



---

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

*Εργαστήριο Ατμοπαραγωγών & Θερμικών Εγκαταστάσεων*

---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΙΚΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΞΗΡΟΥ  
ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ  
ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ»**

**Του Προπτυχιακού Φοιτητή**

Δημήτριου Μ. Σταμάτη

**Επιβλέπων**

Εμμανουήλ Κακαράς, Καθηγητής,  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

---

ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2007

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	1
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	3
1.2 Σκοπός.....	3
1.3 Πρωτόκολλο Κιότο – Εκπομπές CO <sub>2</sub> σε Ευρωπαϊκή Ένωση.....	4
1.4 Σημασία ξήρανσης και κονιοποίησης.....	6
1.5 Γενικά περί ξήρανσης σε ρευστοποιημένη κλίνη.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΞΗΡΑΝΣΗΣ.....	8
2.1 Υπάρχουσες τεχνολογίες.....	8
2.1.1 Κονιοποίηση με θερμό αέρα ή καυσάεριο.....	8
2.1.2 Ανοιχτός κύκλος κονιοποίησης.....	10
2.1.3 Περιστροφικοί ξηραντήρες.....	11
2.2 Λόγοι επιβολής εφαρμογής νέων τεχνολογιών ξήρανσης.....	12
2.3 Τεχνολογία ξήρανσης WTA.....	15
2.4 Τεχνολογία ξήρανσης MTE.....	20
2.5 Εφαρμογή ξήρανσης σε ρευστοποιημένη κλίνη στις ΗΠΑ.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> : ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕ ΗΜΙΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ.....	23
3.1 Υφιστάμενη εμπειρία από παλαιότερα πειράματα.....	23
3.1.1 Εισαγωγή.....	23
3.1.2 Περιγραφή παλαιότερων πειραμάτων σε ημιβιομηχανική κλίμακα.....	23
3.1.2.1 Πειραματική διερεύνηση καύσης σε μονάδα 500 kWth.....	23
3.1.2.2 Πειραματική διερεύνηση επικαθίσεων σε μονάδα 150 MWe.....	27
3.2 Πειραματική εγκατάσταση κονιοποιημένου καυσίμου (VVA).....	28
3.2.1 Συνοπτική περιγραφή πειραμάτων σε εγκατάσταση VVA.....	30
3.2.2 Επεξεργασία μετρήσεων – σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	34
3.2.2.1 Μεταβολή θερμοκρασιών στις δύο σειρές πειραμάτων.....	34
3.2.2.2 Διερεύνηση συμπεριφοράς της τέφρας – Τάση για επικαθίσεις.....	37
3.2.2.3 Μεταβολή συγκέντρωσης ακαύστων σωματιδίων κατά την καύση.....	43
3.3 Συμπεράσματα.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> : ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΤΟ ΛΕΒΗΤΑ ΤΟΥ «ΑΗΣ ΛΙΠΤΟΛ».....	46
4.1 Εισαγωγή - Σκοπός ερευνητικών δραστηριοτήτων.....	46
4.2 Περιγραφή Βιομηχανικής Εγκατάστασης.....	47
4.3 Προετοιμασία για την πειραματική ερευνητική δραστηριότητα.....	56
4.3.1 Πυρόμετρο.....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> : ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ.....	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	69

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο Εργαστήριο Ατμοπαραγωγών και Θερμικών Εγκαταστάσεων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ολοκληρώνονται οι σπουδές μου και ένα χρονικό διάστημα 6 ετών ως φοιτητής.

Καταρχάς, θα πρέπει να αποδώσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον κύριο Καθηγητή Εμμανουήλ Κακαρά για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και τη δυνατότητα ενασχόλησής μου με το αντικείμενο αυτό. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Μιχάλη Αγρανιώτη για τη συνεχή καθοδήγηση, επίβλεψη και βοήθεια σε όλη την πορεία εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον ο Δρ. Παναγιώτης Γραμμέλης ήταν πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει, να επισημάνει παραλείψεις ή βελτιώσεις, και γι' αυτό το λόγο τον ευχαριστώ πολύ.

Σε προσωπικό επίπεδο, ευχαριστώ πολύ τους γονείς μου και όλα τα μέλη της οικογένειάς μου, οι οποίοι μου συμπαράσταθηκαν και με ενθάρρυναν με κάθε τρόπο σ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Σταμάτης Δημήτριος

Σεπτέμβριος 2007

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Είναι γεγονός ότι ο λιγνίτης εξακολουθεί να παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, παρά τις προσπάθειες που γίνονται για αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι στη Γερμανία το 30% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από καύση λιγνίτη, ενώ σε χώρες όπως η Κίνα και η Ινδία τα ποσοστά είναι ακόμα υψηλότερα. Ωστόσο το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας έγκειται στην βελτίωση των ήδη υπάρχουσών τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και κυρίως λιγνίτη, προκειμένου να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης των εγκαταστάσεων και να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών του CO<sub>2</sub>.

Ήδη τα τελευταία χρόνια έχουν αντικατασταθεί οι παλαιότερες λιγνιτικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με νέες κονιοποιημένου καυσίμου, ώστε να πετύχουμε καλύτερους βαθμούς απόδοσης των μονάδων. Παρ' όλα αυτά η ξήρανση και η κονιοποίηση του λιγνίτη αποτελούν δύο τομείς ιδιαίτερης σημασίας, αφού η εφαρμογή καινούριων μεθόδων μπορεί να επιφέρει ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του βαθμού απόδοσης των θερμοηλεκτρικών σταθμών. Ο έλεγχος των επικαθήσεων τέφρας, που παρατηρούνται κατά τη διεργασία της καύσης, αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό πεδίο έρευνας και μπορεί να συμβάλει στην αποδοτικότερη λειτουργία των λιγνιτικών εγκαταστάσεων.

### 1.2 Σκοπός

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της μικτής καύσης ξηρού λιγνίτη σε εγκαταστάσεις κονιοποιημένου καυσίμου, καθώς και η προετοιμασία αντίστοιχων πειραμάτων σε βιομηχανικό λέβητα του «ΑΗΣ Λιπτόλ». Αρχικά έγινε αναφορά στην υφιστάμενη εμπειρία της μικτής καύσης ξηρού λιγνίτη, με βάση παλαιότερα πειράματα και εξετάστηκαν η τάση για επικαθήσεις, τα θερμοκρασιακά προφίλ, οι εκπομπές και η ποιότητα της τέφρας. Στο πλαίσιο της προετοιμασίας των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν: i) σε υπολογιστικό επίπεδο, μοντελοποίηση της καύσης στο λέβητα, καθώς και ισολογισμός μάζας και ενέργειας αυτής, ενώ ii) σε πειραματικό επίπεδο, επικεντρώθηκε το ενδιαφέρον στις απαιτούμενες μετρητικές διατάξεις και στην εξέταση των συστημάτων ψύξης αυτών.

### 1.3 Πρωτόκολλο Κιότο – Εκπομπές CO<sub>2</sub> σε Ευρωπαϊκή Ένωση

Η καύση των ορυκτών καυσίμων αποτελεί μια από τις κυριότερες ανθρώπινες δραστηριότητες που συμβάλλουν στις κλιματικές αλλαγές και δημιουργούν εκπομπές CO<sub>2</sub>, του κυριότερου αερίου για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> σήμερα φτάνει το ποσοστό του 0,037% κ.ο. και δεν είναι στάσιμη. Από το 1800 και μετά τα ατμοσφαιρικά επίπεδα του CO<sub>2</sub> έχουν αυξηθεί κατά το 1/3 σε σχέση με την προηγούμενη συγκέντρωσή τους, τα 275 ppm. Από στοιχεία της IPCC (1996) [1] οι εκπομπές του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα αυξάνονται γύρω στα 1,5 ppm κάθε χρόνο ή 0,4% κάθε χρόνο. Μέχρι το 2100 η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα θα φτάσει τα 700 ppm ή 70%. Είναι γεγονός ότι λόγω της αύξησης των αερίων του θερμοκηπίου, η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της γης παρουσίασε άνοδο κατά 0,6°C (Σχήμα 1.1), ενώ προβλέπεται ότι θα αυξηθεί κατά 1,4 έως 5,8 °C μεταξύ των ετών 1990 και 2100, παράλληλα η στάθμη της θάλασσας αναμένεται να ανέλθει κατά 9 έως 88 cm κατά την ίδια χρονική περίοδο.



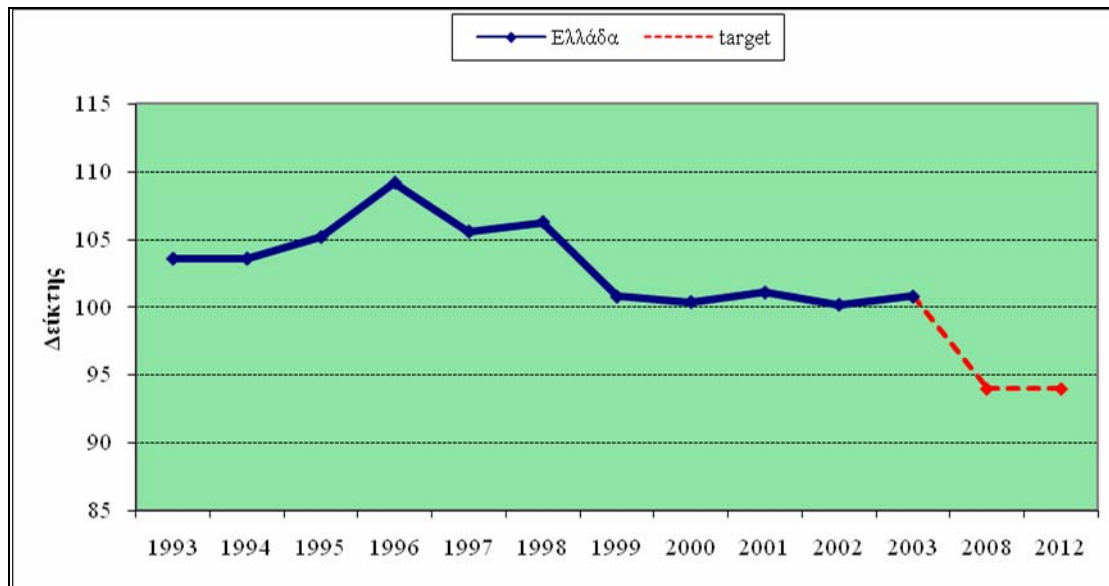
(Σχήμα 1.1) Μεταβολές της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας τον τελευταίο αιώνα. (πηγή: Hadley Centre) [2]

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Κιότο, δεσμεύεται ως σύνολο να μειώσει τις δικές της εκπομπές αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου κατά 8%, κατά το χρονικό διάστημα της δεύτερης περιόδου δέσμευσης 2008-2012. Ο στόχος αυτός επιμερίζεται μεταξύ των κρατών μελών. Στην οδηγία 2002/358/EK, συμφωνήθηκαν οι μειώσεις για κάθε χώρα λαμβάνοντας υπ' όψιν και τον αναμενόμενο ρυθμό ανάπτυξης αυτών. Έτσι επιτρέπεται σε μερικές χώρες να αυξήσουν τις εκπομπές τους με την προϋπόθεση ότι αυτές θα αντισταθμίζονται από αντίστοιχες μειώσεις σε άλλες χώρες. Στον Πίνακα 1.1 δίνονται οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου εκφρασμένες σε Mt CO<sub>2</sub> eq το έτος βάσης 1990, το έτος 2002, τον στόχο για την περίοδο 2008-2012 και την απόσταση από το στόχο για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 15.

