is not limited to, solvent-refined coal, liquefied coal, and gasified coal.
Very low sulfur oil	Oil that contains no more than 0.5 wt % sulfur and that, when combusted without SO ₂ emission control, has a SO ₂ emissions rate equal to or less than 215 ng/J (0.5 lb/MBtu) heat output.
Wood	Wood, wood residue, bark, or any derivative fuel or residue thereof, in any form, including, but not limited to, sawdust, sanderdust, wood chips, scraps, slabs, millings, shavings, and processed pellets made from wood or other forest products.
Wood residue	Bark, sawdust, slabs, chips, shavings, mill trim, and other wood products derived from wood processing and forest management operations.

Πίνακας 3.1 Καύσιμα που καίγονται σε λέβητες για την παραγωγή ζεστού νερού ή ατμού.
Πηγή: ABMA, 1997.

Fuel	High heating value	Carbon (%)	Hydrogen (%)	Ultimate CO ₂ (%)
Anthracite coal	12,680 Btu/lb	80.6	2.4	19.9
Bagasse	8,200 Btu/lb	45.0	6.4	20.3
Bark				
15% moisture	8,500 Btu/lb	52.0	5.5	20.0
30% moisture	8,500 Btu/lb	52.0	5.5	20.0
45% moisture	8,500 Btu/lb	52.0	5.5	20.0
60% moisture	8,500 Btu/lb	52.0	5.5	20.0
Bituminous coal	14,030 Btu/lb	80.1	5.0	18.5
Distillate No. 1	19,423 Btu/lb	86.6	13.3	15.4
	131,890 Btu/gal			
Fuel oil No. 2	18,993 Btu/lb	87.3	12.5	15.7
	137,080 Btu/gal			
Fuel oil No. 5	18,909 Btu/lb	88.7	10.7	16.3
	149,960 Btu/gal			
Fuel oil No. 6	18,126 Btu/lb	88.5	9.3	16.7
	153,120 Btu/gal			
Kerosene	19,942 Btu/lb	86.5	13.2	15.1
	137,000 Btu/gal			
Natural gas	21,830 Btu/lb	69.4	22.5	11.7
Propane	21,573 Btu/lb	81.6	18.4	13.8
Wood				
10% moisture	8,800 Btu/lb	50.0	6.5	20.0
20% moisture	8,800 Btu/lb	50.0	6.5	20.0
30% moisture	8,800 Btu/lb	50.0	6.5	20.0
40% moisture	8,800 Btu/lb	50.0	6.5	20.0

Πίνακας 3.2 Βασικές ιδιότητες επιλεγμένων καυσίμων. Πηγή: Taplin H. (1991).

3.1.1 ΑΝΘΡΑΚΑΣ (COAL)

Ο άνθρακας είναι ένα καφέ έως μαύρο εύφλεκτο, ιζηματογενές υλικό που μοιάζει με πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από ενοποιημένο και χημικά αλλοιωμένο φυτικό υλικό που αναπτύχθηκε σε προϊστορικά δάση. (Zhu Q., 2014). Η χημική σύνθεση του άνθρακα ποικίλλει από τη μια τοποθεσία στην άλλη, ανάλογα με τη βλάστηση από την οποία σχηματίστηκε και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (όπως θερμοκρασία και πίεση) στις οποίες εκτέθηκε ο σχηματισμός. Εκτός από τα κύρια χημικά συστατικά του άνθρακα, υδρογόνου, αζώτου και

οξυγόνου, ο άνθρακας περιέχει επίσης λίγο νερό και ακαθαρσίες από τα οποία η τέφρα, ο υδράργυρος και το θείο αποτελούν σημαντικές ανησυχίες από την άποψη των εκπομπών.

Μια σειρά από φυσικές και χημικές ιδιότητες επηρεάζουν τη διαδικασία επιλογής άνθρακα. Αυτές οι ιδιότητες προσδιορίζονται με εργαστηριακή ανάλυση αντιπροσωπευτικών δειγμάτων άνθρακα χρησιμοποιώντας μεθόδους δοκιμής που καθιερώθηκαν από την Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών (ASTM D121-09a , 2009).

Σημαντικές ιδιότητες του άνθρακα κατά τον (Taplin H., 1991) περιλαμβάνει το/την:

- υγρασία.
- προσεγγιστική ανάλυση (σταθερός άνθρακας, πτητική ύλη, τέφρα).
- τελική ανάλυση (άνθρακας, υδρογόνο, άζωτο, οξυγόνο, θείο και χλώριο).
- ακαθάριστη θερμιδική αξία (όπως ελήφθη και σε ξηρή βάση).
- ορυκτό υλικό στον άνθρακα (στάχτη, κύρια και δευτερεύοντα στοιχεία, εύτηκτη τέφρα, ιχνοστοιχεία, υδράργυρος, φθόριο, αρσενικό, σεληνίο και θείο στην τέφρα).
- πετρογραφική ανάλυση.
- δυνατότητα λείανσης.
- δείκτης ελεύθερης διόγκωσης.
- Διοξειδίο του άνθρακα CO₂.
- μορφές θείου (πυριτικό, θειικό, οργανικό).
- λειαντικότητα τέφρας (ash abrasiveness).

Η χημική σύσταση του άνθρακα προσδιορίζεται επίσης σε εργαστήριο με χημική ανάλυση. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς του ισοζυγίου θερμότητας και τον προσδιορισμό των θεωρητικών απαιτήσεων αέρα.

Η υγρασία αντιπροσωπεύει μια ακαθαρσία που προσθέτει στο βάρος του άνθρακα αλλά όχι στη θερμαντική του αξία. Η υγρασία μπορεί να είναι συστατικό του άνθρακα ή μπορεί να υπάρχει στην επιφάνεια του άνθρακα λόγω της βροχόπτωσης ή των εργασιών καθαρισμού του άνθρακα. Η περιεκτικότητα σε υγρασία, η οποία εκφράζεται ως ποσοστό, ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του βάρους ενός δείγματος άνθρακα πριν και μετά τη διατήρηση του δείγματος σε φούρνο στους 104°C για 1 ώρα. Όταν θερμαίνεται η υγρασία στον άνθρακα, μέρος της θερμότητας που παράγεται από τη διαδικασία της καύσης πρέπει να αξιοποιηθεί για τη μετατροπή του νερού σε ατμό. Κανονικά είναι πιο οικονομικό να καίμε άνθρακα με χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία αλλά όταν καίγεται άνθρακας σε ορισμένες σχάρες, υπάρχουν συγκεκριμένες συνθήκες που το καθιστούν πιο πλεονεκτικό ώστε να υπάρχουν μικρές ποσότητες υγρασίας. Η υγρασία τείνει να επιταχύνει τη διαδικασία καύσης, να διατηρεί ομοιόμορφη την κλίνη του καυσίμου και να προάγει την ομοιόμορφη καύση. Άνθρακες με περιεκτικότητα σε υγρασία από 7 έως 12% συνιστώνται για χρήση σε αλυσιδωτές και ταξιδιωτικές σχάρες (stokers). Η προσθήκη υγρασίας στον άνθρακα για την ενίσχυση της διαδικασίας καύσης αναφέρεται ως σκλήρυνση. [Woodruff E., Lammers H. και Lammers T. (1998)].

Όταν ο άνθρακας θερμαίνεται, η αέρια ουσία που απομακρύνεται είναι πτητική ύλη. Αυτή η ύλη, η οποία αποτελείται κυρίως από αέρια υδρογονανθράκων, καίγεται στον χώρο καύσης πάνω από το καύσιμο. Ο άνθρακας με σχετικά υψηλό ποσοστό πτητικής ύλης ονομάζεται μαλακός (soft), ενώ ο άνθρακας με σχετικά χαμηλό ποσοστό πτητικής ύλης ονομάζεται σκληρός (hard). Όταν ο μαλακός άνθρακας καίγεται σε κονιοποιημένη μορφή, η πτητική ύλη απομακρύνεται με τρόπο όπως συμβαίνει στην απόσταξη και καίγεται ως αέριο. Αυτό καθιστά

τον μαλακό άνθρακα σχετικά εύκολο να καίγεται επειδή διατηρείται η ανάφλεξη και επιτυγχάνεται πλήρης καύση με ελάχιστη διαδρομή φλόγας. Η καύση κονιοποιημένου σκληρού άνθρακα, ο οποίος έχει λιγότερη πτητική ύλη, είναι πιο δύσκολο να επιτευχθεί. Για να βελτιωθεί σε αυτούς η καύση, μπορεί να είναι απαραίτητο να κονιοποιηθούν σε μικρότερο μέγεθος σωματιδίων σε σύγκριση με τους μαλακούς άνθρακες ή να χρησιμοποιηθούν πιο έντονες μέθοδοι καύσης.

Το αδρανές στερεό υλικό που παραμένει μετά την καύση ονομάζεται τέφρα. Περιλαμβάνει ένα ορυκτό ή ανόργανο υλικό, όπως το πυρίτιο, το οποίο εισήχθη καθώς σχηματιζόταν ο άνθρακας. Ο άργιλος, η λάσπη, η άμμος, ο σχιστόλιθος και τα σωματίδια πυρίτη είναι άλλα υλικά που σχηματίζουν επίσης τέφρα. Επειδή η τέφρα είναι αδρανής, ο άνθρακας με υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα έχει χαμηλότερη θερμαντική αξία. Αν και η τέφρα θεωρείται συνήθως απόβλητο που πρέπει να μεταφερθεί για απόρριψη, μπορεί να έχει αξία ως δομικό υλικό. Για παράδειγμα, η ιπτάμενη τέφρα έχει χρησιμοποιηθεί ως βάση για οδοστρώματα, δομική πλήρωση, σταθεροποίηση απορριμμάτων, τροποποίηση εδάφους και επίχωση (backfill). Η ιπτάμενη τέφρα που παράγεται σε ορισμένους λέβητες με καύση άνθρακα μπορεί ακόμα να είναι κατάλληλη και για χρήση ως πρόσμικτο ορυκτών υλικών στο σκυρόδεμα, εάν πληροί βέβαια τις απαιτήσεις χημικών και φυσικών προδιαγραφών που καθορίζονται από τον ASTM C 618-17a, (2017). Η τέφρα από ορισμένες διαδικασίες καύσης άνθρακα χρησιμοποιείται επίσης στην κατασκευή τοιχοποιίας από μονάδες σκυροδέματος.

Το θείο σύμφωνα με τους (Woodruff E., Lammers H. and Lammers T., 1998), είναι μια ακαθαρσία στον άνθρακα που εμφανίζεται σε τρεις μορφές:

1. οργανικό θείο, το οποίο αποτελεί μέρος της μοριακής δομής του φυτού.
2. πυριτικό θείο, το οποίο εμφανίζεται ως θειούχος σίδηρος και είναι περισσότερο γνωστό ως ορυκτό πυρίτης.
3. θειικό θείο, το οποίο προέρχεται κυρίως από το θειικό σίδηρο.

Η υψηλότερη πηγή θείου προέρχεται από θειικά άλατα που βρίσκονται σε κάποιο γλυκό νερό και θαλασσινό νερό. Κατά την επιλογή του άνθρακα και του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την καύση του, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η περιεκτικότητα του άνθρακα σε θείο. Οι διαβρωτικές επιδράσεις του θείου μπορεί να επηρεάσουν την επιλογή άνθρακα και ανάλογα τη ποσότητα SO₂ που απορρίπτεται στην ατμόσφαιρα, μπορεί να υπαγορεύσει την ανάγκη για εγκατάσταση εξοπλισμού ελέγχου της συγκεκριμένης αέριας ρύπανσης. Σε ιδιαίτερα διαβρωτικά περιβάλλοντα, όπως εκείνα όπου υπάρχουν καυσαέρια χαμηλής θερμοκρασίας, ορισμένες φορές καθορίζονται υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση για την ελαχιστοποίηση ή την αποφυγή ζημιών από τη διάβρωση. Για νέες μονάδες σήμερα, μπορεί επίσης να απαιτηθεί εγκατάσταση συστημάτων καθαρισμού SO₂ που αφαιρούν περισσότερο από το 90% του SO₂ από τα καυσαέρια, ανάλογα με την περιεκτικότητα του άνθρακα σε θείο. Η μετάβαση από άνθρακα υψηλής περιεκτικότητας σε θείο, σε άνθρακα με λιγότερο περιεκτικότητα σε θείο, μπορεί να είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για τις υπάρχουσες μονάδες για την αντιμετώπιση των ζητημάτων που προαναφέραμε και που σχετίζονται με το θείο.

Ένα σύστημα ταξινόμησης για τη διάκριση του ενός άνθρακα από τον άλλο έχει καθιερωθεί από την ASTM. Αυτό το σύστημα καλύπτει ανθρακικούς (anthracitic), ασφαλτούχους (bituminous), υπό-ασφαλτικούς (subbituminous) και λιγνιτικούς άνθρακες (lignite coals) σύμφωνα με την ASTM D 388-19a. Η ταξινόμηση γίνεται σύμφωνα με τον σταθερό άνθρακα (fixed carbon) και τη μεικτή θερμιδική αξία (gross calorific value) που εκφράζεται σε βρετανικές θερμικές μονάδες ανά λίβρα (Btu/lb). Οι άνθρακες της υψηλότερης κατάταξης που περιέχουν τουλάχιστον 69% σταθερό άνθρακα ταξινομούνται σε ξηρή βάση. Οι άνθρακες με

χαμηλότερης κατάταξη που παρουσιάζουν θερμιδική αξία έως και 14.000 Btu/lb ταξινομούνται με υγρή βάση. Η ASTM έχει καθιερώσει τυπικές μεθόδους δοκιμής για χρήση στην ταξινόμηση του άνθρακα. Οι τέσσερις κατηγορίες άνθρακα και οι σχετικές ομάδες προσδιορίζονται και συνοψίζονται στις ακόλουθες παραγράφους σύμφωνα με την ASTM.

3.1.1.1 ΛΙΓΝΙΤΗΣ (LIGNITE)

Ο λιγνίτης είναι ο χαμηλότερης κατάταξης άνθρακας, με τιμή θέρμανσης 8.300 Btu/lb ή και λιγότερο, με περιεκτικότητα σε υγρασία έως και 35%. Ανάλογα με τη θερμιδική αξία (caloric value), οι λιγνιτικοί άνθρακες υποδιαιρούνται στις δύο κατηγορίες που φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.3.

Οι λιγνιτικοί άνθρακες γενικά έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικές ύλες, γεγονός που τους καθιστά σχετικά εύκολο να αναφλεγούν, ειδικά όταν ο αέρας καύσης είναι προθερμασμένος. Επειδή ο λιγνίτης έχει σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο S, εκπέμπει αντίστοιχα και χαμηλές ποσότητες διοξειδίου του θείου SO₂.

Class/group	Gross caloric value limits (Btu/lb) (moist, mineral-matter-free basis)	
	Equal or greater than	Less than
Lignite A (abbreviated ligA)	6,300	8,300
Lignite B (abbreviated ligB)	No limit	6,300

Πίνακας 3.3 Λιγνιτικοί άνθρακες. Πηγή: ASTM 388-19a (2019).

3.1.1.2 ΥΠΟΑΣΦΑΛΤΟΕΙΔΕΙΣ ΑΝΘΡΑΚΕΣ (SUBBITOMINOUS COALS)

Οι υποασφαλτοειδείς άνθρακες (subbituminous coals) έχουν συνήθως θερμαντική αξία μεταξύ 8.300 και 11.500 Btu/lb. Έχουν υψηλότερη θερμαντική αξία (heating value), λιγότερη τέφρα και καίνε πιο καθαρά σε σχέση με τους λιγνιτικούς άνθρακες. Η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι σχετικά υψηλή, συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 15 και 30%. Οι υπόασφαλτοειδείς άνθρακες υποδιαιρούνται σε τρεις κατηγορίες με βάση τις θερμιδικές τιμές (caloric value) που αναφέρονται στον παρακάτω Πίνακα 3.4.

Η περιεκτικότητα σε θείο των περισσότερων υποασφαλτούχων ανθράκων είναι χαμηλή, κάτι λιγότερο από 1%. Σύμφωνα με τους Woodruff E., Lammers H. και Lammers T. (1998), επειδή η περιεκτικότητα σε θείο είναι τόσο χαμηλή, πολλά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αλλάξει σε αυτό το καύσιμο για να περιορίσουν τις εκπομπές SO₂.

Η καύση του υποασφαλτούχου άνθρακα έχει επίσης μειωμένες εκπομπές NO_x, αλλά γενικά παρουσιάζει μειονεκτήματα καθαλάτωσης (fouling) και υψηλά χαρακτηριστικά ρύπανσης από

τέφρα. Η καύση του υποασφαλτούχου άνθρακα σε λέβητα που έχει σχεδιαστεί για να καίει διαφορετική κατηγορία άνθρακα, μπορεί να χρειάζεται αλλαγές στο σχεδιασμό (boiler design) ή τη λειτουργία του λέβητα (operation) για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του.

Class/group	Gross caloric value limits (Btu/lb) (moist, mineral-matter-free basis)	
	Equal or greater than	Less than
Subbituminous A (abbreviated subA)	10,500	11,500
Subbituminous B (abbreviated subB)	9,500	10,500
Subbituminous C (abbreviated subC)	8,300	9,500

Πίνακας 3.4 Υποασφαλτοειδείς άνθρακες.
Πηγή: ASTM 388-19a (2019).

3.1.1.3 ΑΣΦΑΛΤΟΥΧΟΙ ΑΝΘΡΑΚΕΣ (BITUMINOUS COALS)

Οι ασφαλτούχοι άνθρακες χρησιμοποιούνται τακτικά από ηλεκτρικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και σε ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές για την καύση σε λέβητες, παρόλο που η περιεκτικότητά τους σε θείο μπορεί να είναι σχετικά υψηλή. Σε σύγκριση με τους λιγνιτικούς και υποασφαλτικούς άνθρακες, η θερμαντική αξία (heating value) των ασφαλτούχων ανθράκων κυμαίνεται παραπάνω μεταξύ 10.500 και 14.000 Btu/lb. Αυτή η θερμαντική αξία και η σχετικά υψηλή πτητική ύλη του επιτρέπουν να καίγονται εύκολα αρκετά όταν καίγονται ως PC. Οι ασφαλτούχοι άνθρακες υποδιαιρούνται στις ακόλουθες ομάδες στον παρακάτω Πίνακα 3.5 με βάση τα σταθερά όρια άνθρακα, πτητικής ύλης και ακαθάριστων θερμιδικών ορίων.

Class/group	Fixed carbon limits (%) (dry, mineral-matter-free basis)		Volatile matter limits (%) (dry, mineral-matter-free basis)		Gross caloric value limits (Btu/lb) (moist, mineral-matter-free basis)	
	Equal or greater than	Less than	Greater than	Equal or less than	Equal or greater than	Less than
Low-volatile bituminous coal (abbreviated lvb)	78	86	14	22	No limit	No limit
Medium-volatile bituminous coal (abbreviated mvb)	69	78	22	31	No limit	No limit
High-volatile A bituminous coal (abbreviated hvAb)	No limit	69	31	No limit	14,000	No limit
High-volatile B bituminous coal (abbreviated hvBb)	No limit	No limit	No limit	No limit	13,000	14,000
High-volatile C bituminous coal (abbreviated hvCb)	No limit	No limit	No limit	No limit	11,500 (commonly agglomerating) 10,500 (agglomerating)	13,000 (commonly agglomerating) 11,500 (agglomerating)

Πίνακας 3.5 Ασφαλτούχοι άνθρακες.
Πηγή: ASTM 388-19a (2019).

3.1.1.4 ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΑΝΘΡΑΚΕΣ (ANTHRACITE COALS)

Ως καύσιμο, οι ανθρακικοί άνθρακες κατέχουν την υψηλότερη κατάταξη με περιεκτικότητα σε σταθερό άνθρακα (fixed carbon) να κυμαίνεται από 86 έως 98%. Εκτός από την υψηλή περιεκτικότητά τους αυτή, έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία που είναι περίπου μόνο 3% και με θερμαντική τιμή (heating value) που μπορεί να φτάσει έως και τα 15.000 Btu/lb. Οι ανθρακικοί άνθρακες χαρακτηρίζονται ως καύσιμα βραδείας καύσης με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο και πτητική ύλη. Αυτοί οι άνθρακες, σύμφωνα με τους Woodruff E., Lammers H. και Lammers T. (1998), χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή οπτάνθρακα (coke), που χρειάζεται για μεταλλουργικές διεργασίες. Οι ανθρακικοί άνθρακες υποδιαιρούνται στις ακόλουθες ομάδες στον παρακάτω Πίνακα 3.6 με βάση την περιεκτικότητά τους σε σταθερό άνθρακα και πτητικές ουσίες.

Εάν η ποιότητα του άνθρακα από μια συγκεκριμένη τοποθεσία δεν πληροί τις ισχύουσες προδιαγραφές του καυσίμου, μπορεί να υποβληθεί σε επεξεργασία με διαφορετικούς τρόπους για την αναβάθμιση της ποιότητάς του. Τέτοιες λειτουργίες όπως το πλύσιμο, το στέγνωμα, κατάταξη ανάλογα με το μέγεθος του άνθρακα και η ανάμειξη με άνθρακα από άλλες πηγές είναι τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενός αποδεκτού πλέον άνθρακα. Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι που περιλαμβάνουν τον διαχωρισμό του άνθρακα από ξένα υλικά όπως είναι ο σχιστόλιθος και οι πυρίτες. Αν και μία ή και περισσότερες από αυτές τις μεθόδους παράγουν έναν άνθρακα με την επιθυμητή ποιότητα, μπορεί να απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για την εκτέλεση των εργασιών αυτών.

Class/group	Fixed carbon limits (%) (dry, mineral-matter-free basis)		Volatile matter limits (%) (dry, mineral-matter-free basis)	
	Equal or greater than	Less than	Greater than	Equal or less than
Meta-anthracite (abbreviated ma)	98	No limit	No limit	2
Anthracite (abbreviated an)	92	98	2	8
Semianthracite (abbreviated sa)	86	92	8	14

Πίνακας 3.6 Ανθρακικοί άνθρακες.
Πηγή: ASTM D 388-19a (2019).

3.1.2 MAZOYT (FUEL OIL)

Το πετρέλαιο είναι ένα φυσικό μαύρο υγρό που βρίσκεται να επιπλέει σε υπόγειες λίμνες αλμυρού νερού και βρίσκεται κάτω από μη πορώδους βραχώδεις σχηματισμούς σε σχήμα θόλου (dome-shaped). Αυτά τα κοιτάσματα αποτελούνται από φυσικό αέριο, αργό πετρέλαιο και αλμυρό νερό και χωρίζονται σε στρώματα λόγω της διαφοράς τους στο ειδικό βάρος. Το αργό πετρέλαιο απομακρύνεται με άντληση και μεταφέρεται με αγωγό, φορτηγό, σιδηρόδρομο, φορτηγίδα ή πλοίο σε ένα διυλιστήριο. Στο διυλιστήριο, το αργό πετρέλαιο μέσω της απόσταξης διαχωρίζεται σε προϊόντα, συμπεριλαμβανομένων του μαζούτ.

Τα καύσιμα που καίγονται σε λέβητες περιλαμβάνουν τα βαρύτερα προϊόντα πετρελαίου που είναι λιγότερο πτητικά από τη βενζίνη. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα αποσταγμένα έλαια

και τα υπολειμματικά. Τα αποσταγμένα έλαια είναι ελαφρύτερα από τα υπολειμματικά λάδια με μια συνοχή μεταξύ κηροζίνης και λιπαντικού, έχουν χαμηλό ιξώδες και είναι τυπικά χωρίς ιζήματα και τέφρα. Επειδή τα αποσταγμένα έλαια είναι σχετικά καθαρά καύσιμα, χρησιμοποιούνται κυρίως για την οικιακή θέρμανση και βιομηχανικές εφαρμογές όπου η χαμηλή τέφρα και η χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο παίζουν σημαντικό ρόλο. Μικρότερες ποσότητες αποσταγμένου λαδιού χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές παραγωγής ατμού ως το καύσιμο για εκκίνηση ή συμπληρωματικό καύσιμο για ορισμένες διαδικασίες καύσης των στερεών καυσίμων. Τα υπολειμματικά έλαια είναι προϊόντα που παραμένουν μετά την εξαγωγή των πιο πτητικών υδρογονανθράκων. Είναι πολύ παχύρρευστα (υψηλό ιξώδες), συνήθως απαλλαγμένα από την υγρασία και τα ιζήματα. Μερικά από τα βαρύτερα υπολειμματικά λιπαντικά πρέπει να θερμαίνονται για να διευκολύνεται ο χειρισμός και η καύση του συγκεκριμένου καυσίμου. Μερικές φορές, τα αποσταγμένα και τα υπολειμματικά έλαια αναμειγνύονται για να δημιουργηθεί ένα μείγμα με αναλογίες που πληρούν τις επιθυμητές προδιαγραφές του καυσίμου. Ως υγρό τώρα, το μαζούτ είναι σχετικά εύκολο στο χειρισμό και στην καύση του. Στους περισσότερους καυστήρες λαδιού, το λάδι ψεκάζεται με την βοήθεια αέρα, ατμού ή άλλη μορφή πίεσης για να ενισχυθεί η καύση στον καυστήρα (gunner). Τα χαρακτηριστικά του ψεκασμένου αυτού πετρελαίου προσεγγίζουν αυτά του φυσικού αερίου. Woodruff E., Lammers H. and Lammers T. (1998).

Η θερμαντική αξία (heating value) του μαζούτ προέρχεται κυρίως από τα δύο κύρια συστατικά του, το υδρογόνο και τον άνθρακα. Τα περισσότερα καύσιμα έχουν περιεκτικότητα σε υδρογόνο που κυμαίνεται μεταξύ 10 και 14% και περιεκτικότητα σε άνθρακα που κυμαίνεται μεταξύ 86 και 90%, σύμφωνα με τους Stultz S. και Kitto J. (1992). Οι θερμαντικές αξίες για τα καύσιμα εκφράζονται σε μονάδες είτε βρετανικής θερμικής μονάδας ανά λίβρα (Btu/lb) είτε ανά γαλόνι (Btu/gal) στους 60°F. Ο Reed R., (1986) αναφέρει ότι η πλήρης καύση 1 λίβρας άνθρακα αποδίδει μικτή θερμότητα (gross heat) 14.500 Btu. Το υδρογόνο έχει πολύ υψηλή θερμαντική αξία σε σύγκριση με τον άνθρακα, αλλά είναι πολύ ελαφρύ αέριο, επομένως η θερμαντική αξία 1 ft³ υδρογόνου είναι χαμηλή σε σύγκριση με άλλα αέρια καύσιμα. Οι Stultz S. και Kitto J., (1992) ανέφεραν ότι οι θερμαντικές αξίες για τα εμπορεύσιμα πετρέλαια μαζούτ ποικίλλουν από περίπου 17.500 έως σχεδόν 20.000 Btu/lb. Άλλα συστατικά στα μαζούτ περιλαμβάνουν την υγρασία, άζωτο, θείο, τέφρα και άλλες ακαθαρσίες όπως τα ιζήματα. Σε σύγκριση με τον άνθρακα, η περιεκτικότητα σε άζωτο και τέφρα των περισσότερων μαζούτ είναι πολύ χαμηλή. Τα υπολειμματικά έλαια όμως έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε άζωτο από τα αποσταγμένα έλαια.

Μια τυπική προδιαγραφή για πέντε ποιότητες μαζούτ που προορίζονται για χρήση σε διαφορετικούς τύπους εξοπλισμού καύσης υπό διάφορες κλιματικές και λειτουργικές συνθήκες έχει αναπτυχθεί από τον ASTM D 396 – 21 (2021). Οι απαιτήσεις σε αυτήν την προδιαγραφή καλύπτουν τόσο τα αποσταγμένα όσο και τα υπολειμματικά έλαια. Οι διάφοροι αριθμοί ποιότητας στους οποίους υποδιαιρούνται τα λιπαντικά παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακα 3.7. Το μαζούτ κατηγορίας νούμερο 2 θεωρείται ως ένα υψηλής ποιότητας καύσιμο για λέβητες, υπερέχει σε καθαρότητα καύσης και σε ευκολία χειρισμού του. Το μειονέκτημα του είναι η σχετικά υψηλή τιμή του. Το κόστος του μαζούτ κατηγορίας νούμερο 6 αντίθετα είναι σχετικά χαμηλό, αλλά απαιτείται προθέρμανση του καυσίμου για τη διευκόλυνση του χειρισμού και της καύσης.

Το θείο που βρίσκεται στο μαζούτ είναι αρκετά ανεπιθύμητο. Τα προϊόντα της καύσης του είναι πολύ όξινα και μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση σε οικονομητήρες (economizers), θερμαντήρες αέρα (air heaters), ανεμιστήρες καυσαερίων (induced fans), αγωγούς καυσαερίων (flue gas ducts) και καμινάδας (stack). Οι Stultz S. και Kitto J., (1992) ανέφεραν ότι η

περιεκτικότητα σε θείο του μαζούτ μπορεί να ποικίλλει από ένα χαμηλό της τάξεως 0,01% για τον βαθμό Νο. 1 έως και το 3,5% για τον βαθμό Νο. 6. Κατά τη διάρκεια της καύσης, μέρος του θείου συσσωρεύεται στην τέφρα, αλλά το μεγαλύτερο μέρος απορρίπτεται με τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα. Εάν οι ανεξέλεγκτες εκπομπές SO₂ υπερβαίνουν τα καθορισμένα όρια, μπορεί να χρειαστεί να μεταβούμε σε μαζούτ χαμηλότερης περιεκτικότητας σε θείο ή να εγκαταστήσουμε πλυντηρίδες SO₂ ,που θα περιγράψουμε σε επόμενο κεφάλαιο, για να πληρούνται τα ισχύοντα πρότυπα εκπομπών.

Fuel oil	Description
Grade No. 1	Distillate fuel for use in domestic and small industrial burners. This grade is particularly adapted to vaporizing burners in which the oil is converted to a vapor by contact with a heated surface or by radiation or where storage conditions require low-pour-point fuel. High volatility is necessary to ensure that evaporation proceeds with a minimum of residue. The maximum allowable sulfur content is 0.5% by mass. The maximum allowable ash content is not specified.
Grade No. 2	Distillate fuel that is heavier than Grade No. 1. It is intended for use in atomizing burners that spray the oil into a combustion chamber where the tiny droplets burn while in suspension. This grade of fuel oil is used in most domestic burners and in many medium-capacity commercial-industrial burners where its ease of handling and ready availability sometimes justify its higher cost over residual fuels. The maximum allowable sulfur content is 0.5% by mass. The maximum allowable ash content is not specified.
Grade No. 4 (light)	Heavy distillate fuel or distillate/residual fuel blend used in commercial/industrial burners equipped for this viscosity range. This grade of fuel oil is intended for use both in pressure-atomizing commercial-industrial burners not requiring higher cost distillates and in burners equipped to atomize oils of higher viscosity. Its permissible viscosity range allows it to be pumped and atomized at relatively low storage temperatures. The maximum allowable sulfur content is not specified. The maximum allowable ash content is 0.05% by mass.
Grade No. 4	Heavy distillate fuel or distillate/residual fuel blend used in commercial/industrial burners equipped for this viscosity range. This grade of fuel oil is intended for use in burners equipped with devices that atomize oils of higher viscosity than domestic burners can handle. Its permissible viscosity range allows it to be pumped and atomized at relatively low storage temperatures. Thus, in all but extremely cold weather it requires no preheating for handling. The maximum allowable sulfur content is not specified. The maximum allowable ash content is 0.10% by mass.
Grade No. 5 (light)	Residual fuel oil of intermediate viscosity intended for use in industrial burners capable of handling fuel more viscous than Grade No. 4 without preheating. Preheating may be necessary in some equipment for proper atomization and in colder climates for handling. The maximum allowable sulfur content is not specified. The maximum allowable ash content is 0.15% by mass.
Grade No. 5 (heavy)	Residual fuel oil used in industrial burners with an increased viscosity and boiling range compared to Grade No. 5 (light). Preheating may be necessary in some types of equipment for proper atomization and in colder climates for handling. The maximum allowable sulfur content is not specified. The maximum allowable ash content is 0.15% by mass.
Grade No. 6	Residual fuel oil used in industrial burners with an increased viscosity and boiling range compared to Grade No. 5 (heavy). Preheating is required for handling and proper atomization. Extra equipment and maintenance required to handle this fuel usually preclude its use in smaller installations where cleanliness and ease of handling are important. The maximum allowable sulfur content and the maximum allowable ash content are not specified.

Πίνακας 3.7 Ποιότητες μαζούτ καθορισμένες από τον ASTM.
Πηγή: ASTM D 396 – 21 (2021).

3.1.3 ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ (NATURAL GAS)

Το φυσικό αέριο είναι ένα άχρωμο καύσιμο αέριου υδρογονάνθρακα που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) και αιθάνιο (C_2H_6). Συνήθως βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της γης σε πορώδεις σχηματισμούς πετρωμάτων και σχιστόλιθων ή πάνω από τα κοιτάσματα αργού πετρελαίου. Όταν ένα πηγάδι διατρυπάτε μέσω του σχηματισμού, το φυσικό αέριο, το οποίο βρίσκεται υπό πίεση, ρέει προς την επιφάνεια όπου εκεί είτε καίγεται είτε μεταφέρεται με αγωγό σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά το φυσικό αέριο ένα πολύ επιθυμητό καύσιμο για λέβητες επειδή μπορεί να διοχετευθεί σχεδόν απευθείας σε αυτούς. Εκτός από την ευκολία διανομής του, η χρήση λεβήτων που καταναλώνουν φυσικό αέριο απαιτούν σχετικά μικρό χώρο και ο συνολικός σχεδιασμός της εγκατάστασης είναι συνήθως συμπαγής και απλός. Με θερμαντική αξία περίπου στα 1.000 Btu/ft^3 υπό τυπικές συνθήκες 60°F ή $15,5^\circ\text{C}$, σε ατμοσφαιρική πίεση και με χαμηλές απαιτήσεις περισσειας αέρα συμβάλλουν στην υψηλή απόδοση του λέβητα. Το φυσικό αέριο είναι ίσως πολύ κοντά στον χαρακτηρισμό ως ιδανικό καύσιμο.

Όταν το φυσικό αέριο εξάγεται από την γη περιέχει θειούχες αλκοόλες, φαινόλες (μερκαπτάνες) και ένα υψηλό ποσοστό υδρόθειου, για αυτό και αναφέρεται σε αυτό το στάδιο ως ξινό αέριο (sour gas). Με την αφαίρεση των αυτών των συστατικών, το ξινό αέριο μετατρέπεται σε γλυκό αέριο (sweet gas). Η μετατροπή σε γλυκό αέριο απαιτείται για την αποφυγή προβλημάτων διάβρωσης στους αγωγούς που προκαλούνται από την έκθεση στο υδρόθειο. Η απομάκρυνση του θείου από το αέριο εξαλείφει επίσης και την πιθανότητα εκπομπών SO_2 κατά την καύση.

Από άποψη των εκπομπών, το φυσικό αέριο είναι μια εξαιρετική επιλογή καυσίμου. Αν και το φυσικό αέριο από ορισμένες πηγές περιέχει άκαυστα αέρια όπως το άζωτο και το διοξείδιο του άνθρακα, είναι πρακτικά απαλλαγμένο από στερεά υπολείμματα. Επειδή είναι απαλλαγμένο από στάχτη και αναμιγνύεται εύκολα με τον αέρα, η καύση ολοκληρώνεται συνήθως χωρίς μαύρο καπνό ή σχηματισμό αιθάλης. Το μόνο σημαντικό πρόβλημα με τη χρήση φυσικού αερίου ως καύσιμο για λέβητες σχετίζεται με τη χημική του σύνθεση. Το φυσικό αέριο έχει σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο (μεγαλύτερη από 20% κατά βάρος) σε σύγκριση με άλλα ορυκτά καύσιμα όπως το πετρέλαιο και ο άνθρακας. Κατά τη διάρκεια της καύσης, το υδρογόνο αυτό συνδυάζεται με το οξυγόνο και σχηματίζει υδρατμούς. Ο σχηματισμός σχετικά μεγάλων ποσοτήτων υδρατμών όπως θα δούμε σε παρακάτω Κεφάλαιο, μεταφράζεται σε χαμηλότερη απόδοση του λέβητα.

Όπως το φυσικό αέριο, και άλλοι τύποι αερίων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα στους λέβητες, αλλά το κόστος επεξεργασίας τους γενικά τα καθιστά πολύ ακριβά συνήθως για τις περισσότερες εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Τα υποπροϊόντα που μπορούν να υποκαταστήσουν το φυσικό αέριο είναι το αέριο παραγωγής HBG (High BTU gas), αέριο οπτανθρακοποίησης (coke oven gas) και αέριο υψικαμίνου (blast oven gas) που προέρχεται από τον άνθρακα και το αέριο καύσιμο του πετρελαίου που προέρχεται με την σειρά του από το πετρέλαιο και το αέριο υγροποιημένου πετρελαίου LP (liquefied petroleum), όπως το προπάνιο και το βουτάνιο, προερχόμενα και αυτά ως παράγωγα είτε από το φυσικό αέριο είτε από το αργό πετρέλαιο, σύμφωνα με τον ASTM D 1835-20 (2020).

3.1.4 BIOMAZA (BIOMASS)

Η βιομάζα είναι ένα μη ορυκτό καύσιμο κατάλληλο για την παραγωγή ατμού σε λέβητες. Προέρχεται από κάποιο φυτικό υλικό, όπως ξύλο, βαγάσση, φλούδες ξηρών καρπών, φλούδες ρυζιού, καλαμπόκι, κατακάθι καφέ και καπνού. Η χρήση αυτών των υλικών υποπροϊόντων ως καύσιμο μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτική, ειδικά όταν επιλύει το πρόβλημα διάθεσης των απορριμμάτων.

Το ξύλο είναι ένας πολύπλοκος φυτικός ιστός που αποτελείται κυρίως από κυτταρίνη. Τα περισσότερα ξύλα συνήθως που καίγονται σε λέβητες είναι υποπροϊόν από παραγωγικές εργασίες όπως πριονιστήρια, χαρτοβιομηχανίες και εργοστάσια που κατασκευάζουν προϊόντα ξύλου. Τα υποπροϊόντα από αυτές τις εργασίες έχουν τη μορφή φλοιού, πριονιδιού, σκόνης, τσιπς, απορριμμάτων, πλακών, φρεζαρίσματος, ρινισμάτων και επεξεργασμένων σφαιριδίων από ξύλο ή άλλα δασικά προϊόντα. Πρέπει να δίνεται προσοχή κατά την καύση λεπτής σκόνης ξύλου, διότι υπό ορισμένες συνθήκες μπορεί να αναφλεγεί γρήγορα. Σύμφωνα με τον Singer J., (1991) ανάλογα με το είδος και την περιεκτικότητα σε υγρασία, η θερμοαντική αξία του ξύλου ποικίλλει σε μεγάλο εύρος.

Τα αποθέματα ξύλου ως καυσίμου μπορεί να μην είναι πάντα διαθέσιμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, στον λέβητα μπορεί να χρειαστεί να καούν συμπληρωματικά καύσιμα μαζί με το ξύλο για να καλυφθεί η συνολική ζήτηση ατμού.

Η βαγάσση (bagasse) είναι ένα υποπροϊόν καύσιμο που παράγεται όταν ο χυμός αφαιρείται από το ζαχαροκάλαμο σε ένα ζαχαρόμυλο. Αν και η θερμοαντική του αξία μπορεί να φτάσει τα 8.000 έως 9.000 Btu/lb, η καύση της βαγάσσης είναι εφικτή μόνο σε ορισμένα μέρη όπου γίνεται κοντά επεξεργασία ζαχαροκάλαμου. Όταν καίγεται η βαγάσση, συνήθως συμπληρώνεται με άλλα βοηθητικά καύσιμα.

Άλλα καύσιμα βιομάζας σύμφωνα με τον Singer J., (1991) περιλαμβάνουν:

- Φλούδες ξηρών καρπών με θερμοαντική αξία περίπου 7.700 Btu/lb,
- Φλούδες ρυζιού με θερμοαντική αξία μεταξύ 5.200 και 6.500 Btu/lb,
- Καλαμπόκι με θερμοαντική αξία μεταξύ 7.500 και 8.300 Btu/lb,
- Κατακάθια καφέ από παραγωγή στιγμιαίου καφέ με θερμοαντική αξία μεταξύ 4.900 και 6.500 Btu/lb.