Όσον αφορά την πορεία των εκπομπών CO<sub>2</sub> για την Ελλάδα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2 με τη μορφή δεικτών, σε αντιπαραβολή με το στόχο για τη χρονική περίοδο 2008-2012.

	Έτος βάσης 1990 (Mt CO <sub>2</sub> eq)	Έτος 2002 (Mt CO <sub>2</sub> eq)	Μεταβολή 1990-2002 (Mt CO <sub>2</sub> eq)	Στόχος 2008- 2012 (%)	Στόχος 2008- 2012 σε (Mt CO <sub>2</sub> eq)	Απόσταση 2002-στόχος (Mt CO <sub>2</sub> eq)
Αυστρία	78	85	7	-13	67,9	17,1
Βέλγιο	146,8	150	3,2	-7,5	135,8	14,2
Δανία	69	68	-1	-21	54,5	13,5
Φιλανδία	76,8	82	5,2	0	76,8	5,2
Γαλλία	564,7	554	-10,7	0	564,7	-10,7
Γερμανία	1.253,3	1.016	-237,3	-21	990,1	25,9
<b>Ελλάδα</b>	<b>107</b>	<b>135</b>	<b>28</b>	<b>25</b>	<b>133,8</b>	<b>1,3</b>
Ιρλανδία	53,4	69	15,6	13	60,3	8,7
Ιταλία	508	554	46	-6,5	475	79
Λουξεμβούργο	12,7	11	-1,7	-28	9,1	1,9
Ολλανδία	212,5	214	1,5	-6	199,8	14,3
Πορτογαλία	57,9	82	24,1	27	73,5	8,5
Ισπανία	286,8	400	113,2	15	329,8	70,2
Σουηδία	72,3	70	-2,3	4	75,2	-5,2
Ην. Βασίλειο	746	635	-111	-12,5	652,8	-17,8
<b>EK-15</b>	<b>4.245,5</b>	<b>4.125</b>	<b>-120,5</b>	<b>-8</b>	<b>3.905,9</b>	<b>219,1</b>

(Πίνακας 1.1) : Ισοδύναμες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (εκ. τόνοι CO<sub>2</sub>) για τις χώρες της ΕΕ των 15 για το έτος βάσης, το 2002 και στόχοι μείωσης για την περίοδο 2008-2012. (Πηγή: Point Carbon and United Nations Framework Convention on Climate Change)



(Σχήμα 1.2) : Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>) για την Ελλάδα και πορεία στόχου για την περίοδο δέσμευσης 2008 - 2012. (πηγή: European Environment Agency, European Topic Center on Air and Climate Change)

#### 1.4 Σημασία ξήρανσης και κονιοποίησης

Όπως είναι γνωστό, ο φυσικός λιγνίτης προερχόμενος από τους χώρους εναπόθεσης των ορυχείων υφίσταται ένα πρώτο στάδιο κατεργασίας σε ειδικούς σπαστήρες, όπου επιτυγχάνονται μέσες διάμετροι μικρότερες των 50mm. Η διαδικασία της κονιοποίησης καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική, προκειμένου να πραγματοποιείται όσο το δυνατό ομοιόμορφη ανάμιξη κατά την καύση, αφού έχουμε κοκκομετρία μικρότερη του 1mm και μέσες διαμέτρους περίπου της τάξης των 200μm, με αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερων θερμοκρασιών στο εσωτερικό της εστίας και τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου καύσης. Βασικά στοιχεία ενός κύκλου κονιοποίησης είναι ο μύλος κονιοποίησης, ο διανομέας του καυσίμου, ο διαχωριστής του κονιοποιημένου καυσίμου και ο φυσητήρας (ή ανεμιστήρας). Ανάλογα με το είδος και την απαραίτητη τελική κοκκομετρία του καυσίμου, τις προσμίξεις και τα αδρανή συστατικά, επιλέγεται αντίστοιχος τύπος μύλου, ώστε να επιτυγχάνεται ο απαιτούμενος βαθμός κονιοποίησης, καθώς και η ομοιόμορφη ανάμιξη του καυσίμου. Οι συνήθεις τύποι μύλων περιλαμβάνουν σύστημα διαχωρισμού με το οποίο ρυθμίζεται το μέγεθος του κόκκου, με την επαναφορά του καυσίμου στο μύλο. Ο μηχανικός διαχωρισμός με τη συνεχή επαναφορά των βαρύτερων κλασμάτων καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα, τη λεπτότερη κονιοποίηση αυτού. Η έξοδος του κονιοποιημένου καυσίμου γίνεται εφαπτομενικά και με προσαγωγή κατάλληλων αγωγών είναι δυνατόν να γίνεται τροφοδοσία του καυσίμου σε διαφορετικά επίπεδα στο λέβητα.

Η ξήρανση (προξηρανση) είναι με τη σειρά της μια εξίσου σημαντική διεργασία, κυρίως σε περιπτώσεις καυσίμων με υψηλό ποσοστό υγρασίας, όπως οι φαιάνθρακες, όπου η περιεχόμενη υγρασία είναι της τάξης του 50-60%, με αποτέλεσμα η ξήρανση να επιβάλλεται για την καλύτερη απόδοση της καύσης. Πραγματοποιείται συνήθως,

με θερμό αέρα ή καυσαέριο, είτε σε περιστρεφόμενα τύμπανα, είτε, όπως συμβαίνει στις περισσότερες των περιπτώσεων, κατά τη διαδρομή του καυσίμου από το σιλό στο μύλο κονιοποίησης και κατά τη διάρκεια παραμονής του σε αυτόν. Εάν το ποσοστό υγρασίας είναι έως της τάξεως του 40%, γίνεται ξήρανση με αέρα, ενώ για μεγαλύτερες περιεκτικότητες υγρασίας, χρησιμοποιούνται καυσαέρια. Στον πίνακα 1.2 δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές θερμοκρασιών για την ξήρανση φαιανθράκων και λιθανθράκων.

Καύσιμο	Φαιάνθρακες (λιγνίτης)	Λιθάνθρακες
Ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας	>45%	<10%
Θερμοκρασία στην είσοδο μύλου κονιοποίησης	~500 <sup>0</sup> C	~200 <sup>0</sup> C
Θερμοκρασία μείγματος καυσαερίων-υδρατμών μετά το διαχωριστή (μέσο ξήρανσης αέρας)	100 <sup>0</sup> C	100-130 <sup>0</sup> C
Θερμοκρασία μείγματος καυσαερίων-υδρατμών μετά το διαχωριστή (μέσο ξήρανσης καυσαέριο)	200 <sup>0</sup> C	200 <sup>0</sup> C

(Πίνακας 1.2) : Ενδεικτικές τιμές θερμοκρασιών κατά την ξήρανση φαιανθράκων και λιθανθράκων

Η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης μπορεί να φτάσει και τους 360<sup>0</sup>C, ειδικά σε περιπτώσεις πολύ μικρής περιεκτικότητας σε πτητικά. Ιδιαίτερη σημασία έχει η θερμοκρασία του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών, γιατί, όταν τα καυσαέρια φτάσουν το σημείο κορεσμού τους σε υδρατμούς, δεν έχουν πια την ικανότητα να απορροφήσουν υγρασία, με αποτέλεσμα η υπόλοιπη υγρασία να παραμένει στον κόκκο του κονιοποιημένου καυσίμου. Γι' αυτό προτιμάται η θερμοκρασία του μείγματος να είναι πάνω από 100<sup>0</sup>C, προς αποφυγή υγροποίησης των υδρατμών των καυσαερίων. Συνήθως τα καυσαέρια λαμβάνονται από το ανώτερο σημείο του θαλάμου καύσης, δηλαδή σε θερμοκρασία 800-1100<sup>0</sup>C, ώστε ανάλογα με το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας και τη διαθέσιμη επιφάνεια συναλλαγής του καυσίμου να μην έχουμε πτώση της θερμοκρασίας τους κάτω των 100<sup>0</sup>C.

## 1.5 Γενικά περί ξήρανσης σε ρευστοποιημένη κλίνη

Τις τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο οι ρευστοποιημένες κλίνες σε βιομηχανικές εφαρμογές, κυρίως στη χημική βιομηχανία είτε σαν αντιδραστήρια είτε για την ξήρανση ουσιών ή χημικών παραγώγων. Η αρχή λειτουργίας της, βασίζεται στο γεγονός ότι, όταν ένα αέριο ρέει μέσω υλικού συγκεκριμένης κοκκομετρίας, με κατάλληλη ταχύτητα ροής πετυχαίνεται η αιώρηση του. Κατ' αυτόν τον τρόπο, εάν η ταχύτητα της αέριας φάσης διατηρείται μικρότερη της οριακής ταχύτητας αιώρησης των σωματιδίων του καυσίμου, ακόμα και για πολύ μικρές διαμέτρους σωματιδίων, είναι εφικτή η παραμονή του κονιοποιημένου καυσίμου για αρκετό χρονικό διάστημα στην κλίνη, ώστε να ολοκληρωθεί η διαδικασία της ξήρανσής του.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΞΗΡΑΝΣΗΣ**

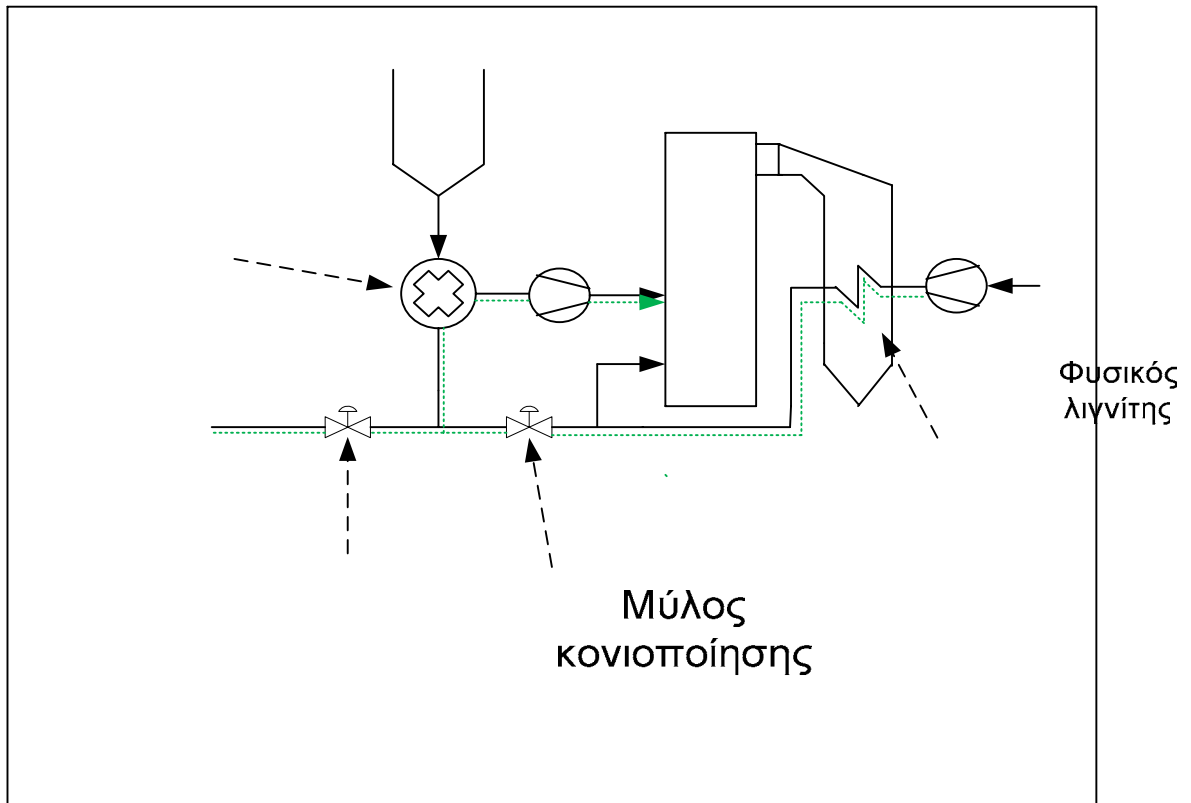
#### **2.1 Υπάρχουσες τεχνολογίες**

Είναι γεγονός ότι στις περισσότερες από τις υπάρχουσες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από στερεά καύσιμα, η ξήρανση και η κονιοποίηση του καυσίμου πραγματοποιείται ταυτόχρονα στο εσωτερικό μύλων κονιοποίησης με την εισαγωγή, είτε καυσαερίων από την εστία, είτε προθερμασμένου αέρα ξήρανσης. Ειδικότερα, για την περίπτωση λιγνίτη, τα θερμά αυτά καυσαέρια έχουν θερμοκρασία περίπου 1000<sup>0</sup>C κατά την έξοδό τους από τον λέβητα και η θερμοκρασία στην είσοδο του μύλου κονιοποίησης μειώνεται στους 450<sup>0</sup>C. Ωστόσο, ανάλογα με το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας, καθώς και την επιφάνεια συναλλαγής του καυσίμου, ενδέχεται να υπάρχουν διαφοροποιήσεις.

Μια ακόμα διάκριση των διαφόρων μεθόδων ξήρανσης μπορεί να γίνει με βάση το μείγμα καυσαερίων-υδρατμών που προκύπτει κατά τη διάρκεια της ξήρανσης-κονιοποίησης. Έτσι υπάρχουν εγκαταστάσεις όπου τροφοδοτείται στο εσωτερικό του λέβητα ή διαφορετικά εξέρχεται στην ατμόσφαιρα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η περίπτωση ξήρανσης σε περιστροφικούς ξηραντήρες, αν και κατά κύριο λόγο γίνεται χρήση αυτών στη χημική βιομηχανία, παρά στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής.

##### **2.1.1 Κονιοποίηση με θερμό αέρα ή καυσαέριο**

Στην περίπτωση κλειστού κύκλου κονιοποίησης με θερμό αέρα (Σχήμα 2.1), η ξήρανση του καυσίμου πραγματοποιείται στο εσωτερικό μύλου κονιοποίησης με θερμό αέρα ξήρανσης, ο οποίος έχει προθερμανθεί στον προθερμαντήρα αέρα. Το μείγμα αερίων-υδρατμού εισάγεται, στη συνέχεια, στο εσωτερικό της εστίας μαζί με το κονιοποιημένο καύσιμο.

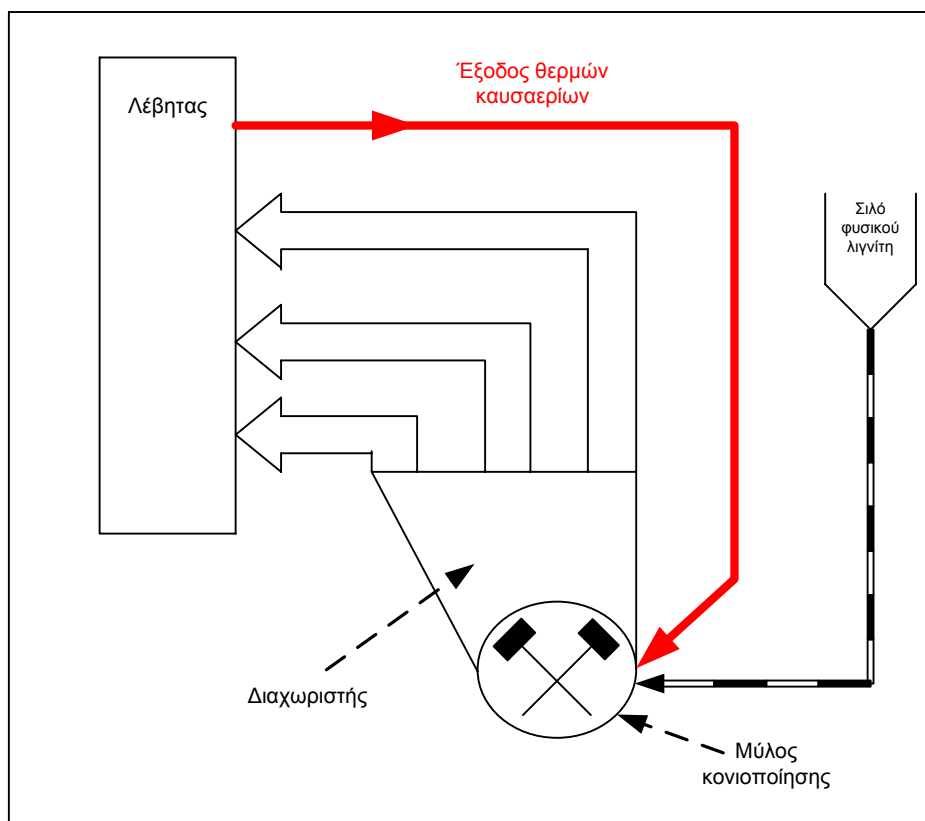


(Σχήμα 2.1): Κλειστός κύκλος κονιοποίησης με θερμό αέρα

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και όταν χρησιμοποιούνται θερμά καυσαέρια ως μέσο ξήρανσης του καυσίμου (Σχήμα 2.2). Το μείγμα καυσαερίων-υδρατμού τροφοδοτείται στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης, όπως και το καύσιμο, σε διαφορετικά επίπεδα ανάλογα με τη θερμοκρασία αυτών, καθώς και την κοκκομετρία του καυσίμου.

Διάφραγμα  
ψυχρού αέρα

Διάφραγμα  
θερμού αέρα

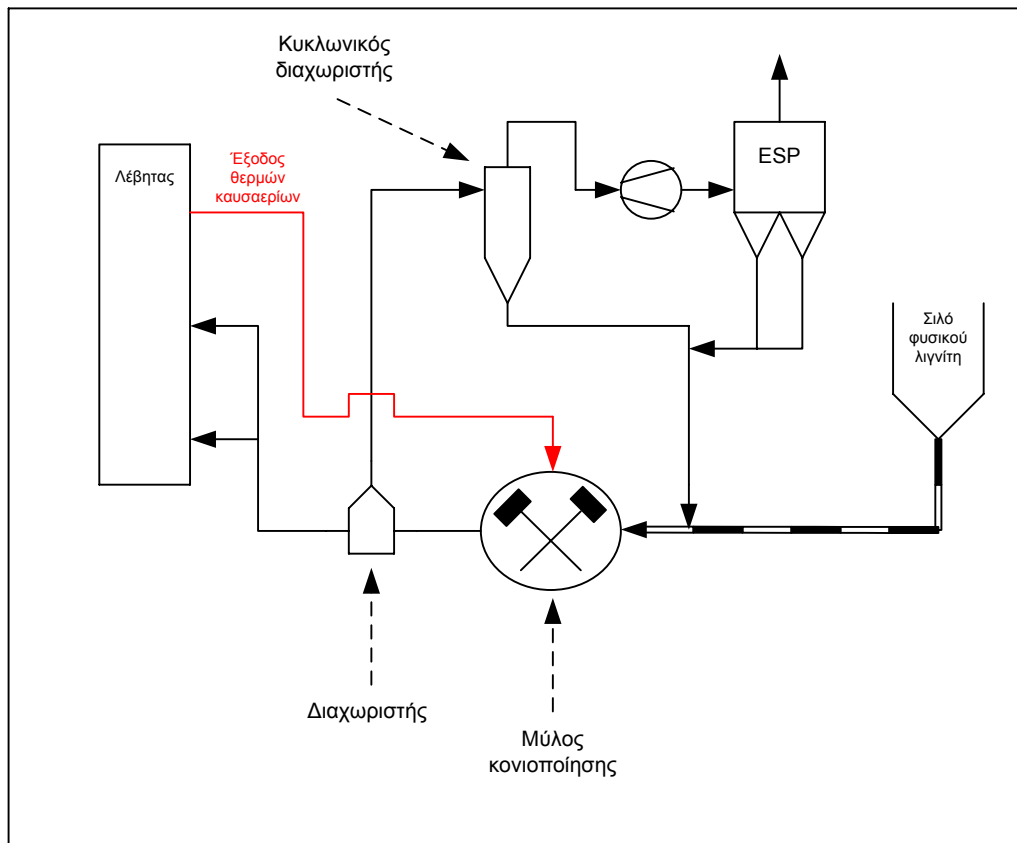


(Σχήμα 2.2): Κλειστός κύκλος κονιοποίησης με θερμά καυσαέρια

### 2.1.2 Ανοιχτός κύκλος κονιοποίησης

Στην περίπτωση του ανοικτού κύκλου κονιοποίησης (Σχήμα 2.3), το μείγμα υδρατμών-καυσαερίων, που προέρχεται από την ξήρανση του καυσίμου, μετά από μηχανικό καθαρισμό και κατάλληλη αφαίρεση της περιεχόμενης σκόνης σε ηλεκτροστατικά φίλτρα, οδηγείται στην ατμόσφαιρα μέσω της καπνοδόχου. Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου ξήρανσης είναι το γεγονός ότι οι υδρατμοί που προέρχονται από την ατμοποίηση της περιεχόμενης υγρασίας στο φυσικό λιγνίτη, δεν προσάγονται στην εστία, όπου απορροφούν θερμότητα, ψύχοντάς την, αλλά εξάγονται στο περιβάλλον. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί ο ΑΗΣ Μεγαλόπολης.

Υπάρχουν εγκαταστάσεις όπου το καύσιμο ξηραίνεται από σημαντικό τμήμα των καυσαερίων. Σε αυτή την περίπτωση, τα καυσαέρια λαμβάνονται από τον Ατμοπαραγωγό, με θερμοκρασία 200-300<sup>0</sup>C, ανάλογα με την υγρασία του καυσίμου. Αυτό έχει ως συνέπεια, τη μείωση της επιφάνειας του προθερμαντήρα ή ακόμα και την κατάργησή του [3]. Επιπλέον, επειδή η θερμοκρασία λήψης των καυσαερίων είναι ήδη μικρή, η θερμοκρασία τους στην έξοδο από το σύστημα ξήρανσης είναι ακόμα μικρότερη, σχεδόν ίση με τη θερμοκρασία κόρου του περιεχόμενου υδρατμού, κι έτσι οι απώλειες του Ατμοπαραγωγού, λόγω καυσαερίων μειώνονται στο ελάχιστο. Ωστόσο ένα σημείο προς διερεύνηση είναι το ενδεχόμενο ρύπανσης της περιοχής από την απαγωγή στην ατμόσφαιρα ψυχρών καυσαερίων και υδρατμών, με ιδιαίτερα υψηλή περιεκτικότητα σε θείο.