3.1.5 ΑΠΟΡΡΙΜΑΤΑ RDF (REFUSED - DERIVED FUEL)

Τα οικιακά, εμπορικά και βιομηχανικά στερεά απόβλητα που μεταφέρονται σε χώρο υγειονομικής ταφής για διάθεση μπορούν να καούν ως καύσιμο σε λέβητες ενέργειας από απόβλητα (waste-to-energy boilers). Τα απόβλητα MSW περιέχουν μείγματα χαρτιού, ξύλου, απορριμμάτων αυλής, υπολειμμάτων τροφίμων, πλαστικών, δερμάτων και καουτσούκ τα οποία μπορεί να έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με το ξύλο της βιομάζας. Η χρήση αυτών των αποβλήτων ως καύσιμο μπορεί να επιτευχθεί ανάλογα με την καύση του υλικού που λαμβάνεται και ονομάζεται μαζική καύση (mass burning) αλλά συχνά απαιτείται επεξεργασία για να μπορέσει να καεί αποτελεσματικά. Η επεξεργασία χρησιμοποιεί τεχνικές μείωσης μεγέθους τους και ανάκτησης υλικών που έχουν σχεδιαστεί για να τεμαχίζουν τα απόβλητα και να απομακρύνουν τα άκαυστα υλικά. Η εξαιρετικά μεταβλητή φύση των απορριμμάτων

παρουσιάζει προκλήσεις στο σχεδιασμό ενός συστήματος καύσης που μπορεί να φιλοξενήσει αυτό το καύσιμο υψηλής τέφρας και χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Stultz S. and Kitto J., (1992).

3.1.6 ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Οι συγγραφείς Stultz S. and Kitto J., (1992) ανέφεραν ότι τα βαριά υπολείμματα από τις διεργασίες πυρόλυσης πετρελαίου δίνουν ένα στερεό υπόλειμμα που είναι κατάλληλο για χρήση ως καύσιμο στους λέβητες. Στα στερεά καύσιμα που προέρχονται από το πετρέλαιο περιλαμβάνονται ο καθυστερημένος οπτάνθρακας (delayed coking), ο ρευστός οπτάνθρακας (fluid coke) και η πίσσα πετρελαίου (petroleum pitch). Μερικοί οπτάνθρακες (cokes) που παράγονται από τη διαδικασία καθυστερημένης οπτανθρακοποίησης κονιοποιούνται εύκολα και καίγονται σε λέβητες. Οι υγροί οπτάνθρακες μπορούν επίσης να κονιοποιηθούν και να καούν σε λέβητες ή να καούν σε κλίβανο με κυκλώνα ή ρευστοποιημένης κλίνης, αλλά και οι τρεις αυτές μέθοδοι μπορεί να απαιτούν και συμπληρωματικό καύσιμο για να βοηθήσουν την καύση, ειδικά για την εκκίνηση της έναυσης στον λέβητα.

Η πίσσα από το πετρέλαιο, αποδίδει και αυτή ως ένα καύσιμο σε λέβητα με ποικίλα χαρακτηριστικά. Η χαμηλού σημείου τήξης πίσσα μπορεί να θερμανθεί και να καεί σαν βαρύ λάδι (heavy oil). Αυτή με υψηλότερα σημεία τήξης πρέπει να κονιοποιείται ή να συνθλίβεται και στη συνέχεια μετά να καεί. Η πίσσα είναι το υπόλειμμα που προκύπτει από την απόσταξη και τον εξευγενισμό της λιθανθρακόπισσας. Αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο λέβητα, είναι κάπως δύσκολο στον χειρισμό της. Ο Singer J. (1991) αναφέρει ότι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, είναι ένα στερεό που μπορεί να κονιοποιηθεί πριν παραδοθεί στο λέβητα. Στους περίπου 150°C, γίνεται υγρή και μπορεί να καεί ως λάδι. Λόγω της χαμηλής περιεκτικότητάς της σε τέφρα, η χρήση λιθανθρακόπισσας είναι μερικές φορές προτιμότερη από τον άνθρακα.

Ένα άλλο καύσιμο για λέβητες είναι η λάσπη μύλου χαρτοπολτού (pulp mill sludge), αλλά θα πρέπει να έχει στεγνώσει για να καεί αποτελεσματικά. Αυτό το καύσιμο έχει περιεκτικότητα σε τέφρα περίπου 10%. Οι λάσπες από τις διαδικασίες απομελάνωσης είναι λιγότερο κατάλληλες επειδή έχουν μικρότερη θερμαντική αξία και σημαντικά περισσότερη τέφρα. Οι Woodruff E., Lammers H. and Lammers T., (1998) αναφέρουν ότι ο συνδυασμός υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία και χαμηλής θερμαντικής αξίας καθιστούν δύσκολη την καύση. Παρουσιάζει οπότε ορισμένα σημαντικά προβλήματα επειδή με την αφαίρεση της υγρασίας κατά την καύση έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη θερμοκρασία στον θάλαμο καύσης. Για το λόγο αυτό, η λάσπη μύλου χαρτοπολτού καίγεται γενικά σε λέβητες με συνδυασμό άλλου καυσίμου όπως ο φλοιός (bark).

3.1.7 ΑΝΑΜΕΙΚΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με τις εκπομπές SO₂ και σωματιδίων PM από την καύση ασφαλτικών ανθράκων έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνικών καθαρισμού του άνθρακα γνωστών ως εμπλουτισμός (beneficiation). Σύμφωνα με τους Stultz S. και Kitto J., (1992) αυτές οι τεχνικές περιλαμβάνουν την αφαίρεση του θείου και άλλων ορυκτών ουσιών από τον άνθρακα πριν από την καύση του. Για να επιτευχθεί το επίπεδο καθαρισμού για την τήρηση των προτύπων των ρύπων σχετικά με το θείο, πρέπει πρώτα να αλλάξει η μορφή του

στερεού άνθρακα. Οι περισσότερες προηγμένες διεργασίες καθαρισμού χρησιμοποιούν το νερό ως μέσο διαχωρισμού και περιλαμβάνουν άλεση του άνθρακα σε μέγεθος λεπτών σωματιδίων. Η λείανση αυτή επιτρέπει στο πυριτικό θείο και άλλα ορυκτά που είναι διασκορπισμένα σε όλο τον άνθρακα να διαχωριστούν ευκολότερα από αυτόν. Αφού αφαιρεθούν αυτά τα υλικά, το καθαρό λεπτό προϊόν άνθρακα πρέπει να στεγνώσει, να πάρει σχήμα σφαίρας ή να ανασυσταθεί σε πολύ άνθρακα-νερού, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν λάδι πριν από την καύση σε έναν λέβητα.

Οι πολτοί άνθρακα-νερού (slurries) έχουν την δυνατότητα να υποκαταστήσουν το μαζούτ σε ορισμένες εφαρμογές καύσης. Οι τυπικοί ασφαλούχοι πολτοί άνθρακα περιέχουν περίπου 70% PC, 29% νερό και 1% χημικά πρόσθετα. Οι πολτοί που παρασκευάζονται από τον άνθρακα, οι οποίοι έχουν καθαριστεί σε βάθος, μπορούν να περιέχουν άνθρακα με λεπτότερα μεγέθη σωματιδίων και χαμηλότερη περιεκτικότητα σε στερεά (50 έως 60%). Αν και οι πολτοί άνθρακα-νερού παράγονται από λεπτά PC και χειρίζονται και καίγονται όπως το νούμερο 6 μαζούτ, καίγονται κάπως διαφορετικά. Οι καυστήρες που είναι κατάλληλοι για την καύση πολτού άνθρακα-νερού είναι συχνά ειδικά σχεδιασμένοι για να προσαρμόζονται στις μοναδικές ιδιότητες του. Τα χαρακτηριστικά ιξώδους και ροής μπορούν να επηρεάσουν τον τρόπο με τον οποίο γίνεται ο ψεκασμός του καυσίμου και μπορεί να αυξήσουν τη φθορά των σωληνώσεων και των εξαρτημάτων του καυστήρα.

Οι πολτοί λαδιού-νερού μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο με απόδοση καύσης ίδια με τα υπολειμματικά λάδια. Αυτά τα υγρά καύσιμα αποτελούνται από πολύ μικρά σταγονίδια λαδιού διασκορπισμένα στο νερό. Τέλος οι Stultz S. και Kitto J., (1992) αναφέρουν ότι αν και η θερμοαντική αξία, η περιεκτικότητα σε τέφρα και το ιξώδες των πολτών λαδιού-νερού είναι παρόμοια με το υπολειμματικό λάδι, έχουν σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε θείο.

3.2 ΑΕΡΙΟΙ ΡΥΠΟΙ

Πολλά είναι τα προβλήματα που απορρέουν από την χρήση ορυκτών καυσίμων. Ιδίως από τον τομέα ηλεκτροπαραγωγής, με χρήση του λιγνίτη ως καύσιμο, εκπέμπονται τοξικοί ρύποι όπως:

1. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) το οποίο προκαλεί δυσλειτουργίες στο αναπνευστικό σύστημα.
2. Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) προέρχεται από την ατελή καύση υδρογονανθράκων, δυσχεραίνει την διαδικασία της οξείδωσης του ανθρώπινου οργανισμού (με την κυκλοφορία του αίματος) σε όλα σχεδόν τα όργανα του. Γενικά τα άμεσα προβλήματα που σχετίζονται με το μονοξείδιο του άνθρακα προκαλούνται μέσω της μεταφοράς του από το αίμα. Συγκεκριμένα η τοξική δράση του δεσμεύει το οξυγόνο της αιμοσφαιρίνης (μεταφορέα του οξυγόνου στον ανθρώπινο οργανισμό), παράγοντας καρβοξυαιμοσφαιρίνη. Το μόριο αυτό δεν έχει πλέον την ικανότητα να δεσμεύει και να μεταφέρει οξυγόνο. Έτσι μειώνεται η πνευματική και σωματική κατάσταση καθώς ο εγκέφαλος και άλλα ζωτικά όργανα αρχίζουν να δυσλειτουργούν. Μεγάλη συγκέντρωση CO στο αίμα μπορεί να επιφέρει ακόμα και θάνατο.

3. Επιπλέον εκπέμπεται διοξείδιο του θείου (SO₂) που αντιδρά στην ατμόσφαιρα δημιουργώντας το τριοξείδιο του θείου (SO₃), το οποίο σχηματίζει ομίχλη θειικού οξέος, καθώς εμφανίζει έντονη δραστικότητα με υδρατμούς. Επίσης συντελεί στην εμφάνιση οξείας βρογχίτιδας κυρίως σε παιδιά προσχολικής ηλικίας. Το θειικό οξύ προκαλεί αναπνευστικά προβλήματα στον άνθρωπο και σε υψηλές συγκεντρώσεις ακόμα και τον θάνατο.
4. Εκπέμπονται ακόμη πτητικοί υδρογονάνθρακες (HCs) που μπορούν να εξασθενήσουν το ανοσοποιητικό σύστημα ενώ θεωρούνται και ιδιαίτερα επικίνδυνοι, όπως είναι για παράδειγμα το βενζόλιο που προκαλεί καρκίνο.
5. Τέλος, τα εκπεμπόμενα αιωρούμενα σωματίδια PM 0,1-10 (0,1-1μm) εναποτίθενται στην τραχεία των πνευμόνων και γίνονται έρευνες για τη συσχέτισή τους με διάφορες μορφές καρκίνου, καθώς μερικά από αυτά είναι τοξικά. Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM-2,5), με διάμετρο δηλαδή 2,5μm περίπου, μπορούν να κατακρατηθούν από την μύτη.

Ο αριθμός που προσδιορίζει το ενεργειακό αποτύπωμα ενός και μόνο σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, δηλαδή το πόσα γραμμάρια ρύπων εκλύονται στην ατμόσφαιρα για να παραχθεί η απαιτούμενη ενέργεια μετράται σε εκατομμύρια τόνους ανά έτος. Από εκεί γίνεται εύκολα κατανοητό το γεγονός του προβλήματος αλλά και το μέγεθος του.

3.2.1 ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ NO_x (NITROGEN OXIDES)

Κατά την διαδικασία της καύσης παράγονται οξείδια του αζώτου NO_x τα οποία είναι από τους κυριότερους ρύπους που εκλύονται στην ατμόσφαιρα. Σε αυτό το πλαίσιο, τα NO_x αναφέρονται σε αθροιστικές εκπομπές μονοξειδίου του αζώτου (NO), διοξειδίου του αζώτου (NO₂) και μικρών ποσοτήτων άλλων ειδών, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 3.8.

Formula	Name	Properties
N ₂ O	Nitrous oxide	Colorless gas, water soluble
NO	Nitric oxide	Colorless gas, slightly water soluble
N ₂ O ₂	Dinitrogen dioxide	Colorless gas, slightly water soluble
N ₂ O ₃	Dinitrogen trioxide	Black solid, water soluble, decomposes in water
NO ₂	Nitrogen dioxide	Red-brown gas, very water soluble, decomposes in water
N ₂ O ₄	Dinitrogen tetroxide	Red-brown gas, very water soluble, decomposes in water
N ₂ O ₅	Dinitrogen pentoxide	White solid, very water soluble, decomposes in water

Πίνακας 3.8 Οξείδια του Αζώτου NO_x.
Πηγή: Soud H., (1995).

Αν και οι κινητές πηγές, όπως τα αυτοκίνητα / φορτηγά, συμβάλλουν περισσότερο ως ποσοστό στην παραγωγή αέριων ρύπων NO_x, συμβάλλουν επίσης κατά ένα μεγάλο μέρος και η καύση ορυκτών καυσίμων λόγω υψηλών θερμοκρασιών και της διαθεσιμότητας οξυγόνου και αζώτου τόσο από τον αέρα όσο και από τα καύσιμα. Οι εκπομπές NO_x από τις διεργασίες καύσης συνήθως αποτελούνται από 90-95% νιτρικό οξύ NO, με το υπόλοιπο 5-10% να είναι διοξείδιο του αζώτου NO₂. Καθώς τα καυσαέρια εξέρχονται από την καμινάδα, το μεγαλύτερο μέρος

νιτρικού οξέος NO που απελευθερώνεται τελικά οξειδώνεται και σχηματίζει διοξείδιο του αζώτου NO₂ στην ατμόσφαιρα.

Το διεσπαρμένο πλέον διοξείδιο του αζώτου NO₂ στην ατμόσφαιρα αντιδρά για να σχηματίσει δευτερογενείς ρύπους όπως το όζον στο επίπεδο του εδάφους και την όξινη βροχή. Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) (ρίζες υδρογονάνθρακα HC) και των άζωτο - οξειδίων NO_x παράγουν το όζον στο χαμηλά υψομετρικά στο επίπεδο του εδάφους, το οποίο δεν πρέπει να συγχέεται με το όζον που υπάρχει σε ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Όταν αυτές οι ουσίες αντιδρούν παρουσία του ηλιακού φωτός, σχηματίζεται το χειρσαίο όζον, το κύριο συστατικό της αιθαλομίχλης. Όταν τα NO_x αντιδρούν με υδρατμούς ή τον αέρα, παράγεται πολύ αραιό νιτρικό οξύ NO. Τα NO_x εκτιμάται ότι συνεισφέρουν λιγότερο από το ένα τρίτο για την παραγωγή της όξινης βροχής, επομένως ο έλεγχος της όξινης βροχής επικεντρώνεται κυρίως στη μείωση των εκπομπών SO₂, που είναι ο κύριος παράγοντας.

Υπάρχουν δύο γενικοί μηχανισμοί σχηματισμού NO_x, σύμφωνα με τους Stultz S. και Kitto J., (1992): τα θερμικά NO_x (thermal NO_x) και των καύσιμων NO_x (fuel NO_x). Τα θερμικά NO_x είναι τα NO_x που παράγονται όταν το άζωτο του αέρα καύσης οξειδώνεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Των καυσίμων NO_x περιλαμβάνουν τη μετατροπή του αζώτου σε NO_x κατά τη διάρκεια της καύσης, που είναι δεσμευμένο σε καύσιμα όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο. Ένας τρίτος τύπος NO_x που σχηματίζεται υπό ορισμένες συνθήκες είναι γνωστός ως άμεσο NO_x (prompt NO_x).

3.2.1.1 ΘΕΡΜΙΚΑ NO_x (THERMAL NO_x)

Ο ρυθμός σχηματισμού θερμικών NO_x είναι μια ισχυρή συνάρτηση της θερμοκρασίας καθώς και του χρόνου παραμονής σε αυτή την θερμοκρασία. Σημαντικά επίπεδα NO_x σχηματίζονται συνήθως πάνω από 1425 °C. Πάνω από αυτή τη θερμοκρασία ο ρυθμός των θερμικών NO_x αυξάνεται εκθετικά. Σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες, το μοριακό άζωτο (N₂) και το οξυγόνο (O₂) που υπάρχουν στον αέρα καύσης μπορούν να διασπαστούν στις ατομικές τους καταστάσεις και να συμμετάσχουν σε μια σειρά αντιδράσεων. Ένα προϊόν από αυτές τις αντιδράσεις είναι το νιτρικό οξύ (NO). Σε θερμοκρασίες κάτω των 760°C, το νιτρικό οξύ (NO) παράγεται σε πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις ή και καθόλου σύμφωνα με τον Soud H., (1995) και τον ASTM D 1608-16, (2017).

Ο θερμικός σχηματισμός NO_x τυπικά μπορεί να ελεγχτεί με τη μείωση της μέγιστης και της μέσης θερμοκρασίας της φλόγας. Αν και αυτή η προσέγγιση είναι αντίθετη με τις παραδοσιακές μεθόδους εξασφάλισης της πλήρους καύσης (δηλαδή, υψηλές θερμοκρασίες, μεγάλος χρόνος παραμονής και υψηλές αναταράξεις ή ανάμειξη), απαιτείται κάποιος συμβιβασμός μεταξύ της αποτελεσματικής καύσης και του ελεγχόμενου σχηματισμού των NO_x. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω μιας σειράς αλλαγών στο σύστημα καύσης:

1. Χρήση καυστήρων ελεγχόμενης ανάμειξης για τη μείωση του στροβιλισμού της φλόγας κοντά στην περιοχή του καυστήρα και για την επιβράδυνση της διαδικασίας της καύσης. Αυτό συνήθως μειώνει τη θερμοκρασία της φλόγας αφαιρώντας την πρόσθετη ενέργεια από τη φλόγα πριν επιτευχθεί η υψηλότερη θερμοκρασία.
2. Χρήση σταδιακής καύσης όπου ένα μέρος του αέρα καύσης εισάγεται αρχικά για να κάψει ένα μέρος του καυσίμου. Ο υπόλοιπος αέρας προστίθεται ξεχωριστά για να

ολοκληρωθεί η διαδικασία της καύσης. Με αυτόν τον τρόπο που μειώνουμε τη συγκέντρωση οξυγόνου καταφέρνουμε να μειώσουμε την μέγιστη θερμοκρασία της φλόγας. Η καύση σε πολύ χαμηλά περισσειας αέρα επίπεδα είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος ελέγχου του σχηματισμού NO_x.

3. Χρήση σταδιακής καύσης, όπου τώρα ένα μέρος του συνολικού καυσίμου που πρόκειται να καταναλωθεί, προστίθεται μαζί με υπερβολική ποσότητα από αέρα καύσης. Το υπόλοιπο καύσιμο προστίθεται σταδιακά στην συνέχεια σε μεταγενέστερο στάδιο στην διαδικασία της καύσης. Η καύση σε πολύ υψηλά περισσειας αέρα επίπεδα είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος ελέγχου του σχηματισμού NO_x.
4. Χρήση μιας τεχνικής γνωστής ως ανακυκλοφορία καυσαερίων (FGR – flue gas recirculation) κατά την οποία μέρος των καυσαερίων αναμιγνύεται με τον αέρα καύσης στον καυστήρα. Αυτό αυξάνει τον όγκο του αερίου που πρέπει να θερμανθεί από τη χημική ενέργεια στο καύσιμο, μειώνοντας έτσι τη θερμοκρασία της φλόγας.
5. Χρήση καυστήρων πολλαπλών φλογών και καύση ελαφρού προ-μείγματος που διασπά τη συνολική εισερχόμενη θερμότητα σε μικρότερες φλόγες με αποτελεσματική ανάμειξη. Αυτό μειώνει τις μέγιστες θερμοκρασίες της φλόγας και επιτρέπει τη γρήγορη απομάκρυνση της θερμότητας τοποθετώντας τη φλόγα σε κοντινή απόσταση από την επιφάνεια θέρμανσης.
6. Η χρήση προ-αναμεμιγμένου μίγματος αέρα και αερίου καυσίμου με την επιλογή προσθήκης καυσαερίων στο μείγμα θα προκαλέσει καύση σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία, μειώνοντας έτσι τον θερμικό σχηματισμό NO_x.
7. Χρήση συνδυασμών των παραπάνω τεχνικών.

Οι παραπάνω προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τη μείωση του σχηματισμού NO_x με καύση αερίου, πετρελαίου ή άνθρακα ως καυσίμου. Για καύσιμα που δεν περιέχουν σημαντικές ποσότητες αζώτου, όπως είναι του φυσικού αερίου, τα θερμικά NO_x είναι σχεδόν ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει σε εκπομπές NO_x. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι προσεγγίσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές στον έλεγχο των εκπομπών των NO_x.

3.2.1.2 ΑΖΩΤΟ-ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ (FUEL NO_x)

Σύμφωνα με τους Stultz S. και Kitto J., (1992) η κύρια πηγή εκπομπών NO_x από καύσιμα που περιέχουν άζωτο όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο προέρχεται από την μετατροπή του αζώτου σε νιτρικό οξύ (NO) κατά την διάρκεια της καύσης. Εργαστηριακές μελέτες δείχνουν ότι τα NO_x καυσίμων συμβάλλουν περίπου στο 50% των συνολικών μη ελεγχόμενων εκπομπών κατά την καύση με υπολειμματικό λάδι και περισσότερο από το 80% κατά την καύση με άνθρακα. Κατά την καύση, το άζωτο απελευθερώνεται ως ελεύθερη ρίζα για να σχηματίσει τελικά NO ή NO₂. Αν και είναι ένας σημαντικός παράγοντας στις εκπομπές των NO_x, μόνο το 20% έως 30% της περιεκτικότητας σε άζωτο του καυσίμου μετατρέπεται σε NO.

Η μετατροπή του δεσμευμένου στο καύσιμο N₂ σε NO εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις αναλογίες μίξης καυσίμου-αέρα, αλλά είναι σχετικά ανεξάρτητη από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας της ζώνης καύσης. Επομένως, η μείωση της διαθεσιμότητας οξυγόνου κατά τα

αρχικά στάδια της καύσης μπορεί να ελέγξει αυτή τη μετατροπή. Τεχνικές όπως η ελεγχόμενη ανάμειξη καυσίμου-αέρα και η σταδιακή καύση μπορούν να προσφέρουν σημαντική μείωση των εκπομπών NO_x.

Η απομάκρυνση του αζώτου από το καύσιμο πριν αυτό καεί δεν επιτυγχάνεται εύκολα, αλλά η αλλαγή από ένα καύσιμο υψηλής περιεκτικότητας σε άζωτο, σε καύσιμο χαμηλότερης περιεκτικότητας αζώτου μπορεί να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος στη μείωση των εκπομπών NO_x. Γενικά, η καύση του άνθρακα παράγει τις υψηλότερες εκπομπές NO_x με την καύση πετρελαίου αμέσως μετά να παράγει λιγότερα και με την καύση αερίου τη λιγότερη δυνατή τιμή. Για το πετρέλαιο, η μείωση της περιεκτικότητας σε άζωτο στο καύσιμο οδηγεί σε μείωση του σχηματισμού NO_x αλλά για τον άνθρακα, η μείωση της περιεκτικότητας του αζώτου αντίστοιχα στο καύσιμο μπορεί να μην παρέχει αντίστοιχη μείωση σχηματισμού NO_x.

3.2.1.3 ΑΜΕΣΟ NO_x (PROMPT NO_x)

Οι συγγραφείς Stultz S. και Kitto J., (1992) ανέφεραν ότι ένα μέρος του NO_x που σχηματίζεται από την οξείδωση του δεσμευμένου στο καύσιμο αζώτου υπό συνθήκες πλούσιες σε καύσιμη ύλη αναφέρεται ως άμεσο NO_x. Όταν το θερμικό NO_x και το NO_x καυσίμων εξαλείφονται, παρατηρείτε ακόμη ένας σχηματισμός NO_x. Το όνομα προέρχεται από τον σχηματισμό του NO_x ,από πολύ νωρίς, κατά τη διαδικασία της καύσης. Το άμεσο NO_x εμφανίζεται μέσω του σχηματισμού των ενδιάμεσων ειδών υδροκυανίου (HCN) και της αντίδρασης μεταξύ μοριακών ενώσεων αζώτου και υδρογονάνθρακα. Αυτή η αντίδραση ακολουθείται από την οξείδωση του HCN σε NO.

Αν και ο άμεσος σχηματισμός NO_x έχει συνήθως μια ασθενή εξάρτηση από τη θερμοκρασία, αυτή η εξάρτηση μπορεί να γίνει πιο ισχυρή υπό συνθήκες πλούσιες σε καύσιμη ύλη. Εκτός από τους καυστήρες που αναμιγνύουν πλήρως τον αέρα καύσης και το αέριο καύσιμο, οι περισσότεροι καυστήρες έχουν σχεδιαστεί για να μειώνουν τις μέγιστες θερμοκρασίες φλόγας ελέγχοντας τον ρυθμό ανάμειξης αυτών των δυο. Η καύση ξεκινά υπό συνθήκες πλούσιες σε καύσιμη ύλη και αυτή η πλούσια σε καύσιμα ζώνη είναι όπου σχηματίζεται το άμεσο NO_x. Το άμεσο NO_x μπορεί να συνεισφέρει από σχεδόν μηδέν έως περισσότερα από 100 ppm NO. Οι καυστήρες που είναι ικανοί να ελέγχουν τον άμεσο σχηματισμό NO_x με προ-ανάμειξη καυσίμου και αέρα περιγράφονται σε επόμενο κεφάλαιο.

3.2.2 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ (SO₂ - SULFUR DIOXIDE)

Το θείο στα περισσότερα ορυκτά καύσιμα προέρχεται κυρίως από τη διάσπαση της φυτικής και ζωικής ύλης. Επίσης προέρχεται ως υδρόθειο, ένα υποπροϊόν της διαδικασίας της αποσύνθεσης. Άλλη πηγή θείου στα καύσιμα περιλαμβάνουν το θειικό σίδηρο (iron sulfate).

Η καύση θειούχων καυσίμων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία SO₂. Οι δύο βασικές βιομηχανικές πηγές εκπομπών θείου είναι η καύση ορυκτών καυσίμων και η μεταλλουργία. Όταν το SO₂ οξειδώνεται στην ατμόσφαιρα, μετατρέπεται σε θειικό οξύ (H₂SO₄). Υπάρχουν δύο μηχανισμοί με τους οποίους σχηματίζεται το θειικό οξύ.

- Το διοξείδιο του θείου SO_2 μπορεί να ενωθεί με υγρό νερό και να σχηματίσει ένα αραιό υδατικό διάλυμα θειικού οξέος (H_2SO_3), το οποίο οξειδώνεται στην ατμόσφαιρα και σχηματίζει θειικό οξύ H_2SO_4 .
- Το διοξείδιο του θείου SO_2 ως αέριο μπορεί επίσης να οξειδωθεί στην ατμόσφαιρα και να παράξει αέριο SO_3 , το οποίο συνδυάζεται με υδρατμούς και αντίστοιχα να σχηματίσει θειικό οξύ H_2SO_4 .

Το 1970, η μέση περιεκτικότητα του άνθρακα σε θείο που καίγονταν σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ήταν 2,3%. Μεταξύ 1970 και 1988, η χρήση άνθρακα με λιγότερο θείο μείωσε αυτόν τον μέσο όρο στο 1,34%. Σύμφωνα με τους Stultz S. και Kitto J., (1992) η μετάβαση σε άνθρακα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο μπορεί να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για τη μείωση των εκπομπών SO_2 και, ως εκ τούτου, να επιτρέψει σε λέβητες κοινών παροχών, να συμμορφωθούν με τους νέους υποχρεωτικούς περιορισμούς εκπομπών SO_2 . Παράλληλα αυτό μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην απόδοση του λέβητα. Για παράδειγμα, μπορούμε να μεταβούμε από τον ασφαλούχο άνθρακα, ο οποίος έχει υψηλή θερμαντική αξία και χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα σε κάποιον άλλον άνθρακα που είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, με υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα και χαμηλότερη θερμαντική αξία (heating value). Αυτό που μπορεί να επηρεαστεί είναι η σταθερότητα της φλόγας σε διάφορα φορτία και ενδέχεται να προκύψουν υψηλότερες αιθάλες και ρύπανση, αφού η φόρτωση τέφρας θα αυξηθεί και αντιστοίχως ως αποτέλεσμα ενδέχεται να απαιτηθούν και αλλαγές στον εξοπλισμό διαχείρισης του καυσίμου. Επίσης ο εξοπλισμός ελέγχου εκπομπών ενδέχεται να μην λειτουργεί ικανοποιητικά και τα επίπεδα εκπομπών να είναι διαφορετικά.

Εάν οπότε η μετάβαση σε χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο άνθρακα δεν είναι αποτελεσματική σε αποδεκτό επίπεδο για τη μείωση των εκπομπών SO_2 , η χρήση υγρών ή ξηρών πλυντηρίδων (wet/dry scrubbers) είναι συχνά μια βιώσιμη επιλογή. Αυτές οι μετά την καύση τεχνικές, για τον έλεγχο των εκπομπών SO_2 , είναι πολύ αποτελεσματικές και η εγκατάστασή τους επιτρέπει τη συνεχή χρήση των υπαρχουσών πηγών καυσίμου. Οι συγγραφείς Woodruff E., Lammers H. και Lammers T. (1998) ανέφεραν ότι ανάλογα με τη διαδικασία, τα υποπροϊόντα από το υγρό τρίψιμο μπορεί να περιλαμβάνουν μείγματα θειικού ασβεστίου ή θειώδους ασβεστίου τα οποία μπορούν να πουληθούν ως γύψος ή να τοποθετηθούν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Άλλες μέθοδοι που είναι αποτελεσματικές στη μείωση των εκπομπών SO_2 περιλαμβάνουν τη χρήση λεβήτων FBC, οι οποίοι μειώνουν την περιεκτικότητα σε θείο καυσίμων απευθείας και μεταβαίνουν καίγοντας μαζούτ ή φυσικό αέριο τα οποία είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.

Ο καθαρισμός του άνθρακα μπορεί επίσης να είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για τη μείωση των εκπομπών SO_2 μειώνοντας την ποσότητα του θείου που περιέχεται σε αυτόν πριν καεί. Σύμφωνα με τους Stultz S. και Kitto J., (1992) αφού ο άνθρακας εξορυχτεί, θρυμματιστεί και κοσκινιστεί για να επιτευχθεί ένας διαχωρισμός βάσης μεγέθους, μπορεί να υποβληθεί σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, όπως συγκέντρωση με την βοήθεια της βαρύτητας (gravity concentration), επίπλευση (floatation) και ξηρή επεξεργασία (dry processing).

1. Η συγκέντρωση βαρύτητας, είναι μια τεχνική μηχανικού καθαρισμού που χρησιμοποιεί τη διαφορά στο ειδικό βάρος των διαφόρων συστατικών του άνθρακα για τον διαχωρισμό της τέφρας και του θείου από αυτόν. Ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται όταν τα πιο πυκνά σωματίδια τέφρας και θείου καθιζάνουν πιο μακριά και γρηγορότερα σε ένα ρευστό μέσο σε αντίθεση με τα λιγότερο πυκνά σωματίδια άνθρακα ίδιου μεγέθους.

2. Η μέθοδος επίπλευσης για τον καθαρισμό του άνθρακα, χρησιμοποιεί διαφορές στις ιδιότητες της επιφάνειας για την επίτευξη του διαχωρισμού. Καθώς ο αέρας περνά πάνω από τις επιφάνειες των σωματιδίων άνθρακα και των ορυκτών ουσιών που αιωρούνται σε ένα υδατικό διάλυμα, τα σωματίδια άνθρακα επιπλέουν προς τα πάνω επειδή οι επιφάνειές τους είναι πιο 'αδιάβροχες'. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται γενικά για τον καθαρισμό του άνθρακα λεπτότερο από 300 μm.
3. Η ξηρή επεξεργασία άνθρακα είναι κατάλληλη μόνο για υλικά που έχουν συνθλιβεί λεπτότερα από 1.27cm και έχουν χαμηλή επιφανειακή υγρασία. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει μια πνευματική επεξεργασία (δηλαδή με αέρα) για την επίτευξη του διαχωρισμού.

3.2.3 ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ (PM - Particulate Matter)

Τέφρα παράγεται κατά την διάρκεια της καύσης από καύσιμα που περιέχουν άκαυστες ουσίες. Η τέφρα και τα άκαυστα σωματίδια άνθρακα ονομάζονται συλλογικά ως σωματίδια PM ή ιπτάμενη τέφρα (fly ash). Τα σωματίδια περιλαμβάνουν σκόνη, καπνό και αιθάλη που μπορεί να απελευθερωθεί κατά την καύση ορισμένων καυσίμων, όπως είναι ο άνθρακας και το ξύλο.

Το μέγεθος των σωματιδίων μετριέται σε μικρόμετρα (ή εκατομμυριοστά του μέτρου). Ανάλογα με τη συγκέντρωση, αυτά τα λεπτά σωματίδια μπορούν να επηρεάσουν την αναπνοή και να προκαλέσουν ακόμα και προβλήματα όρασης. Τα σωματίδια με ονομαστική αεροδυναμική διάμετρο 10 μm ή μικρότερη (PM₁₀) έχουν ξεχωριστά όρια εκπομπής σωματιδίων από τα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο 2,5 μm ή μικρότερη (PM_{2.5}).

Όλοι οι τύποι άνθρακα περιέχουν κάποια ποσότητα τέφρας. Οι ασφαλτούχοι άνθρακες συνήθως περιέχουν 5-30% τέφρα. Η περιεκτικότητα σε τέφρα του μαζούτ εξαρτάται από το εάν το καύσιμο προέρχεται από υπολειμματικό λάδι ή από απόσταξη. Το υπολειμματικό λάδι περιέχει περισσότερη τέφρα από ότι στο απόσταγμα, αλλά και οι δύο τύποι έχουν πολύ λιγότερη τέφρα από ότι περιέχει ο άνθρακας. Το φυσικό αέριο είναι ουσιαστικά χωρίς τέφρα, αλλά μπορεί να εκπέμπει κάποιες μικρές ποσότητες σωματιδίων.

Οι συγγραφείς Woodruff E., Lammers H. και Lammers T. (1998), ανέφεραν στο σύγγραμμα τους, ότι είναι απαραίτητο να αφαιρέσουμε όσο το δυνατόν περισσότερα σωματίδια γίνεται πριν αυτά απελευθερωθούν μέσω των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα. Τρεις τεχνικές που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος μόνες ή σε συνδυασμό για το σκοπό αυτό είναι ο μηχανικός συλλέκτης, ο Ηλεκτροστατικός Κατακρημνιστής (ESP) και τα υφασμάτινα φίλτρα.

3.2.4 ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO - Carbon monoxide)

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι ένα άχρωμο, άοσμο αέριο που παράγεται όταν ο άνθρακας στα καύσιμα δεν καίγεται εντελώς. Η αυτοκίνηση υπολογίζεται ότι προκαλεί περίπου το 60% όλων των εκπομπών CO στις ΗΠΑ. Οι εκπομπές των οχημάτων αντιπροσωπεύουν ακόμα έως

και το 95% των συνολικών εκπομπών CO σε ορισμένες πόλεις. Άλλες πηγές εκπομπών CO είναι οι βιομηχανικές διεργασίες και η καύση καυσίμων που λαμβάνει χώρα σε λέβητες και αποτεφρωτήρες. Οι συνδυασμένες εκπομπές από αυτές τις πηγές μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλές συγκεντρώσεις CO, ειδικά σε περιοχές που παρουσιάζουν έντονη κυκλοφορία.

Ο Singer J. (1991) ανέφερε ότι ο έλεγχος της διαδικασίας της καύσης είναι πολύ σημαντικός για την αποτελεσματική λειτουργία του λέβητα. Η ατελής καύση των καυσίμων σπαταλά ενέργεια και οδηγεί σε αυξημένες εκπομπές CO και σωματιδίων PM. Αν και οι εκπομπές CO από την καύση υγρών και αέριων καυσίμων είναι συνήθως πολύ χαμηλές, ο έλεγχος του άκαυτου άνθρακα σε λέβητες που καίνε στερεά καύσιμα είναι ένα σημαντικό σχεδιαστικό και λειτουργικό ζήτημα. Η καύση του άνθρακα εξαρτάται από τις ιδιότητες του καυσίμου, τα χαρακτηριστικά του λέβητα και του συστήματος καύσης και τις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την πλήρη καύση του άνθρακα είναι:

1. Η αντιδραστικότητα του καυσίμου,
2. Η λεπτότητα και το μέγεθος των σωματιδίων του καυσίμου,
3. Η αποδοτικότητα της ανάμειξης καυσίμου-αέρα,
4. Η περίσσεια αέρα που είναι διαθέσιμη για την πλήρη καύση,
5. Ο χρόνος παραμονής,
6. Το προφίλ θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του λέβητα.

Η αντιστοίχιση των παραπάνω παραμέτρων με τα χαρακτηριστικά καύσης του καυσίμου είναι σημαντική για την ελαχιστοποίηση της απώλειας άνθρακα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι απώλειες άκαυτου άνθρακα από την καύση άνθρακα, ξύλου και άλλων στερεών καυσίμων μπορούν να περιοριστούν σε λιγότερο από το 0,5% του καυσίμου που καίγεται.

3.3 ΟΡΙΑ ΡΥΠΩΝ

- 1) Αναφορικά για την Αμερική, οι απαιτήσεις καθορίζονται από τον νόμο περί καθαρού αέρα (CAA). Ο νόμος για τον καθαρό αέρα (CAA) είναι ένας ολοκληρωμένος ομοσπονδιακός νόμος που ρυθμίζει τις εκπομπές αέρα από διάφορες πηγές (αυτοκίνηση, βιομηχανίες). Αυτός ο νόμος εξουσιοδοτεί την EPA να θεσπίσει τα αναφερόμενα ως Εθνικά Πρότυπα Ποιότητας Αέρας Περιβάλλοντος (NAAQS) που είναι αρμόδια για την προστασία της δημόσιας υγείας, της δημόσιας ευημερίας και για τη ρύθμιση των εκπομπών επικίνδυνων ατμοσφαιρικών ρύπων.
- 2) Σύμφωνα με την ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΗΣ, 22/01/2021, αρ. φ. 182, «Μείωση των εθνικών εκπομπών ορισμένων ατμοσφαιρικών ρύπων, τροποποίηση της Οδηγίας 2003/35/EK και κατάργηση της Οδηγίας 2001/81/EK - μεταφορά στο εθνικό δίκαιο της Οδηγίας (ΕΕ) 2016/2284 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου (ΕΕ L 334/1/17-12-2016) επιβάλλονται κάποιοι στόχοι ορόσημα για μείωση των ρύπων.

Το πρόγραμμα περιέχει εθνικές πολιτικές και μέτρα, ώστε να υπάρξει συμμόρφωση με τις εθνικές δεσμεύσεις μείωσης των εκπομπών για τα έτη από το 2020 έως το 2029 και από το 2030 και μετά, όπως προβλέπονται στην παραπάνω νομοθεσία, για τους ρύπους του διοξειδίου του θείου (SO₂), των οξειδίων του αζώτου (NO_x), τις πτητικές οργανικές ενώσεις εκτός του μεθανίου (NMVOC), της αμμωνία (NH₃) και των αιωρούμενων σωματιδίων (PM).

Η επίτευξη των Ενεργειακών και Κλιματικών Στόχων της Ελλάδος έως το έτος 2030 αποτυπώνεται στο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), που κυρώθηκε με την υπ' αρ. 4/2019 απόφαση του Κυβερνητικού Συμβουλίου Οικονομικής Πολιτικής (Β' 4893). Το ΕΣΕΚ αποτελεί για την Ελληνική Κυβέρνηση ένα Στρατηγικό Σχέδιο για τα θέματα του Κλίματος και της Ενέργειας και παρουσιάζεται σε αυτό ένας αναλυτικός οδικός χάρτης για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων.

Ειδικότερα, το ΕΣΕΚ θέτει τους ακόλουθους στόχους για το έτος 2030:

α) Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, κατ' ελάχιστον 42% σε σχέση με τις εκπομπές του έτους 1990 και πάνω από 55% έως το 2050, σε σχέση με τις εκπομπές του έτους 2005, επιτυγχάνοντας να ξεπεράσει ακόμη και τους κεντρικούς ευρωπαϊκούς στόχους.

β) Μεριδίο συμμετοχής ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας κατ' ελάχιστον 35%.

γ) Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, με στόχο η τελική κατανάλωση ενέργειας το έτος 2030 να είναι χαμηλότερη από αυτή που είχε καταγραφεί κατά το έτος 2017. Επιπροσθέτως, επιτυγχάνεται ποιοτική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 38%, σύμφωνα με συγκεκριμένη ευρωπαϊκή μεθοδολογία.

δ) Πρόγραμμα για τη δραστική και οριστική μείωση του μεριδίου του λιγνίτη στην ηλεκτροπαραγωγή, μέχρι την πλήρη απολιγνιτοποίηση.

Όσον αφορά τις εθνικές δεσμεύσεις μείωσης των εκπομπών το εθνικό πλαίσιο πολιτικής για την ποιότητα και τη ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα θέτει ως στόχο τη μείωση των εκπομπών SO₂, NO_x, VOC (εκτός του μεθανίου), NH₃ και PM_{2,5}. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι εθνικές δεσμεύσεις μείωσης των εκπομπών, για την Ελλάδα, σε σύγκριση με το έτος αναφοράς του 2005 (σε ποσοστό %).

	SO ₂	NO _x	VOC εκτός του μεθανίου	NH ₃	PM _{2.5}
2020 2029 (Υ)	74%	31%	54%	7%	35%
Από το 2030 και μετά (Υ)	88%	55%	62%	10%	50%

Πίνακας 3.9 Οι εθνικές δεσμεύσεις μείωσης των εκπομπών σε σύγκριση με το έτος αναφοράς 2005 (σε ποσοστό %).
 Πηγή: ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΗΣ, 22/01/2021, αρ. φ. 182, σελ.1593.

Ρύποι (Υ)	Συνολικές εκπομπές (kt), σύμφωνα με τις απογραφές για το έτος x 2 ή x 3 (προσδιορίστε το έτος) (Υ)				Προβλεπόμενο % μείωσης των εκπομπών σε σύγκριση με το 2005 (Υ)			Εθνική δέσμευση για μείωση των εκπομπών κατά τα έτη 2020 2029 (%) (Υ)	Εθνική δέσμευση για μείωση των εκπομπών από το 2030 και μετά (%) (Υ)
	Έτος αναφοράς 2005	2020	2025	2030	2020	2025	2030		
SO ₂	549.35	50.54	38.11	26.39	90.8%	93.1%	95.2%	74%	88%
NO _x	482.41	203.52	182.74	155.58	56.0%	60.4%	66.3%	31%	55%
NM _{VOC}	325.75	125.758	115.82	106.06	59.2%	62.4%	65.6%	54%	62%
NH ₃	75.74	65.13	63.40	67.02	14.0%	16.3%	11.5%	7%	10%
PM _{2.5}	47.65	24.44	22.70	21.73	48.7%	52.4%	54.4%	35%	50%
Ημερομηνία προβλέψεων εκπομπών (Υ)					30/12/2019				

Πίνακας 3.10 Προβλεπόμενες εκπομπές για μειώσεις εκπομπών και βελτίωση της ποιότητας του αέρα.
 Πηγή: ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΗΣ, 22/01/2021, αρ. φ. 182, σελ.1597.

Επίσης όπως παρατηρούμε από το Παράρτημα Α στο τέλος της εργασίας, από την εφημερίδα της κυβερνήσεως ,Τεύχος Β , 182/22.01.2021, στην σελίδα 1620 σύμφωνα με την εθνική απογραφή του 2019 όσον αφορά την πρόοδο της μείωσης των εκπομπών και βαθμό εκπλήρωσης των υποχρεώσεων σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο σε σύγκριση με το έτος 2005 βγάζουμε το συμπέρασμα ότι:

1. Για το διοξείδιο του θείου SO₂ έχουμε μειώσει ήδη από το έτος 2017 κατά 87,41% πιάνοντας τον στόχο μέχρι το έτος 2029 που απαιτούσε μείωση της τάξεως 74%.
 2. Για τα οξειδία του αζώτου NO_x ομοίως από το 2017 οι εκπομπές τους έχουν μειωθεί κατά 44,04%, όπου η εθνική δέσμευση ήταν μέχρι το 2029 να μειωθούν κατά 31% σε σχέση το 2005.
 3. Για τα λεπτά αιωρούμενα σωματίδια PM_{2.5} οι εκπομπές έχουν μειωθεί κατά 42,90% το 2017 σε σχέση με το 2005 επιτυγχάνοντας τον στόχο 35% έως το έτος 2029 .
 4. Ομοίως για την εκπομπή αμμωνίας NH₃ έχει μείωση κατά 16% στο έτος 2017 αναφορικά με το 2005 πιάνοντας τον στόχο του 7% έως το έτος 2029.
- 3) Βάση της επίσημης Εφημερίδας της Ευρωπαϊκής Ένωσης 30.11.2021 (L469/01 – 81), έχει σχηματιστεί επίσης από μια εκτελεστική επιτροπή για τον καθορισμό των συμπερασμάτων για τις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές (ΒΔΤ) βάσει της οδηγίας 2010/75/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου όσον αφορά μεγάλες μονάδες καύσης.
- 4) Σύμφωνα με την γενική διεύθυνση περιβαλλοντικής πολιτικής και αδειοδότησης για τα διυλιστήρια της Ελλάδος ισχύει:

Τα διυλιστήρια που λειτουργούν στην περιοχή της Αττικής εμπίπτουν στις αυστηρότερες διατάξεις με αρ. 172058/17-02-2016 ΚΥΑ, περί βιομηχανικών εκπομπών (ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχος της ρύπανσης) και λειτουργεί βάσει την υπ' αρ. πρωτοβάθμιας Διεύθυνσης Ε.Α.Ρ.Θ./ΥΠΕΚΑ 146393/3.06.2008 σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές.

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΓΕΝΙΚΗ Δ/ΝΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ, Διεύθυνση Περιβαλλοντικής Αδειοδότησης, «Ανανέωση/Τροποποίηση της υπ' αρ. πρωτ. 146393/3.06.2008, Δ/νσης Ε.Α.Ρ.Θ. /ΥΠΕΚΑ, Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ), όπως αυτή τροποποιήθηκε με την υπ' αρ. 1021/16.01.2018 Απόφαση Τροποποίησης της ΑΕΠΟ και την υπ' αρ. 162459/30.04.2014 Απόφαση περί μη τροποποίησης της ΑΕΠΟ της ίδιας Διεύθυνσης, του διυλιστηρίου του Ν. Αττικής και αναδιατύπωση των εγκεκριμένων περιβαλλοντικών όρων αυτής», 2020.

Σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στη ΑΕΠΟ για τον έλεγχο της ποιότητας της ατμόσφαιρας της ευρύτερης περιοχής που λειτουργεί το εν λόγω διυλιστήριο, λειτουργεί ένας κεντρικός σταθμός εφοδιασμένος με αυτόματα όργανα συνεχούς μέτρησης για την παρακολούθηση/καταγραφή και επεξεργασία των τιμών συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων (SO₂, H₂S, NO, NO₂, NO_x, CH₄, υδρογονανθράκων πλην του CH₄, συνολικών υδρογονανθράκων, βενζολίου, αιωρούμενων σωματιδίων (PM₁₀) και των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων (διεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου, θερμοκρασία και σχετική υγρασία του αέρα) καθώς και τρεις

σταθεροί σταθμοί (νότιος, δυτικός και βόρειος σταθμός) για την παρακολούθηση/καταγραφή της συγκέντρωσης του υδρόθειου (H₂S). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ποιότητας της ατμόσφαιρας περιλαμβάνονται στην Έκθεση για την Ποιότητα του Περιβάλλοντος που υποβάλλεται ετησίως από το διυλιστήριο στην Υπηρεσία του Υπουργείου, καθώς και στις αρμόδιες υπηρεσίες της οικείας Περιφέρειας. Επισημαίνεται ότι η Έκθεση για την Ποιότητα του Περιβάλλοντος υποβάλλεται και στην ηλεκτρονική διεύθυνση emissions.ind@prv.ypeka.gr, προκειμένου να αναρτηθεί στην ιστοσελίδα <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=965&language=el-GR>.

Επιβάλλεται η πραγματοποίηση μετρήσεων, συνεχών ή ασυνεχών, των συγκεντρώσεων των SO₂, NO_x (ως NO₂), σωματιδίων και O₂ καθώς και της θερμοκρασίας και της παροχής σε κάθε καπνοδόχο του διυλιστηρίου. Οι μετρήσεις των ανωτέρω ρύπων καθώς και των CO, Νικελίου (Ni) και Βαναδίου (V) θα πραγματοποιούνται σύμφωνα με το Άρθρο 13.1 της ΚΥΑ 36060 και τη ΒΔΤ 4 της Εκτελεστικής Απόφασης 2014/738/ΕΕ, και σύμφωνα με σχετικά πρότυπα EN ή/και ISO.

Εφαρμογή των Βέλτιστων Διαθέσιμων Τεχνικών ΒΔΤ 57 Και ΒΔΤ 58 από την Εκτελεστική Απόφαση 2014/738/ΕΕ και του κειμένου Αναφοράς της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τη διύλιση πετρελαίου και αερίου, σύμφωνα με το Reference Document for the Refining of Mineral (2015). Η εκτίμηση των ορίων των ατμοσφαιρικών εκπομπών NO_x και SO_x, ως μέση μηνιαία τιμή, χρήση ολοκληρωμένης τεχνικής διαχείρισης εκπομπών, εφαρμογή της ΒΔΤ 57 για την εκτίμηση των εκπομπών NO_x (mg/Nm³) και εφαρμογή της ΒΔΤ 58 για την εκτίμηση των εκπομπών SO_x (mg/Nm³) από όλες τις μονάδες καύσης του διυλιστηρίου παρουσιάζεται στους παρακάτω Πίνακες 3.11 και 3.12.

ΜΟΝΑΔΑ/ ΕΣΤΙΑ ΚΑΥΣΗΣ	Θερμική ισχύς (MW)	Καύσιμο	Ροή Καυσαερίων σε ΚΣ & dry (Nm ³ /h)	Όριο συγκέντρωσης NOx εφαρμογή ΒΔΤ24, ΒΔΤ34 (mg/Nm ³)	[(Ροή απαερίων μονάδας) x (συγκέντρωση, εφαρμογή ΒΔΤ24, ΒΔΤ34)] (mg/h)
Μονάδα Διύλισης Αργού	76,47	Αέριο	79.160,77	150	11.874.115,53
Μονάδα Διύλισης Αργού	18,95	Μαζούτ/ Αέριο/ Φ.Α	19.141,97	300	5.742.589,60
Μονάδα Υδρογ/αποθείωσης	5,25	Αέριο	3.049,19	150	457.378,32
Μονάδα Απόσταξης Κενού	48,00	Μαζούτ/ Αέριο/ Φ.Α	52.872,78	300	15.861.833,64
Μονάδα Θερμικής Πυρόλυσης Ασφάλτου	11,66	Αέριο	10.992,81	150	1.648.921,97
Μονάδα Υδρογόνου	217,1	Αέριο	205.466,29	150	30.819.944,15
Μονάδα Υδρογονοδιάσπασης	97,2	Αέριο	110.398,08	150	16.559.711,64
Λέβητες	206,14	Μαζούτ/ Αέριο/ Φ.Α	152.196,37	300	45.658.912,64
Σύνολο		Ροή απαερίων όλων των μονάδων = 633.278 Nm ³ /h		(Ροή απαερίων μονάδας)x(συγκέντρωση)] = 128.623.407 mg/h	
Όριο Bubble Εγκατάστασης NOx				203,11 mg/Nm³	

Πίνακας 3.11: Εκτίμηση ορίου εκπομπών NOx (mg/Nm³), εφαρμογή ΒΔΤ 57 (2014/738/ΕΕ). Πηγή: ΑΕΠΟ 2020.

ΜΟΝΑΔΑ/ ΕΣΤΙΑ ΚΑΥΣΗΣ	Θερμική ισχύς (MW)	Καύσιμο	Ροή Καυσαερίων σε ΚΣ & dry (Nm ³ /h)	Όριο συγκέντρωσης SO _x (ως SO ₂) εφαρμογή ΒΔΤ26, ΒΔΤ36 και ΒΔΤ54 (mg/Nm ³)	[(Ροή απαερίων μονάδας) x (συγκέντρωση εφαρμογής ΒΔΤ26 και ΒΔΤ36 και ΒΔΤ54)] (mg/h)
Μονάδα Διύλισης Αργού	76,47	Αέριο	79.160,77	35	2.770626,96
Μονάδα Διύλισης Αργού	18,95	Μαζούτ/ Αέριο/ Φ.Α	19.141,97	600	11.485.179,20
Μονάδα Αποθείωσης	5,25	Αέριο	3.049,19	35	106.721,61
Μονάδα Απόσταξης Κενού	48,00	Μαζούτ/ Αέριο/ Φ.Α	52.872,78	600	31.723.667,27
Μονάδα Θερμικής Πυρόλυσης Ασφάλτου	11,66	Αέριο	10.992,81	35	384.748,46
Μονάδα Υδρογόνου	217,1	Αέριο	205.466,29	35	7.191.320,30
Μονάδα Υδρογονοδιάσπασης	97,2	Αέριο	110.398,08	35	3.863.932,72
Μονάδα Ανάκτησης Θείου	10,24	Αέριο & Φ.Α	33.437,41	1.137	38.018.334,77
Λέβητες	206,14	Μαζούτ/ Αέριο/ Φ.Α	152.196,37	600	91.317.824,95
Σύνολο		Ροή απαερίων όλων των μονάδων =666.716 Nm ³ /h		(Ροή απαερίων μονάδας) x(συγκέντρωση) = 186.862.356 mg/h	
Όριο Bubble Εγκατάστασης SO_x ως SO₂				280,27 mg/Nm³	

Πίνακας 3.12: Εκτίμηση ορίου εκπομπών SO_x ως SO₂(mg/Nm³),εφαρμογή ΒΔΤ 58 (2014/738/ΕΕ). Πηγή: ΑΕΠΟ 2020.

Οπότε συνοπτικά έχουμε τα όρια εκπομπών για την Μονάδα των Λεβήτων με τα εξής ακόλουθα:

1. SO_x ≤ 600 mg/Nm³
2. CO: ≤ 100 mg/Nm³
3. NO_x ≤ 300 mg/Nm³
4. Σωματίδια PM ≤ 20 mg/Nm³

Προκειμένου οι εκπομπές SO_x να παραμείνουν στο προαναφερθέν όριο των 600 mg/Nm³, θα πρέπει σε περίπτωση καύσης μαζούτ, αυτή να γίνει με το χαμηλότερο δυνατό περιεχόμενο σε θειάφι, είτε να επιλεγεί διαφορετικό καύσιμο στους καυστήρες των Λεβήτων. (Fuel Oil με μέγιστο περιεχόμενο θείου 0.69%).

5) Συχνότητα μέτρησης και τεχνική παρακολούθησης ρύπων:

Η Βέλτιστη Διαθέσιμη Τεχνική (ΒΔΤ) σύμφωνα με τους Barthe P. , Chaugny M., Roudier S. και Sancho L. (2015) είναι η παρακολούθηση των εκπομπών στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιώντας τεχνικές παρακολούθησης με τουλάχιστον την ελάχιστη συχνότητα που δίνεται παρακάτω και σύμφωνα με τα πρότυπα EN. Εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμα πρότυπα EN, η ΒΔΤ κάνει χρήση των ISO, εθνικών ή άλλων διεθνών προτύπων που διασφαλίζουν την παροχή δεδομένων ισοδύναμης επιστημονικής ποιότητας (πίνακας 3.13).

Description	Process unit	Minimum frequency	Monitoring technique
i. SO _x , NO _x , and dust emissions	Catalytic cracking	Continuous (1) (2)	Direct measurement
	Combustion units ≥ 100 MW (3) and calcining units	Continuous (1) (2)	Direct measurement (4)
	Combustion units of 50 to 100 MW (3)	Continuous (1) (2)	Direct measurement or indirect monitoring
	Combustion units <50 MW (3)	Once a year and after significant fuel changes (5)	Direct measurement or indirect monitoring
	Sulphur recovery units (SRU)	Continuous for SO ₂ only (6)	Direct measurement or indirect monitoring (7)
ii. NH ₃ emissions	All units equipped with SCR or SNCR	Continuous	Direct measurement
iii. CO emissions	Catalytic cracking and combustion units ≥ 100 MW (3)	Continuous	Direct measurement
	Other combustion units	Once every 6 months (8)	Direct measurement
iv. Metals emissions: Nickel (Ni), Antimony (Sb) (9), Vanadium (V)	Catalytic cracking	Once every 6 months and after significant changes to the unit (10)	Direct measurement or analysis based on metals content in the catalyst fines and in the fuel
	Combustion units (3)		
v. Polychlorinated dibenzodioxins/furans (PCDD/F) emissions	Catalytic reformer	Once a year or once a regeneration, whichever is longer	Direct measurement
<p>(1) Continuous measurement of SO₂ emissions may be replaced by calculations based on measurements of the sulphur content of the fuel or the feed; where it can be demonstrated that this leads to an equivalent level of accuracy.</p> <p>(2) Regarding SO_x, only SO₂ is continuously measured, while SO₃ is only periodically measured (e.g. during calibration of the SO₂ monitoring system).</p> <p>(3) Refers to the total rated thermal input of all combustion units connected to the stack where emissions occur.</p> <p>(4) Or indirect monitoring of SO_x.</p> <p>(5) Monitoring frequencies may be adapted if, after a period of one year, the data series clearly demonstrate a sufficient stability.</p> <p>(6) SO₂ emissions measurements from SRU may be replaced by a continuous material balance or other relevant process parameter monitoring, provided appropriate measurements of SRU efficiency are based on periodic (e.g. once every 2 years) plant performance tests.</p> <p>(7) Antimony (Sb) is monitored only in catalytic cracking units when Sb injection is used in the process (e.g. for metals passivation).</p> <p>(8) With the exception of combustion units firing only gaseous fuels.</p>			

Πίνακας 3.13 Συχνότητα ανάλυσης CO_x, NO_x, NH₃ για μονάδες καύσης >50MW.

Πηγή: Barthe P. , Chaugny M., Roudier S. και Sancho L. (2015).

6) Για την Ελλάδα επίσης ισχύουν με τον Ν.4936/2022 (ΦΕΚ 105/Α' 27.05.2022) για την μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, επείγουσες διατάξεις για την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης και την προστασία του περιβάλλοντος:

- Από το άρθρο 8, σχετικά με την αναθεώρηση κλιματικών στόχων, της ΕΦΗΜΕΡΙΔΑΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ Τεύχος Α' 105/27.05.2022 έχουμε ότι:

Ο Υπουργός Περιβάλλοντος και Ενέργειας, κατόπιν εισήγησης της Διεύθυνσης Κλιματικής Αλλαγής και Ποιότητας της Ατμόσφαιρας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τα τελευταία διαθέσιμα επιστημονικά δεδομένα και τις ετήσιες εκθέσεις προόδου, το αργότερο έως την 31η Δεκεμβρίου 2024 και ακολούθως κάθε πέντε (5) τουλάχιστον έτη, αξιολογεί την πορεία προς την κλιματική ουδετερότητα και προτείνει σχετικά μέτρα, την αναθεώρηση των ενδιάμεσων κλιματικών στόχων της παρ. 2 του άρθρου 1 ή τη θέσπιση νέων ενδιάμεσων στόχων, προς την Κυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Ουδετερότητα. Τα βασικά αποτελέσματα της αξιολόγησης και η πρόταση νέων μέτρων από τον Υπουργό Περιβάλλοντος και Ενέργειας τίθενται σε δημόσια διαβούλευση από τον Οργανισμό Φυσικού Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής (ΟΦΥΠΕΚΑ), κατά το άρθρο 26.

Η Κυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Ουδετερότητα, λαμβάνοντας υπόψη την ανωτέρω πρόταση του Υπουργού Περιβάλλοντος και Ενέργειας και την έκθεση διαβούλευσης που συντάσσεται από τον ΟΦΥΠΕΚΑ, εγκρίνει πρόσθετα μέτρα για την επίτευξη των ενδιάμεσων κλιματικών στόχων και του μακροπρόθεσμου στόχου επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας, καθώς και την αναθεώρηση των ενδιάμεσων κλιματικών στόχων της παρ. 2 του άρθρου 1.

- Επίσης από το άρθρο 11 παρατηρούμε ότι για μελλοντικά αναφέρει:

Απαγορεύεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από στερεά ορυκτά καύσιμα από την 31η Δεκεμβρίου 2028. Υφιστάμενες άδειες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από στερεά ορυκτά καύσιμα παύουν να ισχύουν κατά την ημερομηνία αυτή. Επίσης μπορεί να επισπευτεί η καταληκτική ημερομηνία, αφού ληφθούν υπόψη η επάρκεια ισχύος και η ασφάλεια εφοδιασμού, σύμφωνα με τις προβλέψεις του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα.

- Βάση του άρθρου 19, για την μείωση εκπομπών σε εγκαταστάσεις, βλέπουμε επίσης ότι :
 - i. Τα έργα και οι δραστηριότητες κατηγορίας Α' του άρθρου 1 του ν. 4014/2011 (Α' 209) υποχρεούνται σε μείωση εκπομπών κατά τριάντα τοις εκατό (30%) τουλάχιστον, έως το 2030 σε σχέση με το έτος 2019, με αναγωγή στην κατάλληλη μονάδα προϊόντος και έργου, ανάλογα με το είδος της δραστηριότητας.
 - ii. Έως την 1η Ιανουαρίου 2026, για το σύνολο των υφιστάμενων έργων και δραστηριοτήτων της παρ. 1 υποβάλλεται έκθεση στην αρμόδια για την περιβαλλοντική αδειοδότηση αρχή, προκειμένου να αποτυπωθεί ο τρόπος συμμόρφωσης με τον στόχο μείωσης των εκπομπών. Η έκθεση υπέχει θέση φακέλου τροποποίησης Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) της παρ. 6 του άρθρου 11 του ν. 4014/2011 (Α' 209).
 - iii. Για την επίτευξη του στόχου της προηγούμενης παρ. 1 ο φορέας του έργου ή της δραστηριότητας μπορεί να προβαίνει σε αντιστάθμιση εκπομπών με την αγορά

πράσινων πιστοποιητικών μέσω της εφαρμογής του Συστήματος Εγγυήσεων Προέλευσης και του Μηχανισμού Διασφάλισής του, σύμφωνα με την υπό στοιχεία Δ6/Φ1/οικ.8786/ 6.5.2010 απόφαση της Υπουργού Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (Β' 646) ή μέσω εθνικής εθελοντικής αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών, ιδίως μέσω φυτεύσεων, συμπεριλαμβανομένων δασώσεων, μέσω αναδασώσεων, σύμφωνα με την υπό στοιχεία ΥΠΕΝ/ ΔΔΕΥ/81777/2996/3.9.2021 απόφαση του Υφυπουργού Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Β' 4080), ή με άλλο εναλλακτικό τρόπο ισοδύναμου αποτελέσματος, σύμφωνα με την απόφαση της παρ. 11 του άρθρου 33.

- Βάση του άρθρου 22, σε περίπτωση μη επίτευξης του στόχου μείωσης των εκπομπών που προβλέπεται στην ΑΕΠΟ, επιβάλλεται διοικητικό πρόστιμο με κύριο κριτήριο την απόκλιση από τον στόχο, το οποίο δεν υπερβαίνει το μισό τοις εκατό (0,5%), επί του συνολικού κύκλου εργασιών της τελευταίας χρήσης του φορέα του έργου ή της δραστηριότητας, με βάση τον κύκλο εργασιών της τελευταίας υποβληθείσας δήλωσης φορολογίας εισοδήματος. Αυτά αποδίδονται στο Πράσινο Ταμείο του ν. 3889/2010 (Α' 182), σε ειδικό λογαριασμό, προκειμένου να διατεθούν για έργα και δράσεις που αποσκοπούν στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.

7) Από τις νεότερες στρατηγικές προτάσεις της Ε.Ε. (του έτους 2023):

Μέτρα για την επίτευξη μηδενικών εκπομπών μέχρι το 2050 μέσω αυστηρότερων κανόνων στις αδειοδοτήσεις για τη βιομηχανία και μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας και ενίσχυσης της κυκλικής οικονομίας και της καινοτομίας πρότείνει η ΕΕ σε μια προσπάθεια να καταστούν πιο πράσινες οι νέες επενδύσεις αλλά και οι περίπου 50.000 μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις στην Ευρώπη.

Οι νέοι κανόνες που προτείνονται μέσω της αναθεώρησης της Οδηγίας 2010/75/ΕΕ θα καλύπτουν τις άδειες για Εγκαταστάσεις με στόχο να καταστήσουν αποτελεσματικότερη την αδειοδότηση, να μειώσουν το διοικητικό κόστος, να αυξήσουν τη διαφάνεια και να στηρίξουν περισσότερο τις ρηζικέλευθες τεχνολογίες και άλλες καινοτόμες προσεγγίσεις. Συγκεκριμένα, αντί του συμβιβασμού με τα λιγότερο απαιτητικά όρια των βέλτιστων διαθέσιμων τεχνικών (ΒΔΤ), η αδειοδότηση θα πρέπει να αξιολογεί το κατά πόσο είναι εφικτή επίσης και η επίτευξη των βέλτιστων επιδόσεων. Επίσης οι κανόνες χορήγησης παρεκκλίσεων θα αυστηρήνουν, εναρμονίζοντας τις απαιτούμενες αξιολογήσεις και διασφαλίζοντας την τακτική επανεξέταση των παρεκκλίσεων που χορηγούνται.

Η καινοτομία γενικά θα ενθαρρύνεται. Ως εναλλακτική λύση σε προσεγγίσεις που βασίζονται σε καθιερωμένες τεχνικές βέλτιστης πρακτικής, οι πρωτοπόροι θα μπορούν να δοκιμάσουν τις αναδυόμενες τεχνικές και να επωφεληθούν από πιο ευέλικτες προσεγγίσεις. Προς το σκοπό αυτό, ένα Κέντρο Καινοτομίας για Βιομηχανικό Μετασχηματισμό και Εκπομπές θα βοηθήσει τη βιομηχανία να εντοπίσει λύσεις για τον έλεγχο της ρύπανσης, ενώ έως το 2030 ή το 2034, οι φορείς εκμετάλλευσης θα πρέπει να αναπτύξουν σχέδια μετασχηματισμού για τις υφιστάμενες εγκαταστάσεις. Έτσι θα επιτευχθούν οι στόχοι της ΕΕ για μηδενική ρύπανση έως το 2050, κυκλική οικονομία και απεξάρτηση από τον άνθρακα.

Σύμφωνα με όσα προβλέπονται, οι νέες βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν δεσμευτικά επίπεδα επιδόσεων όσον αφορά τη χρήση των πόρων ενώ προτείνεται να αναβαθμιστεί το υφιστάμενο σύστημα περιβαλλοντικής διαχείρισης ώστε να μειωθεί η χρήση τοξικών χημικών ουσιών.

Για τη μείωση των ρύπων, προβλέπονται συνέργειες μεταξύ της απορρύπανσης και της απανθρακοποίησης και σε αυτή τη λογική, η ενεργειακή απόδοση θα αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των αδειών και θα εξετάζονται σε συστηματική βάση οι τεχνολογικές και επενδυτικές συνέργειες μεταξύ της απανθρακοποίησης και της απορρύπανσης κατά τον καθορισμό των βέλτιστων διαθέσιμων τεχνικών.

«Οι επικαιροποιημένοι κανόνες θα καθοδηγήσουν τις βιομηχανικές επενδύσεις που απαιτούνται για τη μετατροπή της Ευρώπης σε μια ανταγωνιστική, κλιματικά ουδέτερη οικονομία, μηδενικής ρύπανσης έως το 2050. Αυτοί οι κανόνες στοχεύουν στην προώθηση της καινοτομίας, στην επιβράβευση των πρωτοπόρων και στη διασφάλιση ίσων συνθηκών ανταγωνισμού στην αγορά της ΕΕ. Η αναθεώρηση θα συμβάλει στη μακροπρόθεσμη επενδυτική βεβαιότητα, με τις πρώτες νέες υποχρεώσεις για τον κλάδο να αναμένονται στο δεύτερο μισό της δεκαετίας», σημειώνει η σχετική ανακοίνωση της Ε.Ε στον επίσημο ιστότοπό της ([climate.ec.europa.eu/2050 long-term strategy](https://climate.ec.europa.eu/2050-long-term-strategy)).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ

Σύμφωνα με τους Zeitz R. (1997) και Harrell G. (2002), για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής ατμού ή ζεστού νερού, οι ιδιοκτήτες και οι χειριστές λεβήτων ενδιαφέρονται πολύ να εξάγουν όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια γίνεται από το καύσιμο. Εκτός από τη μείωση του κόστους των καυσίμων, η αποδοτική χρήση ενέργειας είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης των εκπομπών. Όταν καίγεται λιγότερο καύσιμο για την παραγωγή μιας δεδομένης ποσότητας ατμού ή ζεστού νερού, οι εκπομπές μειώνονται. Επομένως, η επίτευξη υψηλής απόδοσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιλογή ενός λέβητα χαμηλών εκπομπών και του κατάλληλου εξοπλισμού καύσης. Ωστόσο, πολλές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη μείωση των εκπομπών έχουν κάποιο τίμημα, είτε ως προς τον αντίκτυπο στην απόδοση του συστήματος είτε ως προς το αυξημένο λειτουργικό κόστος.

Σύμφωνα με τον Harrell G. (2002) η έννοια του όρου της αποδοτικότητας μπορεί μερικές φορές να προκαλεί σύγχυση, επειδή υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να ποσοτικοποιηθεί. Κατά τον προσδιορισμό της απόδοσης, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη όλες οι μορφές απώλειας θερμότητας. Η απώλεια θερμότητας σε αυτό το πλαίσιο είναι ενέργεια που δεν μεταφέρεται στο νερό για να αυξήσει το ενεργειακό του περιεχόμενο αλλά χάνεται ή εξαερίζεται από το σύστημα. Ο στόχος είναι να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του συστήματος για να αυξηθεί η λειτουργική ευελιξία και να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος στο συνολικό σύστημα.

Όταν εξετάζονται όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός λέβητα, θα παρατηρήσουμε για αυτήν ότι δεν είναι σταθερή σε όλο το εύρος λειτουργίας του λέβητα. Η μέγιστη απόδοση εμφανίζεται γενικά σε μια συγκεκριμένη τιμή εξόδου του ατμού του λέβητα. Λειτουργίες που αποκλίνουν από αυτή την τιμή εξόδου συχνά καταλήγουν σε απόδοση που είναι κάπως χαμηλότερη από τη μέγιστη απόδοση.

Η συνεχής λειτουργία σε μέγιστη απόδοση είναι συχνά ανέφικτη λόγω διακυμάνσεων φορτίου ή εποχιακών απαιτήσεων, αλλά η λειτουργία με σταθερό φορτίο και η αποφυγή κυκλικής ή ενεργοποίησης λειτουργίας μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση. Ωστόσο, η λειτουργία άναμμα-κλείσιμο (on-off) μπορεί να μειώσει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας, ανάλογα με τις απαιτήσεις εξόδου.

Ενώ κάθε διάταξη λέβητα και καυστήρα έχει διαφορετική απόδοση, είναι δυνατό να υπάρξουν διακυμάνσεις στην απόδοση με βάση το φορτίο του λέβητα. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι η απώλεια απόδοσης μπορεί να ποικίλλει έως και 10% όταν οι λειτουργίες αλλάζουν από τη μέγιστη συνεχή βαθμολογία MCR (maximum continuous rating) σε μειωμένη απόδοση του λέβητα (30 έως 40% της χωρητικότητας). Το κλειδί για την αυξημένη απόδοση περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση όλων των μορφών καύσης και απωλειών σε έναν λέβητα. Επιπλέον, η συνολική απόδοση του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί με προσοχή στην εφαρμογή και τις χρήσεις του ατμού ή του ζεστού νερού που παράγονται από τον λέβητα. Η βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος σημαίνει ότι χρησιμοποιείται λιγότερο καύσιμο για την εκτέλεση ολόκληρης της διαδικασίας, γεγονός που με τη σειρά του οδηγεί σε χαμηλότερες συνολικές εκπομπές.

4.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ

Η απόδοση καύσης είναι ένα μέτρο της χημικής ενέργειας που διατίθεται στο καύσιμο που απελευθερώνεται από τη διαδικασία καύσης.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός της απόδοσης καύσης περιλαμβάνει τον προσδιορισμό:

- απώλειες από άκαυστο άνθρακα στα καυσαέρια (CO)
- απώλειες από άκαυστο άνθρακα στο στερεό υπόλειμμα (στάχτη κάτω μέρος και ιπτάμενη τέφρα)
- απώλειες από άκαυστους υδρογονάνθρακες (UHCs) στα καυσαέρια

Στην απλούστερη μορφή της, η απόδοση καύσης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{Απόδοση καύσης} = 100 - (\text{άκαυτα καύσιμα} - \text{απώλειες καυσίμων}) \\ \text{Εξίσωση 4.1 Απόδοση καύσης}$$

Υπό τέλειες συνθήκες καύσης, μπορεί να συμβούν τα ακόλουθα φαινόμενα:

- Ο άνθρακας στα καύσιμα υδρογονανθράκων να συνδυάζεται με το οξυγόνο στον αέρα καύσης για να σχηματίσει CO₂.
- Το υδρογόνο στο καύσιμο να συνδυάζεται με το οξυγόνο στον αέρα καύσης για να σχηματίσει υδρατμούς.

Η επίτευξη πλήρους καύσης απαιτεί ακριβή αναλογία του μείγματος καυσίμου-αέρα. Η ατελής καύση λόγω ανισορροπίας στην αναλογία καυσίμου-αέρα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική απώλεια ενέργειας που μεταφράζεται σε μειωμένη απόδοση καύσης στον λέβητα.

Όταν υπάρχει ανεπαρκής αέρας καύσης για την πλήρη καύση καυσίμου, ένα μέρος του άνθρακα παραμένει άκαυστο. Η ατελής καύση μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό CO και σωματιδίων PM, γνωστά και ως αιθάλη. Εάν δεν διατίθεται πρόσθετος αέρας για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της καύσης, χάνονται με δύο μορφές ενέργειας. Η θερμότητα χάνεται από το σύστημα καθώς το ζεστό καυσαέριο CO ή τα σωματίδια αιθάλης εγκαταλείπουν την καμινάδα και δεύτερον δεν έχει εξαχθεί όλη η ενέργεια από τον άκαυστο ή από τον μερικώς καμένο άνθρακα.

Ο αέρας που τροφοδοτείται σε ένα λέβητα πέραν αυτού που απαιτείται για την πλήρη καύση του καυσίμου (υπερβολικός αέρας πέρα από τις στοιχειομετρικές συνθήκες) είναι επίσης επιζήμιος για την απόδοση του. Η μείωση της απόδοσης προκύπτει από την είσοδο υπερβολικού αέρα στο λέβητα με θερμοκρασία περιβάλλοντος και την έξοδο από το σύστημα στη θερμοκρασία καμινάδας.

4.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΕΒΗΤΑ

Η απόδοση του λέβητα είναι συνάρτηση των απωλειών του λέβητα και των απωλειών της καύσης. Μπορεί να χαρακτηριστεί ως η ποσότητα θερμότητας που δεσμεύεται από τον λέβητα και μεταφέρεται στο νερό, διαιρούμενη με τη θερμότητα που εισήχθη.

Η θερμότητα που δεν μεταφέρθηκε στο νερό εκδηλώνεται σε μια σειρά απωλειών που περιλαμβάνουν:

- Απώλειες καυσαερίων
- Απώλειες ακτινοβολίας θερμότητας
- Απώλειες στρατσώνας
- Ανεξέλεγκτες απώλειες

Οι απώλειες καυσαερίων είναι συχνά μια από τις κύριες αιτίες για τη μειωμένη απόδοση του λέβητα. Η ενέργεια χάνεται κάθε φορά που θερμαινόμενα καυσαέρια διοχετεύονται από το λέβητα προς την καμινάδα. Η θερμοκρασία των καυσαερίων σχετίζεται με το φορτίο του λέβητα. Γενικά, όσο αυξάνεται το φορτίο του λέβητα, αυξάνεται και η θερμοκρασία των καυσαερίων. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες καυσαερίων όμως αυξάνουν τις απώλειες καυσαερίων. Η εγκατάσταση ενός εξοπλισμού όπως ένας οικονομητήρας (economizer), για την ανάκτηση μέρους αυτής της θερμότητας μπορεί να έχει ευεργετική επίδραση στην απόδοση, αλλά η αφαίρεση υπερβολικής θερμότητας (φτάνοντας σε σημείο δρόσου) μπορεί να προκαλέσει προβλήματα όπως ακόμα και διάβρωση, ειδικά όταν το νερό συμπυκνώνεται στον εξοπλισμό του λέβητα. Διάβρωση στα εσωτερικά εξαρτήματα του λέβητα που κατασκευάζονται από ορισμένους τύπους χάλυβα, όπως τον ανθρακούχο χάλυβα, μπορεί να συμβεί σε θέσεις όπου το νερό συμπυκνώνεται και συνδυάζεται με άλλα συστατικά από τα καυσαέρια και να σχηματίσει οξέα. Μερικές φορές απαιτείται χρήση ανοξειδωτού χάλυβα ή άλλων κραμάτων για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων διάβρωσης. Για τα περισσότερα συστήματα λεβήτων, υπάρχει ένα πρακτικό όριο που υπαγορεύει την ελάχιστη θερμοκρασία καυσαερίων.

Ο αέρας που υπερβαίνει αυτόν που απαιτείται για την πλήρη καύση του καυσίμου αντιπροσωπεύει μια σημαντική απώλεια καυσαερίων. Επειδή το καύσιμο παρέχει ενέργεια που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του πλεονάζοντος αέρα, ο έλεγχος της ποσότητας αέρα που παρέχεται σε έναν λέβητα έχει άμεσο αντίκτυπο στην απόδοση του λέβητα. Η απώλεια είναι συνάρτηση της ποσότητας του πλεονάζοντος αέρα που διέρχεται από το λέβητα και της θερμοκρασίας του πλεονάζοντος αέρα που απορρίπτεται από την καμινάδα. Η ενέργεια που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του πλεονάζοντος αέρα σπαταλάτε επειδή δεν χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του νερού. Εάν η περιεκτικότητα σε υγρασία/υδρατμούς της περίσσειας αέρα είναι υψηλή, απαιτείται ακόμη περισσότερη ενέργεια για την θέρμανση και αυτών των υδρατμών. Αν και η καύση οποιουδήποτε καυσίμου οδηγεί σε κάποιο βαθμό απώλειας καυσαερίων, τα στερεά καύσιμα απαιτούν περισσότερη περίσσεια αέρα για την πλήρη καύση από ότι χρειάζονται τα αέρια καύσιμα.

Αν και η καύση με ανεπαρκή αέρα μειώνει την απόδοση της καύσης, είναι μια πολύ αποτελεσματική τεχνική για τη μείωση του σχηματισμού των NOx. Μια χαμηλότερη θερμοκρασία φλόγας που σχετίζεται με την ατελή καύση μειώνει την ποσότητα των θερμικών NOx που σχηματίζεται. Η επιλογή ενός λέβητα χαμηλών εκπομπών και ενός εξοπλισμού καύσης απαιτεί συχνά έναν συμβιβασμό μεταξύ της απόδοσης και του σχηματισμού των NOx. Για μεγαλύτερη απόδοση, ένας λέβητας θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος με έναν κατάλληλο εξοπλισμό καύσης, συμπεριλαμβανομένου ενός συστήματος ελέγχου που να είναι ικανό να ρυθμίζει το μείγμα καυσίμου-αέρα έτσι ώστε να παράγεται λίγο ή καθόλου CO και αιθάλη. Ο

πρόσθετος αέρας που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας καύσης παρέχεται μερικές φορές σταδιακά. Η σταδιακή καύση είναι μια τεχνική ελέγχου NOx που βασίζεται στο γεγονός ότι η καύση είτε σε πολύ χαμηλά είτε σε πολύ υψηλά επίπεδα περισσειας αέρα έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο σχηματισμό NOx. Με την ανάμειξη αέρα και καυσίμου σε δύο ή περισσότερες θέσεις μέσα σε ένα λέβητα, είναι δυνατό να δημιουργηθούν ζώνες με υψηλά και χαμηλά επίπεδα περισσειας αέρα. Ο αέρας που εγχέεται σε ένα λέβητα σε διαφορετικά σημεία ή στάδια της διαδικασίας καύσης είναι γνωστός ως σταδιακός αέρας καύσης SCA (staged combustion air). Οι τεχνικές ελέγχου NOx που βασίζονται σε αυτή την ιδέα περιγράφονται σε επόμενο κεφάλαιο. Νέοι λέβητες με εξοπλισμό καύσης που είναι καλά σχεδιασμένοι είναι ικανοί να επιτύχουν τόσο υψηλή απόδοση όσο και χαμηλό σχηματισμό NOx. Ωστόσο, για τους υπάρχοντες λέβητες, οι αλλαγές στο προφίλ καύσης μπορεί να αλλάξουν το προφίλ απορρόφησης, το προφίλ θερμοκρασίας και την καύση του άνθρακα, επηρεάζοντας έτσι την απόδοση τους.