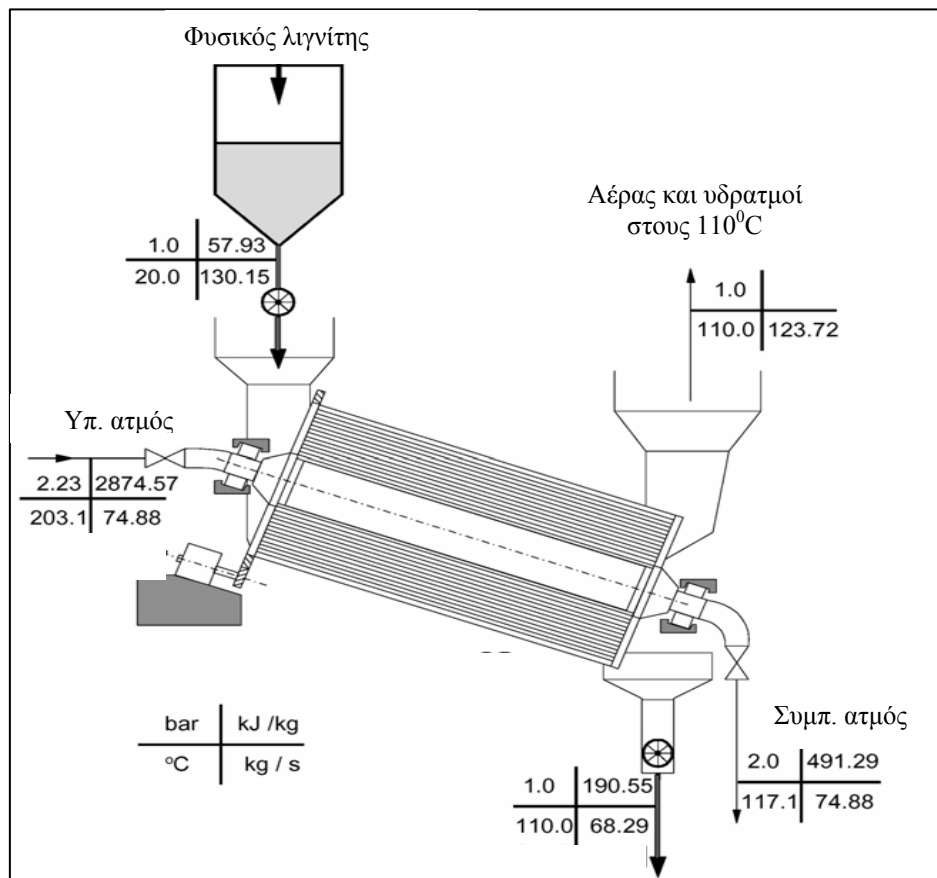


(Σχήμα 2.3): Ανοιχτός κύκλος κονιοποίησης

### 2.1.3 Περιστροφικοί ξηραντήρες

Εκτός από τις παραπάνω περιπτώσεις ξήρανσης, αρκετά διαδεδομένη σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι και η χρησιμοποίηση περιστροφικών ξηραντήρων, καθώς έχουν μικρότερο κόστος, ικανοποιητική θερμική απόδοση και ενδείκνυται κυρίως για στερεά καύσιμα μικρής σχετικά κοκκομετρίας. Βρίσκει κυρίως εφαρμογή στην παραγωγή μπρικετών που χρησιμοποιούνται σε τσιμεντοβιομηχανίες ή ως καύσιμη ύλη (κωκ). Αποτελούνται από περιστρεφόμενο κεκλιμένο κύλινδρο μήκους 7.5÷15m, διαμέτρου 2÷6m [4], στο εσωτερικό του οποίου βρίσκεται μεγάλος αριθμός σωλήνων (αυλών), μικρής διαμέτρου, στους οποίους ρέει ο κονιοποιημένος φυσικός λιγνίτης. Στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές, υπάρχουν περίπου 1600 σωλήνες στο εσωτερικό του κυλίνδρου, με αποτέλεσμα να μπορούμε να έχουμε μια επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας της τάξης των 4000m<sup>2</sup>. Ο ξηραντήρας τροφοδοτείται με ατμό, συνήθως υπέρθερμο, από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης, που κυκλοφορεί ανάμεσα στους αγωγούς με το φυσικό λιγνίτη επιτυγχάνοντας την ατμοποίηση της περιεχόμενης υγρασίας αυτού, σε συνδυασμό με την πολύ αργή περιστροφική κίνηση του κεκλιμένου κυλίνδρου. Η ύπαρξη κατάλληλων εδράνων για τη στήριξη του κυλίνδρου, καθώς και ενός συστήματος κινητήρα – οδοντωτών τροχών για την επίτευξη της περιστροφικής κίνησης είναι απαραίτητη. Ο υδρατμός που δημιουργείται από την αφύγρανηση του λιγνίτη, εξάγεται από το επάνω μέρος του κυλίνδρου, οδηγείται σε ηλεκτροστατικά φίλτρα, όπου θα καθαριστεί από σωματίδια

καυσίμου, και στη συνέχεια απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Μια τυπική διάταξη περιστροφικού ξηραντήρα δίνεται παρακάτω (Σχήμα 2.4).

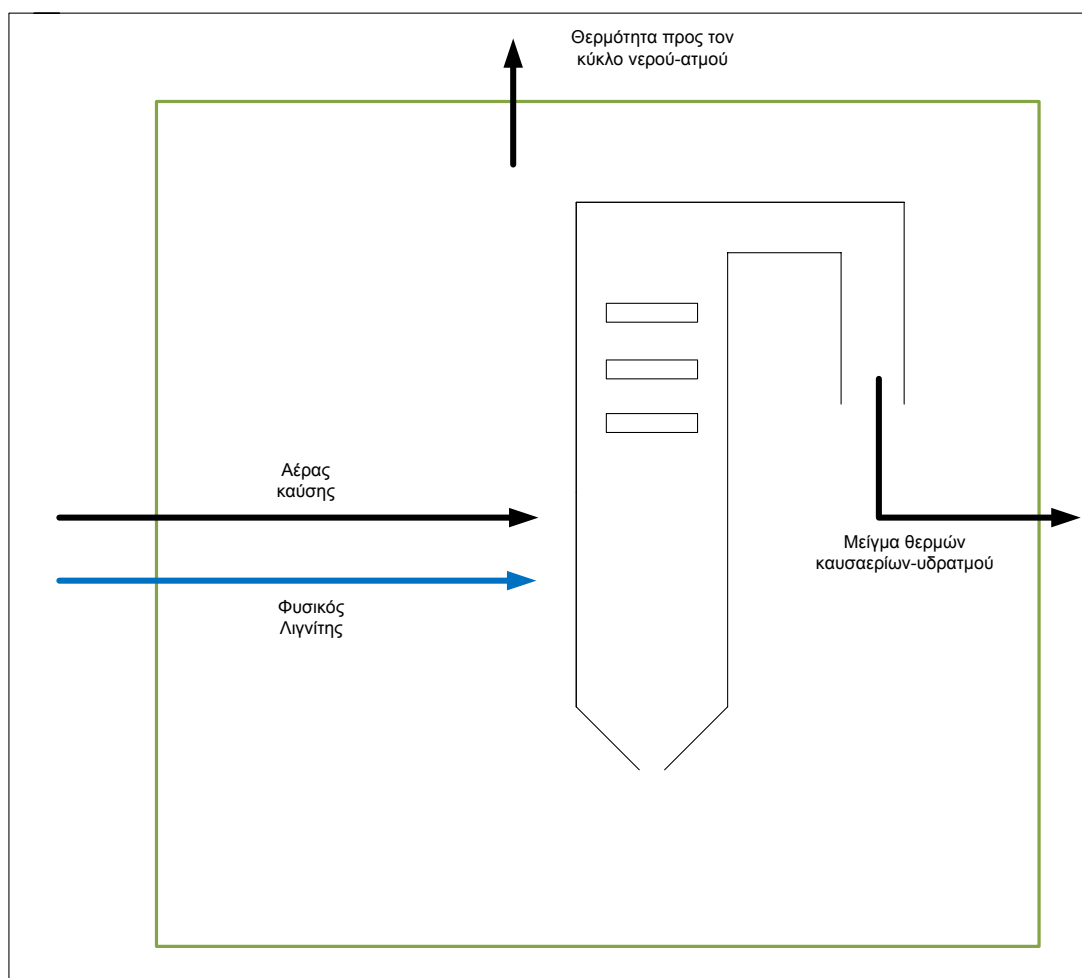


(Σχήμα 2.4): Τυπική διάταξη περιστροφικού ξηραντήρα, [5]

## 2.2 Λόγοι επιβολής εφαρμογής νέων τεχνολογιών ξήρανσης

Αξιολογώντας τις ήδη χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες κονιοποίησης και ξήρανσης, υπάρχουν κάποια σημεία προς διερεύνηση, όσον αφορά την αποδοτικότητα της εφαρμογής-λειτουργίας των. Ένα θέμα προς διερεύνηση ανακύπτει από το γεγονός ότι στην περίπτωση του κλειστού κύκλου κονιοποίησης, το αδρανές μείγμα των καυσαερίων-υδρατμού (είτε θερμού αέρα-υδρατμού), μετά το πέρας της διεργασίας της ξήρανσης-κονιοποίησης, τροφοδοτείται στο εσωτερικό της εστίας, όπου λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασιακής του κατάστασης απορροφά θερμότητα από το θάλαμο καύσης, με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερη εισερχόμενη θερμική ισχύς για την επίτευξη των επιζητούμενων υψηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της καύσης. Λαμβάνοντας επιπλέον υπ' όψιν, ότι οι φαιάνθρακες (λιγνίτης) εμπεριέχουν ιδιαίτερα αυξημένο ποσοστό υγρασίας (50-60%), επιβάλλεται η χρησιμοποίηση θερμών καυσαερίων υψηλής θερμοκρασίας για τη διεργασία της ξήρανσης, ή στις περιπτώσεις ξήρανσης με χρήση ατμού από το στρόβιλο, να απαιτείται η απομάστευση μεγάλης ποσότητας ατμού. Ο υδρατμός που δημιουργείται από την ατμοποίηση της περιεχόμενης υγρασίας του φυσικού λιγνίτη αποτελεί απώλεια ωφέλιμης θερμικής ισχύος, καθώς φεύγει μαζί με τα καυσαέρια από την εγκατάσταση

του ατμοπαραγωγού χωρίς να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω σε κάποιο τμήμα του ατμοηλεκτρικού σταθμού. Ενδεικτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5 το ενεργειακό ισοζύγιο μιας τυπικής λιγνιτικής μονάδας.



(Σχήμα 2.5): Ενεργειακό ισοζύγιο λιγνιτικής μονάδας

Μεγάλη σημασία έχει και η κοκκομετρία των σωματιδίων του καυσίμου. Όσο πιο λεπτόκοκκη σύνθεση έχουμε, πετυχαίνεται μεγαλύτερη επιφάνεια συναλλαγής του καυσίμου, με αποτέλεσμα να γίνεται με πιο γρήγορο ρυθμό η ξήρασή του. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μικρότερη μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων που εισάγονται στο μύλο κονιοποίησης, και επομένως απάγεται λιγότερη θερμότητα κατά την είσοδό τους στο θάλαμο καύσης.

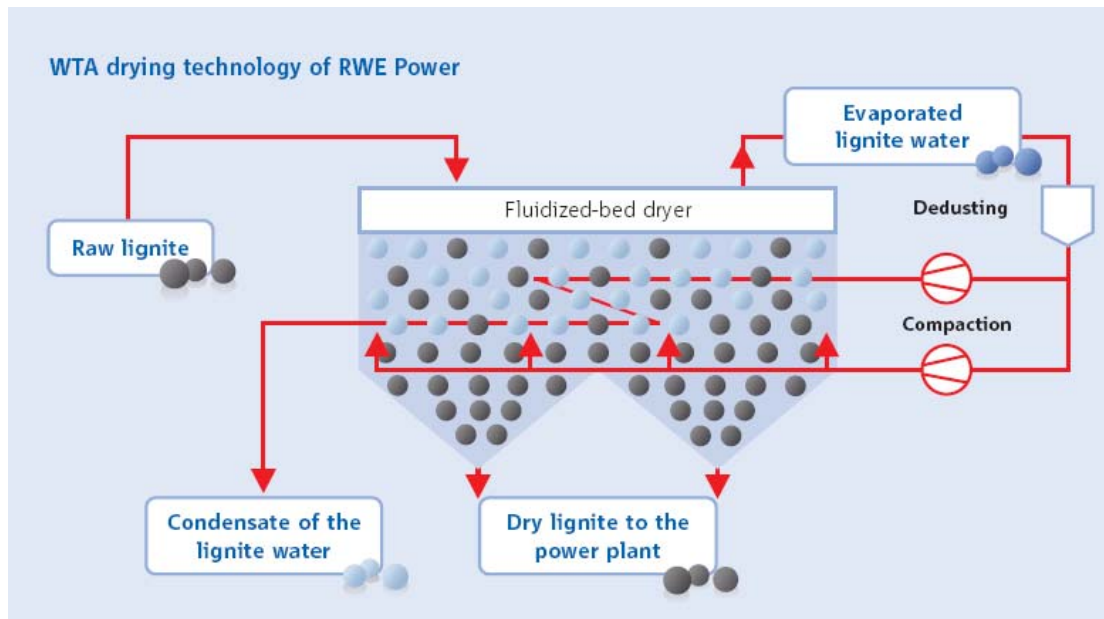
Το μέγεθος των κόκκων του καυσίμου, καθώς και το ποσοστό της υγρασίας, που παραμένει σε αυτούς, παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο, όσον αφορά το φαινόμενο των επικαθίσεων, κατά τη διάρκεια της καύσης, στο εσωτερικό της εστίας. Οι επικαθίσεις τέφρας οδηγούν σε μείωση της ωφέλιμης ισχύος στις επιφάνειες συναλλαγής καθώς και του βαθμού απόδοσης του Ατμοπαραγωγού. Οι χημικές ενώσεις των  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  και  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  συνιστούν το μεγαλύτερο μέρος της σχηματιζόμενης τέφρας. Ανάλογα με τις συνθήκες στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης, είναι δυνατόν να επικολληθούν σωματίδια στα τοιχώματα των σωληνώσεων,

δημιουργώντας έτσι στρώματα επικαθίσεων, το πάχος των οποίων αυξάνει με την πάροδο του χρόνου, προκαλώντας άνοδο της θερμοκρασίας των σωληνώσεων, με αποτέλεσμα πρόσθετη αντίσταση στη ροή θερμότητας και εμφάνιση ανομοιομορφιών κατά την καύση. Επιπλέον οι περιεχόμενες στην τέφρα ενώσεις αλκαλίων, κυρίως του Na και του K, οι οποίες στη θερμοκρασία καύσης ατμοποιούνται, όταν βρεθούν σε ψυχρότερες περιοχές συμπυκνώνονται, εντείνοντας τη ρύπανση στις επιφάνειες συναλλαγής και μειώνοντας τη θερμοκρασία τήξης της τέφρας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα αυτά, μπορούμε να πούμε ότι η διατήρηση κατάλληλων συνθηκών κατά τη διάρκεια της καύσης, με όσο το δυνατό λεπτόκοκκη δομή του καυσίμου, ώστε να μειώνεται ο χρόνος παραμονής του στο θάλαμο καύσης, σε συνδυασμό με την αιώρηση των σωματιδίων του καυσίμου, προς αποφυγή συγκολλήσεων τέφρας, και με αρκετά μικρό ποσοστό υγρασίας, είναι εφικτή η εξοικονόμηση ωφέλιμης θερμικής ισχύος και ο περιορισμός των εκπομπών.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα παραπάνω συνοψίζουμε τις αδυναμίες των ήδη υπάρχουσων τεχνολογιών ξήρανσης :

- i. Χρησιμοποίηση θερμών καυσαερίων υψηλής θερμοκρασίας χάνοντας σημαντικό ποσό παραγόμενης ισχύος,
- ii. Επανατροφοδοσία του αδρανούς μείγματος καυσαερίων – υδρατμών στο εσωτερικό της εστίας,
- iii. Πραγματοποίηση ξήρανσης με αργό ρυθμό λόγω μεγαλύτερης κοκκομετρίας του κονιοποιημένου καυσίμου,
- iv. Οι αυξημένες εξεργειακές απώλειες (Εξέργεια= το μέγιστο ποσοστό της ενέργειας που κάτω από δοθείσες συνθήκες μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμο έργο) [6].

Προς αυτή την κατεύθυνση, η βελτίωση, των διεργασιών της ξήρανσης και κονιοποίησης, με χρήση ρευστοποιημένης κλίνης, απαιτεί διερεύνηση τόσο σε πειραματική όσο και σε βιομηχανική κλίμακα. Η RWE Power AG, έχει εστιάσει το ενδιαφέρον της στην επίτευξη των παραπάνω στόχων, πραγματοποιώντας ξήρανση σε σταθερή ρευστοποιημένη κλίνη, με χρήση υπέρθερμου ατμού και ανάκτηση της θερμότητας που απαιτείται για αυτήν {(Fluidized-bed Drying with internal Waste Heat Utilization),(WTA,Wirbelschicht Trockung mit interner Abwärmenutzung)}, [7-10].

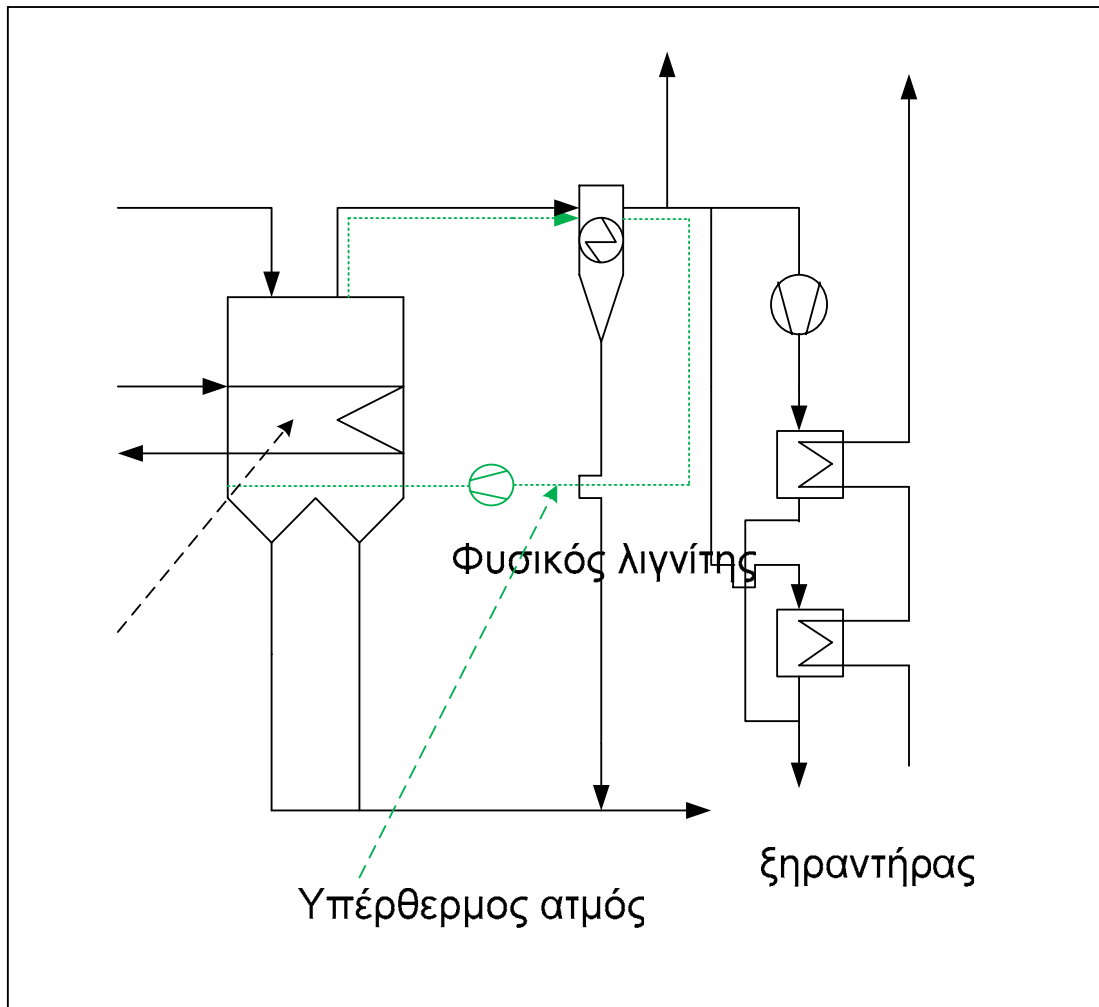


(Σχήμα 2.6): Απεικόνιση διεργασίας ξήρανσης σε ρευστοποιημένη κλίνη, Πηγή RWE [9]

### 2.3 Τεχνολογία ξήρανσης WTA

Το ιδιαίτερα αυξημένο ποσοστό του λιγνίτη σε περιεχόμενη υγρασία οδηγεί στη χρήση σημαντικού ποσού θερμότητας για την ξήρανσή του. Στις ήδη υπάρχουσες εφαρμογές ξήρανσης, ο υδρατμός, που δημιουργείται από την ατμοποίηση της υγρασίας, διοχετεύεται στον ατμοπαραγωγό και εξάγεται μαζί με τα θερμά καυσαέρια. Η βασική ιδέα της τεχνολογίας ξήρανσης WTA έγκειται στην προσπάθεια ανάκτησης του χαμένου αυτού ποσού θερμότητας, που απαιτείται για την ξήρανση, ώστε να μην εισάγεται και μένει ανεκμετάλλευτο στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης. Η διεργασία της ξήρανσης πραγματοποιείται με υπέρθερμο ατμό χαμηλής πίεσης, ο οποίος απομαστεύεται από στρόβιλο και εισάγεται σε εναλλάκτες θερμότητας στο εσωτερικό της κλίνης ξήρανσης, σε θερμοκρασία αρκετά χαμηλή, περίπου  $110^{\circ}\text{C}$ , και στη συνέχεια συμπυκνώνεται, επανατροφοδοτούμενος στον κύκλο νερού-ατμού του ατμοηλεκτρικού σταθμού. Το γεγονός αυτό, η χρήση δηλαδή ατμού χαμηλής θερμοκρασίας αντί για καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας αποτελεί βασικό πλεονέκτημα. Είναι δυνατό να επιτευχθεί μείωση του ποσοστού υγρασίας από 50-60% σε περίπου 12-15%, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι, ένα ποσοστό της τάξης του 86% και 91%, αντιστοίχως, της αρχικής περιεκτικότητας σε νερό, εξατμίζεται, συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό στην εξοικονόμηση θερμικής ισχύος κατά τη διεργασία της καύσης. Όσον αφορά το μέγεθος των κόκκων του λιγνίτη, χρησιμοποιώντας μια σειρά από μύλους κονιοποίησης, πριν την κλίνη ξήρανσης, πετυχαίνεται μείωση της κοκκομετρίας του φυσικού λιγνίτη από 0-80mm, σε 0-6mm, ή ακόμα περισσότερο σε 0-2mm. Η διαγραμματική απεικόνιση της εγκατάστασης ξήρανσης δίνεται στη συνέχεια (Σχήμα 2.7).