Η αντίδραση των ατόμων υδρογόνου στο καύσιμο με τα μόρια του οξυγόνου στον αέρα παράγει θερμότητα και υδρατμούς. Όταν οι υδρατμοί εγκαταλείπουν την καμινάδα, μειώνεται η διαθέσιμη ενέργεια απομακρύνοντας τη σχετική λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης. Η μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων ως μέσο μείωσης της απώλειας της θερμότητας είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα διάβρωσης. Επειδή το φυσικό αέριο έχει σχετικά υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο σε σύγκριση με τον άνθρακα, αυτή η μορφή απώλειας θερμότητας είναι μεγαλύτερη για λέβητες με καύση φυσικού αερίου από ότι για λέβητες με καύση άνθρακα συγκρίσιμου μεγέθους.

Η υγρασία στα καύσιμα αντιπροσωπεύει μια άλλη μορφή απώλειας θερμότητας. Όπως το φαινόμενο παραπάνω, οι υδρατμοί που εξέρχονται από την καμινάδα μειώνουν τη διαθέσιμη ενέργεια απομακρύνοντας τη σχετική λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης. Καθώς οι υδρατμοί από το καύσιμο υπερθερμαίνονται, υπάρχει μια πρόσθετη απώλεια θερμότητας. Η σπατάλη ενέργειας αυτής της μορφής απώλειας θερμότητας μπορεί να είναι σημαντική για τα στερεά καύσιμα, αλλά τείνει να είναι μικρότερη για τα αέρια καύσιμα, τα οποία συνήθως έχουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία.

Η απώλεια θερμότητας ακτινοβολίας αποτελείται από απώλειες θερμότητας λόγω της ακτινοβολίας και μεταφοράς από τις εξωτερικές επιφάνειες ενός λέβητα, οι οποίες είναι συνήθως πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτές οι απώλειες δεν ποικίλλουν σημαντικά σε μέγεθος με το φορτίο του λέβητα επειδή η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του λέβητα παραμένει ουσιαστικά σταθερή κατά τη λειτουργία. Ωστόσο, αυτές οι απώλειες ως ποσοστό της απόδοσης του λέβητα χειροτερεύουν κάθε φορά που το φορτίο μειώνεται. Δύο τρόποι για τη μείωση της απώλειας ακτινοβολίας θερμότητας περιλαμβάνουν την προσθήκη θερμομόνωσης στις εξωτερικές επιφάνειες του λέβητα και τη λειτουργία του λέβητα στη χαμηλότερη θερμοκρασία σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή του λέβητα.

Η συσσώρευση διαλυτών αλάτων και η συσσώρευση άλλων στερεών στις διόδους νερού ενός λέβητα μπορεί να εμποδίσει τη μεταφορά θερμότητας και τελικά να περιορίσει τη ροή μέσω αυτών. Η χρήση χημικών ουσιών που εμποδίζουν την εναπόθεση και τις τακτικές απομαστεύσεις (στρατσώνα) μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο αυτού του προβλήματος, αλλά για το ζεστό νερό και τα στερεά σωματίδια που εκκενώνονται κατά τη διάρκεια μιας απομάστευσης αποτελούν σπατάλη ενέργειας. Η εγκατάσταση ενός συστήματος ανάκτησης

θερμότητας μπορεί να μειώσει τις απώλειες του λέβητα λόγω συνεχόμενης στρατσώνας. Με τη χρήση χημικών ουσιών για τον έλεγχο της εναπόθεσης, μπορεί να είναι δυνατό να μειωθεί και ο ρυθμός απομάστευσης. Ο εξοπλισμός ανάκτησης θερμότητας είναι συνήθως οικονομικά αποδοτικός μόνο για συστήματα που χρησιμοποιούν συνεχή απομάστευση (continuous blowdown) και όχι διακοπτόμενη απομάστευση (intermittent blowdown). Η μέγιστη συνεχόμενη ροή απομάστευσης για τον λέβητα είναι 5% μεγαλύτερη από τη μέγιστη παραγωγή ατμού και ελέγχεται μέσω της χημικής ανάλυσης του νερού του λέβητα (αγωγιμότητας).

Μια σχετικά μικρή αλλά σημαντική μορφή απώλειας θερμότητας χαρακτηρίζεται ως ανεξέλεγκτη απώλεια. Αυτές του τύπου οι απώλειες δεν σχετίζονται με τη διαδικασία της καύσης αλλά σχετίζονται με κυκλικές και όχι συνεχείς λειτουργίες του λέβητα. Περιλαμβάνουν απώλειες πριν την εκκαθάριση (pre-purge losses) και μετά την εκκαθάριση (post-purge losses), απώλειες φυσικού παρασυρμού (natural draft losses) και απώλειες κελύφους εκτός σύνδεσης (off-line shell losses). Οι απώλειες που δημιουργούνται πριν και μετά την εκκαθάριση του λέβητα συνεπάγονται από τον εξαναγκασμό του αέρα για την απομάκρυνση των άκαυτων υλικών πριν από την εκκίνηση και μετά την απενεργοποίηση του λέβητα. Όταν εκτελείται αυτή η λειτουργία, ο αέρας που ρέει αφαιρεί κάποια θερμική ενέργεια από τον λέβητα. Παρόμοια με τις απώλειες καθαρισμού, οι απώλειες φυσικού παρασυρμού (natural draft) συμβαίνει όταν ο λέβητας είναι κλειστός και ο αέρας κυκλοφορεί φυσικά μέσα από αυτόν. Οι απώλειες κελύφους εκτός σύνδεσης (off-line shell losses) είναι απώλειες θερμότητας ακτινοβολίας που συμβαίνουν μετά την απενεργοποίηση του λέβητα. Οι φλογοαυλωτοί λέβητες συνήθως έχουν πολύ μικρότερες απώλειες κελύφους εκτός σύνδεσης σε σχέση με συγκρίσιμοι μεγέθους υδραυλωτούς λέβητες, επειδή η θερμοκρασία του κελύφους σε έναν φλογοαυλωτό λέβητα είναι περισσότερο συνάρτηση της θερμοκρασίας του νερού παρά της θερμοκρασίας του αερίου καύσης.

Τα συστήματα θέρμανσης για τα εμπορικά κτίρια παρουσιάζουν συνήθως ένα ευρύ φάσμα απαιτήσεων θέρμανσης ειδικά κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάγκης θέρμανσης. Για να ελαχιστοποιηθούν οι ανεξέλεγκτες απώλειες θερμότητας που σχετίζονται με την κυκλική λειτουργία, μπορεί να υπάρχουν πλεονεκτήματα στην επιλογή πολλαπλών λεβήτων αντί για έναν ή δύο μεγάλους λέβητες. Σε αυτή την προσέγγιση, τουλάχιστον μερικές από τις μικρότερες μονάδες λειτουργούν περισσότερο ή λιγότερο συνεχώς.

4.3 ΟΙΚΟΝΟΜΗΤΗΡΑΣ (ECONOMIZER) / ΘΕΡΜΑΝΤΗΡΑΣ ΑΕΡΑ (PREHEATER)

Η επιλογή λέβητα χαμηλών εκπομπών και εξοπλισμός καύσης δεν θα πρέπει να οριστικοποιηθεί έως ότου αξιολογηθεί και κατανοηθεί η απόδοση του πλήρους συστήματος. Εκτός από τα εξαρτήματα καύσης και ελέγχου εκπομπών, είναι συχνά απαραίτητο να συμπεριληφθούν στο σύστημα και άλλοι εξοπλισμοί όπως οι εξοικονομητές / οικονομητήρες και οι θερμαντήρες αέρα. Αυτοί οι εξοπλισμοί έχουν σχεδιαστεί για να ανακτούν την υπολειπόμενη χαμηλής θερμοκρασίας ενέργεια από τα καυσαέρια. Αυτές απαιτούνται για τη βελτίωση της συνολικής θερμικής απόδοσης του λέβητα.

Αποτελώντας βασικά μέρη ενός πλήρους συστήματος μονάδας παραγωγής ατμού, εγκαθίστανται για να εξοικονομούν όσο το δυνατόν περισσότερη θερμότητα καύσης καυσίμου

στον κλίβανο του λέβητα και να αυξάνουν τη χωρητικότητα ενός λέβητα ή να μειώνουν το μέγεθος ενός μελλοντικού λέβητα για μια καθορισμένη απόδοση. Δηλαδή, η θεμελιώδης βάση της εγκατάστασής τους είναι η μείωση του κόστους παραγωγής ατμού.

Η χρήση και η διάταξη των θερμαντήρων και των οικονομητήρων εξαρτάται από παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά του καυσίμου, την διαδικασία καύσης, την πίεση λειτουργίας του λέβητα, τον κύκλο ισχύος του λέβητα και το συνολικό κόστος.

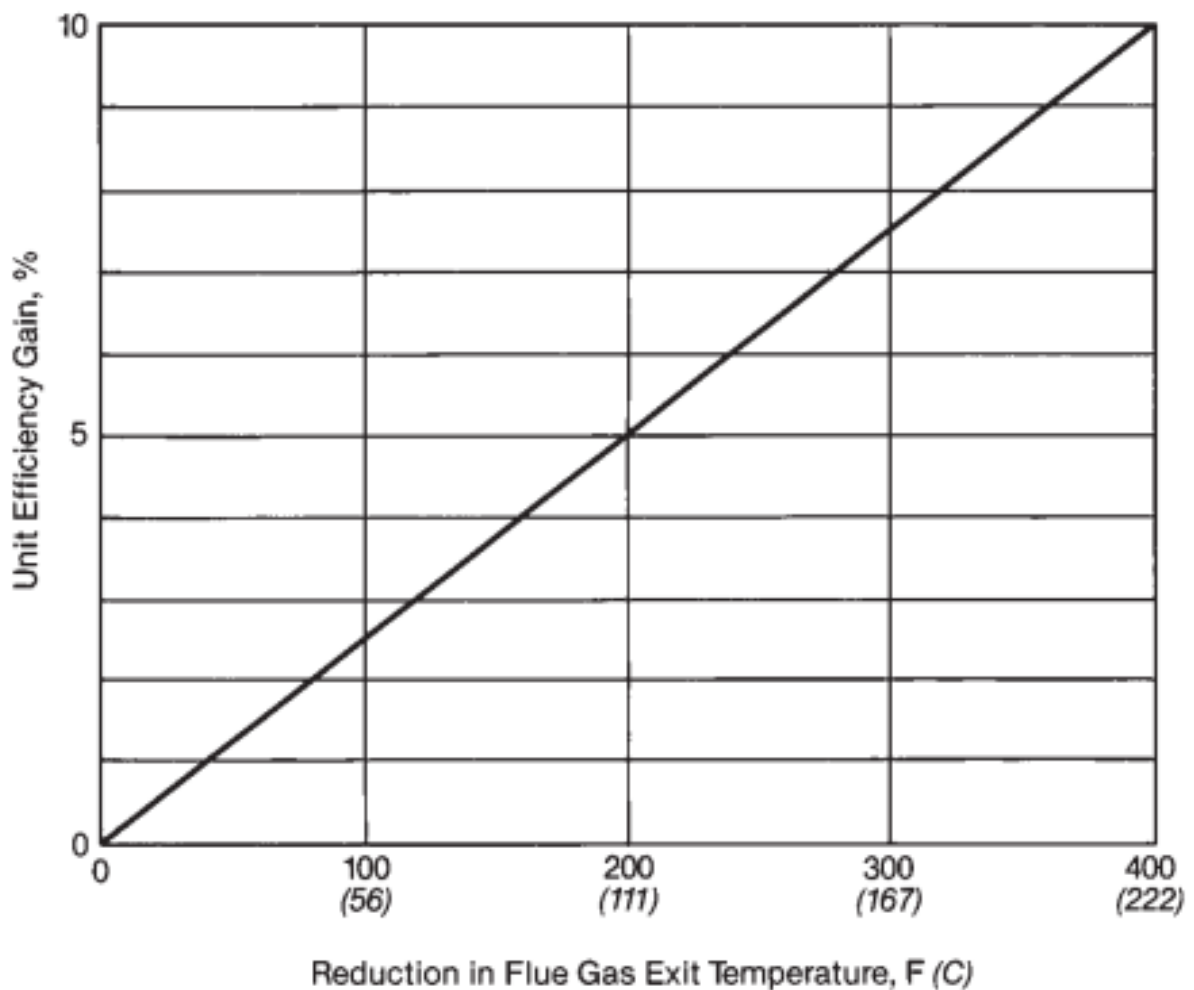
Η διάταξη του εξοικονομητή και θερμαντήρα είναι τέτοια, ώστε η θερμοκρασία των καυσαερίων να είναι μεγαλύτερη από το σημείο δρόσου του θειικού οξέος (H_2SO_4), για να μην υπάρχει υγροποίησή του και να αποφευχθεί η διάβρωση.

Για να λειτουργούν ικανοποιητικά, όλα τα επιλεγμένα εξαρτήματα όχι μόνο πρέπει να ταιριάζουν μεταξύ τους, αλλά και παρέχουν επίσης τα απαιτούμενα επίπεδα μείωσης των εκπομπών χωρίς να επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του λέβητα.

Αν αντί να εγκατασταθεί αυτός ο εξοπλισμός ανάκτησης θερμότητας, αφηθεί να λάβει χώρα ολόκληρη η πτώση θερμοκρασίας των καυσαερίων στις επιφάνειες του λέβητα, δεν θα ήταν οικονομικό, θα αύξανε το κόστος παραγωγής ατμού και θα μείωνε την απόδοση του λέβητα.

Η θερμοκρασία των καυσαερίων αφήνεται να πέσει σε ένα επίπεδο στο οποίο γίνεται πιο οικονομικό ώστε να σταματήσει η απορρόφηση θερμότητας μέσω των επιφανειών του λέβητα σε θερμοκρασία κορεσμού και να ξεκινήσει αυτή η απορρόφηση θερμότητας σε ένα μεταγενέστερο σημείο κατάντη, δηλαδή έναν εξοικονομητή ή έναν θερμαντήρα αέρα που λειτουργεί σύμφωνα με το νόμο της φθίνουσας απόδοσης. Δεδομένου ότι υπάρχει πάντα μια πιο οικονομική θερμοκρασία καυσαερίων πάνω και κάτω από την οποία αυξάνεται το κόστος παραγωγής ατμού, η υπερβολική μείωση της θερμοκρασίας εισερχόμενων αερίων εντός του λέβητα θα αυξήσει την επένδυση κεφαλαίου καθώς και τις πάγιες χρεώσεις που θα μειώσουν οποιοδήποτε κέρδος στην απόδοση.

Έχει φανεί στην πράξη ότι η αύξηση σε ποσοστό 1% της αποδοτικότητας του λέβητα επιτυγχάνεται για κάθε μείωση $22^{\circ}C$ στη θερμοκρασία των καυσαερίων στον εξοπλισμό ανάκτησης θερμότητας (ο υπολογισμός βασίζεται στον άνθρακα με θερμογόνο δύναμη 7222 kcal/kg και απόδοση CO_2 13%), σύμφωνα με τους Stultz S. και Kitto J. (1992).



Σχήμα 4.1 Κατά προσέγγιση αύξηση της απόδοσης λόγω εξοικονομητή και θερμαντήρα αέρα σε συμβατικούς λέβητες. Πηγή: Stultz S. και Kitto J. (1992).

Εξάλλου, όταν αυτά τοποθετηθούν, η συνολική απόδοση του λέβητα αυξάνεται κατά 3-5%. Μόνο με την ενσωμάτωση οικονομητήρων και θερμαντήρων αέρα κατέστη δυνατό να μειωθεί η θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο της καμινάδας στους 150°C (ή ακόμα χαμηλότερα) και έτσι να επιτευχθεί απόδοση του λέβητα έως και 88- 90%.

Τα μειονεκτήματα τους είναι:

- 1) Χρειάζεται καλή λειτουργία και καλή συντήρηση.
- 2) Είναι ευαίσθητος στη σκόνη και τα καυσαέρια φορτωμένα με βρωμιά που μπορεί να φράξουν τους εναλλάκτες θερμότητας .
- 3) Να προκαλέσουν απώλεια ελκυσμού (draft) και επομένως οι ανεμιστήρες induced fans (Ids) να είναι απαραίτητοι, ώστε να ξεπεραστεί η αντίσταση.
- 4) Απαιτούν την παράκαμψη ενός μέρους ή του συνόλου των καυσαερίων, σε χαμηλό φορτίο, για να αποφευχθεί η διάβρωση από το σημείο δρόσου ή εγκατάσταση duct burners.
- 5) Συνεπάγονται επιπλοκές σχεδιασμού εάν απαιτείται η συντήρησή τους σε χαμηλά φορτία.

Οι οικονομητήρες (economizers) χρησιμοποιούν την ανακτώμενη ενέργεια για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας του λέβητα (BFW), ενώ οι προθερμαντήρες αέρα χρησιμοποιούν την ενέργεια από τα καυσαέρια για την προθέρμανση του αέρα καύσης. Το υψηλής πίεσης BFW τροφοδοτείται για προθέρμανση προς τον εξοικονομητή, μέσω αντλιών. Υπάρχει η δυνατότητα ένα μέρος του BFW, μέσω τρίοδης βάνας, να διέλθει από την κάτω μπουγέλα μέσα σε έναν εναλλάκτη - σερπαντίνα (coil) για μια πρώτη προθέρμανση. Στη συνέχεια, και αφού περάσει διαμέσου του εξοικονομητή, τροφοδοτεί το δοχείο ατμού υψηλής πίεσης (boiler drum), όπου εκεί ο κορεσμένος ατμός υψηλής πίεσης διαχωρίζεται από το νερό.

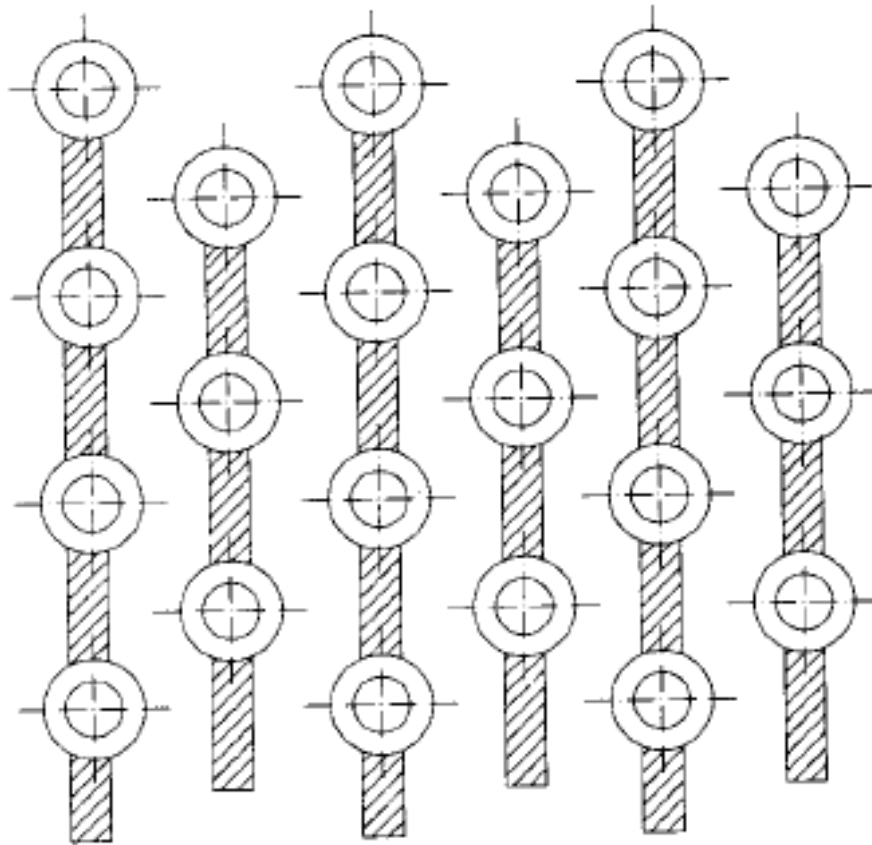
Αξιοσημείωτο εδώ είναι ότι όσο η θερμοκρασία του BFW αυξάνεται τόσο μειώνεται η απόδοση του εξοικονομητή (max 105°C, σπάνια είναι σε υψηλής πίεσης βιομηχανίες να εισέρχεται με 200°C). Η θερμοκρασία θα πρέπει να διατηρείται 10°C κάτω από την θερμοκρασία κορεσμού του νερού για να μην δημιουργηθεί ατμός μέσα στους αυλούς και έχουμε θερμική καταπόνηση και φαινόμενο σφυριού (water hammering).

Δύο τύποι οικονομητήρων που υπάρχουν είναι:

- 1) Βρασίματος (Boiling): Αυτός ο τύπος εξοικονομητή χαρακτηρίζεται με τη μετατροπή ενός μέρους (περίπου 25%) του νερού τροφοδοσίας του λέβητα (BFW) σε ατμό.
- 2) Μη βρασίματος (Non – boiling): Σε αυτόν τον τύπο εξοικονομητή το BFW θερμαίνεται σε θερμοκρασία κάτω από του κορεσμού του νερού.

Οι αυλοί του εξοικονομητή είναι είτε ίσοι είτε έχουν το σχήμα πηνίων, έχουν 20–30mm διάσταση και 2,5-3,5mm πάχος. Με αυτό το μικρό μέγεθος καταφέρνουμε να μεγιστοποιήσουμε το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και ελαχιστοποιήσουμε τον ρυθμό επικαθήσεων (fouling). Η πτώση πίεσης από τον ελκυσμό (draft) κυμαίνεται συνήθως από 60 – 75mm H₂O.

Ένα βελτιωμένο όσον αφορά την απόδοση μηχανολογικό σχέδιο είναι η χρήση των λεγόμενων μεμβρανοειδών τύπων αντί τύπου απλού σωλήνα οικονομητήρα. Αυτά αποτελούνται από απλούς σωλήνες με χαλύβδινες μεμβράνες (φύλλα χάλυβα πάχους 2-3 mm), συγκολλημένες στο ευθύγραμμο τμήμα των σωλήνων. (Σχήμα 4.2). Με αυτόν τον τρόπο έχουμε μια ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας από τα καυσαέρια, δηλαδή μεγαλύτερη απόδοση, πιο αξιόπιστία στον χειρισμό του οικονομητήρα καθώς και ότι απαιτεί λιγότερο μέταλλο για την απορρόφηση της ίδιας θερμότητας.



Σχήμα 4.2 Σωλήνες συγκολλημένοι με χαλύβδινες μεμβράνες.
Πηγή: Stultz S. και Kitto J. (1992).

Ο προθερμαντήρας του αέρα (Preheater) ενισχύει επίσης την καύση πολλών καυσίμων και είναι κρίσιμης σημασίας για την καύση του κονιοποιημένου άνθρακα για την ξήρανση του και την επακόλουθη σταθερή ανάφλεξη.

Υπάρχουν δυο είδη θερμαντήρων:

1. Θερμαντήρες αέρα ανάκτησης. Αυτοί είναι κυρίως σωληνοειδείς εναλλάκτες θερμότητας στους οποίους η θερμότητα από τα καυσαέρια ή κάποια άλλη πηγή θερμότητας μεταφέρεται συνεχώς στον ατμοσφαιρικό αέρα καθώς ο αέρας ρέει μέσω της πλευράς του κελύφους (shell side) και τα προϊόντα καύσης μέσω της πλευράς του σωλήνα (tube side).

2. Αναγεννητικοί θερμαντήρες αέρα. Είναι ένα είδος εναλλάκτη θερμότητας στον οποίο η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας θερμαίνεται και ψύχεται εναλλάξ με τα καυσαέρια και τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Ο προθερμαντήρας αέρα λειτουργεί στη ζώνη της χαμηλότερης θερμοκρασίας των προϊόντων καύσης, επομένως ένα μέρος της επιφάνειάς του κοντά στο ψυχρό άκρο (όπου η θερμοκρασία των καυσαερίων μπορεί να είναι 120-160°C) θα είναι σε θερμοκρασία ίση με το σημείο δρόσου του θεικού οξέος (140°C) που παράγεται κατά την αντίδραση του SO₃ με την περιεκτικότητα σε υγρασία στα προϊόντα καύσης. Αυτή η διαβρωτική όξινη μεμβράνη που εναποτίθεται στο ψυχρό άκρο της επιφάνειας του θερμαντήρα θα συμβάλει σε σοβαρή διάβρωση της μεταλλικής επιφάνειας. Η ίδια θερμοκρασία αποφεύγεται όπως είδαμε και στον οικονομητήρα.

Πλεονεκτήματα των προθερμαντήρων του αέρα:

1. Βελτιωμένη καύση και αποτελεσματική χρήση καυσίμου.
2. Σταθεροποιημένη ανάφλεξη καυσίμου που βελτιώνει την καύση χαμηλού φορτίου.
3. Αυξημένη ικανότητα παραγωγής ατμού και υψηλότερη απόδοση του λέβητα που αυξάνεται κατά 1% για κάθε 20°C άνοδο θερμοκρασίας του προθερμασμένου αέρα.
4. Καλύτερη χρήση από καύσιμο χαμηλής ποιότητας, υψηλής τέφρας.
5. Υψηλότερη θερμική απόδοση καθώς ανακτάται το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας από τα προϊόντα καύσης.
6. Μεγαλύτερη ευελιξία φορτίου.
7. Μείωση της επιφάνειας θέρμανσης του λέβητα λόγω αύξησης της συνολικής απόδοσης του λέβητα λόγω βελτιωμένης καύσης.
8. Όσο μεγαλύτερη είναι η προθέρμανση, τόσο χαμηλότερο το τριοξειδίο του θείου SO₃ στα καυσαέρια και επομένως η θερμοκρασία εξόδου της καμινάδας μπορεί να μειωθεί οπότε θα έχουμε μεγαλύτερη χρήση θερμότητας.
9. Η προθέρμανση του αέρα εξασφαλίζει την πλήρη καύση του καυσίμου με αποτέλεσμα λιγότερες επικαθήσεις και καθαρότερα καυσαέρια και αυτό μειώνει τη διακοπή λειτουργίας του λέβητα για καθαρισμό.

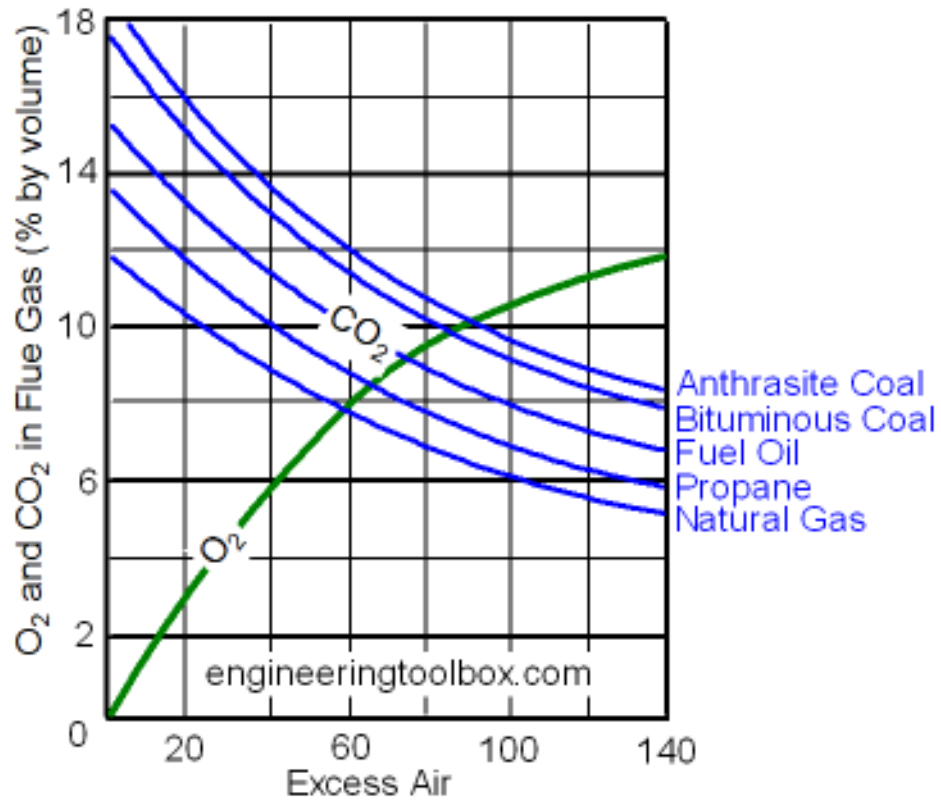
Μειονεκτήματα των προθερμαντήρων του αέρα:

1. Αυξάνει το κόστος συντήρησης του λέβητα.
2. Ενέχει τον κίνδυνο σοβαρής ζημιάς λόγω εναπόθεσης και ανάφλεξης καυσίμων.
3. Η λειτουργία ολόκληρης της μονάδας παραγωγής ατμού μπορεί να παρεμποδιστεί σοβαρά λόγω απόφραξης.
4. Απαιτεί ανεμιστήρες ελκυσμού (forced ή induced fans) και αγωγούς για διέλευση των καυσαερίων και αυτό χρειάζεται προσεκτικό υπολογισμό στον σχεδιασμό για απώλεια παρασυρμού draft.
6. Η διαρροή είναι δύσκολο να εντοπιστεί έως ότου η διάβρωση βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο που απαιτεί σημαντική επισκευή ή ολική αντικατάσταση και μεγαλύτερο χρόνο διακοπής λειτουργίας.

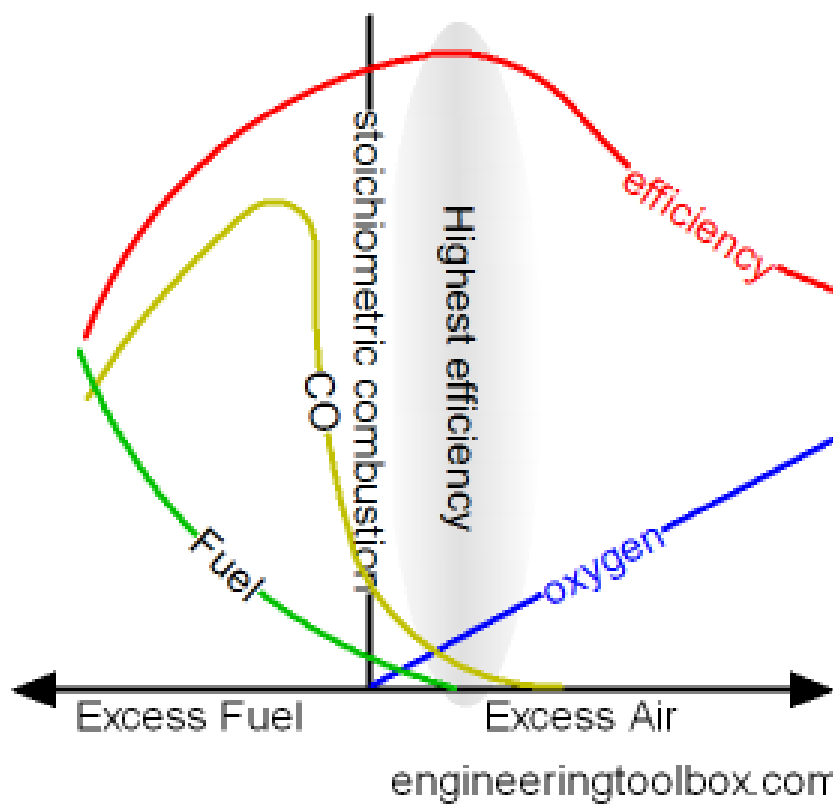
4.4 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Το κλειδί για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης της καύσης (και την ελαχιστοποίηση της μείωσης του άνθρακα) είναι να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα περίσσειας οξυγόνου λειτουργώντας όσο το δυνατόν πιο κοντά στη στοιχειομετρική καύση (0% οξυγόνο στον καπναγωγό) διατηρώντας παράλληλα ελάχιστο το CO. Η περίσσεια οξυγόνου εξαρτάται εν μέρει από τον τύπο καυσίμου που θα καταναλωθεί, αλλά γενικά βασίζεται στην ικανότητα ακριβούς ανάμειξης καυσίμου και αέρα. Σε συνδυασμό με αξονική ροή αέρα, ο έλεγχος της σχέσης αέρα/καυσίμου μπορεί να επιτευχθεί για να διατηρηθούν τα βέλτιστα επίπεδα οξυγόνου σε όλη την αναλογία πλήρους γκαζιού με επίπεδα O₂ κάτω από 2,5% υψηλή καύση και 4% χαμηλή καύση στο εύρος 10:1.

Τα παρακάτω γραφήματα στα σχήματα 4.3 και 4.4 δείχνουν τη σχέση μεταξύ της αύξησης της περίσσειας οξυγόνου και της μείωσης της αποδοτικότητας αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3 Σύγκριση καυσαερίων καυσίμων με την αύξηση της περίσσειας οξυγόνου.



Σχήμα 4.4 Σύγκριση αποδοτικότητας, κατανάλωσης καυσίμου, καυσαερίου CO με την αύξηση της περίσσειας οξυγόνου.

Σύμφωνα με τον ορισμό του δείκτη αξιολόγησης απόδοσης, με τις παρακάτω εξισώσεις υπολογίζεται ο δείκτης βαθμολογίας απόδοσης διαφόρων διαδικασιών ελέγχου καύσης λέβητα και η αναλογία εξάτμισης του λέβητα.

$$\text{Boiler Efficiency, } \eta = \frac{\text{Heat output}}{\text{Heat Input}} \times 100$$

$$= \frac{\text{Heat in steam output (kCals)}}{\text{Heat in Fuel Input (kCals)}} \times 100$$

Εξίσωση 4.2 Απόδοση Λέβητα

$$\text{Evaporation Ratio} = \frac{\text{Quantity of Steam Generation}}{\text{Quantity of fuel Consumption}}$$

Εξίσωση 4.3 Αναλογία εξάτμισης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΑΕΡΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Ο έλεγχος των εκπομπών NO_x, SO₂, CO και PM από λέβητες είναι απαραίτητος για τη συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Οι τεχνικές που είναι αποτελεσματικές για τη μείωση ή την εξάλειψη αυτών των εκπομπών μπορούν να υποδιαιρεθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες ανάλογα με το στάδιο της διαδικασίας καύσης που εφαρμόζονται. Οι κατηγορίες περιλαμβάνουν τεχνικές ελέγχου εκπομπών πριν την καύση, κατά την διάρκεια της καύσης και μετά την καύση.

Όταν ο άνθρακας ξεπλένεται ή το αργό πετρέλαιο εξευγενίζεται, τα φορτωμένα με θείο σωματίδια και τα υλικά που φέρουν τέφρα αφαιρούνται, καθιστώντας έτσι το καύσιμο πιο επιθυμητό για εφαρμογές όπου απαιτούνται χαμηλότερες εκπομπές. Αυτές οι μέθοδοι επεξεργασίας καυσίμου είναι πολύ αποτελεσματικές τεχνικές ελέγχου των εκπομπών πριν από την καύση. Ο έλεγχος της ποσότητας NO_x και SO₂ που σχηματίζονται κατά την καύση είναι επίσης μια αποτελεσματική τεχνική για τη μείωση των εκπομπών. Αν και οι έλεγχοι επεξεργασίας και καύσης καυσίμου διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη μείωση των εκπομπών, μερικές φορές είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν τεχνικές ελέγχου εκπομπών μετά την καύση για την απομάκρυνση των NO_x, SO₂ και PM από τα καυσαέρια. Οι κοινώς χρησιμοποιούμενες τεχνικές για την επεξεργασία του καυσίμου, τον έλεγχο της διαδικασίας καύσης και την επεξεργασία των καυσαερίων περιγράφονται στις ακόλουθες υποενότητες.

5.1 ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΚΑΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Η επιλογή καυσίμου είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την ελαχιστοποίηση των ατμοσφαιρικών εκπομπών. Το είδος και η ποσότητα των εκπομπών που πρέπει να ελέγχονται σχετίζονται άμεσα με το καύσιμο που καίγεται. Για παράδειγμα, το φυσικό αέριο είναι ένα πολύ καθαρό καύσιμο που είναι ουσιαστικά απαλλαγμένο από θείο, άκαυστα αέρια και στερεά υπολείμματα. Συχνά χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου τα πρότυπα εκπομπών είναι τα πιο αυστηρά επειδή ουσιαστικά δεν υπάρχουν εκπομπές SO₂ ή PM που σχετίζονται με την καύση φυσικού αερίου. Το απόσταγμα και τα υπολειμματικά έλαια (distillate και residual oils) είναι επίσης καλές επιλογές καυσίμου, αν και η καύση τους συνήθως παράγει ορισμένες εκπομπές NO_x, SO₂ και PM. Ανάλογα με την ποιότητα, τα υπολειμματικά έλαια έχουν γενικά υψηλότερη περιεκτικότητα σε άζωτο, θείο και τέφρα από τα αποσταγμένα έλαια. Από την άποψη των εκπομπών, ο άνθρακας είναι το λιγότερο επιθυμητό από όλα τα ορυκτά καύσιμα, επειδή μπορεί να περιέχει σημαντικές ποσότητες αζώτου, θείου και τέφρας. Τα μη ορυκτά καύσιμα όπως η βιομάζα, το RDF και η λάσπη χαρτοποιίας είναι κάπως καθαρότερα καύσιμα που συνήθως έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο αλλά υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα.

Για ορισμένους τύπους καυσίμων, είναι δυνατό να περιοριστεί η ποσότητα των εκπομπών που απελευθερώνονται κατά την καύση του καυσίμου χρησιμοποιώντας τεχνικές ελέγχου των εκπομπών πριν από την καύση. Δύο κοινά χρησιμοποιούμενες τεχνικές περιλαμβάνουν την αλλαγή καυσίμου και τον εμπλουτισμό ή την προετοιμασία. Και οι δύο αυτές τεχνικές συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.1 και συζητούνται παρακάτω.

Emission	Control technique	Description
NO _x	Switch to fuel with a low-nitrogen content	Removing nitrogen from fuel prior to combustion is generally not practical, but switching to fuel with a low-nitrogen content is an effective technique for reducing NO _x emissions. The level of nitrogen in natural gas is generally low, and fuel oil typically has a lower nitrogen content than coal.
SO ₂	Switch to fuel with a low-sulfur content	Switching from high- to low-sulfur fuel is an effective technique for reducing SO ₂ emissions.
	Perform beneficiation	Cleaning solid fuel such as coal by mechanical, chemical, or other means is an effective technique for maximizing the quality of the fuel. Eliminating noncombustible sulfur-bearing materials like pyrites and sulfates prior to combustion can reduce SO ₂ emissions. Refining petroleum to produce distillate oil is an effective processing technique that decreases the sulfur content of the fuel. Removing sulfur-bearing compounds prior to combustion is an effective technique for reducing SO ₂ emissions. Processing natural gas by removing hydrogen sulfide eliminates the possibility of SO ₂ emissions during combustion.
PM	Switch to fuel with a low-ash content	Switching from solid fuel such as coal, which has a high-ash content, to oil or natural gas is an effective technique for reducing PM emissions.
	Perform beneficiation	Cleaning solid fuel such as coal by mechanical, chemical, or other means is an effective technique for maximizing the quality of the fuel. Eliminating noncombustible, ash-producing materials like metals, sand, glass, and rock prior to combustion can be a very effective technique for reducing PM emissions. Refining petroleum into distillate oil is an effective processing technique that decreases the ash content of the fuel. Removing ash prior to combustion is an effective technique for reducing PM emissions.

Πίνακας 5.1 Τεχνικές για τον έλεγχο των εκπομπών πριν από την καύση. Πηγή: Clean Coal Technology (1999).