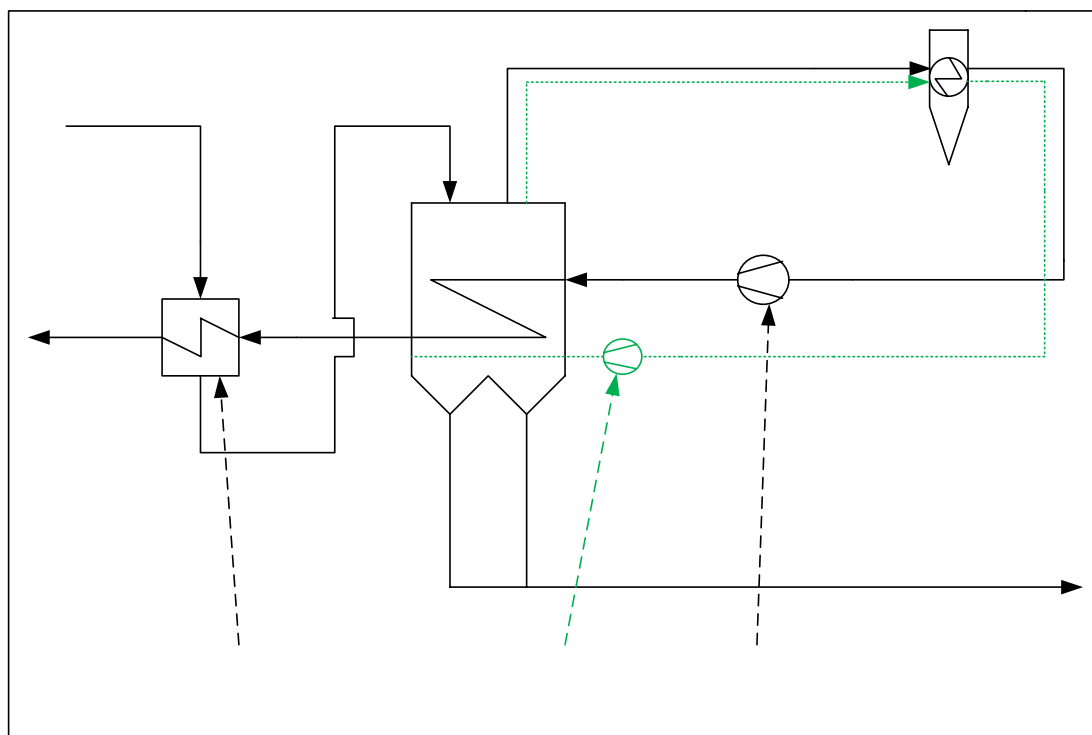
(Σχήμα 2.7): Ξήρανση WTA με χρήση υπέρθερμου ατμού χαμηλής πίεσης

Ένα, ιδιαίτερος, σημαντικό **Συμπύκνωμα** χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης τεχνολογίας ξήρανσης είναι το γεγονός ότι ο ατμός, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ξήρανση, αφού μετατραπεί σε συμπύκνωμα, χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο ατμός, που εισάγεται στην κλίνη ξήρανσης προέρχεται από το τμήμα χαμηλής πίεσης του αμοστροβίλου. Όσον αφορά το περιεχόμενο ποσό σε υγρασία του φυσικού λιγνίτη, αφού ατμοποιηθεί, εξάγεται από τον ξηραντήρα και οδηγείται σε ηλεκτροστατικά φίλτρα (ESP), όπου κατακρατούνται τα αιωρούμενα σωματίδια του λιγνίτη, που με τη σειρά τους, μαζί με τον ξηρό λιγνίτη από την κλίνη ξήρανσης, εισάγονται στην εστία, προκειμένου να γίνει η **Προθέρμανση** καθαρός αυτός ατμός, στη συνέχεια, συμπυκνώνεται (Συμπυκνωτές 1 και 2), αποδίδοντας την θερμότητά του και προθερμαίνοντας το χαμηλής θερμοκρασίας τροφοδοτικό νερό. Κατ' αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο αριθμός των σταδίων που απαιτούνται για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, καθώς και ανάλογο κέρδος στο βαθμό απόδοσης.

Η χρήση περισσότερων του ενός συμπυκνωτών, συμβάλλει στην καλύτερη εκμετάλλευση του ατμού, που προέρχεται από την κλίνη ξήρανσης, αφού πετυχαίνεται προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού σε περισσότερα στάδια και με καλύτερη απόδοση. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε, ότι στην περίπτωση φυσικού λιγνίτη με περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας 50%, χρησιμοποιείται για προθέρμανση

του νερού τροφοδοσίας περίπου το 65% του παραγόμενου ατμού, ενώ εάν τοποθετηθεί και δεύτερος συμπυκνωτής μπορούμε να εκμεταλλευτούμε μέχρι και σε ποσοστό 85% τον παραγόμενο ατμό για προθέρμανση. Αντίστοιχα πετυχαίνεται αύξηση της απόδοσης της εγκατάστασης, σε ποσοστό 9.3% και 10.2%, σύμφωνα με το σχεδιασμό της RWE.

Εκτός από την εφαρμογή της ξήρανσης με χρήση υπέρθερμου ατμού από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης, αναπτύσσεται και η περίπτωση της ξήρανσης WTA με συμπίεση ατμού και προθέρμανση του φυσικού λιγνίτη. Η διαγραμματική απεικόνιση της εγκατάστασης δίνεται στη συνέχεια (Σχήμα 2.8).



(Σχήμα 2.8): Ξήρανση WTA με συμπίεση ατμού και προθέρμανση φυσικού λιγνίτη

### Φυσικός λιγνίτης

Βασική διαφορά της συγκεκριμένης εγκατάστασης με την περίπτωση ξήρανσης με υπέρθερμο ατμό είναι το γεγονός, ότι ο ατμός που παράγεται στο εσωτερικό του ξηραντήρα από την ατμοποίηση της περιεχόμενης ποσότητας σε υγρασία, οδηγείται πάλι σε αυτόν για να θερμάνει τον εναλλάκτη θερμότητας. Ο ατμός μετά την κλίση ξήρανσης, καθαρίζεται από αιωρούμενα σωματίδια στα ηλεκτροστατικά φίλτρα, συμπιέζεται μέχρι πίεση περίπου 4bar και εισάγεται στον ξηραντήρα για να ατμοποιήσει το νερό του φυσικού λιγνίτη. Στη συνέχεια, και αφού έχει συμπυκνωθεί, χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του λιγνίτη, σε θερμοκρασία 65-70°C. Ένα θετικό στοιχείο αυτής της εγκατάστασης είναι εκτός των άλλων ότι λειτουργεί ανεξάρτητα από το υπόλοιπο κύκλωμα του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε αντίθεση με την προηγούμενη η οποία ήταν άρρικτα συνδεδεμένη, τόσο με το στρόβιλο για την απομάστευση υπέρθερμου ατμού, όσο με τους συμπυκνωτές για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού. Η αύξηση σε βαθμό απόδοσης που

ξηραντήρας

Συμπύκνωμα

ατμού

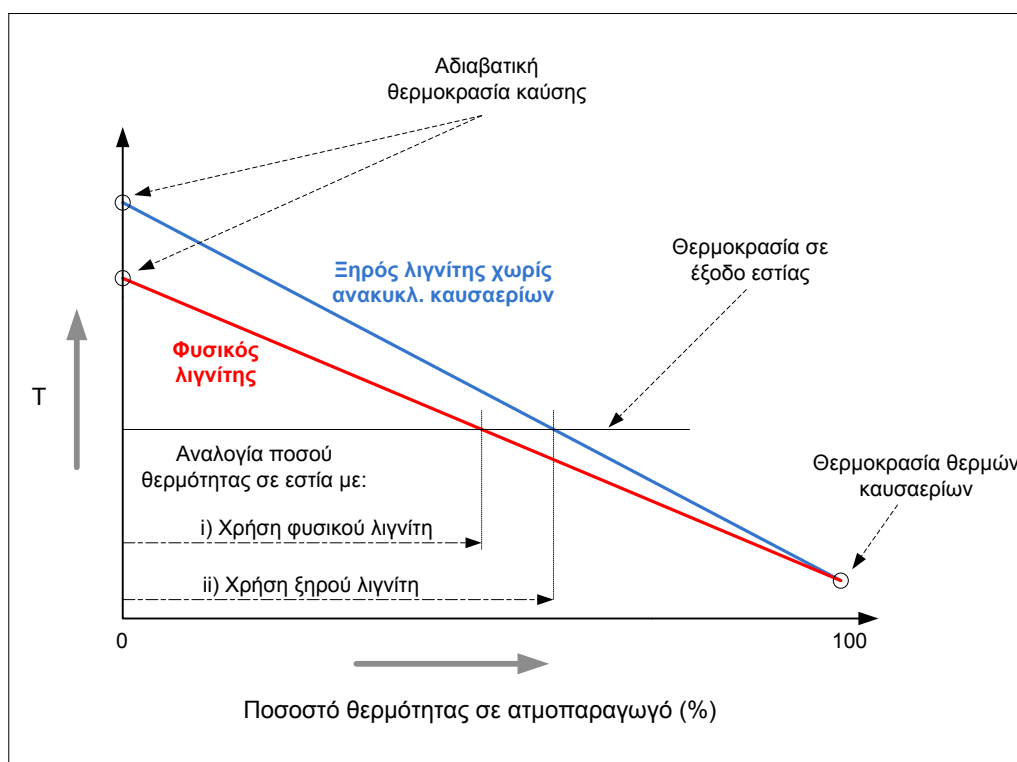
μπορούμε να επιτύχουμε για φυσικό λιγνίτη 50% υγρασίας, φτάνει περίπου το 4-5% σε σχέση με τις παραδοσιακές λιγνιτικές μονάδες. Απ' την άλλη πλευρά αρνητικό σημείο της συγκεκριμένης εγκατάστασης αποτελεί η ύπαρξη του συμπιεστή ατμού, αφού πιθανή βλάβη εμποδίζει τη λειτουργία του σταθμού. Με δεδομένο τα στενά όρια λειτουργίας λόγω της ύπαρξης πτερυγίων, τους περιορισμούς για αποφυγή ανομοιόμορφης ροής καθώς και προβλήματα από την επιβράδυνση της ροής, επιβάλλεται εκτενής διερεύνηση για τη χρησιμοποίηση ή όχι συμπιεστή.