Όταν είναι εφικτό, η εναλλαγή καυσίμου είναι μια σχετικά εύκολη τεχνική ελέγχου εκπομπών. Μπορεί να είναι τόσο απλό όσο η αντικατάσταση του καυσίμου που παράγει ένα ορισμένο επίπεδο εκπομπών με ένα διαφορετικό καύσιμο που παράγει λιγότερες εκπομπές. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιείται φυσικό αέριο αντί για μαζούτ ή άνθρακα, η ανάγκη απομάκρυνσης PM και SO₂ από τα καυσαέρια εξαλείφεται και η ποσότητα NO_x που απορρίπτεται στην ατμόσφαιρα μπορεί να μειωθεί σε μεγάλο βαθμό. Όταν η καύση ενός εναλλακτικού καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα μειωμένες εκπομπές, η αλλαγή καυσίμου θεωρείται ως μια αποτελεσματική τεχνική ελέγχου των εκπομπών. Αν και η αλλαγή καυσίμου μπορεί να μειώσει τις εκπομπές, δεν είναι πάντα εφικτή. Όταν η επαρκής παροχή εναλλακτικού καυσίμου δεν είναι άμεσα διαθέσιμη, όταν οι λειτουργίες και η απόδοση του λέβητα επηρεάζονται αρνητικά ή όταν το κόστος του εναλλακτικού καυσίμου είναι απαγορευτικό, η αλλαγή καυσίμου τότε δεν είναι συνήθως μια βιώσιμη επιλογή.

Η αξιοποίηση βελτιώνει την ποιότητα του καυσίμου με τη χρήση μηχανικών, χημικών ή άλλων μέσων καθαρισμού σύμφωνα με τον Wilbur L. (1985). Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται συχνότερα για την αφαίρεση θείου και υλικών τέφρας από τον άνθρακα. Για ορισμένους τύπους άνθρακα, ο εμπλουτισμός μπορεί να μειώσει την περιεκτικότητα σε θείο έως και 50% με αντίστοιχη μείωση των εκπομπών SO₂. Ο καθαρισμός και η προετοιμασία του άνθρακα απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό για να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Ο σχεδιασμός αυτού του εξοπλισμού εκμεταλλεύεται τη διαφορά ειδικού βάρους μεταξύ των διαφόρων συστατικών άνθρακα. Για παράδειγμα, υλικά που περιέχουν θείο και τέφρα όπως ο σχιστόλιθος, ο πηλός και ο πυρίτης έχουν υψηλότερες πυκνότητες από τον άνθρακα. Ορισμένες από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση αυτών των υλικών από τον άνθρακα περιλαμβάνουν συγκέντρωση μέσω βαρύτητας (gravity concentration), επίπλευση (flotation), ξηρή επεξεργασία (dry processing) και αφυδάτωση (dewatering). Αυτές οι μέθοδοι διαφαίνονται στο έργο των Stultz S. & Kitto J. (1992). Η αφαίρεση αζώτου από τον άνθρακα πριν από την καύση είναι ένας καλός τρόπος για τη μείωση των εκπομπών NO_x, αλλά γενικά δεν είναι πρακτικός.

Μια άλλη μορφή εμπλουτισμού καυσίμου περιλαμβάνει την επεξεργασία του πετρελαίου και του φυσικού αερίου μετά την απομάκρυνσή τους από τη γη. Σε ένα διυλιστήριο, το πετρέλαιο υπόκειται σε διαδικασίες επεξεργασίας που παράγουν έναν αριθμό προϊόντων με βάση το πετρέλαιο, συμπεριλαμβανομένων των αποσταγμάτων και των υπολειμματικών ελαίων. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, τα μαζούτ ταξινομούνται σε πέντε κατηγορίες ανάλογα με τη χημική τους σύνθεση και τα φυσικά τους χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένης της περιεκτικότητας σε τέφρα και θείο. Από την άποψη των εκπομπών, τα αποσταγμένα έλαια έχουν μικρότερο δυναμικό εκπομπών SO₂ και PM σε σύγκριση με τα υπολειμματικά λάδια. Το φυσικό αέριο που περιέχει αλκοόλες και φαινόλες που περιέχουν θείο (μερκαπτάνες) και υψηλό ποσοστό υδρόθειου γενικά υποβάλλονται σε επεξεργασία για την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων συστατικών. Αυτή η επεξεργασία μετατρέπει το όξινο αέριο (sour gas) σε γλυκό αέριο (sweet gas), ένα πιο επιθυμητό καύσιμο με μειωμένες εκπομπές σε SO₂.

5.2 ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Κατά τη διάρκεια της καύσης, το άζωτο και το θείο που υπάρχουν σε ορισμένους τύπους καυσίμων οξειδώνονται και σχηματίζουν NO_x και SO₂, αντίστοιχα. Επιπλέον, τα PM που αποτελούνται από άκαυστο άνθρακα και τέφρα διασκορπίζονται μέσω του καυσαερίου. Η επιλογή μιας τεχνικής που θα ελέγχει αποτελεσματικά τις εκπομπές αυτών των υλικών εξαρτάται από παράγοντες όπως η σύνθεση του καυσίμου, ο σχεδιασμός του λέβητα και η

μέθοδος καύσης. Οι τεχνικές ελέγχου της καύσης που είναι αποτελεσματικές στη μείωση των εκπομπών NOx και SO₂ συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.2.

Emission	Control technique	Description
NO _x	Operational modifications <ul style="list-style-type: none"> oxygen trim (OT) burner tuning (BT) low excess air (LEA) 	Minimizing the amount of excess oxygen supplied to the boiler can reduce thermal NO _x formation. OT, BT, and LEA can sometimes be used to successfully optimize the operation of burners by minimizing excess air without excessively increasing unburned fuel.
	Staged combustion air (SCA) <ul style="list-style-type: none"> burners out of service (BOOS) biased firing (BF) overfire air (OFA) 	Staging the amount of combustion air that is introduced into the burner zone can reduce the flame temperature and thereby reduce thermal NO _x formation. For multiburner units, taking certain BOOS can be an effective technique for staging combustion. Biasing the fuel flow to different burners can also be an effective technique. Injecting air into the boiler above the top burner level through OFA ports can decrease the primary flame zone oxygen level and produce an air-rich secondary zone where combustion is completed.
	Steam or water injection (SI/WI)	Quenching the combustion process with WI or SI can lower the peak flame temperature and result in reduced thermal NO _x production.
	Flue gas recirculation (FGR)	Recirculating a portion of the flue gas to the combustion zone can lower the peak flame temperature and result in reduced thermal NO _x production.
	Reducing air preheat (RAP)	Reducing the air preheat temperature when preheat is used can lower the peak flame temperature and result in reduced thermal NO _x production.
	Low-NO _x burner (LNB)	Using LNBs can reduce NO _x formation through careful control of the fuel-air mixture during combustion. Control techniques used in LNBs include staged air, staged fuel, and FGR as well as other methods that effectively lower the flame temperature.
	Fuel-induced recirculation (FIR)	An NO _x reduction technique applicable to boilers that burn gaseous fuels. FIR is similar to FGR except a portion of the flue gas is mixed with natural gas instead of combustion air. The effect of this mixture on the combustion process is to reduce the peak flame temperature.
	Natural gas reburning (NGR)	Introducing natural gas downstream of the main fuel combustion zone can reduce NO _x emissions. The natural gas combustion products strip oxygen from NO _x molecules produced by combustion of the primary fuel thereby creating harmless molecular nitrogen.
SO ₂	Limestone or dolomite can be introduced into FBC boilers to serve as a sulfur-capture sorbent	Controlling SO ₂ emissions during combustion in an FBC boiler can be accomplished by feeding limestone or dolomite into the bed where calcium oxide reacts with SO ₂ for a sulfur-laden sorbent that is removed as either bottom or fly ash.
	Except for FBC boilers, no techniques are available to effectively remove SO ₂ during combustion	Reducing SO ₂ emissions can be accomplished by either removing sulfur compounds from the fuel prior to combustion or employing FGD techniques after combustion
PM	Operational modifications	Unburned carbon particles can sometimes be reduced by adjusting the combustion process or changing certain fuel properties such as fineness.
	No techniques are available to effectively remove non-combustible PM during combustion	Controlling noncombustible PM emissions is most effectively accomplished after combustion by removing fine particles dispersed in the flue gas

Πίνακας 5.2 Τεχνικές για τον έλεγχο των εκπομπών κατά την καύση.

Πηγή: Clean Coal Technology (1999).

5.2.1 Τεχνικές Ελέγχου των οξειδίων του αζώτου (NO_x)

Εκτός από τους καυστήρες που αναμιγνύουν καύσιμο και αέρα πριν από την καύση, η ταχεία ανάμειξη καυσίμου και αέρα κατά την καύση παράγει υψηλές θερμοκρασίες αιχμής φλόγας και περίσσεια οξυγόνου εντός της ζώνης καύσης. Αυτές οι συνθήκες προάγουν το σχηματισμό θερμικών και καυσίμων NO_x σύμφωνα με το έργο των Stultz S. & Kitto J. (1992). Ο ρυθμός με τον οποίο παράγεται το NO_x επηρεάζεται έντονα από τη θερμοκρασία καύσης και τον χρόνο που τα αέρια καύσης παραμένουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Όταν ο συνδυασμός υψηλών θερμοκρασιών καύσης και υψηλών συγκεντρώσεων οξυγόνου δρουν μαζί, ο ρυθμός δημιουργίας NO_x κορυφώνεται σε επίπεδα περίσσειας αέρα που κυμαίνονται μεταξύ 25 και 45%. Σε αυτό το πλαίσιο, η περίσσεια αέρα αναφέρεται στην ποσότητα αέρα πάνω από αυτή που απαιτείται για την πλήρη καύση του καυσίμου. Για τους καυστήρες που προ αναμιγνύουν το καύσιμο και τον αέρα πριν από την καύση, η μέγιστη θερμοκρασία φλόγας μειώνεται καθώς αυξάνονται τα επίπεδα περίσσειας αέρα που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του σχηματισμού NO_x. (EPA 1980).

Η καταστολή του σχηματισμού τόσο θερμικών NO_x όσο και καυσίμων εμπλουτισμένων σε NO_x είναι μια πολύ αποτελεσματική τεχνική για τη μείωση των εκπομπών NO_x. Ωστόσο, η πλήρης αποτροπή του σχηματισμού NO_x είναι αδύνατη επειδή το οξυγόνο, το άζωτο και η υψηλή θερμοκρασία είναι αναπόσπαστα μέρη της διαδικασίας της καύσης. Για την καύση φυσικού αερίου, αποσταγμένου πετρελαίου και μη ορυκτών καυσίμων, σχεδόν όλες οι εκπομπές NO_x προέρχονται από το σχηματισμό θερμικών NO_x. Με την καύση άνθρακα, υπολειμματικού πετρελαίου και αργού πετρελαίου, η αναλογία των καυσίμων NO_x μπορεί να είναι σημαντική και, υπό ορισμένες συνθήκες λειτουργίας, μπορεί να είναι κυρίαρχη. (EPA 1994).

Η μείωση των εκπομπών NO_x με την καταστολή του σχηματισμού θερμικών και καυσίμων εμπλουτισμένων σε NO_x μπορεί να επιτευχθεί είτε τροποποιώντας τον τρόπο καύσης του καυσίμου είτε να λάβουν μια επεξεργασία τα καυσαέρια πριν την απόρριψή τους στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες τεχνικές επεξεργασίας καυσαερίων που συζητούνται παρακάτω. Σε ορισμένες περιπτώσεις, απαιτούνται συνδυασμοί ελέγχου καύσης και επεξεργασίας καυσαερίων για να επιτευχθεί η απαιτούμενη μείωση των εκπομπών.

Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται μόνες ή σε συνδυασμό για την αναστολή του σχηματισμού NO_x κατά την καύση περιλαμβάνουν:

- Μείωση της συγκέντρωσης οξυγόνου στη ζώνη καύσης
- Μείωση της συγκέντρωσης αζώτου στη ζώνη καύσης
- Μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας καύσης
- Μείωση του χρόνου που τα αέρια της καύσης παραμένουν σε υψηλές θερμοκρασίες

Αν και η μείωση της περίσσειας οξυγόνου και η μείωση του χρόνου παραμονής σε υψηλή θερμοκρασία θα μειώσει το σχηματισμό NO_x, σημειώστε ότι οι αλλαγές σε αυτές τις παραμέτρους συχνά επηρεάζουν την απόδοση του λέβητα. Για παράδειγμα, το οξυγόνο και η θερμοκρασία είναι σημαντικές παράμετροι φλόγας που επηρεάζουν τη σταθερότητα, την απελευθέρωση ακτινοβολούμενης θερμότητας, την καύση, την εμφάνιση φλόγας και άλλους παράγοντες λειτουργίας του λέβητα, σύμφωνα με τις οδηγίες από την EPA (1977) για τη βελτίωση της απόδοσης του βιομηχανικού λέβητα και τις διαδικασίες ρύθμισης του λέβητα για την ελαχιστοποίηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και την επίτευξη αποτελεσματικής χρήσης

καυσίμου. Η επιτυχής εφαρμογή οποιασδήποτε τεχνικής ελέγχου NOx μπορεί να περιλαμβάνει αλλαγές στον εξοπλισμό, το σχεδιασμό ή τη λειτουργία του λέβητα επιτύχει το επιθυμητό επίπεδο μείωσης των εκπομπών NOx. Η πιο αποτελεσματική στρατηγική ελέγχου των εκπομπών NOx είναι αυτή στην οποία ο σχηματισμός NOx μειώνεται όσο το δυνατόν περισσότερο και η απόδοση του λέβητα επηρεάζεται όσο το δυνατόν λιγότερο. Εκτός από τις προηγμένες ιδέες καυστήρα όπου ο αέρας και το καύσιμο προ αναμιγνύονται, η καύση είτε σε πολύ χαμηλά είτε σε πολύ υψηλά επίπεδα περισσειας αέρα έχει ως αποτέλεσμα χαμηλό σχηματισμό NOx. Για τα περισσότερα LNB, ο καλύτερος συνδυασμός χαμηλού σχηματισμού NOx και υψηλής απόδοσης λέβητα εμφανίζεται όταν η ποσότητα οξυγόνου είναι αρκετή για να διασφαλιστεί η πλήρης καύση του καυσίμου. Ωστόσο, η λειτουργία σε πολύ επίπεδα LEA (low excess air) μπορεί να προκαλέσει προβλήματα. Μπορεί να οδηγήσει σε ατελή καύση και σχηματισμό CO που προκαλεί μείωση της απόδοσης του λέβητα. Επιπλέον, μπορεί να δημιουργήσει ανασφαλείς συνθήκες στο εσωτερικό του λέβητα που μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε έκρηξη. (EPA 1980).

Οι συζητήσεις στις επόμενες ενότητες επικεντρώνονται σε τεχνικές ελέγχου των εκπομπών NOx που βασίζονται στις προσεγγίσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως. Δεν γίνεται καμία προσπάθεια εντοπισμού ή ποσοτικοποίησης των επιπτώσεων στη λειτουργία και την απόδοση του λέβητα που μπορεί να προκύψουν εάν εφαρμοστούν μία ή περισσότερες από αυτές τις τεχνικές. Αυτά τα ζητήματα μπορούν να αξιολογηθούν μόνο κατά περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού του συστήματος και τις παραμέτρους λειτουργίας.

5.2.1.1 Μείωση μέγιστης θερμοκρασίας της φλόγας

Η βασική τεχνική για τη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας φλόγας είναι γενικά η προσθήκη αέρα, καυσαερίων, νερού ή ατμού στη ζώνη καύσης. Αυτές οι ενέργειες περιορίζουν την ποσότητα του διαθέσιμου οξυγόνου, αραιώνουν την εισροή ενέργειας ή ψύχουν τη διαδικασία καύσης.

Η επιλογή ενός λέβητα με μεγαλύτερη χωρητικότητα από την απαιτούμενη έχει τη δυνατότητα να μειώσει τη μέγιστη θερμοκρασία φλόγας.

Η μείωση της διαδικασίας της καύσης χρησιμοποιώντας μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες 4 τεχνικές μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τη μέγιστη θερμοκρασία της φλόγας, σύμφωνα με την EPA (1994).

1. **Τεχνική έγχυσης νερού ή ατμού WI/SI (water injection/ steam injection):** Σε αυτή την τεχνική, νερό ή ατμός εγχέεται στη ζώνη καύσης. Η χρήση της τεχνικής WI/SI είναι πολύ αποτελεσματική στη μείωση του θερμικού σχηματισμού των NOx. Ωστόσο, δεν εφαρμόζεται ευρέως λόγω των πιθανών παραβάσεων από την μεγάλη παραγωγή θερμικής απόδοσης, κάποιες ανησυχίες για την ασφάλεια και μερικά προβλήματα σχετικά με τον έλεγχο του καυστήρα.
2. **Τεχνική ανακυκλοφορίας καυσαερίων FGR (flue gas recirculation):** Στην τεχνική FGR, γίνεται μια διαδικασία έγχυσης καυσαερίων στον λέβητα μαζί με τον φρέσκο αέρα καύσης για την τροποποίηση των συνθηκών εντός της ζώνης της καύσης. Το αποτέλεσμα του FGR είναι ο έλεγχος του σχηματισμού οξειδίου του αζώτου με τη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας της φλόγας και τη μείωση της συγκέντρωσης οξυγόνου. Κατά την διάρκεια

της καύσης, το ανακυκλούμενο καυσαέριο απορροφά επίσης ένα μέρος της θερμότητας, μειώνοντας έτσι και περαιτέρω τη μέγιστη θερμοκρασία της φλόγας. Το FGR μπορεί να υλοποιηθεί μόνο του ή σε συνδυασμό με LNB καυστήρα. Οι τυπικές μειώσεις εκπομπών NO_x με χρήση αυτής της τεχνικής κυμαίνονται από 30 έως 50%. Για πολλούς λέβητες με καύση φυσικού αερίου με LNB, το FGR αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του συστήματος ελέγχου καύσης.

3. **Τεχνική ανακυκλοφορίας που προκαλείται από καύσιμο FIR (fuel-induced recirculation and forced-internal recirculation):** Το FIR είναι μια τεχνική μείωσης των NO_x που εφαρμόζεται σε λέβητες που καίνε αέρια καύσιμα. Είναι παρόμοιο με το FGR εκτός από το ότι ένα μέρος των καυσαερίων αναμιγνύεται με το καύσιμο του λέβητα αντί με τον αέρα καύσης. Η χρήση αυτής της τεχνικής έχει πολλά πλεονεκτήματα. Μειώνει τη μέγιστη θερμοκρασία της φλόγας, μειώνει τη συγκέντρωση οξυγόνου στη ζώνη καύσης, βελτιώνει την ανάμειξη καυσίμου-αέρα και μειώνει το χρόνο υπό συνθήκες σχηματισμού των εκπομπών NO_x. (Προσοχή: Η ανακυκλοφορία που προκαλείται από καύσιμο δεν πρέπει να συγχέεται με την αναγκαστική εσωτερική ανακυκλοφορία, η οποία αντιπροσωπεύεται επίσης από το ακρωνύμιο FIR που περιγράφεται αμέσως παρακάτω.)

Αναγκαστική εσωτερική ανακυκλοφορία (FIR): Ένας καυστήρας FIR χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό προ-ανάμειξης, σταδιακής απομάκρυνσης και ενδιάμεσης θερμότητας για τον έλεγχο του σχηματισμού οξειδίου του αζώτου και μονοξειδίου του άνθρακα κατά την καύση του φυσικού αερίου.

4. **Τεχνική μείωσης προθέρμανσης του αέρα RAP (reducing air preheat):** Όταν παρέχεται προθερμασμένος αέρας καύσης σε ένα λέβητα, μπορεί να έχει θετικό αντίκτυπο στην απόδοση του λέβητα, αλλά η αυξημένη θερμοκρασία λειτουργίας του λέβητα μπορεί επίσης να έχει αρνητική επίδραση στο σχηματισμό NO_x. Μειώνοντας τη θερμοκρασία του προθερμασμένου αέρα καύσης μέσω της τεχνικής RAP, επιτυγχάνεται μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας φλόγας και αντίστοιχη μείωση του σχηματισμού NO_x. Αν και η μείωση της θερμοκρασίας προθέρμανσης του αέρα είναι μια αποτελεσματική τεχνική μείωσης των NO_x, η χρήση της σπάνια εφαρμόζεται. Οι ενεργειακές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη μειωμένη απόδοση του λέβητα μπορεί να είναι σοβαρές.

5.2.1.2 Λειτουργικές τροποποιήσεις

Ο αέρας που παρέχεται στους λέβητες περιέχει το οξυγόνο που απαιτείται για την καύση. Όταν η διαθεσιμότητα οξυγόνου υπερβαίνει αυτή που απαιτείται για την πλήρη καύση του καυσίμου (υπερβολικό αέρα), το υπόλοιπο οξυγόνο απελευθερώνεται πίσω στην ατμόσφαιρα μαζί με τα καυσαέρια. Ο περιορισμός της ποσότητας περίσσειας αέρα που παρέχεται σε ένα λέβητα μπορεί να μειώσει το σχηματισμό NO_x μειώνοντας τη συγκέντρωση οξυγόνου στη ζώνη καύσης. Μια τεχνική που χρησιμοποιείται μερικές φορές για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας καύσης είναι η low excess air (LEA). Σε αυτή την τεχνική, η περίσσεια αέρα ελαχιστοποιείται χωρίς να αυξάνονται υπερβολικά οι εκπομπές των άκαυτων καυσίμων.

Μια συνθήκη LEA μπορεί να επιτευχθεί μέσω αλλαγών στις διαδικασίες λειτουργίας, στις ρυθμίσεις του συστήματος ελέγχου ή και στα δύο. Για παράδειγμα, το oxygen trim (OT) και

το burner tuning (BT) είναι δύο σχετικά απλές λειτουργικές τροποποιήσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν για να περιοριστεί η ποσότητα του πλεονάζοντος οξυγόνου που είναι διαθέσιμο για καύση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτές οι προσαρμογές μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές NOx έως και 15%, αλλά ο πραγματικός βαθμός μείωσης των NOx εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του καυσίμου και τις συνθήκες καύσης. (EPA 1994). Για LNBs που είναι εξοπλισμένα με αυτόματο και όχι χειροκίνητο OT (oxygen trim), μερικές φορές είναι δυνατό να επιτευχθούν επίπεδα περίσσειας αέρα 5% ή λιγότερο χωρίς να επηρεαστεί αρνητικά η απόδοση του λέβητα. Τα καλά σχεδιασμένα συστήματα αυτόματου ελέγχου λέβητα που βασίζονται σε μια προσαρμοσμένη στρατηγική ελέγχου μπορούν να διατηρήσουν αποτελεσματικά τα επίπεδα χαμηλών εκπομπών και να διατηρήσουν τη μέγιστη απόδοση του λέβητα χωρίς περιοδική παρέμβαση του χειριστή. (EPA 1980). Όταν σε αυτά τα συστήματα ενσωματώνονται προηγμένες συσκευές οργάνων και ελέγχου, είναι σε θέση να διατηρούν αποτελεσματικές και ασφαλείς συνθήκες λειτουργίας, παρέχοντας παράλληλα την ευελιξία για να φιλοξενήσουν ένα ευρύ φάσμα αλλαγών ρυθμίσεων. Ο σωστός σχεδιασμός στρατηγικής ελέγχου και ο συντονισμός βρόχου ελέγχου είναι το κλειδί για τη βέλτιστη απόδοση του συστήματος, σύμφωνα με τον Dukelow S. (1991).

Εάν η ροή του αέρα είναι πολύ περιορισμένη λόγω υπερβολικού ελέγχου και εάν δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο για την πλήρη καύση του καυσίμου, η απόδοση του λέβητα θα υποβαθμιστεί. Επίσης η λειτουργία υπό αυτές τις συνθήκες ενδέχεται να μην είναι ασφαλής. Οι συνθήκες που σχετίζονται με την κακή απόδοση του λέβητα περιλαμβάνουν την κακή σταθερότητα στη φλόγα, την αύξηση των εκπομπών CO, την υψηλή ακτινοβολία της φλόγας και την ατελή καύση. Εκτός από την ύπαρξη προβλημάτων λειτουργίας με ακρίβεια ελέγχου, οι αλλαγές στη λειτουργία του λέβητα μπορεί να έχουν πιο σοβαρές συνέπειες. Τα πλούσια σε καύσιμα μείγματα που προκύπτουν από το LEA μπορούν μερικές φορές να δημιουργήσουν συνθήκες ευνοϊκές για εκρήξεις εντός του θαλάμου καύσης. Πριν εγκριθούν οποιεσδήποτε τροποποιήσεις στη λειτουργία του λέβητα, θα πρέπει να ληφθούν μέτρα ασφάλειας. (ABMA 1998).

Αν και οι τροποποιήσεις στις λειτουργίες του λέβητα που περιλαμβάνουν αλλαγές στα επίπεδα περίσσειας αέρα μπορεί να είναι αποτελεσματικές στη μείωση του σχηματισμού NOx, το LEA σπάνια χρησιμοποιείται από μόνο του ως τεχνική ελέγχου εκπομπών. Η χρήση του LEA εφαρμόζεται γενικά με την τεχνική LNBs.

Για λέβητες που χρησιμοποιούν προθερμασμένο αέρα καύσης, μερικές φορές είναι δυνατό να μειωθούν οι εκπομπές NOx ρυθμίζοντας το επίπεδο προθέρμανσης. Η εισαγωγή ψυχρότερου αέρα καύσης με τη μείωση της θερμοκρασίας του προθερμασμένου αέρα μπορεί να είναι αποτελεσματική για την κατάσβεση της καύσης και τη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας της φλόγας.

5.2.1.3 Σταδιακή καύση (SCA - staged combustion air)

Η σταδιακή καύση είναι μια τεχνική ελέγχου εκπομπών NOx που βασίζεται στο γεγονός ότι η καύση είτε σε πολύ χαμηλά είτε σε πολύ υψηλά επίπεδα περίσσειας αέρα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή χαμηλών NOx. Με την ανάμειξη αέρα και καυσίμου σε δύο ή περισσότερες θέσεις στο λέβητα, είναι δυνατό να δημιουργηθούν ζώνες υψηλής και χαμηλής περίσσειας αέρα. Η σταδιακή καύση μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη αέρα ή καυσίμου σε διαφορετικά στάδια της διαδικασίας καύσης.

Στην πρώτη ζώνη κατάντη του καυστήρα, ο αέρας εισάγεται στον λέβητα σε επίπεδο που είναι ανεπαρκές για την πλήρη καύση του καυσίμου. Αυτό δημιουργεί ένα μείγμα πλούσιο σε καύσιμα που αναστέλλει το σχηματισμό NO_x. Περαιτέρω κατάντη, τα προϊόντα καύσης από την πρώτη ζώνη αναμιγνύονται με πρόσθετο αέρα. Αυτός ο αέρας, ο οποίος μερικές φορές αναμιγνύεται με μια μικρή ποσότητα πρόσθετου καυσίμου, διατηρεί τη διαδικασία καύσης και της επιτρέπει να συνεχιστεί μέχρι να καεί όλο το καύσιμο. Η έλλειψη οξυγόνου στην πρώτη ζώνη και οι χαμηλές θερμοκρασίες στη δεύτερη ζώνη συμβάλλουν στον μειωμένο σχηματισμό NO_x.

Αυτή η τεχνική, η οποία αναφέρεται ως σταδιακός αέρας καύσης SCA (staged combustion air), μπορεί να εφαρμοστεί με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με το μέγεθος του λέβητα. Σε μεγάλους λέβητες με πολλαπλούς καυστήρες, μερικές φορές η σταδιακή καύση επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας ορισμένους από τους καυστήρες να λειτουργούν με πλούσιο μείγμα και τους άλλους να λειτουργούν με φτωχό μείγμα. Μια άλλη προσέγγιση είναι η μείωση ρυθμού ροής του καυσίμου προς στους καυστήρες και η έγχυση της απαραίτητης ποσότητας αέρα μέσω των θυρών OFA (overfire air), που βρίσκονται δίπλα ή κατάντη από τους καυστήρες. Παρόλο που η χρήση των θυρών OFA είναι αποτελεσματική, ένας πολύ πρακτικός τρόπος για την εφαρμογή του SCA είναι να βγάλετε ορισμένους καυστήρες εκτός λειτουργίας BOOS (burners out of service) ή να ωθήσετε τη ροή καυσίμου σε επιλεγμένους καυστήρες για να αποκτήσετε ένα παρόμοιο αποτέλεσμα σταδίου αέρα. Για μικρούς λέβητες με έναν ή μόνο λίγους καυστήρες, μια από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους είναι η χρήση LNB που ενσωματώνουν SCA στη λειτουργία τους.

Η τεχνική SCA, μπορεί να οδηγήσει σε μειώσεις NO_x έως και 50% για το φυσικό αέριο και 20% για το Νο. 6 μαζούτ και τα υπολειμματικά λιπαντικά. Η χρήση του SCA είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε καύσιμα όπως είναι ο άνθρακας και το υπολειμματικό λάδι που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο. (EPA 1980).

Όπως θα δούμε παρακάτω, ένας άλλος τρόπος σταδιακής καύσης περιλαμβάνει την προσθήκη καυσίμου σε διαφορετικά στάδια της διαδικασίας της καύσης. Αρχικά, αυτό δημιουργεί ένα ελαφρύ μείγμα καυσίμου που μειώνει τη θερμοκρασία της φλόγας και έτσι έχει ως αποτέλεσμα να μειώνει το σχηματισμό NO_x. Στο επόμενο στάδιο, η περίσσεια αέρα συνδυάζεται με πρόσθετο καύσιμο για να ολοκληρωθεί η διαδικασία καύσης. Ορισμένοι LNB ενσωματώνουν τον σταδιακό διαχωρισμό του καυσίμου στο σχεδιασμό τους με τρόπο τέτοιο ώστε να ελέγχεται ο σχηματισμός NO_x.

5.2.1.4 Επανάκαυση φυσικού αερίου (NGR - Natural Gas Reburning)

Μια άλλη τεχνική τροποποίησης της καύσης που μπορεί να είναι αποτελεσματική στη μείωση των εκπομπών NO_x περιλαμβάνει τη σταδιακή παροχή του καυσίμου και όχι του αέρα καύσης. Σε αυτή την τεχνική, ένα μέρος του καυσίμου εγχέεται κατάντη της κύριας ζώνης καύσης. Αυτό το καύσιμο, μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 15 και 20% της συνολικής παροχής του, ονομάζεται καύσιμο επανακαύσης. Σύμφωνα με τους συγγραφείς Basu P., Kefa C. και Jestin L. (2000), οι ρίζες υδρογονάνθρακα που παράγονται από την επανάκαυση του καυσίμου αφαιρούν το οξυγόνο από μόρια NO, δημιουργώντας έτσι το αβλαβές μοριακό άζωτο N₂. Αυτή η τεχνική επιτυγχάνεται καλύτερα όταν το καύσιμο που ξανά-καίγεται είναι το φυσικό αέριο. Η επανάκαυση φυσικού αερίου (NGR) έχει αποδειχθεί ότι μειώνει τις εκπομπές NO_x κατά

περισσότερο από 60%, κατά το U.S. Department of Energy and Energy and Environmental Research Corporation (1993).

Το NGR έχει αναπτυχθεί κυρίως για λέβητες κοινής ωφέλειας, κυρίως για μονάδες με καύση άνθρακα που δεν δέχονται άλλες τεχνικές μείωσης των NO_x, όπως τα LNB. Παραδείγματα αυτών των λεβήτων είναι με κυκλώνες και stocker-fired. Η εφαρμογή της τεχνικής επανακαύσης σε λέβητες έχει περιοριστεί σε ορισμένους λέβητες που διαθέτουν το απαραίτητο επιπλέον ύψος πάνω από τη ζώνη κύριας καύσης.

5.2.1.5 Καυστήρες χαμηλών NO_x (LNBS - Low NO_x Burners)

Στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών NO_x, στο εύρος των 30 ppm, εφαρμόστηκαν τεχνικές μείωσης των NO_x για τη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας φλόγας και της διαθεσιμότητας οξυγόνου μέσω της προσθήκης διάφορων αραιωτικών στη διαδικασία καύσης. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω της ανάπτυξης μιας νέας κατηγορίας καυστήρων γνωστών ως LNBS.

Τα LNB είναι ειδικά σχεδιασμένα κομμάτια του εξοπλισμού της καύσης που μειώνουν το σχηματισμό NO_x μέσω προσεκτικού ελέγχου του μείγματος καυσίμου-αέρα κατά την διάρκεια της καύσης. Η στρατηγική ελέγχου των εκπομπών πίσω από τη σχεδίαση ενός LNB γενικά αντανάκλα μία ή περισσότερες τεχνικές μείωσης των NO_x, συμπεριλαμβανομένου του σταδιακού αέρα, σταδιακού καυσίμου και FGR. Για παράδειγμα, σε ένα LNB σταδιακής καύσης, είτε ο αέρας είτε το καύσιμο προστίθεται κατάντη της ζώνης της κύριας καύσης. Για να μειωθεί περαιτέρω ο σχηματισμός NO_x, ο φρέσκος αέρας καύσης μπορεί να συνδυαστεί με το επανακυκλώμενο καυσαέριο για τη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας φλόγας. Ανάλογα με το ποια από αυτές τις τεχνικές μείωσης των NO_x χρησιμοποιείται, τα LNB με σταδιακή καύση υποδιαιρούνται σε βαθμιδωτούς καυστήρες αέρα και σταδιακούς καυστήρες καυσίμου.

Ορισμένα LNB δημιουργούν συνθήκες καύσης που παράγουν χαμηλή θερμοκρασία φλόγας ως μέσο για τη μείωση του σχηματισμού NO_x. Είτε χωρίζουν μια μεγάλη φλόγα σε πολλές μικρότερες φλόγες είτε διευρύνουν την περιοχή απορρόφησης της ακτινοβολίας θερμότητας της φλόγας. Ορισμένα σχέδια LNB χρησιμοποιούν πολλαπλές φλόγες με λιτή, προ αναμειγμένη καύση για να σπάσουν τη συνολική εισερχόμενη θερμότητα σε μικρότερες φλόγες, μειώνοντας έτσι τη μέγιστη θερμοκρασία φλόγας. Άλλα σχέδια επιτυγχάνουν χαμηλή θερμοκρασία φλόγας μειώνοντας τη θερμοκρασία του προθερμασμένου αέρα καύσης, εκχέοντας είτε ατμό είτε νερό στη ζώνη καύσης ή τροφοδοτώντας τον καυστήρα με επανακυκλοφορούμενα καυσαέρια.

Σημαντικές μειώσεις NO_x πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας LNB που καίνε καύσιμο τόσο σε συνθήκες περίσσειας αέρα όσο και σε συνθήκες LEA. Σε αυτούς τους καυστήρες, ένα μέρος του καυσίμου συνδυάζεται με περισσότερο αέρα από αυτόν που απαιτείται για την πλήρη καύση. Αυτή η χαμηλή συγκέντρωση καυσίμου προάγει χαμηλότερη θερμοκρασία φλόγας. Το υπόλοιπο του καυσίμου συνδυάζεται με λιγότερο αέρα από τον απαραίτητο για την πλήρη καύση, γεγονός που εμποδίζει το σχηματισμό NO_x. Σε ένα ορισμένο σημείο πέρα από τον καυστήρα όπου συνδυάζονται τα δύο μείγματα αέρα-καυσίμου, η καύση ολοκληρώνεται. Όταν τα καυσαέρια ανακυκλώνονται μέσω αυτών των καυστήρων, μπορούν να πραγματοποιηθούν ακόμη περαιτέρω μειώσεις. Basu P. et al. (2000).

Η εμπειρία δείχνει ότι μπορούν να πραγματοποιηθούν σημαντικές μειώσεις στις εκπομπές NO_x με τη χρήση LNB. Τα LNB έχουν επιτύχει μειώσεις έως και 80%, αλλά οι πραγματικές

μειώσεις εξαρτώνται από τον τύπο του καυσίμου και διαφέρουν σημαντικά από τη μία εγκατάσταση καυστήρα στην άλλη. (EPA 1999). Οι τυπικές μειώσεις κυμαίνονται από 30 έως 50%, αλλά υπό ορισμένες συνθήκες, είναι δυνατές υψηλότερες μειώσεις, ειδικά όταν χρησιμοποιείται τεχνική OFA (overfire air) ή άλλη τεχνική μείωσης NO_x σε συνδυασμό με LNB. [Basu P. et al. (2000), EPA (1994), EPA (1999) και U.S. Department of Energy and Energy and Environmental Research Corporation (1993)].

5.2.1.6 Καυστήρες εξαιρετικά χαμηλών NO_x (ULNBs - Ultra Low NO_x burners)

Καθώς οι νέοι κανονισμοί υποχρεούνται να συμμορφώνονται με τα πρότυπα του όζοντος, η έρευνα για την καύση επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μιας προηγμένης κατηγορίας LNB γνωστών ως ULNB. Οι στόχοι της έρευνας είναι η παραγωγή καυστήρων που μειώνουν τις εκπομπές NO_x σε μονοψήφια (λιγότερα από 10 ppm ογκομετρικά, διορθωμένα σε 3% οξυγόνο) και δραστικά χαμηλότερες εκπομπές CO. Οι ULNBs είναι ειδικά σχεδιασμένα για να καίνε καθαρά αέρια καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο, που είναι ουσιαστικά απαλλαγμένα από άζωτο που συνδέεται με το καύσιμο. Η επιτυχία τους μετριέται από το πόσο καλά μπορούν να εφαρμοστούν συνδυασμοί τεχνικών μείωσης των NO_x για τη μείωση της θερμότητας και την άμεση δημιουργία NO_x χωρίς να συμβάλουν σε απώλειες απόδοσης.

Μέχρι στιγμής, αρκετές έννοιες ULNB έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία και ορισμένα σχέδια είναι πλέον διαθέσιμα στο εμπόριο. Καθώς η τεχνολογία ULNB προχωρά, δίνεται έμφαση στην έρευνα των καυστήρων με στόχο τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας καύσης για την αύξηση της λειτουργικής ευελιξίας και την ελαχιστοποίηση του αντίκτυπου στη συνολική απόδοση του συστήματος. Παρά τις γρήγορες αλλαγές στην τελευταία λέξη της τεχνολογίας, τα ULNB δεν είναι καθολικά προσαρμόσιμα σε όλα τα σχέδια λέβητα και οι μεγαλύτερες μειώσεις NO_x πραγματοποιούνται όταν χρησιμοποιείται μια τεχνική ελέγχου NO_x μετά την καύση, όπως η επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (SCR) σε συνδυασμό με τους ULNBs.

Χωρίς να προσδιορίζονται εμπορικές ονομασίες, κατασκευαστές ή ιδιότητα στοιχεία, οι ακόλουθες συζητήσεις παρέχουν μια σύντομη επισκόπηση τριών εννοιών ULNB. Κάθε σχέδιο επιτυγχάνει μονοψήφιες εκπομπές NO_x ελέγχοντας τόσο τον θερμικό όσο και τον άμεσο σχηματισμό NO_x μέσω της χρήσης ανακυκλωμένων καυσαερίων σε συνδυασμό με τουλάχιστον μία άλλη τεχνική μείωσης NO_x.

Οι μειώσεις των εκπομπών NO_x μπορούν να επιτευχθούν αυξάνοντας την ποσότητα του πλεονάζοντος αέρα καύσης που αναμιγνύεται με το καύσιμο πριν εισέλθει στον καυστήρα. Αυξάνοντας το επίπεδο της περίσσειας αέρα, η καύση λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερη θερμοκρασία και ο σχηματισμός θερμικών NO_x μειώνεται. Η λειτουργία σε υψηλό ποσοστό περίσσειας αέρα μειώνει επίσης τον σχηματισμό NO_x. Η προσθήκη καυσαερίων από τη καμινάδα του λέβητα στη φλόγα είναι επίσης μια αποτελεσματική και κοινή τεχνική για τη μείωση των θερμοκρασιών αιχμής της φλόγας και του σχηματισμού θερμικών NO_x. Καθώς αυξάνεται η ποσότητα των ανακυκλοφορούμενων καυσαερίων, το επίπεδο των εκπομπών NO_x μειώνεται μέχρι να επιτευχθεί το όριο ευστάθειας του καυστήρα. Η απόδοση των καυστήρων που έχουν σχεδιαστεί για να αναμειγνύουν είτε την περίσσεια αέρα καύσης είτε τα ανακυκλωμένα καυσαέρια με το καύσιμο πριν εισέλθουν στον καυστήρα έχει αποδειχθεί ότι παράγουν πολύ χαμηλές εκπομπές NO_x και CO από τους Sullivan J. και Duret M. (1997).

Ένας από τους πιο άμεσους τρόπους μείωσης των εκπομπών NOx περιλαμβάνει την αποφυγή περιοχών πλούσιες σε καύσιμα, οι οποίες μειώνουν τον σχηματισμό άμεσων NOx και τη μείωση της θερμοκρασίας της φλόγας, η οποία μειώνει τον σχηματισμό θερμικών NOx. Στο ταχείας ανάμειξης ULNB, το αέριο καύσιμο αναμιγνύεται γρήγορα με τον αέρα κοντά στην έξοδο του καυστήρα, με αποτέλεσμα ένα σχεδόν ομοιόμορφο μείγμα καυσίμου-αέρα στο σημείο ανάφλεξης. Αυτή η γρήγορη ανάμειξη ουσιαστικά εξαλείφει τον γρήγορο σχηματισμό NOx και προάγει την πλήρη καύση του καυσίμου. Όταν καίγεται καύσιμο κάτω από αυτές τις σχεδόν ιδανικές συνθήκες, δεν σχηματίζεται σχεδόν καθόλου CO και ουσιαστικά καμία VOC. Τα θερμικά NOx ελαχιστοποιούνται με την προσθήκη ανακυκλωμένων καυσαερίων στον αέρα καύσης ανάντη του καυστήρα για τον έλεγχο της θερμοκρασίας της φλόγας. Σε αντίθεση με τη συμβατική θεωρία LNB, η αύξηση της περιέσειας αέρα μειώνει τον σχηματισμό NOx σε εφαρμογές καυστήρα ταχείας ανάμειξης. Αν και οι καυστήρες ταχείας ανάμειξης λειτουργούν όπως οι καυστήρες προ-μίξης, υπάρχει μια ξεχωριστή διαφορά. Όταν προστίθεται καύσιμο στο εσωτερικό του καυστήρα, ο εξαιρετικά μικρός όγκος προ-ανάμειξης εξαλείφει την πιθανότητα αναδρομής που είναι εγγενής στα σχέδια των καυστήρων προ μίξης. Ωστόσο, η πολύ υψηλή περίσσεια αέρα που χρησιμοποιείται σε αυτούς τους καυστήρες ταχείας ανάμειξης μπορεί να μειώσει αρκετά την απόδοση του λέβητα.

Οι καυστήρες FIR χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό προ-ανάμειξης, σταδιοποίησης και απομάκρυνσης θερμότητας μεταξύ των σταδίων για τον έλεγχο σχηματισμού NOx και CO από:

1. Προανάμειξη του αέρα καύσης και σημαντική εσωτερική ανακυκλοφορία προϊόντων μερικής καύσης στο πρώτο στάδιο για επίτευξη σταθερής, ομοιόμορφης καύσης που ελαχιστοποιεί τη μέγιστη θερμοκρασία φλόγας και τους υψηλούς θύλακες οξυγόνου (oxygen pockets).
2. Ενίσχυση της μεταφοράς θερμότητας από το πρώτο στάδιο για μείωση των θερμοκρασιών καύσης στο δεύτερο στάδιο.
3. Έλεγχος της καύσης δεύτερου σταδίου για περαιτέρω ελαχιστοποίηση της μέγιστης θερμοκρασίας φλόγας.

5.2.2 Τεχνικές Ελέγχου του διοξειδίου του θείου (SO₂)

Οι τεχνικές ελέγχου της καύσης για τη μείωση των εκπομπών SO₂ μπορεί να είναι αποτελεσματικές για λέβητες FBC όπου χρησιμοποιείται ασβεστόλιθος ή δολομίτης ως υλικό κλίνης. Όταν λειτουργούν στη βέλτιστη θερμοκρασία καύσης, οι χημικές αντιδράσεις εντός της κλίνης μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές SO₂. Αυτές οι αντιδράσεις μπορούν να απορροφήσουν περισσότερο από το 90% του θείου που απελευθερώνεται κατά την καύση ανάλογα με την περιεκτικότητα σε θείο στο καύσιμο και την ποσότητα του προστιθέμενου απορροφητικού υλικού σύμφωνα με τους Stultz S. και Kitto J., (1992). Όταν προστίθεται ασβεστόλιθος ή δολομίτης στην κλίνη, λαμβάνει χώρα μια αντίδραση μεταξύ του οξειδίου του ασβεστίου (CaO) στον ασβεστόλιθο ή του δολομίτη και του SO₂ στο αέριο. Η δέσμευση θείου είναι συνάρτηση της αναλογίας ασβεστίου προς θείο, του χρόνου παραμονής του αερίου στην κλίνη, του μεγέθους των σωματιδίων, της θερμοκρασίας της κλίνης και της αντιδραστικότητας του απορροφητή υλικού. Το φορτωμένο με θείο απορροφητικό υλικό είτε συλλέγεται ως τέφρα από τον πυθμένα του λέβητα είτε αφαιρείται ως σωματίδια PM.

5.2.3 Τεχνικές ελέγχου σωματιδίων (PM)

Το στερεό υλικό που απελευθερώνεται κατά την καύση ορισμένων καυσίμων, όπως ο άνθρακας, αποτελείται από άκαυστη ύλη που σχηματίζει τέφρα και άκαυστα σωματίδια άνθρακα. Κατά τη διάρκεια της καύσης, αυτά τα υλικά διασκορπίζονται στο καυσαέριο ως σωματίδια PM ή συσσωρεύονται στο εσωτερικό του λέβητα ως τέφρα πυθμένα ή αιθάλη.

Η μείωση της ποσότητας του άκαυτου άνθρακα που απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία καύσης μπορεί να επιτευχθεί ρυθμίζοντας την ποσότητα και τη θέση του αέρα και του καυσίμου που παρέχονται στο λέβητα. Οι αλλαγές στις ιδιότητες του καυσίμου, όπως η αύξηση της λεπτότητας και οι ρυθμίσεις στο σύστημα ελέγχου του λέβητα, μπορεί μερικές φορές να είναι αποτελεσματικές στη μείωση του άκαυτου άνθρακα. Για λέβητες με καύση πετρελαίου και λέβητες FBC, η επανέγχυση σωματιδίων σκόνης με άνθρακα είναι επίσης ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης του άκαυτου άνθρακα. Οι εκπομπές άκαυστων σωματιδίων άνθρακα ή άκαυστος άνθρακας με τη μορφή τέφρας ή αιθάλης θα έχουν ως αποτέλεσμα ελαφρώς μειωμένη απόδοση του λέβητα.

Η απομάκρυνση της άκαυστης ύλης που σχηματίζει τέφρα δεν μπορεί να επιτευχθεί εύκολα κατά τη διάρκεια της καύσης. Επιτυγχάνεται καλύτερα με την επεξεργασία του καυσίμου πριν από την καύση για την απομάκρυνση των πετρωμάτων και των ορυκτών που σχηματίζουν τέφρα ή την επεξεργασία των καυσαερίων μετά την καύση με χρήση τεχνικών επεξεργασίας καυσαερίων.

5.3 ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΑΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Όταν οι τεχνικές επεξεργασίας καυσίμου και ελέγχου της καύσης δεν μειώνουν τις εκπομπές NO_x, SO₂ και PM σε αποδεκτά επίπεδα, ενδέχεται να απαιτούνται πρόσθετες βελτιώσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μόνη επιλογή που απομένει είναι η επεξεργασία των καυσαερίων πριν απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα. Οι τεχνικές επεξεργασίας καυσαερίων γενικά περιλαμβάνουν ειδικό εξοπλισμό που βρίσκεται κατόπιν του λέβητα σύμφωνα με την Clean Coal Technology (1999). Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο εξοπλισμός εκτελεί μόνο μία λειτουργία και ο σχεδιασμός του μπορεί να είναι περίπλοκος ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του λέβητα, τις εκπομπές που ελέγχονται και το απαιτούμενο επίπεδο μείωσης των εκπομπών. Αν και ο αντίκτυπος στο κόστος σχετίζεται με την εφαρμογή μιας τεχνικής επεξεργασίας καυσαερίων, είναι γενικά πιο αποδοτικό να συμπεριληφθεί ο εξοπλισμός στον αρχικό σχεδιασμό παρά να τοποθετηθεί εκ των υστέρων η εγκατάσταση. Τεχνικές για την επεξεργασία των καυσαερίων για τη μείωση των εκπομπών NO_x, SO₂ και PM προσδιορίζονται στον Πίνακα 5.3 και περιγράφονται στις ακόλουθες ενότητες.

Emission	Control technique	Description
NO _x	Selective catalytic reduction (SCR)	Reducing NO _x emissions can be accomplished using the SCR technique in which a reductant (ammonia gas) is injected in the flue-gas stream before it passes through a catalyst bed. This technique disassociates NO _x to nitrogen gas and water vapor.
	Selective Noncatalytic Reduction (SNCR)	Reducing NO _x emissions can also be accomplished using the SNCR technique in which a reagent is injected in the flue-gas stream where NO _x is reduced to nitrogen gas and water vapor. Ammonia gas and aqueous urea are the two reagents most often used for this purpose.
SO ₂	Flue gas desulfurization (FGD) using <ul style="list-style-type: none"> • nonregenerable (throwaway) processes • regenerable (recovery) processes 	Removing SO ₂ from flue gas is most often accomplished in a wet scrubber where the flue gas is contacted with an aqueous slurry of lime or limestone. Reactions between the lime or limestone and the SO ₂ produce a calcium salt waste product.
		Circulating a sodium-based compound through a scrubber will also reduce SO ₂ emissions. Effluent from the scrubber is then mixed with lime or limestone to produce a calcium-sulfur waste product.
		Injecting a calcium-based sorbent such as lime into the flue-gas steam is also an effective technique for reducing SO ₂ emissions. Methods such as spray absorption, spray drying, or semiwet scrubbing produce a dry waste product that is collected along with the PM.
		Removing SO ₂ dispersed in flue gas can be accomplished by various advanced FGD techniques. Resulting sulfur compounds that have value include gypsum (wallboard), sulfur, and sulfuric acid.
PM	Cyclone separator	Separating PM dispersed in flue gas can be accomplished using a mechanical collector known as a cyclone. Separation is achieved as the particles are subjected to centrifugal and gravitational forces. Inside the cyclone, solid particles exit through an opening in the bottom, and the cleaned flue gas exits through an opening in the top.
	Wet scrubber	Removing PM dispersed in flue gas can be accomplished using a wet scrubber in which the particles impact water droplets. A spray tower is one type of low-pressure-drop wet scrubber, and a venturi-type scrubber is a high-pressure-drop wet scrubber.
	Electrostatic precipitator (ESP)	Charging particles that are dispersed in flue gas with electrical energy is an effective technique for reducing PM emissions. In an ESP, the particles are electrically charged and then attracted to a collecting surface rather than discharged into the atmosphere.
	Fabric filter (baghouse)	Collecting PM dispersed in flue gas can be accomplished by allowing the particle-laden gas to flow through a fabric filter. These fine-mesh filters are located inside a gas-tight structure known as a baghouse.

Πίνακας 5.3 Τεχνικές για τον έλεγχο των εκπομπών μετά την καύση.

Πηγή: Clean Coal Technology (1999).

5.3.1 Τεχνικές επεξεργασίας καυσαερίων για τα οξείδια του αζώτου (NO_x).

Δύο τεχνικές χρησιμοποιούνται συνήθως για την απομάκρυνση των NO_x από τα καυσαέρια. Αυτές οι τεχνικές είναι η εκλεκτική καταλυτική αναγωγή SCR (selective catalytic reduction) και η εκλεκτική μη καταλυτική αναγωγή SNCR (Selective non-catalytic reduction). Και οι δύο αυτές τεχνικές μειώνουν τις εκπομπές NO_x μετατρέποντας τα NO_x σε αβλαβές άζωτο. Εκτός από αυτές τις τεχνικές, οι οποίες χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά επί σειρά ετών, αναπτύσσονται και πιο προηγμένες τεχνικές.

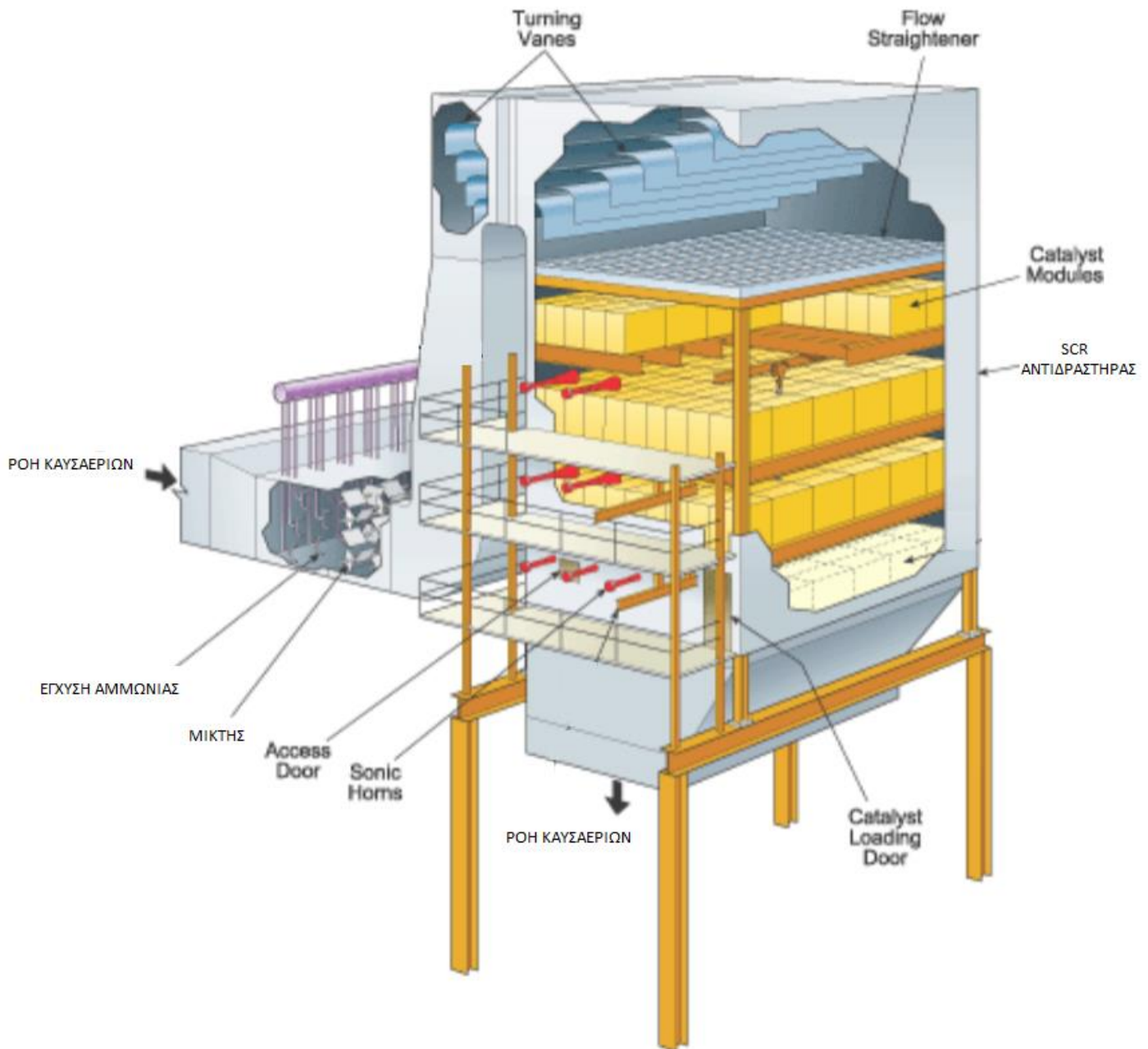
5.3.1.1 Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή SCR (Selective catalytic reduction)

Σύμφωνα με την U.S. Department of Energy (1997) το SCR χρησιμοποιεί έναν καταλύτη και ένα αναγωγικό (αμμωνία, NH₃) για τη διάσπαση των NO_x σε αέριο άζωτο και υδρατμούς. Στην πράξη, οι σωλήνες έγχυσης αμμωνίας, τα ακροφύσια και τα πλέγματα ανάμειξης βρίσκονται ανάντη από τον θάλαμο καταλύτη. Αφού εγχυθεί ένα αραιό μίγμα αμμωνίας-αέρα στο ρεύμα των καυσαερίων, το οποίο λαμβάνει χώρα με διασπορά και η καταλυτική αντίδραση ολοκληρώνεται εντός του θαλάμου του καταλύτη, όπως αυτό φαίνεται στο παρακάτω Σχ. 5.1. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται παγκοσμίως όπου απαιτούνται υψηλές (70 έως 90%) αποτελεσματικότητας αφαίρεσης NO_x. Η χρήση του SCR μπορεί να είναι αποτελεσματική για λέβητες που καίνε μια ποικιλία καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων φυσικού αερίου, πετρελαίου, άνθρακα και ξύλου υποστηρίζουν οι Stultz S. και Kitto J. (1992).

Μια ποικιλία σχημάτων και σκευασμάτων καταλύτη είναι διαθέσιμα για χρήση στη διαδικασία SCR. Τα δύο κορυφαία σχήματα είναι η κηρήθρα (honeycomb) και το σχήμα πλάκας.

Η επιλογή του καταλύτη βασίζεται στους ακόλουθους παράγοντες:

1. αντοχή σε τοξικά υλικά,
2. αντοχή στην τριβή,
3. μηχανική αντοχή για να αντισταθεί στην αιθάλη,
4. αντίσταση στη θερμική ανακύκλωση,
5. αντίσταση στην οξείδωση του SO₂ σε SO₃, και
6. αντίσταση στην απόφραξη.



Σχήμα 5.1 Διαμόρφωση θαλάμου αντίδρασης SCR.

Πηγή: U.S. Department of Energy (1997).

Οι περισσότεροι καταλύτες εμπίπτουν συνήθως σε μία από τις τρεις κατηγορίες: βασικό μέταλλο, ζεόλιθος και πολύτιμο μέταλλο. Ο πιο τυπικός καταλύτης που χρησιμοποιείται είναι SINOX SP 353 (που αποτελείται από 80% TiO_2 + 10% WO_3/MoO_3 + 10% V_2O_5 + binding + plastifier material).

Οι καταλύτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπου οι θερμοκρασίες των καυσαερίων κυμαίνονται μεταξύ 175 °C και 650°C, αλλά συνήθως σήμερα έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν εντός εύρους από 230°C έως 455°C. Η βέλτιστη απόδοση αναφέρουν οι Stultz S. και Kitto J. (1992) ότι εμφανίζεται γενικά μεταξύ 345°C και 450°C ανάλογα με το καύσιμο που καταναλώνεται.

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στον καταλύτη είναι οι παρακάτω:

- $4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
- $4\text{NH}_3 + 6\text{NO} \rightarrow 5\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
- $4\text{NH}_3 + 2\text{NO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 3\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$

Η λειτουργία πάνω από αυτό το εύρος θερμοκρασίας μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα ορισμένων καταλυτών και οι λειτουργίες σε χαμηλότερες θερμοκρασίες αυξάνουν την πιθανότητα σχηματισμού θεικού αμμωνίου εντός της καταλυτικής κλίνης. Για αυτούς τους λόγους, η επιλογή της κατάλληλης σύνθεσης καταλύτη για τις συνθήκες λειτουργίας είναι κρίσιμη για την επιτυχία αυτής της τεχνικής μείωσης των NOx. Η ωφέλιμη διάρκεια ζωής μιας καταλυτικής κλίνης ποικίλλει αλλά συχνά υπερβαίνει τα 2 χρόνια. Στο τέλος αυτού του χρόνου, πρέπει να προστεθεί επιπλέον καταλύτης ή να αντικατασταθεί η κλίνη.

Ο έλεγχος της διεργασίας της ροής της αμμωνίας παραμένει ουσιαστικά σταθερός κατά τη διάρκεια περιόδων κανονικών λειτουργιών με 1 mol αμμωνίας που απαιτείται για να επιτευχθεί μείωση 1 mol στο NOx. Στην πράξη, η πραγματική μοριακή αναλογία που απαιτείται για να επιτευχθεί ένα δεδομένο επίπεδο μείωσης των NOx είναι ελαφρώς υψηλότερη από αυτή την αναλογία ένα προς ένα λόγω της αμμωνίας που δεν αντέδρασε. Αυτή η περίσσεια αμμωνίας είναι γνωστή ως ολίσθηση αμμωνίας. Για να ληφθεί υπόψη ο χρόνος καθυστέρησης αντίδρασης κατά την εκκίνηση και τον τερματισμό λειτουργίας, απαιτείται αναλογία πλούσια σε αμμωνία για την αύξηση των φορτίων και μικρή - φτωχή αναλογία αμμωνίας για τη μείωση των φορτίων. Επίσης οι Stultz S. και Kitto J. (1992) αναφέρουν ότι ο συμπαρασυρμός της αμμωνίας πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα ($<5\text{mg}/\text{Nm}^3$) κατά την έξοδο των καυσαερίων από τον καταλύτη. Είναι σημαντικό να διατηρούνται χαμηλά τα επίπεδα ολίσθησης αμμωνίας επειδή η αμμωνία μπορεί να αντιδράσει με άλλα συστατικά καύσης όπως το τριοξείδιο του θείου για το σχηματισμό αλάτων αμμωνίας. Αυτά τα άλατα είναι συχνά πολύ λεπτά σωματίδια που μπορούν να οδηγήσουν σε πρόσθετες εκπομπές σωματιδίων PM. Επειδή αυτά τα σωματίδια είναι επίσης κολλώδη και διαβρωτικά, μπορούν ενδεχομένως να προκαλέσουν προβλήματα κατάντη, συμπεριλαμβανομένης της απόφραξης.

5.3.1.2 Επιλεκτική μη καταλυτική αναγωγή SNCR (Selective non-catalytic reduction).

Το SNCR χρησιμοποιεί έναν αναγωγικό παράγοντα είτε αμμωνίας (NH_3) είτε ουρίας $[(\text{NH}_2)_2\text{CO}]$ για να διαχωρίσει NOx σε αέριο άζωτο και υδρατμούς. Στην πράξη, ο αναγωγικός παράγοντας εγχέεται στο ρεύμα καυσαερίων εντός μιας συγκεκριμένης ζώνης θερμοκρασίας. Με την κατάλληλη ανάμειξη και τον επαρκή χρόνο παραμονής για να συμβεί η αντίδραση αναγωγής, το NOx μετατρέπεται σε αβλαβές μοριακό άζωτο. Η αποδεκτή περιοχή θερμοκρασίας για την αντίδραση αναγωγής είναι 760°C έως 1090°C , αλλά προτιμώνται θερμοκρασίες άνω των 925°C . Σε θερμοκρασίες κάτω των 870°C , απαιτούνται συχνά χημικοί ενισχυτές όπως το υδρογόνο για να βοηθήσουν την αντίδραση. Πάνω από 1100°C , η αμμωνία ή η ουρία η κύρια αντίδραση που λαμβάνει χώρα με το διαθέσιμο οξυγόνο σχηματίζει επιπλέον NOx.

- $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + 3/2\text{H}_2\text{O}$

Για νέους λέβητες που ενσωματώνουν εξοπλισμό SNCR, μπορεί να είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν ειδικά χαρακτηριστικά στο σχεδιασμό του για να εξυπηρετούν τις αντιδράσεις μείωσης σε μια περιοχή του λέβητα όπου υπάρχουν βέλτιστες θερμοκρασίες.

Τα μηχανικά εξαρτήματα που απαιτούνται για την εφαρμογή του SNCR αποτελούνται από εξοπλισμό αποθήκευσης και χειρισμού για την αμμωνία ή την ουρία, τον εξοπλισμό για την ανάμειξη του αναγωγικού παράγοντα με έναν φορέα (πεπιεσμένο αέρα, ατμό ή νερό) και τον εξοπλισμό έγχυσης. Κάτω από προσεκτικά ελεγχόμενες συνθήκες, αναφέρουν οι Stultz S. και Kitto J. (1992) ότι θα μπορούμε να έχουμε επίπεδα μείωσης της τάξης και του 70%, αλλά συχνότερα λειτουργικά βλέπουμε περισσότερο μειώσεις στην περιοχή που κυμαίνεται από 30 έως 50% με την χρήση αυτής της τεχνικής.

Αν και το SNCR μπορεί να είναι αποτελεσματικό όταν παρέχεται επαρκής έλεγχος, η έγχυση περίσσειας αμμωνίας ή ουρίας μπορεί να δημιουργήσει λειτουργικά προβλήματα. Τα άλατα αμμωνίου μπορούν να παραχθούν όταν η περίσσεια του αναγωγικού παράγοντα αντιδρά με συγκεκριμένα συστατικά καυσαερίων, όπως το τριοξειδίο του θείου. Αυτά τα άλατα, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν θειικό αμμώνιο και όξινο θειικό αμμώνιο, μπορεί να προκαλέσουν ανεπιθύμητες συνέπειες, όπως σχηματισμό λεπτών σωματιδίων PM, επιπλέον ρύπανση ή ακόμα και διάβρωση στον επικείμενο εξοπλισμό.

5.3.1.3 Αναδυόμενες τεχνολογίες επεξεργασίας καυσαερίων για τα οξείδια του αζώτου (NOx).

Η πρόοδος στην τεχνολογία επεξεργασίας καυσαερίων NOx εστιάζεται στην ανάπτυξη εναλλακτικών μεθόδων που βασίζονται στην αμμωνία. Αν και γενικά είναι πιο ακριβές από τα υπάρχον συστήματα SCR και SNCR, αυτές οι μέθοδοι εξετάζονται επειδή δεν απαιτούν επιτόπια αποθήκευση αμμωνίας, αποφεύγουν προβλήματα που επιτρέπουν την αμμωνία και εξαλείφουν την ολίσθηση αμμωνίας.

Μια τεχνική που έχει αναπτυχθεί και κυκλοφορεί επί του παρόντος στην αγορά τελευταία περιλαμβάνει τη χρήση αερίου αναγέννησης για την αναγέννηση ενός καταλύτη. Ο καταλύτης φορτώνεται σε μια σειρά από ράφια που βρίσκονται κοντά στις βάνες απομόνωσης. Κατά τη λειτουργία, τα καυσαέρια περνούν πάνω από τον καταλύτη για καθαρισμό. Ενώ βρίσκεται σε λειτουργία, τμήματα του καταλύτη απομονώνονται συνήθως από τα καυσαέρια με βάνες έτσι ώστε ένα αέριο αναγέννησης να μπορεί να περάσει από τον καταλύτη. Μετά την αναγέννηση, ο καταλύτης εκτίθεται ξανά στα καυσαέρια. Οποιαδήποτε στιγμή, ένα μέρος του καταλύτη αναγεννάτε. Ο καταλύτης είναι επικαλυμμένος με ανθρακικό κάλιο που απορροφά τις οξειδωμένες ενώσεις. Ένα αέριο αναγεννά το ανθρακικό κάλιο και απομακρύνει τις απορροφημένες ενώσεις αζώτου ως πλέον μοριακό άζωτο. Αυτή η διαδικασία είναι ικανή να μειώσει τις εκπομπές NOx, CO, SO₂ ακόμα και ορισμένες εκπομπές VOC ανέφεραν στο συγγραφικό τους έργο οι Doyle B. and Solt C. (2014).

Μια άλλη τεχνική που βρίσκεται υπό ανάπτυξη σήμερα περιλαμβάνει την προσθήκη όζοντος κατάντη από το ξηρό σύστημα FGD (Flue gas desulfurization). Το όζον οξειδώνει το NOx σε πεντ-οξειδίο του αζώτου (N₂O₅). Ο υδράργυρος, το CO και άλλες πτητικές οργανικές ενώσεις οξειδώνονται επίσης μαζί με τα NOx. Τα οξειδωμένα προϊόντα πλέον, συμπεριλαμβανομένου του N₂O₅, αφαιρούνται στη συνέχεια μέσω ενός πλυντηρίου με χρήση καυστικής σόδας

(caustic scrubber). Ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου επικεντρώνεται στο κόστος παραγωγής του όζοντος.

5.3.2 Τεχνικές επεξεργασίας καυσαερίων για το διοξείδιο του θείου (SO₂).

Για τη μείωση των εκπομπών SO₂ υπάρχουν δυο προσεγγίσεις για τον χαρακτηρισμό των τεχνικών ελέγχου μετά την καύση σύμφωνα με τους Takeshita M. και Soud H. (1993).

Η μια προσέγγιση κατά τον Singer J. (1991), περιλαμβάνει την κατηγοριοποίηση των διάφορων τεχνικών αποθείωσης καυσαερίων (FGD) σε μη ανανεώσιμες (throwaway) και αναγεννώμενες (recovery) διαδικασίες. Για αυτήν τη συζήτηση, τα ανανεώσιμα και μη ανανεώσιμα αναφέρονται στα υποπροϊόντα που σχηματίζονται και όχι στο αντιδραστήριο στοιχείο. Σε μια μη ανανεώσιμη διαδικασία, τα απόβλητα που περιέχουν θείο και προέρχονται από την επεξεργασία των καυσαερίων αποθηκεύονται ή υποβάλλονται σε επεξεργασία πριν από την απομάκρυνση τους. Οι ανανεώσιμες διεργασίες ανακτούν το SO₂ σε κάποια εμπορικά χρήσιμη μορφή όπως το στοιχειακό θείο ή το θειικό οξύ.

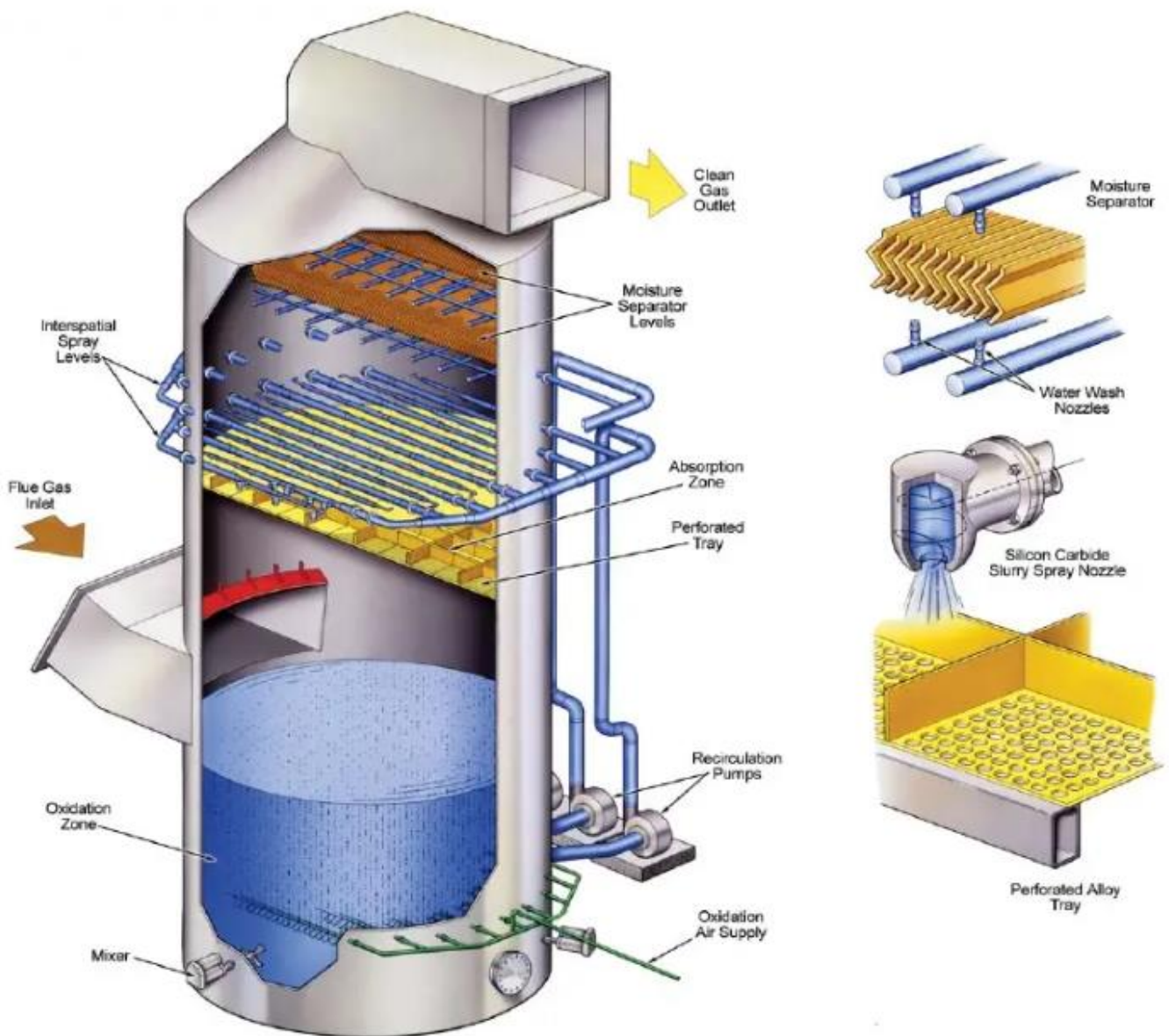
Η δεύτερη προσέγγιση είναι να κατηγοριοποιήσουμε τη διαδικασία FGD ως υγρή ή ξηρή. Μια υγρή διεργασία διαποτίζει τα καυσαέρια με υδρατμούς, ενώ μια ξηρή διεργασία όχι.

Αν και οι διάφορες τεχνικές FGD είναι σαφώς διαφορετικές στην εφαρμογή τους, όλες περιλαμβάνουν χημικές αντιδράσεις που μετατρέπουν το αέριο SO₂ σε υγρή ή στερεή ένωση που περιέχει θείο. Οι πλυντηρίδες καυσαερίων μειώνουν αποτελεσματικά τις εκπομπές SO₂ και περιγράφονται συχνά ως σύνθετες διαδικασίες σε χημικές εγκαταστάσεις σύμφωνα με τους Lunt R. και Cunic J. (2000).

5.3.2.1 Μη ανανεώσιμες διεργασίες FGD

Υπάρχουν τρεις ευρέως χρησιμοποιούμενες μη ανανεώσιμες τεχνικές FGD (flue gas desulfurization) που περιλαμβάνουν είτε υγρό τρίψιμο με ασβέστη ή ασβεστόλιθο, τη διαδικασία διπλού αλκαλίου ή ξηρό τρίψιμο με ασβέστη. Ανάλογα με την τεχνική, ο απαιτούμενος εξοπλισμός αποθείωσης βρίσκεται είτε ανάντη είτε κατάντη από το σύστημα συλλογής σωματιδίων PM.

1) Η διαδικασία με υγρό τρίψιμο με ασβέστη ή ασβεστόλιθο είναι μια πολύ συνηθισμένη τεχνική FGD. Σε αυτά τα συστήματα, τα καυσαέρια έρχονται σε επαφή με έναν υδατικό πολτό από ασβέστη ή ασβεστόλιθο σε έναν απορροφητή αντίθετης ροής ή ένα πλυντήριο (scrubber), που βρίσκεται μετά το σύστημα συλλογής σωματιδίων PM. Μέσα στο πλυντήριο, ο ασβέστης (CaO) ή ο ασβεστόλιθος, ο οποίος είναι κυρίως ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃), αντιδρά με το SO₂ για να σχηματίσει άλατα ασβεστίου. Για να διατηρηθεί αυτή η αντίδραση, φρέσκος πολτός πρέπει να εισάγεται συνεχώς καθώς και να απομακρύνονται τα άλατα ασβεστίου για τελική επεξεργασία και απόρριψη. Αρκετά υγρά συστήματα FGD είναι σε εμπορική χρήση παγκοσμίως με απόδοση απομάκρυνσης SO₂ έως και 98%. [U.S. Department of Energy (1995)]. Η διαμόρφωση ενός τύπου υγρού πλυντηρίου φαίνεται στο παρακάτω Σχ. 5.2.

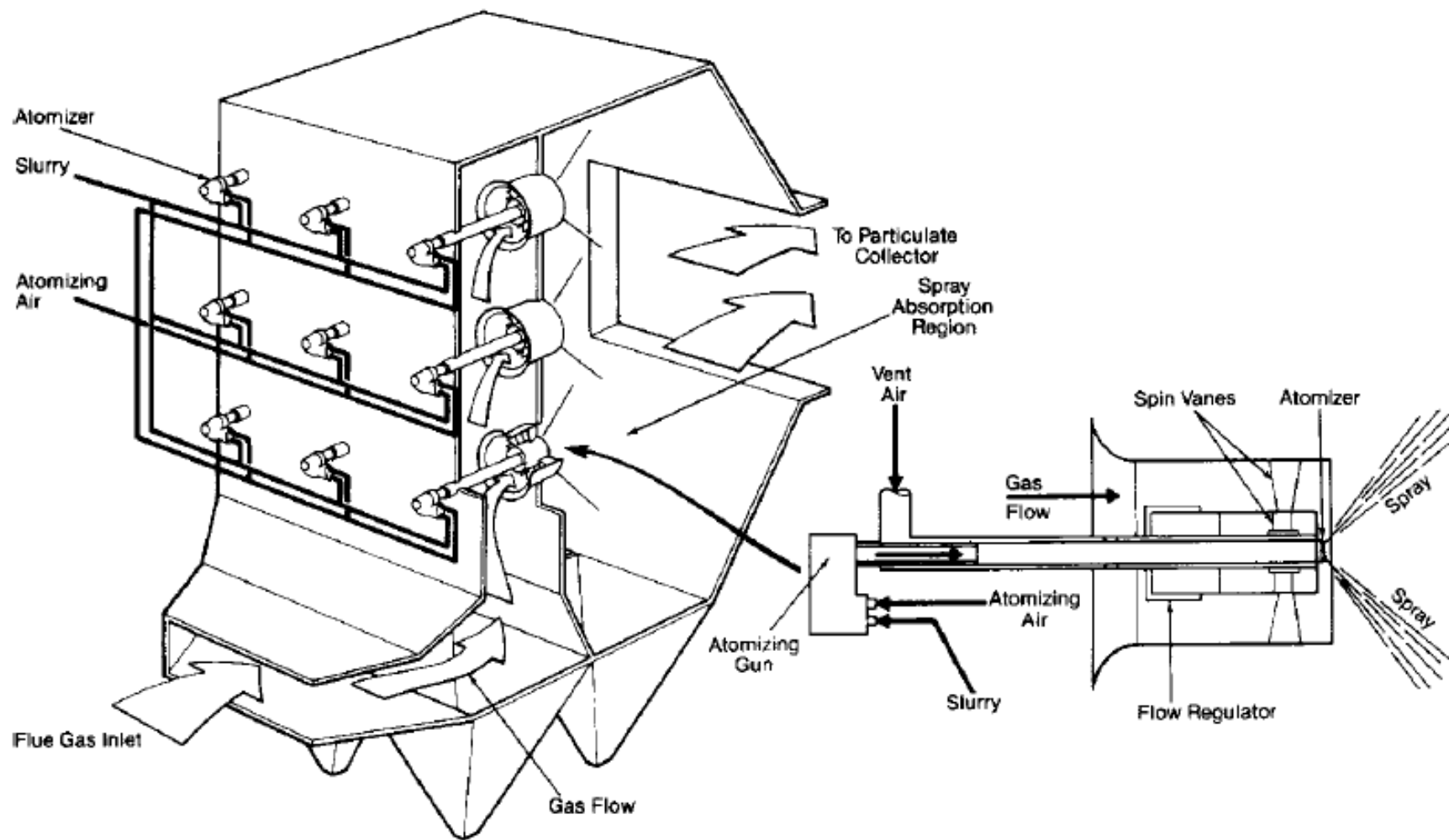


Σχήμα 5.2 Διαμόρφωση υγρού πλυντηρίου (scrubber).
 Πηγή: U.S. Department of Energy (1995).

2) Στη διεργασία διπλού αλκαλίου, καταναλώνεται ασβέστης ή ασβεστόλιθος και ως απόβλητα παράγονται υγρά άλατα ασβεστίου, που αποτελούνται κυρίως από θειώδες ασβέστιο και θειικό ασβέστιο. Σε αντίθεση με τη διαδικασία του υγρού καθαρισμού με ασβέστη ή ασβεστόλιθο, η απορρόφηση SO₂ και η παραγωγή αποβλήτων εκτελούνται ως ξεχωριστές λειτουργίες στη διαδικασία διπλού αλκαλίου. Η απορρόφηση επιτυγχάνεται με την κυκλοφορία ενός διαλυτού αλκαλίου όπως NaCO₃, NaOH ή Na₂SO₃ μέσω ενός πλυντηρίου (scrubber). Τα απόβλητα από το scrubber, τα οποία περιέχουν ενώσεις νατρίου-θείου, αναμειγνύονται στη συνέχεια με ασβέστη ή ασβεστόλιθο για να παραχθεί ένα νέο απόβλητο ως προϊόν ασβεστίου-θείου. Το νάτριο που χάνεται ως αποτέλεσμα της μεταφοράς στα απόβλητα μπορεί μερικές φορές να περιπλέξει τη διαδικασία διάθεσης, επειδή το θειικό νάτριο συμβάλλει στη περιβαλλοντική

μόλυνση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Αυτή η διαδικασία, η οποία βρίσκεται κατάντη από το σύστημα συλλογής σωματιδίων PM, έχει ως αποτέλεσμα εξαιρετική απόδοση αφαίρεσης SO₂. [U.S. Department of Energy (1999)].