Η εφαρμογή των παραπάνω τεχνολογιών ξήρανσης σε βιομηχανική κλίμακα, κυρίως για την κάλυψη του 30% των αναγκών θερμικών σταθμών ισχύος 1000 MWe, αποτελεί ένα από τους βασικότερους στόχους της RWE Power AG, ώστε να διαπιστωθούν και στην πράξη τα οφέλη και η αύξηση της αποδοτικότητας των θερμικών σταθμών. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να γίνουν σημαντικές τροποποιήσεις, προκειμένου να ενσωματωθεί στην όλη εγκατάσταση η μονάδα προξήρανσης του λιγνίτη, ή και να αντικαταστήσει τις παλιότερες ως μελλοντικό σενάριο. Όσον αφορά το σύστημα των μύλων κονιοποίησης, χρειάζεται να αντικατασταθούν οι παλιότεροι μύλοι, αφού η εφαρμογή ξήρανσης σε ρευστοποιημένη κλίση προϋποθέτει πολύ μικρή κοκκομετρία του κονιοποιημένου καυσίμου, για να επιτυγχάνεται αποτελεσματική αφύγρανση του φυσικού λιγνίτη σε λιγότερο χρόνο, εξοικονομώντας θερμική ισχύ. Προς αυτή την κατεύθυνση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρχικά μια σειρά από σπαστήρες και μύλοι κονιοποίησης, σε συνδυασμό με κάποια συστήματα δευτερεύουσας κονιοποίησης κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Με το πέρας της διεργασίας της ξήρανσης, και αφού απομακρυνθεί το μείγμα καυσαερίων-υδρατμών, ο ξηρός λιγνίτης οδηγείται σε κατάλληλα σιλό προς αποθήκευση.

Το μέγεθος του ξηραντήρα (κλίση ξήρανσης) είναι μια παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο, τόσο στην αποδοτικότητα της ξήρανσης, όσο και στο κόστος της συνολικής επένδυσης. Στους περισσότερους από τους παραδοσιακούς θερμικούς σταθμούς, ως κριτήριο για το μέγεθος και τις δυνατότητες του συστήματος ξήρανσης – κονιοποίησης λαμβάνεται η μέγιστη δυνατή ροή μάζας του λιγνίτη. Ανάλογα με την ποιότητα και τη θερμογόνο ικανότητα του φυσικού λιγνίτη καθορίζεται η μέγιστη παροχή μάζας που απαιτείται για να έχουμε λειτουργία σε πλήρες φορτίο. Έτσι ο λιγνίτης με τη μικρότερη αποδοτικότητα είναι αυτός που καθορίζει το μέγιστο της παροχής του καυσίμου, και επομένως το μέγεθος της μονάδας ξήρανσης – κονιοποίησης. Στην περίπτωση της ξήρανσης WTA, βασική παράμετρος σχεδιασμού είναι η ποσότητα της περιεχόμενης υγρασίας του φυσικού λιγνίτη, η οποία καθορίζει το αντίστοιχο απαιτούμενο ποσό του ατμού, που θα απομαστευτεί. Στόχος είναι να λειτουργεί το σύστημα ξήρανσης με τη μέγιστη δυνατότητα ατμοποίησης, ανεξάρτητα από την ποιότητα και τη θερμογόνο ικανότητα των διαφόρων τύπων φυσικού λιγνίτη. Έτσι επιτυγχάνεται μείωση του μεγέθους του ξηραντήρα, αφού, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, εισάγεται σε αυτόν κονιοποιημένο καύσιμο με πολύ μικρή κοκκομετρία, γεγονός το οποίο αυξάνει σημαντικά την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, και επιπλέον η τιμή της μέγιστης παροχής μάζας του λιγνίτη δεν αποτελεί βασικό κριτήριο σχεδιασμού. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μειώνεται το ύψος του ξηραντήρα, σε ποσοστό περίπου 50%, σε σχέση με τις θερμικές μονάδες, παλαιότερης γενιάς WTA.

Διαφοροποιήσεις προβλέπονται και στο σύστημα καύσης, αφού τώρα θα εισάγεται στο εσωτερικό της εστίας και ξηρός λιγνίτης πολύ μικρής κοκκομετρίας, σε σχέση με τις παραδοσιακές εφαρμογές. Ο ξηρός λιγνίτης τροφοδοτείται, από τα σιλό αποθήκευσης, στο λέβητα, χωρίς περαιτέρω κονιοποίηση, δηλαδή έχουμε ένα

σύστημα έμμεσης καύσης. Οι καυστήρες τοποθετούνται ο ένας πάνω απ' τον άλλο, και η τροφοδοσία τους με καύσιμο γίνεται με συστροφή (swirl burners), και όχι με χρήση διατάξεων δέσμης καυσίμου (multi-jet burners). Η εισαγωγή του καυσίμου με συστροφή (στροβιλισμοί) έχει ως πλεονέκτημα την πιο γρήγορη ανάμιξη καυσίμου – αέρα, οπότε απαιτείται μικρότερο ποσό εισερχόμενης θερμικής ισχύος για την ολοκλήρωση της καύσης. Ο ξηρός λιγνίτης, λόγω της υψηλής του θερμογόνου ικανότητας, μεταβάλλει τις θερμοκρασιακές συνθήκες, οδηγώντας σε υψηλότερες θερμοκρασίες στο εσωτερικό της εστίας. Συγχρόνως αυξάνεται το ποσό συναλλαγής θερμότητας, γεγονός το οποίο, ενδέχεται να δημιουργήσει προβλήματα όσον αφορά τα όρια αντοχής υλικών των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης. Προκειμένου να μειωθεί η θερμοκρασία των καυσαερίων σχεδιάζεται ανακυκλοφορία αυτών. Μέρος των θερμών καυσαερίων οδηγείται σε ηλεκτροστατικά φίλτρα για καθαρισμό, και στη συνέχεια επανατροφοδοτούνται με χαμηλότερη θερμοκρασία στο θάλαμο καύσης, διατηρώντας την αδιαβατική θερμοκρασία καύσης σε επίπεδα σύμφωνα με το σχεδιασμό. Ενδεικτικό διάγραμμα των μεταβολών της θερμοκρασίας καύσης για περίπτωση ξηρού και φυσικού λιγνίτη δίνεται στη συνέχεια (Σχήμα 2.9).



(Σχήμα 2.9) : Μεταβολή Αδιαβατικής Θερμοκρασίας Καύσης

Γενικά η λειτουργία των συστημάτων αμοπαγωγής που χρησιμοποιούν ξηρό λιγνίτη είναι ευνοϊκότερη σε σχέση με τις περιπτώσεις όπου κατά βάση γίνεται χρήση φυσικού λιγνίτη. Το γεγονός ότι το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας θα μειωθεί σε επίπεδα της τάξης του 12%, οι διακυμάνσεις στην θερμογόνο ικανότητα είναι πολύ μικρότερες, περίπου το 50% των αντίστοιχων με φυσικό λιγνίτη. Όπως ήδη επισημάνθηκε, η ανακυκλοφορία καυσαερίων θα έχει θετικές επιδράσεις στην όλη διάταξη, με δεδομένο ότι συμβάλλει στην ομοιόμορφη κατανομή των διαφορετικής ποιότητας τύπων λιγνίτη. Επιπλέον εκτιμάται πως θα παρατηρηθεί μείωση του



κορεσμένου υδρατμού. Το ψυχρό νερό (45<sup>0</sup>C) που προκύπτει οδηγείται από το κάτω μέρος του θαλάμου στον κύκλο νερού-ατμού του ατμοπαραγωγού, συμβάλλοντας στην προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού. Ο λιγνίτης με τη σειρά του εξάγεται με θερμοκρασία περίπου 180<sup>0</sup>C και οδηγείται για περαιτέρω εξάτμιση, ώστε να μειωθεί το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας του ακόμα περισσότερο, έως τελική θερμοκρασία 80<sup>0</sup>C, πριν την είσοδο στο μύλο κονιοποίησης.

Η υψηλή απόδοση της συγκεκριμένης εγκατάστασης εξηγείται από το γεγονός ότι απαιτείται μικρότερο ποσό ισχύος για τη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας, αφού το κύριο μέρος αυτής πραγματοποιείται μηχανικά, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους όπου ήταν απαραίτητη η συνεχής απομάστευση μεγάλων ποσοτήτων ατμού, και αρκετά υψηλής θερμοκρασίας σε ορισμένες εφαρμογές. Ως μειονέκτημα θα μπορούσε να αναφερθεί πως το ποσοστό της τελικής περιεχόμενης υγρασίας είναι υψηλότερο, όμως αυτό αντισταθμίζεται σε κάποιο βαθμό από την προαναφερθείσα παράμετρο. Επιπλέον λόγω της παρουσίας μηχανικών τμημάτων στην όλη διεργασία, τίθενται προβλήματα αξιοπιστίας, με αποτέλεσμα τη μη συνεχή λειτουργία αυτής.

## 2.5 Εφαρμογή ξήρανσης σε ρευστοποιημένη κλίνη στις ΗΠΑ

Οι περισσότεροι τύποι λιγνίτη που υπάρχουν στις ΗΠΑ έχουν αρκετά αυξημένο ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας (25 - 40%), με αποτέλεσμα τη μείωση της παραγόμενης θερμικής ισχύος, τη χρησιμοποίηση μεγαλύτερης παροχής καυσίμου καθώς και το αυξημένο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Ιδιαίτερα οι φαιάνθρακες των Δυτικών Πολιτειών, παρά το πολύ υψηλό ποσοστό υγρασίας, λόγω του χαμηλού κόστους και των χαμηλών επιπέδων εκπομπών, χρησιμοποιούνται ευρέως. Με δεδομένο ότι περίπου το 7% της ισχύος του καυσίμου χρησιμοποιείται για την αφύγρανση, επιβάλλεται η εφαρμογή μεθόδων ξήρανσης για βελτίωση του βαθμού απόδοσης.

Προς αυτή την κατεύθυνση πραγματοποιήθηκαν πειράματα για να διαπιστωθεί κατά πόσο η μικτή καύση ξηρού λιγνίτη μαζί με φυσικό μπορεί να βελτιώσει το θερμικό βαθμό απόδοσης. Διαπιστώθηκε ότι καίγοντας λιγνίτη με μικρότερο ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας επιτυγχάνεται αύξηση της ισχύος (2-4%) καθώς και της απόδοσης. Για την ξήρανση του λιγνίτη σχεδιάστηκε μια ρευστοποιημένη κλίνη ξήρανσης (Fluidized Bed Dryer), λόγω της δυνατότητας για υψηλή παραγόμενη ισχύ και παροχή μάζας, και της ενιαίας μορφής της κατασκευής [11].

Η διαδικασία της ξήρανσης πραγματοποιείται με χρήση ανακυκλοφορίας των καυσαερίων. Ο φυσικός λιγνίτης τροφοδοτείται σε ειδικούς σπαστήρες ώστε να έχει μικρή κοκκομετρία, πριν την εισαγωγή του στην κλίνη ξήρανσης. Περαιτέρω μείωση της κοκκομετρίας στα επιθυμητά επίπεδα για την καύση πραγματοποιείται στο μύλο κονιοποίησης του ξηρού λιγνίτη που ακολουθεί.