3) Το στεγνό ή ξηρό τρίψιμο με ασβέστη είναι μια σχετικά απλή τεχνική διεργασία αφαίρεσης SO₂. Τοποθετημένο ανάντη από το σύστημα συλλογής σωματιδίων PM, ο ξηρός καθαρισμός με ασβέστη περιλαμβάνει τον ψεκασμό ενός πολτού (atomized slurry) ή ενός υδατικού διαλύματος ενός αλκαλικού αντιδραστηρίου στο ζεστό καυσαέριο για την απορρόφηση του SO₂. Το κυρίαρχο αντιδραστήριο που χρησιμοποιείται σε ξηρά scrubbers είναι ο νωπός ασβέστης, αλλά μερικές φορές χρησιμοποιούνται διαλύματα ανθρακικού νατρίου και σχετικές ενώσεις του. Τα κρυσταλλωμένα προϊόντα αντίδρασης καθώς και η ιπτάμενη τέφρα από τον λέβητα συλλέγονται στο σύστημα συλλογής σωματιδίων PM και στη συνέχεια υποβάλλονται σε επεξεργασία ως απόβλητα. Οι υγροί scrubbers γενικά επιλέγονται για καύσιμα που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Τα στεγνά scrubbers, επιλέγονται για καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Η χρήση ξηρών scrubbers ασβέστη σε μεγάλους λέβητες κοινής ωφέλειας είναι περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους του αντιδραστηρίου, αλλά η χρήση τους είναι πιο ελκυστική σε σχέση με τους υγρούς scrubbers. Το ξηρό τρίψιμο με ασβέστη αναφέρεται μερικές φορές ως απορρόφηση ψεκασμού, ξήρανση με ψεκασμό ή ημί-υγρό τρίψιμο. Η διαμόρφωση ενός τύπου ξηρού scrubber πλυντηρίου φαίνεται στο παρακάτω Σχ. 5.3.



Σχήμα 5.3 Διαμόρφωση ξηρού πλυντηρίου (dry scrubber). Πηγή: Kitto J. (1996).

5.3.2.2 Ανανεώσιμες διεργασίες FGD

Οι ανανεώσιμες διεργασίες FGD συνήθως περιλαμβάνουν ένα ακριβό και πολύπλοκο σύστημα για την παραγωγή εμπορεύσιμου θείου ή θειικού οξέος αντί για άχρηστα απόβλητα που περιέχουν θείο. Αν και η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης του SO₂ είναι γενικά μεγαλύτερη από 90%, κατά τον Soud (1995), η εφαρμογή του ανανεώσιμου FGD είναι περιορισμένη. Οι διεργασίες αυτές είναι αρκετά ενεργοβόρες και περιλαμβάνουν επικίνδυνα και δυνητικά τοξικά αέρια.

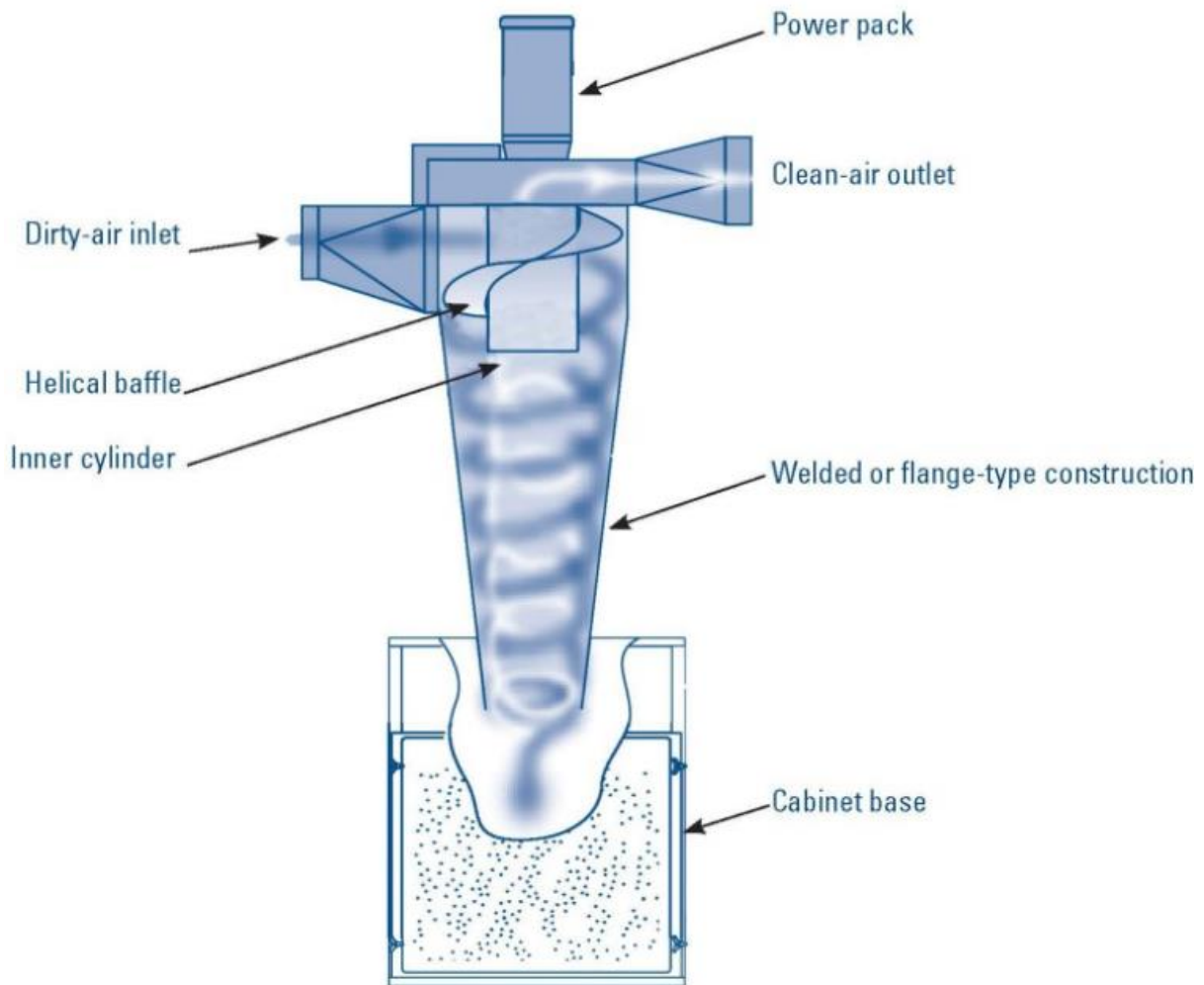
Αναφορικά υπάρχουν και άλλες ανανεώσιμες διαδικασίες FGD που πραγματοποιούνται με το οξείδιο του μαγνησίου, το θειώδες νάτριο και την απορρόφηση από ενεργό άνθρακα σύμφωνα με τον Singer J. (ed.) (1991).

5.3.3 Τεχνικές επεξεργασίας καυσαερίων για τα σωματίδια PM

Τέσσερις βασικοί τύποι εξοπλισμού χρησιμοποιούνται για τη μείωση των εκπομπών σωματιδίων PM σύμφωνα με τους Soud H. and Mitchell S. (1997). Οι κύριες λειτουργίες κάθε τύπου είναι η απομάκρυνση των σωματιδίων που διασπείρονται στα καυσαέρια, η αποφυγή επαναισόδου των σωματιδίων στο ρεύμα των καυσαερίων και η εκκένωση του συλλεγόμενου απορριπτόμενου υλικού. Ο εξοπλισμός που μπορεί να εκτελέσει αυτές τις λειτουργίες περιλαμβάνει μηχανικούς συλλέκτες, υγρές πλυντηρίδες καθαριστές, ηλεκτροστατικούς κατακρημιστές (ESP) και υφασμάτινα φίλτρα. Πλυντηρίδες (Scrubbers) όπως αυτά που περιγράφονται στην προηγούμενη ενότητα 5.3.2, είναι επίσης αποτελεσματικά στην απομάκρυνση των σωματιδίων PM από τα καυσαέρια φορτωμένα με τέφρα, αν και ο πρωταρχικός τους ρόλος είναι η απομάκρυνση του SO₂.

5.3.3.1 Μηχανικοί συλλέκτες σκόνης (Mechanical Collectors)

Οι μηχανικοί συλλέκτες σκόνης, ή κυκλώνες, απομακρύνουν τα σωματίδια με δυνάμεις φυγόκεντρες, αδρανειακές και βαρύτητας. Καθώς το φορτωμένο με τέφρα καυσαέριο εισέρχεται στον κυκλώνα κοντά στην κορυφή, δημιουργείται μια δίνη υψηλής ταχύτητας μέσα στον εξοπλισμό αυτόν. Τα βαριά σωματίδια κινούνται προς τα έξω λόγω της φυγόκεντρης δύναμης και αρχίζουν να συσσωρεύονται προς το τοίχωμα του κυκλώνα. Η βαρύτητα αναγκάζει συνεχώς αυτά τα σωματίδια να κινούνται προς τα κάτω, όπου και εξέρχονται μέσω ενός ανοίγματος σε μια περιοχή σε σχήμα χοάνης και μεταφέρονται σε μια περιοχή αποθήκευσης. Μικρότερα και ελαφρύτερα σωματίδια που παραμένουν αιωρούμενα στα καυσαέρια κινούνται προς το κέντρο της δίνης προτού εκφορτιστούν μέσω της εξόδου καθαρού αερίου που βρίσκεται κοντά στην κορυφή του κυκλώνα.



Σχήμα 5.4 Διαμόρφωση Συλλέκτη σκόνης τύπου κυκλώνα

Οι κυκλώνες είναι επαρκείς για τον έλεγχο των σωματιδίων PM όταν οι κανονισμοί εκπομπών ήταν λιγότερο αυστηροί και όταν οι μέθοδοι καύσης παρήγαγαν μεγαλύτερα σωματίδια. Τώρα, με τις βελτιωμένες μεθόδους καύσης και με όρια εκπομπών με βάση και το μέγεθος των σωματιδίων, οι κυκλώνες δεν χρησιμοποιούνται πλέον ως κύρια μέθοδος αφαίρεσης σωματιδίων. Είναι πιο αποτελεσματικοί σε σωματίδια μεγαλύτερα από 10 μm ενώ πέφτει δραματικά η απόδοση συλλογής των σωματιδίων καθώς μειώνεται το μέγεθος αυτό σύμφωνα με τους Stultz S. και Kitto J. (1992). Η συνολική απόδοση ενός κυκλώνα μπορεί να προσδιοριστεί μόνο όταν είναι γνωστά η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, το ειδικό βάρος τους και η επιτρεπόμενη πτώση πίεσης.

Οι Stultz S. and Kitto J. (1992) ανέφεραν επίσης ότι η χρήση κυκλώνων σε νέες εφαρμογές καύσης περιορίζεται κυρίως σε λέβητες ρευστοποιημένης κλίνης όπου χρησιμοποιούνται για την ανακυκλοφορία του υλικού της κλίνης. Παρόλο που χρησιμοποιούνται κυκλώνες για το σκοπό αυτό, ένας άλλος τύπος συλλέκτη σωματιδίων PM, όπως ένας ESP υψηλής απόδοσης ή ένα υφασμάτινο φίλτρο, πρέπει να εγκατασταθεί σε σειρά με τον κυκλώνα για να πληρούνται οι περιορισμοί εκπομπής σωματιδίων PM.

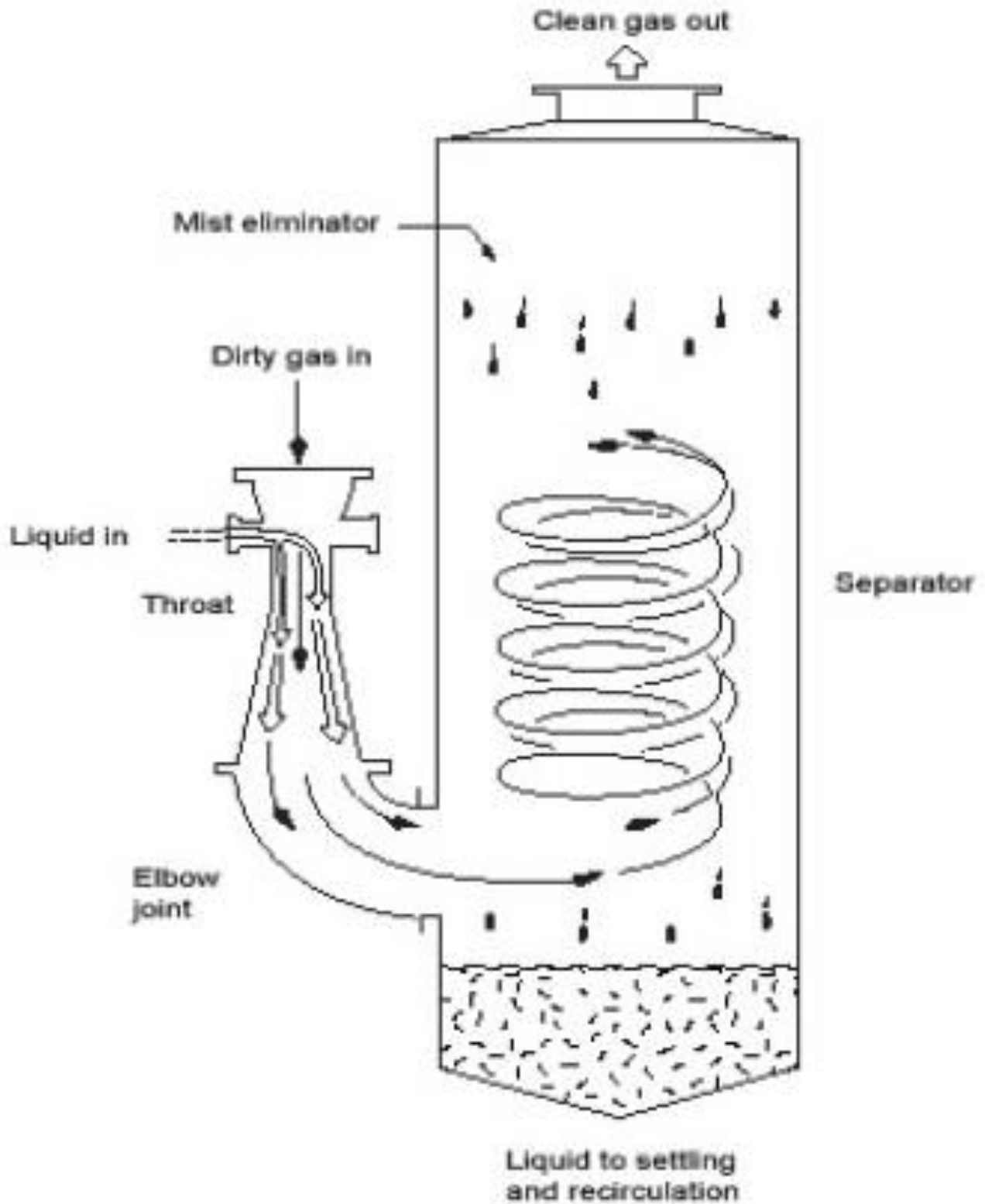
Για εφαρμογές όπου χρησιμοποιείται ένας κυκλώνας για την αφαίρεση μεγάλων σωματιδίων φορτωμένων με άνθρακα από το ρεύμα των καυσαερίων, μπορεί να είναι δυνατό να συμπεριληφθεί ένας εξοπλισμός για την επανέγχυση των συλλεγόμενων σωματιδίων πίσω

στον θάλαμο καύσης. Η επανέγχυση μπορεί να είναι μια αποτελεσματική τεχνική για τη μείωση της απώλειας άνθρακα και συνεπώς την αύξηση της απόδοσης της καύσης.

5.3.3.2 Υγρές πλυντηρίδες (Wet scrubbers)

Τα σωματίδια PM μπορούν να αφαιρεθούν χτυπώντας τα με σταγονίδια υγρού μέσα σε ένα υγρό πλυντήριο. Ένας πύργος ψεκασμού είναι ένας υγρός καθαριστής χαμηλής πτώσης πίεσης. Επιτυγχάνει την απομάκρυνση των σωματιδίων PM με ψεκασμό του νερού και επιτρέποντας στα καυσαέρια να ρέουν μέσα από μια ομίχλη. Οι πύργοι ψεκασμού μπορούν να λειτουργήσουν είτε αντίθετα είτε παράλληλα με το ρεύμα καυσαερίων. Τα πλυντήρια Venturi είναι υγρά πλυντήρια υψηλής πτώσης πίεσης. Και οι δύο τύποι υγρών πλυντηρίων είναι καλοί για την αφαίρεση σωματιδίων PM καθώς και ορισμένων άλλων αερίων.

Το πλυντήριο venturi είναι ένας πολύ αποτελεσματικός εξοπλισμός αφαίρεσης σωματιδίων PM. Καθώς τα καυσαέρια που είναι φορτωμένα με τέφρα διέρχονται από ένα άνοιγμα σε αυτά τα πλυντήρια περιορίζοντας την ροή, η ταχύτητα των καυσαερίων αυξάνεται σημαντικά. Καθώς τα καυσαέρια εξέρχονται από το venturi, συνεχώς διαβρέχονται. Τα σωματίδια στα καυσαέρια συγκρούονται με το ρευστό και παρασύρονται με τα σταγονίδια του υγρού. Η βαρύτητα προκαλεί αυτά τα σταγονίδια να πέσουν στον κάτω θάλαμο του διαχωριστή όπου προσκρούουν σε μια δεξαμενή με νερό καθιστώντας τα σωματίδια να κατακάθονται έξω από το νερό.



Σχήμα 5.5 Διαμόρφωση Πλυντηρίδας Venturi (wet scrubber).
Πηγή US EPA.GOV. (2023)

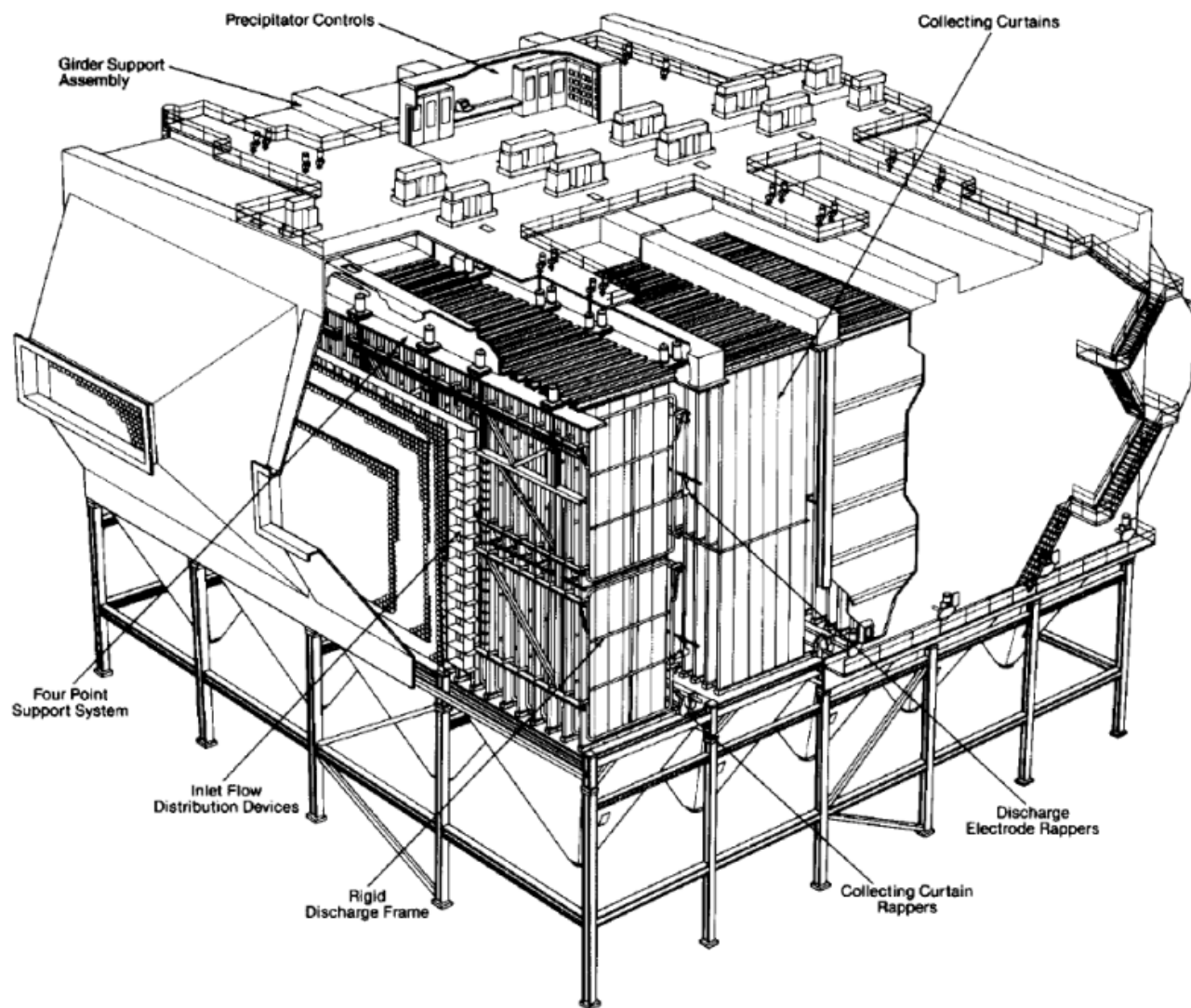
Οι πλυντηρίδες Venturi μπορούν να συλλέξουν σχεδόν το 100% των πολύ λεπτών σωματιδίων που αιωρούνται στα καυσαέρια σύμφωνα με τους Stultz S. and Kitto J. (1992). Ωστόσο, οι πλυντηρίδες Venturi σπάνια χρησιμοποιούνται ως κύρια συσκευή συλλογής σωματιδίων PM λόγω μεγάλης πτώσης πίεσης.

5.3.3.3 Ηλεκτροστατικός κατακρημνιστής (ESP - Electrostatic precipitator)

Η αφαίρεση των σωματιδίων που αιωρούνται στα καυσαέρια μπορεί να επιτευχθεί με ηλεκτρική φόρτιση των σωματιδίων σε μια συσκευή γνωστή ως ESP. Η μονάδα αποτελείται από μια σειρά κατακόρυφων πλακών συλλέκτη με ηλεκτρόδια κεντρικά τοποθετημένα μεταξύ των πλακών σε μια διαμόρφωση όπως αυτή που φαίνεται παρακάτω στο Σχ. 5.6. Ο αγωγός που συνδέει το ESP με τον λέβητα και τη καμινάδα διοχετεύει τα γεμάτα με τέφρα καυσαέρια μεταξύ των πλακών. Όταν οι πλάκες συνδέονται σε ηλεκτρική γείωση και τα ηλεκτρόδια υποβάλλονται σε αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο υψηλής τάσης, τα σωματίδια παίρνουν αρνητικό φορτίο και αρχίζουν να κινούνται προς τις θετικά φορτισμένες πλάκες- συλλέκτη. Καθώς η ροή συνεχίζεται, τα σωματίδια αρχίζουν να συσσωρεύονται στις επιφάνειες της πλάκας συλλέκτη. Τελικώς, ένα στρώμα σωματιδίων συσσωρεύεται και πρέπει με κάποιο τρόπο να αφαιρεθεί. Μια μέθοδος για την αφαίρεση του στρώματος περιλαμβάνει το σφυροκόπημα των πλακών. Αυτή η ξαφνική πρόσκρουση προκαλεί την απομάκρυνση των σωματιδίων από τις πλάκες και την πτώση σε μια χοάνη που βρίσκεται στο κάτω μέρος του ESP. Τα σωματίδια που συσσωρεύονται στη χοάνη μεταφέρονται στη συνέχεια σε ένα χώρο αποθήκευσης που το ονομάζουμε σιλό με την βοήθεια πίεσης αέρα και αυτόματων βανών.

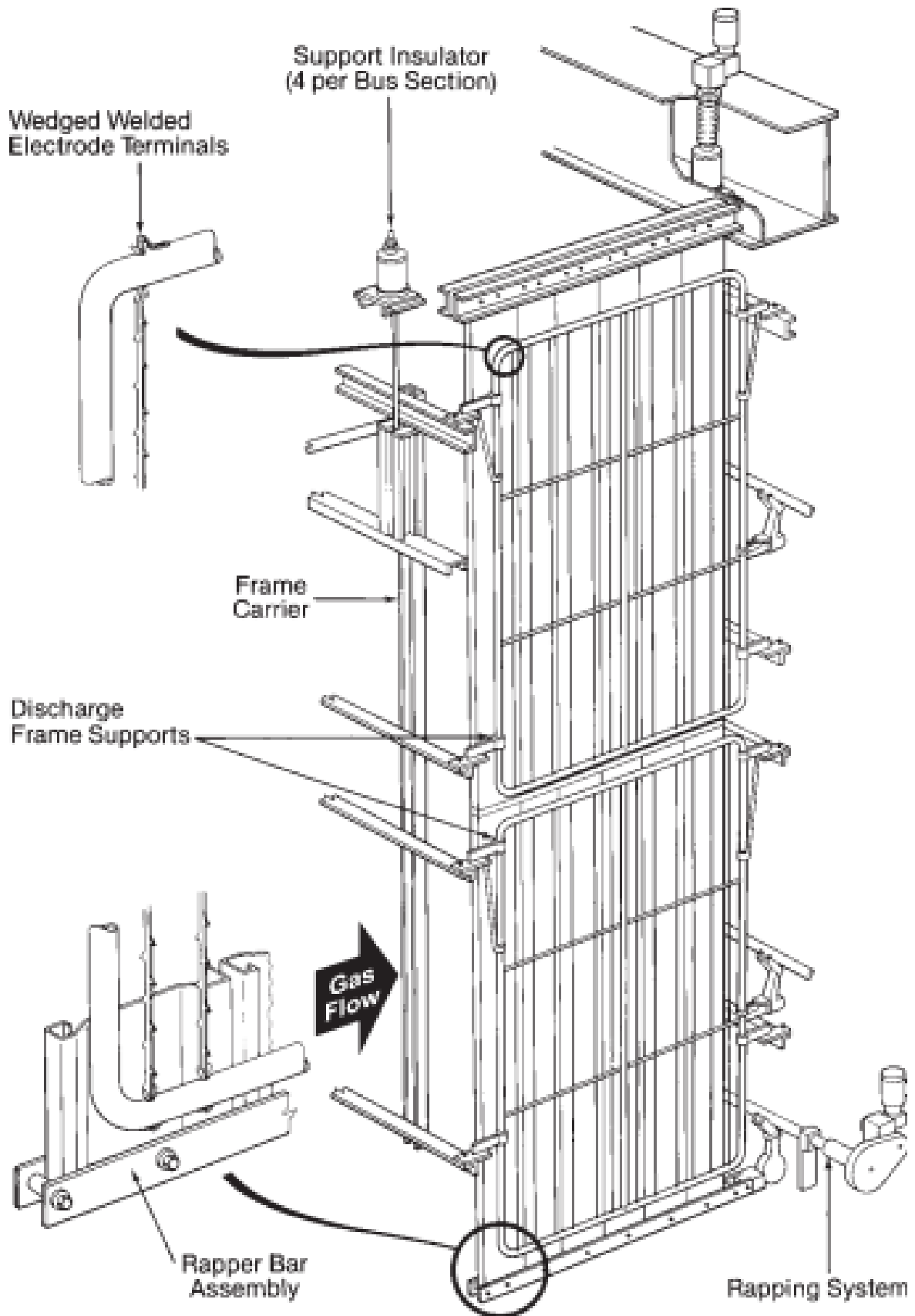
Υπάρχουν δύο βασικές διαμορφώσεις για τα ESP. Στο σχέδιο σταθμισμένου σύρματος, τα σύρματα χρησιμεύουν ως ηλεκτρόδια. Αυτά τα καλώδια αιωρούνται από ένα ηλεκτρικό σύστημα διανομής τοποθετημένο στην οροφή. Τα βάρη που συνδέονται στο κάτω μέρος των καλωδίων διασφαλίζουν ότι τα καλώδια παραμένουν ίσια και κάθετα. Οι πλάκες συλλογής, οι οποίες μπορεί να έχουν μήκος έως και 15 μέτρα, είναι κρεμασμένες σε σειρές σαν κουρτίνες στα 30cm έως 40cm απόσταση η μία με την άλλη. Για βέλτιστη απόδοση με ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο και χωρίς σχηματισμό ηλεκτρικού τόξου, η ευθυγράμμιση των ηλεκτροδίων και των πλακών συλλέκτη πρέπει να διατηρείται σε αυστηρή συνοχή σύμφωνα με τους Stultz S. και Kitto J. (1992). Η αστοχία ενός καλωδίου λόγω ηλεκτρικού τόξου ή άλλων λόγων είναι ένα επαναλαμβανόμενο πρόβλημα που οδηγεί σε υποβάθμιση της απόδοσης. Στα σχέδια με άκαμπτο πλαίσιο και άκαμπτο ηλεκτρόδιο, οι λωρίδες των ηλεκτροδίων υποστηρίζονται από ένα δομικό πλαίσιο που διατηρεί την απαιτούμενη ευθυγράμμιση. Τα σχέδια του άκαμπτου πλαισίου και του άκαμπτου ηλεκτροδίου είναι πιο ανθεκτικά με την υψηλότερη αξιοπιστία του εξοπλισμού. Όλα τα ESP περιλαμβάνουν ένα μεγάλο, αεροστεγές μεταλλικό περίβλημα που είναι μονωμένο για να αποτρέπει την απώλεια θερμότητας.

Οι αποδόσεις συλλογής σωματιδίων μπορεί να είναι 99,6% ή και υψηλότερες, αλλά πρέπει να αναγνωριστεί ότι η απόδοση αφαίρεσης ποικίλλει ανάλογα με το φορτίο σωματιδίων των καυσαερίων και τον σχεδιασμό του ESP. Καθώς αυξάνεται η ποσότητα των σωματιδίων PM που αιωρούνται στα καυσαέρια, αυξάνεται και η ποσότητα που δεν αφαιρείται και πιθανόν να διαφύγουν στην ατμόσφαιρα κατά τον Singer J. (1991).



Σχήμα 5.6 Διαμόρφωση του Ηλεκτροστατικού Κατακρημνιστή ESP. Πηγή: Stultz S. και Kitto J. (1992).

Συστήματα Rapping όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχ. 5.7, η πιο αποτελεσματική μέθοδος καθαρισμού των κουρτινών του συλλέκτη. Είναι το σφυριλάτισμα του καθενός ξεχωριστά και προς την κατεύθυνση της ροής αερίου. Αυτή η μέθοδος διασφαλίζει ότι κάθε κουρτίνα δέχεται μια δύναμη σφυρηλάτησης. Το σύστημα κρότου που φαίνεται είναι τύπου αναδιπλούμενου σφυριού, όπου τα συγκροτήματα σφυριών είναι τοποθετημένα σε έναν άξονα που εκτείνεται κατά μήκος του ESP σε κλιμακωτή διάταξη. Ο άξονας περιστρέφεται αργά από έναν εξωτερικό μηχανισμό κίνησης που ελέγχεται από χρονόμετρα για συχνότητα κτυπήματος και βέλτιστο καθαρισμό. Το μέγεθος σφυριού επιλέγεται για να ταιριάζει με την εφαρμογή και το μέγεθος της κουρτίνας συλλέκτη. Η εξωτερική, τοποθετημένη στην κορυφή τεχνολογία σφυριλάτισματος χρησιμοποιείται ευρέως. Τυπικά, περισσότερες από μία κουρτίνες συλλέκτη τυλίγονται τη φορά με αυτή τη μέθοδο και η δύναμη κτυπήματος είναι προς την κατεύθυνση προς τα κάτω στο επάνω άκρο των κουρτινών. Τόσο η ράβδος πτώσης όσο και η μαγνητική ώθηση είναι οι μηχανισμοί κίνησης που χρησιμοποιούνται.



Σχήμα 5.7 Απεικόνιση του συστήματος Rapping. Πηγή: Stultz S. και Kitto J. (1992).

5.3.3.4 Υφασμάτινα φίλτρα (Fabric filters)

Τα υφασμάτινα φίλτρα, όπως αυτό που φαίνεται στο παρακάτω Σχ. 5.9, είναι πολύ αποτελεσματικές συσκευές για το διαχωρισμό των σωματιδίων από τα καυσαέρια σύμφωνα με τους Stultz S. και Kitto J. (1992). Ο διαχωρισμός συμβαίνει όταν το φορτωμένο με τέφρα καυσαέριο διέρχεται από ένα πορώδες στρώμα φίλτρου ενός υλικού. Καθώς τα μεμονωμένα σωματίδια συσσωρεύονται στην επιφάνεια του φίλτρου, σχηματίζουν σταδιακά ένα στρώμα σωματιδίων PM. Μόλις σχηματιστεί, αυτό το στρώμα, το υλικό του φίλτρου μπορεί να φιλτράρει. Η δράση κοσκινίσματος που συμβαίνει καθώς τα καυσαέρια κινούνται γύρω και μέσω των δεσμευμένων σωματιδίων παρέχει καλύτερη διήθηση από το ύφασμα. Κάθε υφασμάτινο φίλτρο αποτελείται από μια μακριά, κάθετα υποστηριζόμενη, μικρής διαμέτρου σακούλα συλλογής. Όταν πολλά από αυτά τα φίλτρα είναι διατεταγμένα σε ένα αεροστεγές περίβλημα που βρίσκεται μεταξύ του λέβητα και της καμινάδας, ολόκληρο το συγκρότημα αναφέρεται συνήθως ως σακούλα. Κατά τη λειτουργία, τα καυσαέρια εισέρχονται στην σακούλα και διοχετεύονται είτε στο εσωτερικό είτε στο εξωτερικό των μεμονωμένων υφασμάτινων φίλτρων.

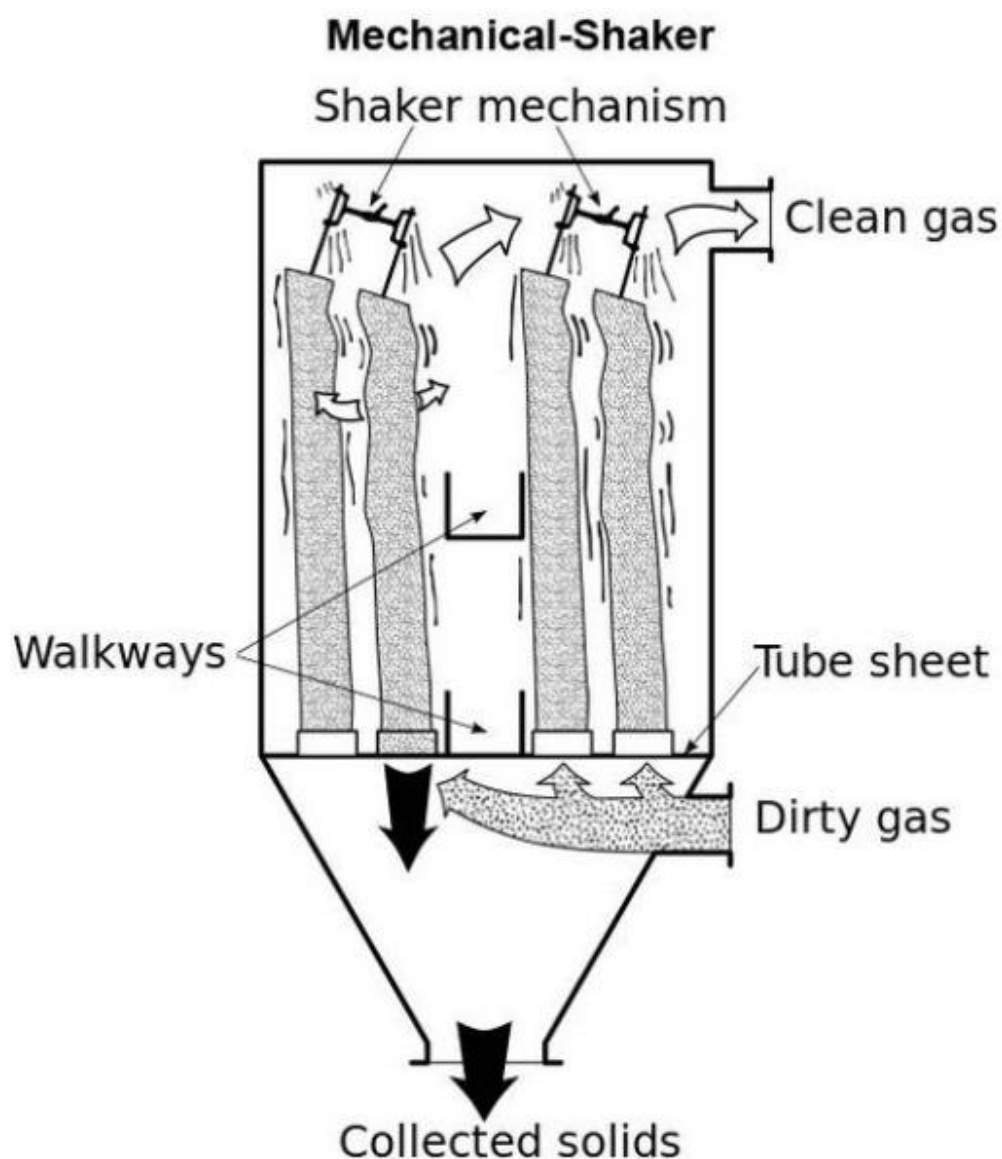
Αφού τα καυσαέρια περάσουν μέσα από το ύφασμα, ρέουν έξω από το σάκο προς την καμινάδα. Τα σωματίδια που αποσπώνται από το υλικό του φίλτρου πέφτουν σε μια χοάνη στο κάτω μέρος του σάκου όπου και αφαιρούνται και μεταφέρονται σε χώρο αποθήκευσης. Κατά τη λειτουργία, το στρώμα σωματιδίων αφαιρείται περιοδικά ανακινώντας τις σακούλες, αντιστρέφοντας τη ροή αέρα μέσα από τους σάκους ή υποβάλλοντας τις σακούλες σε αέρα υψηλής πίεσης.

Το υφαντό fiberglass με ανώτερη θερμοκρασία λειτουργίας 260°C είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή αυτών των σακουλών, για χρήση ως υφασμάτινο φίλτρο. Μια τυπική τσάντα έχει διάμετρο έως 30 cm και μήκος που ποικίλλει έως και 11m. Η δράση κάμψης κατά τον καθαρισμό επηρεάζει τη διάρκεια ζωής της σακούλας, αλλά η πρόοδος στην τεχνολογία υφασμάτων και το φινίρισμα της επιφάνειας έχει ενισχύσει τη μακροζωία τους και έχει βελτιώσει τις δυνατότητες ελέγχου των εκπομπών. Τα νεότερα υφάσματα που κατασκευάζονται με συνθετικά υλικά έχουν βελτιωμένη διάρκεια ζωής, ανώτερη αντοχή στη χημική επίθεση και καλύτερες ιδιότητες απελευθέρωσης της σκόνης, αλλά το επιτρεπόμενο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με το υφαντό fiberglass.

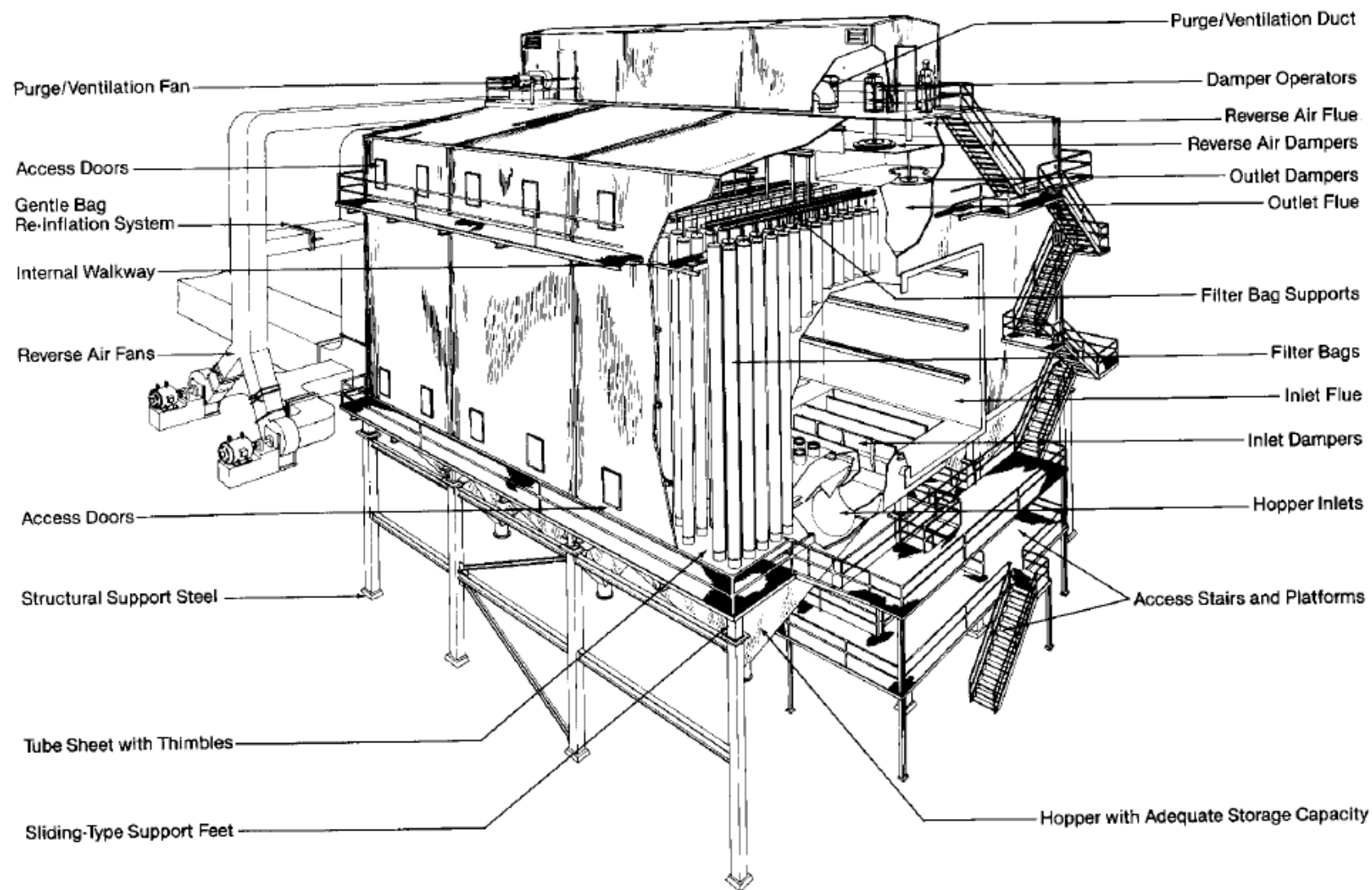
Όταν το στρώμα των σωματιδίων είναι αρκετά παχύ ώστε να προκαλέσει προκαθορισμένη πτώση πίεσης, το ύφασμα θα πρέπει να καθαριστεί. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι καθαρισμού των υφασμάτινων φίλτρων. Η γενική ονομασία της διαδικασίας καθαρισμού παρέχει έναν τρόπο διάκρισης μιας μεθόδου από την άλλη. Για παράδειγμα, το shaker (Σχ. 5.8), το reverse-air, το shake/deflate και το pulse-jet είναι διαφορετικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση του στρώματος σωματιδίων από τα υφασμάτινα φίλτρα σύμφωνα με τον Singer J. (1991). Στα υφασμάτινα φίλτρα με κάποιο αναδευτήρα, οι σακούλες ανακινούνται έντονα για να αποσπάσουν τα σωματίδια. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται σε υφασμάτινα φίλτρα που συλλέγουν σωματίδια είτε στην εσωτερική είτε στην εξωτερική επιφάνεια. Τα υφασμάτινα φίλτρα αντίστροφου αέρα χρησιμοποιούν ρεύμα καθαρισμένου καυσαερίου για να αφαιρέσουν τα σωματίδια από τις εσωτερικές επιφάνειες των υφασμάτινων φίλτρων. Ένας κύκλος καθαρισμού επιτυγχάνεται όταν η αντίστροφη ροή των καυσαερίων προκαλέσει μερική τσάκιση της σακούλας. Τα υφασμάτινα φίλτρα ανακίνησης/ξεφουσκώματος αντιπροσωπεύουν έναν συνδυασμό ανακίνησης και αντίστροφης ροής αέρα για την απομάκρυνση των σωματιδίων. Τα υφασμάτινα φίλτρα Pulse-jet έχουν

σχεδιαστεί για να συλλέγουν τα σωματίδια στην εξωτερική επιφάνεια των σακουλών. Ο καθαρισμός πραγματοποιείται όταν το εσωτερικό των σακουλών υπόκειται σε παλμό αέρα υψηλής πίεσης. Η επιλογή μιας από αυτές τις μεθόδους έναντι μιας άλλης συχνά επηρεάζεται από τη δυσκολία με την οποία το στρώμα σωματιδίων μπορεί να αποσπαστεί από το υφασμάτινο φίλτρο.

Σε αντίθεση με τα ESP των οποίων η απόδοση αφαίρεσης εξαρτάται από τον όγκο καυσαερίων, τα υφασμάτινα φίλτρα συλλέγουν μια δεδομένη μάζα σωματιδίων PM ανά λέβητα. Αυτό σημαίνει ότι η ποσότητα σωματιδίων PM που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα δεν επηρεάζεται από τον όγκο των καυσαερίων. Τα υφασμάτινα φίλτρα είναι ικανά να αφαιρούν περισσότερο από 99,9% των σωματιδίων PM σε ένα ρεύμα καυσαερίων. Για αυτούς τους λόγους, θεωρούνται συχνά η καλύτερη διαθέσιμη τεχνολογία ελέγχου για τη μείωση των εκπομπών σωματιδίων. [Singer J. (1991) και Stultz S. και Kitto J. (1992)].



Σχήμα 5.8 Απεικόνιση του μηχανικού συστήματος τύπου Shaker



Σχήμα 5.9 Διαμόρφωση υφασμάτινου φίλτρου ή σακούλας. Πηγή: Stultz S. και Kitto J. (1992).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε διεξοδικά το θέμα της βελτιστοποίησης των λεβήτων στην βιομηχανία Αερίου και Πετρελαίου. Στο Κεφάλαιο 1^ο αναφέρονται κάποια εισαγωγικά σχόλια, ο σκοπός της έρευνας αυτής και η προσέγγιση που ακολουθήθηκε. Σε αυτό το μεταπτυχιακό έργο συγκεντρωτικά, έχουν αναπτυχθεί θέματα σχετικά με τις διαμορφώσεις διάφορων τύπων λεβήτων ανάλογα το καύσιμο που πρόκειται να καταναλωθεί, όπως αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στον υδραυλωτό λέβητα τύπου D, έχοντας τα περισσότερα πλεονεκτήματα σε μια βιομηχανία όπως ότι είναι πιο αξιόπιστος, καλύτερη απόδοση παραγωγής ατμού, πιο οικονομικός σε κανονικό φορτίο, συμπαγής και ελαφρύς, απαιτεί λιγότερο χρόνο για συντήρηση και ελέγχει καλύτερα την θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού.

Στη συνέχεια του Κεφαλαίου 2, όσον αφορά τον εξοπλισμό καύσης των λεβήτων, αυτός θα πρέπει να συμμορφώνεται με τις καθιερωμένες απαιτήσεις έκλυσης εκπομπών που καθορίζονται από κρατικές και ρυθμιστικές αρχές που ασχολούνται με θέματα εκπομπών και αιτήσεων χορήγησης άδειας για λέβητες. Οι πιο συνηθισμένοι, που πληρούν τα απαιτούμενα στις μέρες μας, είναι οι καυστήρες τύπου LNB και καλύτεροι ακόμη οι ULNBs. Οι LNBs μπορούν να τοποθετηθούν εκ των υστέρων, σε υπάρχον λέβητες. Οι καυστήρες ULNBs χρησιμοποιούν την πιο νέα τεχνολογία για τη μείωση των εκπομπών NOx και μονοξειδίων του άνθρακα CO.

Οι προαναφερθέντες καυστήρες είναι ειδικά σχεδιασμένοι για να καίνε καθαρά αέρια καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο, που είναι απαλλαγμένο από άζωτο, θείο και τέφρα. Όπως βλέπουμε συγκεντρωτικά για τα καύσιμα στο Κεφάλαιο 3, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για κατανάλωση, το φυσικό αέριο, διακρίνεται ως ένα από τα ιδανικά και πιο φιλικά καύσιμα για το περιβάλλον σε σύγκριση με τα υπόλοιπα που παρουσιάστηκαν (ορυκτών και μη ορυκτών καυσίμων).

Στην συνέχεια του Κεφαλαίου 3 παρουσιάζονται οι τέσσερις βασικές εκπομπές που εκλύονται από έναν βιομηχανικό λέβητα. Αυτά είναι τα οξείδια του αζώτου (NOx), το διοξείδιο του θείου (SO₂), τα σωματίδια (PM) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Οι επιτρεπτές τιμές των εκπομπών στερεών και αερίων καυσίμων καθορίζονται βάσει νόμου μέσω Αποφάσεων Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων αδειοδότησης (ΑΕΠΟ) για την Ελλάδα. Θεσπίζονται εκεί τα πρότυπα εκπομπών, με βάση τις αποδόσεις για ορισμένους ατμοσφαιρικούς ρύπους, συμπεριλαμβανομένων των NOx, SO₂, PM και CO. Συνοπτικά τα όρια εκπομπών για μια Μονάδα Λεβήτων εντός περιφέρειας Αττικής είναι:

1. NO_x <= 300 mg/Nm³
2. SO_x <= 600 mg/Nm³
3. CO: <=100 mg/Nm³
4. Σωματίδια PM <= 20 mg/Nm³

Στο 4^ο κεφάλαιο, αφού αναλύσαμε τις απώλειες καύσης και απώλειες του λέβητα, είδαμε δυο εξοπλισμούς που, εάν εγκατασταθούν, προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα, όσον αφορά την αποδοτικότητα σε έναν λέβητα και όχι μόνο. Η συνολική απόδοση μπορεί να αυξηθεί κατά 3-5%. Μόνο με την ενσωμάτωση οικονομητήρων και θερμαντήρων αέρα, κατέστη δυνατό να μειωθεί η θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο της καμινάδας και έτσι να μπορεί να

επιτευχθεί απόδοση στον λέβητα έως και 88- 90%. Έχει φανεί στην πράξη, ότι αύξηση 1% της αποδοτικότητας του λέβητα επιτυγχάνεται, για κάθε μείωση 22°C στη θερμοκρασία των καυσαερίων στον εξοπλισμό ανάκτησης θερμότητας. Ο προθερμαντήρας του αέρα (Preheater) ενισχύει την καύση πολλών καυσίμων και είναι κρίσιμης σημασίας για την καύση του κονιοποιημένου άνθρακα για την ξήρανση του και την επακόλουθη σταθερή ανάφλεξη. Η απόδοση του λέβητα επίσης αυξάνεται κατά 1% για κάθε 20°C άνοδο θερμοκρασίας του προθερμασμένου αέρα. Το κλειδί για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης της καύσης είναι να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα περίσσειας οξυγόνου λειτουργώντας όσο το δυνατόν πιο κοντά στη στοιχειομετρική καύση (0% οξυγόνο στον καπναγωγό) διατηρώντας παράλληλα ελάχιστο το CO. Η περίσσεια οξυγόνου εξαρτάται εν μέρει από τον τύπο καυσίμου που θα καταναλωθεί, αλλά γενικά βασίζεται στην ικανότητα ακριβούς ανάμειξης καυσίμου και αέρα.

Προχωρώντας στο Κεφάλαιο 5, αναλύονται τεχνικές που είναι αποτελεσματικές στη μείωση των εκπομπών NO_x, SO₂ και PM, οι οποίες υποδιαιρούνται σε τρεις γενικές κατηγορίες, ανάλογα με το στάδιο της διαδικασίας της καύσης που εφαρμόζονται (κατά την διάρκεια της προ-καύσης, της καύσης και μετά την καύση).

Στο στάδιο της προ-καύσης, η επιλογή καυσίμου είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την ελαχιστοποίηση των ατμοσφαιρικών εκπομπών. Το είδος και η ποσότητα των εκπομπών που πρέπει να ελέγχονται σχετίζονται άμεσα με το καύσιμο που καίγεται.

Κατά τη διάρκεια της καύσης, για μείωση των NO_x παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές, δίνοντας έμφαση στην μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας της φλόγας που μπορεί να γίνει με τέσσερις διαφορετικές τεχνικές. Επίσης με χρήση τελευταίας τεχνολογίας καυστήρων ULNB με κατανάλωση καυσίμου όπως το φυσικό αέριο, μπορούμε να πετύχουμε εκπομπές NO_x σε λιγότερα από 10 ppm. Επίσης, αναφέρονται οι τεχνικές ελέγχου του διοξειδίου του θείου (SO₂), καθώς και οι τεχνικές ελέγχου των σωματιδίων PM, που είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε λέβητες FBC.

Μετά την καύση, για μείωση των NO_x παρουσιάζεται η επιλεκτική καταλυτική αναγωγή SCR ως μια τεχνική, καθώς και η επιλεκτική μη καταλυτική αναγωγή SNCR. Για μείωση του SO₂ ξεχωρίζουν οι μη ανανεώσιμες τεχνικές FGD που περιλαμβάνουν είτε υγρό τρίψιμο με ασβέστη ή ασβεστόλιθο, τη διαδικασία διπλού αλκαλίου ή ξηρό τρίψιμο με ασβέστη. Για τα σωματίδια PM μπορούμε να φτάσουμε στο συμπέρασμα ότι:

1. Οι αποδόσεις συλλογής καλοσχεδιασμένων ESP μπορεί να είναι 99,6% ή και υψηλότερες, αλλά πρέπει να αναγνωριστεί ότι η απόδοση αφαίρεσης ποικίλλει ανάλογα με το φορτίο σωματιδίων των καυσαερίων και τον σχεδιασμό του ESP. Καθώς αυξάνεται η ποσότητα των σωματιδίων PM που αιωρούνται στα καυσαέρια, αυξάνεται και η ποσότητα που δεν αφαιρείται έχοντας ως αποτέλεσμα να διαφύγουν προς την ατμόσφαιρα. Η αστοχία ενός καλωδίου λόγω ηλεκτρικού τόξου ή άλλων λόγων είναι ένα επαναλαμβανόμενο πρόβλημα που οδηγεί σε υποβάθμιση της απόδοσης.
2. Σε αντίθεση με τα ESP των οποίων η απόδοση αφαίρεσης εξαρτάται από τον όγκο καυσαερίων, τα υφασμάτινα φίλτρα συλλέγουν μια δεδομένη μάζα σωματιδίων. Αυτό σημαίνει ότι η ποσότητα σωματιδίων PM που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα δεν επηρεάζεται από τον όγκο των καυσαερίων. Τα υφασμάτινα φίλτρα είναι ικανά να αφαιρούν περισσότερο από 99,9% των σωματιδίων PM σε ένα ρεύμα καυσαερίων. Για αυτούς τους λόγους, θεωρούνται συχνά η καλύτερη διαθέσιμη τεχνολογία ελέγχου για τη μείωση των εκπομπών σωματιδίων.

6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ (FUTURE WORK)

1) Η τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂ προωθείται ως καινοτομία για την ενεργειακή μετάβαση της βιομηχανίας της χώρας μας, κυρίως για τσιμεντοβιομηχανίες, βιομηχανίες λιπασμάτων και διύλισης.

Η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα CO₂ από μεγάλες πηγές, όπως είναι οι λέβητες και σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής και η αποθήκευση του CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς με στόχο την ελαχιστοποίηση των βλαβερών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής ονομάζεται carbon capture and storage (CCS). Αυτοί οι γεωλογικοί ταμιευτήρες είναι βαθιά υπόγεια στρώματα πορώδους βράχου που καλύπτονται από αδιαπέραστο βράχο κατά τρόπο τέτοιο, που διασφαλίζεται ότι το CO₂ δεν εξέρχεται στην ατμόσφαιρα και δεν μπορεί να αναμειχθεί με υδάτινες μάζες ή να εγκυμονεί κίνδυνο για την υγεία. Η χρήση των CCS απαιτούν ειδικές άδειες που επανεξετάζονται ανά 5 χρόνια.

Για την Ελλάδα, η μόνη αδειοδοτημένη αποθηκευτική εγκατάσταση για ρύπους CO₂, είναι ο ταμιευτήρας του κοιτάσματος του Πρίνου της Energean. Σύμφωνα με μελέτη που εκπόνησε η εταιρεία Halliburton για λογαριασμό της Energean θα ήταν δυνατό να ξεκινήσει η αποθήκευση CO₂ στον Πρίνο, από το 2025, με δυναμικότητα αποθήκευσης 1 εκατ. τόνους CO₂ ετησίως και μετά από 2 χρόνια να αυξηθεί στα 3 εκατ. τόνους CO₂. Η αποθηκευτική του δυναμικότητα εκτιμάται στους 60 εκατ. τόνους. Για σύγκριση των αριθμών αυτών, υπολογίζονται ότι εκπέμπονται ετησίως στην Ελλάδα από βιομηχανίες 9 με 12 εκατ. τόνοι CO₂ και άλλοι 25 εκατ. τόνοι για την ηλεκτροπαραγωγή. Επιπροσθέτως, το κόστος δικαιωμάτων εκπομπής CO₂ για τις αρχές του έτους 2023 κυμαινόταν μεταξύ 80 και 100 ευρώ ανά τόνο, από τα οποία θα ελαχιστοποιηθούν με την επιλογή της αποθήκευσης σε CCS και οι μεγάλες βιομηχανίες θα γίνουν πιο ανταγωνιστικές στην Ευρωπαϊκή και διεθνή αγορά.

2) Κάθε βιομηχανική εγκατάσταση θα πρέπει να διαθέτει μονάδα επεξεργασίας νερού της τοποθεσίας της. Η κακή επεξεργασία του νερού μπορεί να οδηγήσει σε πολύ επιζήμια προβλήματα όπως, σχηματισμός αλάτων, αφρισμός, διάτρηση λόγω οξυγόνου, όξινο συμπύκνωμα και σπατάλη ενέργειας.

3) Ένα άλλο μελλοντικό έργο θα μπορούσε να είναι σχετικά με το μοντέλο του δικτύου ατμού του διυλιστηρίου για να βοηθήσει στην υλοποίηση ορισμένων έργων, όπως:

- Διερεύνηση της επίδρασης μιας πιθανής μετασκευής με στόχο την επίτευξη καλύτερης θερμικής ολοκλήρωσης μεταξύ των χημικών διεργασιών και του δικτύου ατμού.
- Ανάλυση του συστήματος ελέγχου και δυναμική ανάλυση του δικτύου του ατμού. Εξετάζοντας πώς οποιαδήποτε πρόταση μετασκευής θα μπορούσε να επηρεάσει τη δυνατότητα ελέγχου του συστήματος.

Τέλος, το μοντέλο του δικτύου ατμού θα μπορούσε να είναι χρήσιμο για πολλούς μελλοντικούς σκοπούς ανάλυσης όπως:

- Ενοποίηση του μοντέλου ατμού με τις μονάδες διεργασίας και το δίκτυο καυσίμων του διυλιστηρίου, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης καυσίμου εντός των κλιβάνων διεργασίας.
- Ένα δυναμικό μοντέλο του δικτύου ατμού.

- Υλοποίηση συστήματος ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, με δυνατότητες πρόβλεψης και μακροπρόθεσμη βελτιστοποίηση για κάθε είδους σεναρίου εργασίας.

ΛΙΣΤΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΑΝΑΦΟΡΩΝ

1. ASTM D 121-09a (2009). *Standard Terminology of Coal and Coke*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
2. ASTM D 1608-16 (2017). *Standard Test Method for Oxides of Nitrogen in Gaseous Products (Phenol-Disulfonic Acid Procedures)*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
3. ASTM D 1835-20 (2020), *Standard Specification for Liquefied Petroleum (LP) Gases*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
4. ASTM C 618 -17a (2017), *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete* , American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
5. ASTM D 388-19a (2019), *Standard Classification of Coals by Rank*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
6. ASTM D 396 – 21 (2021), *Standard Specification for Fuel Oils*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
7. ABMA (1997). *Guideline for Gas and Oil Emission Factors for Industrial, Commercial, and Institutional (ICI) Boilers*, ABMA-BOILER 305, American Boiler Manufacturers Association, Arlington, Virginia, USA.
8. ABMA (1998). *Packaged Boiler Engineering Manual*, 2nd ed., American Boiler Manufacturers Association, Arlington, Virginia, USA.
9. ABMA (1999). *Combustion Control Guidelines for Single Burner Firetube and Watertube Industrial/Commercial/Institutional Boilers*, BOILER 307, American Boiler Manufacturers Association, Arlington, Virginia, USA.
10. Barthe P. , Chaugny M., Roudier S. και Sancho L. (eds.) (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas*, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control), European Commission, Luxembourg, EU.
11. Basu P., Kefa C. and Jestin L. (2000). *Boilers and Burners: Design and Theory*, Springer, New York, USA.
12. Chang J., Ma X., Wang X. et al. (2023). *CPFD modeling of hydrodynamics, combustion and NOx emissions in an industrial CFB boiler*, Particuology 81, Elsevier, 174-188.
13. Clean Coal Technology (1999). *Technologies for the Combined Control of Sulfur Dioxide and Nitrogen Oxides Emissions from Coal-Fired Boilers*, Topical Report No. 13 , Department of Energy, USA.
14. Doyle B. and Solt C. (2014). *Nox Emissions Control from Stationary Sources*, student manual, APTI course 418.

15. Dukelow S. (1991). *The Control of Boilers*, 2ND ed., Instrument Society of America, North Carolina, USA.
16. Elliott T., Chen K. and Swanekamp R. (eds.) (1989). *Standard Handbook of Powerplant Engineering*, 2nd ed., McGraw-Hill Publishing Company, New York, USA.
17. EPA (1977). *Guidelines for Industrial Boiler Performance Improvement, Boiler Adjustment Procedures to minimize Air Pollution and to Achieve Efficient Use of Fuel*, U.S. Environmental protection Agency, North Carolina, USA.
18. EPA (1980). *Guidelines for NO_x control by combustion modification for coal – fired utility boilers*, EPA – 600/8-80-027, U.S. Environmental protection Agency, North Carolina, USA.
19. EPA (1994). *Alternative Control Techniques Document – NO_x Emissions from Industrial/ Commercial/ Institutional (ICI) Boilers*, EPA-453/R-94-022, U.S. Environmental protection Agency, North Carolina, USA.
20. EPA (1999). *Nitrogen Oxides (NO_x), Why and How They are Controlled*, EPA 456/F-99-006R, U.S. Environmental Protection Agency, North Carolina, USA.
21. EPA.GOV. *Monitoring by control technique – Wet Scrubber For Particulate Matter*, ανακτημένο από το διαδίκτυο: <https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/monitoring-control-technique-wet-scrubber-particulate-0>.
22. Gutiérrez Ortiz F. (2011). *Modeling of fire-tube boilers*, Elsevier, Applied Thermal Engineering, vol. 31, issue 16, p. 3463-3478.
23. Harrell G. (2002). *Steam System Survey Guide*, ORNL/TM-2001/263, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA.
24. Kitto J. (1996). *Air Pollution Control for Industrial Boilers*, ResearchGate, ABMA Industrial Boiler Conference, Florida, USA.
25. Lunt R. and Cunic J. (2000). *Profiles in Flue Gas Desulfurization*, American Institute of Chemical Engineers, New York, USA.
26. Mollo M., Kolesnikov A. and Makgato S. (2022). *Simultaneous reduction of NO_x emission and SO_x emission aided by improved efficiency of a Once-Through Benson Type Coal Boiler*, Energy 248, Elsevier,123551.
27. Reed R. (1986). *North American Combustion Handbook, Volume 1: Combustion, Fuels, Stoichiometry, Heat Transfer, Fluid Flow*, 3rd ed., North American MFG. Co., Cleveland, Ohio, USA.
28. Saito I., Sano H., Nomura H. et al (2022). *Effect of products of low temperature oxidation reaction on NO_x reduction in HC-SCR system of low temperature*, Proceedings of the Combustion Institute, Elsevier, 1-8.

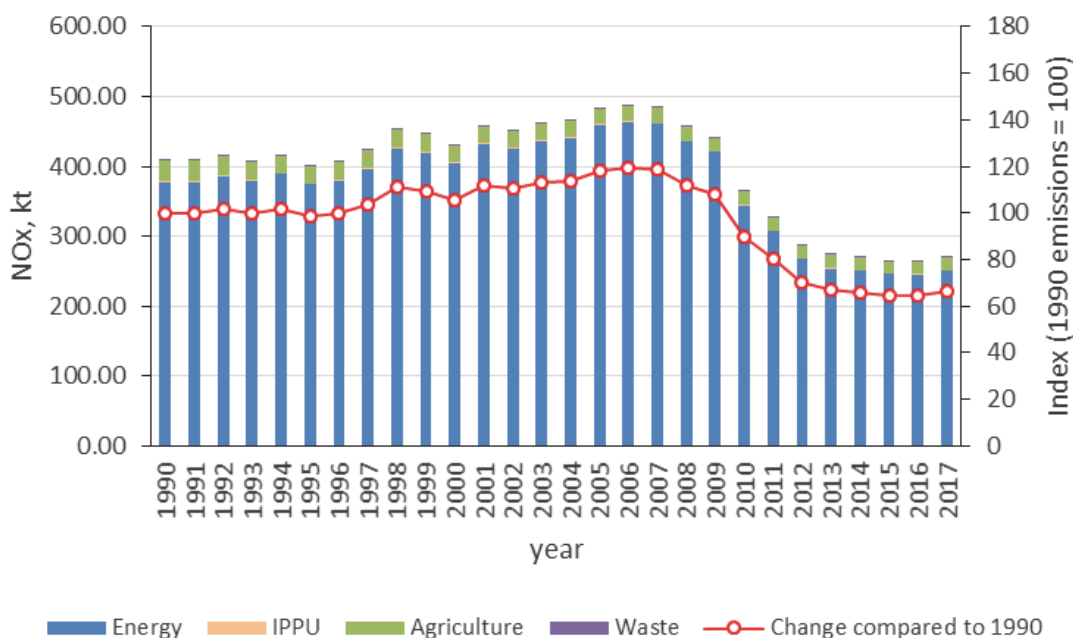
29. Singer J. (ed.) (1991). *Combustion Fossil Power*, 4th ed., Combustion Engineering, Inc., Windsor, Connecticut.
30. Soud H. (1995). *Suppliers of FGD and NO_x Control Systems*, IEA Coal Research, London, United Kingdom.
31. Soud H. and Mitchell S. (1997). *Particulate Control Handbook for Coal-Fired Plants*, vol.93 of IEACR, IEA Coal Research, London, United Kingdom, July.
32. Stultz S. and Kitto J. (eds.), (1992). *Steam, Its Generation and Use*, 41th ed., The Babcock and Wilcox Company, Barberton, Ohio, USA.
33. Sullivan J. and Duret M. (1997). *Development of the Radiation Stabilized Distributed Flux Burner*, DOE/ID/13332, U.S. Department of Energy, USA.
34. Taplin H. (1991). *Combustion Efficiency Tables*, The Fairmont Press, Inc., Lilburn, Georgia.
35. Takeshita M. and Soud H. (1993). *FGD Performance and Experience on Coal-Fired Plants*, IEACR/58, IEA Coal Research, London, United Kingdom.
36. Teir S. (2002). *Basics of Steam Generation*, Energy Engineering and Environmental Protection, Dep. Of Mechanical Engineering, Helsinki.
37. U.S. Department of Energy and Energy and Environmental Research Corporation (1993). *Reduction of NO_x and SO₂ Using Gas Reburning, Sorbent Injection, and Integrated Technologies*, Topical Report No 3, Rev. 1, USA.
38. U.S. Department of Energy (1995). *SO₂ Removal Using Gas Suspension Absorption Technology*, Topical Report No. 4, Clean Coal Technology, USA.
39. U.S. Department of Energy (1997). *Control of Nitrogen Dioxide Emissions: Selective Catalytic Reduction (SCR)*, Topical Report No. 9, Clean Coal Technology, USA.
40. U.S. Department of Energy (1999). *Advanced Technologies for the Control of Sulfur Dioxide Emissions from Coal-Fired Boilers*, Topical Report No. 12, Clean Coal Technology, USA.
41. Zeitz R. (1997). *Energy Efficiency Handbook*, Council of Industrial Boiler Owners, Burke, Virginia.
42. Zhu Q. (2014). *Coal sampling and analysis standards*, IEA Clean Coal Centre, London, UK.
43. Wilbur L. (ed.) (1985). *Handbook of Energy Systems Engineering: Production and Utilization*, Wiley - Interscience, New York, USA.
44. Wulfinghoff D. (1999). *Energy Efficiency Manual*, Energy Institute Press, Wheaton, USA.

45. Woodruff E., Lammers H. and Lammers T. (eds.) (1998), *Steam Plant Operation*, 7th ed., McGraw- Hill Companies, Inc., New York, USA.
46. ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΗΣ 22/01/2021, αρ. φ. 182:
Μείωση των εθνικών εκπομπών ορισμένων ατμοσφαιρικών ρύπων, τροποποίηση της Οδηγίας 2003/35/ΕΚ και κατάργηση της Οδηγίας 2001/81/ΕΚ - μεταφορά στο εθνικό δίκαιο της Οδηγίας (ΕΕ) 2016/2284 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου (ΕΕ L 334/1/17-12-2016), Αθήνα, Ελλάδα.
47. ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ 30.12.2021 (L469/01 – 81):
Εκτελεστική απόφαση (2021/2326) της επιτροπής 30.11.2021 για τον καθορισμό των συμπερασμάτων για τις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές (ΒΔΤ) βάσει της οδηγίας 2010/75/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου όσον αφορά μεγάλες μονάδες καύσης, Βρυξέλες, Βέλγιο.
48. ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ 17.12.2010 (L334/17):
Οδηγία 2010/75/ΕΕ του Ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου της 24.11.2010 περί βιομηχανικών εκπομπών (ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχος της ρύπανσης), Βρυξέλες, Βέλγιο.
49. ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΓΕΝΙΚΗ Δ/ΝΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ, Διεύθυνση Περιβαλλοντικής Αδειοδότησης, «Ανανέωση/ Τροποποίηση της υπ' αρ. πρωτ. 146393/3.06.2008, Δ/νσης Ε.Α.Ρ.Θ. /ΥΠΕΚΑ, με υπαγωγή στην οδηγία 2010/75/ΕΕ, Απόφασης Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ), όπως αυτή τροποποιήθηκε με την υπ' αρ. 1021/16.01.2018 Απόφαση Τροποποίησης της ΑΕΠΟ και την υπ' αρ.162459/30.04.2014 Απόφαση περί μη τροποποίησης της ΑΕΠΟ της ίδιας Διεύθυνσης, για διωλιστήριο του Ν. Αττικής και αναδιατύπωση των εγκεκριμένων περιβαλλοντικών όρων αυτής», Αθήνα , Ελλάδα, 2020.
50. ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ Τεύχος Α' 105/27.05.2022, *Εθνικός Κλιματικός Νόμος - Μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, επείγουσες διατάξεις για την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης και την προστασία του περιβάλλοντος*, σελ. 3561-3592, Αθήνα , Ελλάδα, 2022.

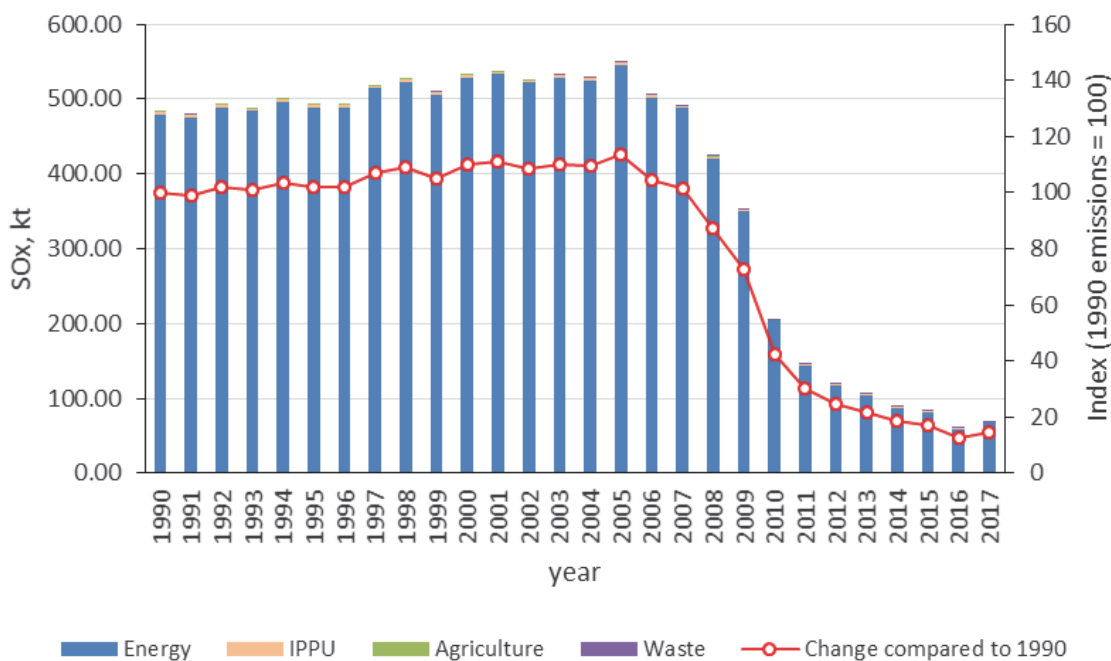
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Παρακάτω ακολουθούν 5 γραφικά σχήματα (A1-A5), σύμφωνα με την εθνική απογραφή του 2019, τα οποία απεικονίζουν τις μειώσεις των εκπομπών ανά ρύπο και ανά κλάδο στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2017, σύμφωνα με το ΦΕΚ 182/Β/22.01.2021 (σελ.1624 – 1626), ώστε να γίνει η συσχέτιση με το έτος 2005.

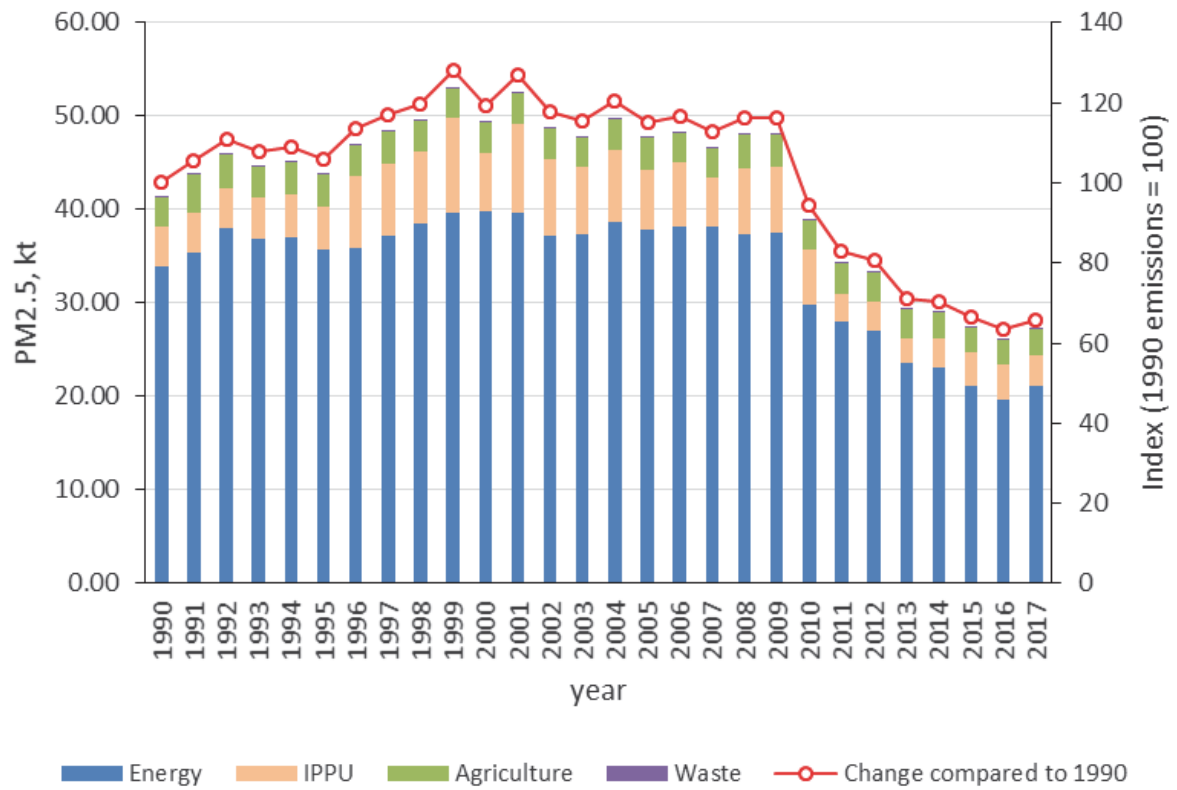
A1) Οξείδια του αζώτου (NO_x) ανά κλάδο στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2017.



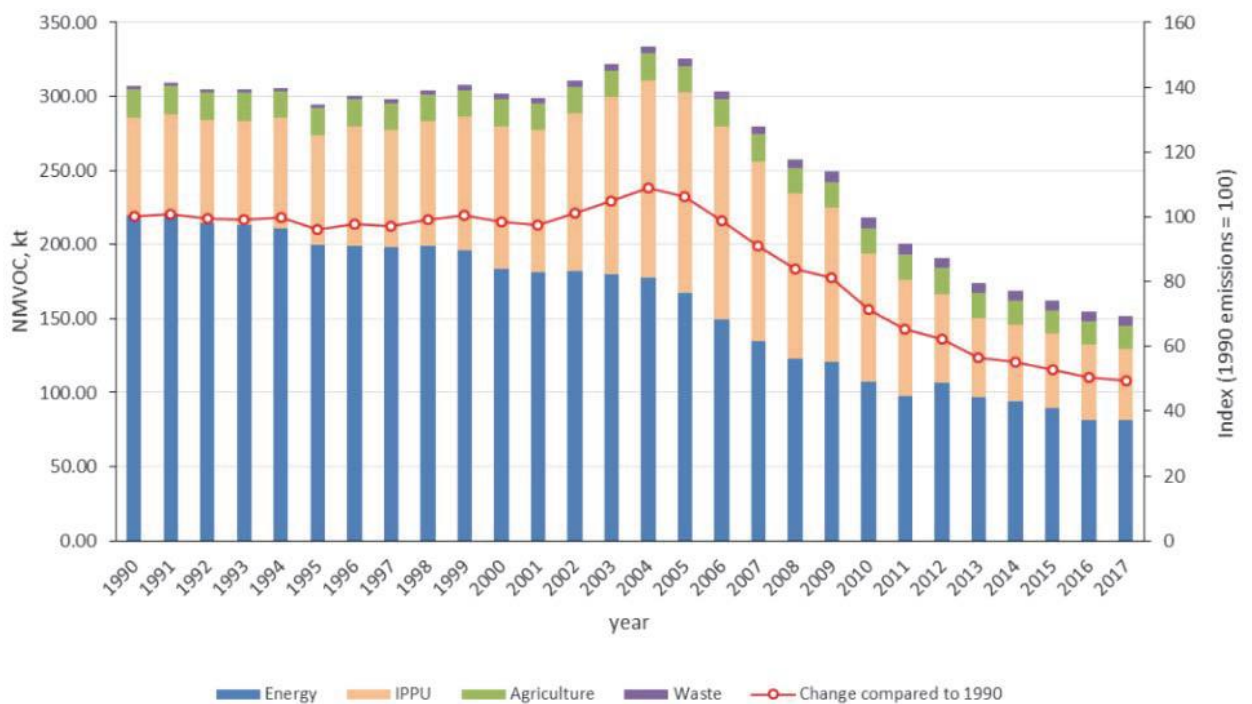
A2) Διοξείδιο του θείου (SO₂) ανά κλάδο στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2017.



A3) Λεπτά αιωρούμενα σωματίδια (PM_{2.5}) ανά κλάδο στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2017.



A4) VOC εκτός του μεθανίου (NMVOC) ανά κλάδο στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2017.



A5) Αμμωνία (NH₃) ανά κλάδο στην Ελλάδα από το 1990 έως το 2017.