Βασικός στόχος της λειτουργίας της ρευστοποιημένης κλίνης ξήρανσης είναι η διατήρηση των σωματιδίων του λιγνίτη σε αιώρηση, για την καλύτερη προσαγωγή θερμότητας και την αποδοτικότερη αφύγρανση. Τα θερμά καυσαέρια εισάγονται από το κάτω μέρος της κλίνης και καθώς οδηγούνται προς την κορυφή χάνουν μέρος της

θερμότητας τους και πιθανώς ένα μικρό ποσοστό αυτών υγροποιείται. Ανάλογα με την ποσότητα παροχής μάζας αυτών μπορεί να καθοριστεί το ποσό της περιεχόμενης υγρασίας που θα ατμοποιηθεί. Ωστόσο πρόσθετο ποσό θερμότητας αποδίδεται στον ξηραντήρα μέσω εναλλάκτη, στο εσωτερικό του οποίου διέρχεται ζεστό νερό από το κύκλωμα ψύξης. Έτσι επιτυγχάνεται αύξηση της παροχής του θερμού αέρα, απάγονται λιγότερα καυσαέρια από το λέβητα, κερδίζοντας σε παραγόμενη θερμική ισχύ.

Οι κυριότεροι παράγοντες που μπορούν να καθορίσουν τη συμπεριφορά κατά τη λειτουργία του ξηραντήρα ρευστοποιημένης κλίνης είναι οι εξής :

- i. Παροχή μάζας και περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας φυσικού λιγνίτη,
- ii. Θερμοκρασία και υγρασία των θερμών καυσαερίων,
- iii. Χρόνος παραμονής του φυσικού λιγνίτη στο εσωτερικό της κλίνης,
- iv. Ύψος του ξηραντήρα,
- v. Ποσό θερμότητας που παρέχεται από τον εναλλάκτη.

Εισάγοντας στην κλίνη θερμά καυσαέρια ιδιαίτερα υψηλής θερμοκρασίας καθώς και θερμότητα από τον εσωτερικό εναλλάκτη διαπιστώθηκε ότι μπορεί να επιτευχθεί μείωση της περιεχόμενης υγρασίας μέχρι και 10%. Έτσι η ισχύς που απαιτείται για την περαιτέρω ξήρανση και την κονιοποίηση στο μύλο είναι αισθητά μικρότερη, και επιπλέον το μείγμα αέρα- κονιοποιημένου καυσίμου εισέρχεται στο λέβητα με υψηλότερη θερμοκρασία. Με δεδομένο την παρουσία μικρότερης ποσότητας υδρατμών κατά την καύση επιτυγχάνεται και βελτίωση του θερμικού βαθμού απόδοσης του Ατμοπαραγωγού.

Σημαντικά πλεονεκτήματα προκύπτουν και για τις εκπομπές από την εφαρμογή της παραπάνω τεχνολογίας ξήρανσης σε ρευστοποιημένη κλίνη. Συγκεκριμένα λόγω της μείωσης της παροχής του αέρα στην αναγωγική ζώνη καύσης δεν ευνοείται ο σχηματισμός NO και έτσι μειώνονται οι εκπομπές NO<sub>x</sub>. Επιπλέον εξαιτίας της μείωσης της παροχής του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών, παρατηρείται μείωση και των εκπομπών του SO<sub>2</sub>.

Παρακάτω δίνονται ορισμένα συγκριτικά στοιχεία των παραπάνω τεχνολογιών ξήρανσης (Πίνακας 2.1).

	<i>Συμβατικές Τεχνολογίες</i>	<i>Περιστροφικοί Ξηραντήρες</i>	<i>MTE</i>	<i>HHA</i>	<i>WTA</i>
<i>Μέσο ξήρανσης</i>	Θερμά καυσαέρια ή θερμός αέρας	Υπέρθερμος ατμός	Υπέρθερμος ατμός χαμηλής πίεσης	Καυσαέρια χαμηλής θερμοκρασίας	Κορεσμένος ατμός μέσης πίεσης
<i>Θερμοκρασία μέσου ξήρανσης</i>	1000 <sup>0</sup> C	200 <sup>0</sup> C	380 <sup>0</sup> C	70-80 <sup>0</sup> C	110 <sup>0</sup> C
<i>Τελικό ποσοστό υγρασίας</i>	18-25%	15-20%	15-20%	15-25%	12-15%
<i>Θερμοκρασία σε είσοδο μύλου κονιοποίησης</i>	450 <sup>0</sup> C	-	80 <sup>0</sup> C	-	-
<i>Ποσοστό αύξησης βαθμού απόδοσης</i>	-	3-4.5%	5-7.5%	-	~ 5.5-7%

(Πίνακας 2.1) : Συγκριτικά στοιχεία τεχνολογιών ξήρανσης

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>**

### **ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕ ΗΜΙΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ**

#### **3.1 Υφιστάμενη εμπειρία από παλαιότερα πειράματα**

##### **3.1.1 Εισαγωγή**

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, ο λιγνίτης καταλαμβάνει σημαντικό μερίδιο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δεδομένου της εύκολης διαδικασίας εξόρυξης και της ανταγωνιστικής του τιμής, με αποτέλεσμα να εντείνονται οι προσπάθειες εύρεσης μεθόδων αύξησης του βαθμού απόδοσης των θερμικών σταθμών. Η αντικατάσταση των παραδοσιακών τεχνικών ξήρανσης και κονιοποίησης, όπου γίνεται χρήση καυσαερίων υψηλής θερμοκρασίας, με προξήρανση χρησιμοποιώντας ατμό χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας, παρέχει τη δυνατότητα για αύξηση του βαθμού απόδοσης μέχρι και 5%. Αρχικός στόχος είναι η εφαρμογή προξήρανσης σε ποσοστό 30-40% της προσδιδόμενης θερμικής ισχύος σε συνδυασμό με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες ξήρανσης – κονιοποίησης, ενώ αργότερα η εφαρμογή για το 100% της προσδιδόμενης θερμικής ισχύος.

Ωστόσο η καύση ξηρού λιγνίτη απαιτεί σημαντικές τροποποιήσεις στην όλη λειτουργία του θερμικού σταθμού. Πετυχαίνοντας μείωση της υγρασίας από 50-60% (συνήθης τιμή για φαιάνθρακες) σε 12% παρατηρείται αύξηση των θερμοκρασιών κατά την καύση, με ταυτόχρονη αύξηση και της θερμογόνου ικανότητας του λιγνίτη (από 9-10 MJ/kgf σε 16-19 MJ/kgf).

Οι κυριότερες παράμετροι που χρειάζεται να διερευνηθούν μπορούν να συνοψιστούν στις παρακάτω :

- i. Η επίδραση της κοκκομετρίας του κονιοποιημένου καυσίμου,
- ii. Η επίδραση της θερμοκρασίας καύσεως,
- iii. Η επίδραση της περιεχόμενης υγρασίας,
- iv. Η συμπεριφορά των χοντρόκοκκων σωματιδίων.

Με σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για την περίπτωση χρήσης ξηρού λιγνίτη (WTA) και σε σχέση με τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα για τις παραδοσιακές τεχνικές ξήρανσης – κονιοποίησης μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά τις συνθήκες κατά την καύση, την παρουσία τέφρας, τις εκπομπές NO<sub>x</sub> καθώς και SO<sub>2</sub>.

##### **3.1.2 Περιγραφή παλαιότερων πειραμάτων σε ημιβιομηχανική κλίμακα**

###### **3.1.2.1 Πειραματική διερεύνηση καύσης σε μονάδα 500 kWth**

Στο πλαίσιο της διερεύνησης κυρίως των εκπομπών των NO<sub>x</sub> και SO<sub>2</sub> διεξήχθησαν τα προηγούμενα χρόνια πειράματα τόσο σε εργαστηριακή όσο και σε ημιβιομηχανική



κλίματα στις εγκαταστάσεις του IVD (Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen), του Πανεπιστημίου της Στουτγκάρδης [12-15].

Ως βασική εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκε μια ημιβιομηχανική μονάδα 500 kWth (KSVA). Από την κορυφή της εγκατάστασης γινόταν η εισαγωγή καυσίμου μαζί με τον κύριο και τον δευτερεύοντα αέρα καύσης, ανάλογα με τις συνθήκες και τις απαιτήσεις των πειραμάτων. Προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση των επικαθίσεων, τις εκπομπές NO<sub>x</sub>, καθώς και τις συνθήκες κατά την καύση (θερμοκρασίες, περιεκτικότητες των καυσαερίων), τοποθετήθηκαν λήπτες σε διάφορα επίπεδα κατά μήκος της εγκατάστασης. Επίσης ανάλογα με το είδος του λιγνίτη που χρησιμοποιήθηκε κατά περίπτωση, έγιναν τροποποιήσεις εξαιτίας της διαφορετικής σύνθεσης του καυσίμου και της περιεχόμενης υγρασίας.

Σε εργαστηριακό επίπεδο έγιναν πειράματα σε ηλεκτρικά θερμαινόμενο αντιδραστήρα (20 kW), όπου υπήρχαν 5 κατάλληλα ρυθμιζόμενες ζώνες θερμότητας, ώστε να επιτυγχάνονται θερμοκρασίες μέχρι και 1500<sup>0</sup>C στα τοιχώματα του θαλάμου. Με τοποθέτηση ληπτών σε διάφορα σημεία του θαλάμου έγινε αναρρόφηση καυσαερίων ώστε να γίνει ανάλυση τόσο για περιεκτικότητες τέφρας όσο και για τα διάφορα είδη εκπομπών.

#### Αποτελέσματα- Συμπεράσματα :

Αρχικά θα αναφερθούμε στην αξιολόγηση των πειραμάτων που έγιναν στον ηλεκτρικά θερμαινόμενο αντιδραστήρα BTS. Με δεδομένο το γεγονός ότι έχουμε σταθερή θερμοκρασία των τοιχωμάτων κατά τη ροή των καυσαερίων, τα δείγματα εκπομπών και τέφρας είναι ενδεικτικά του τελικού τμήματος της εστίας. Σε όλα τα πειράματα διατηρήθηκε σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων, συνολικός χρόνος παραμονής 5 sec, λόγος αέρα στη ζώνη ακαύστων 1.15 και επίσης σταθερή παραγόμενη θερμική ισχύς.

#### Εκπομπές NO<sub>x</sub> :

Τρεις είναι οι κυριότεροι παράγοντες που καθορίζουν τις εκπομπές των NO<sub>x</sub> :

- i. Η θερμοκρασία των καυσαερίων,
- ii. Ο χρόνος παραμονής στην εστία,
- iii. Η στοιχειομετρία του καυσίμου (λ) στην πρωτεύουσα ζώνη καύσης.

Είναι γνωστό ότι μείωση του λόγου αέρα καύσης στην πρωτεύουσα ζώνη, οδηγεί σε μειωμένες εκπομπές NO<sub>x</sub> . Ωστόσο σημαντικός παράγοντας είναι και η θερμοκρασία. Υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με λόγο αέρα >1.0 έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών, ενώ στην περίπτωση που έχουμε λόγο αέρα καύσης <0.8 και θερμοκρασίες μέχρι 1400 <sup>0</sup>C, παρατηρείται μείωση των εκπομπών. Η επίδραση του χρόνου παραμονής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Για θερμοκρασίες της τάξεως των 1000 <sup>0</sup>C αύξηση του χρόνου παραμονής οδηγεί σε μείωση των εκπομπών, ενώ όταν έχουμε επίπεδα θερμοκρασιών των 1300 <sup>0</sup>C, παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση αυτών.

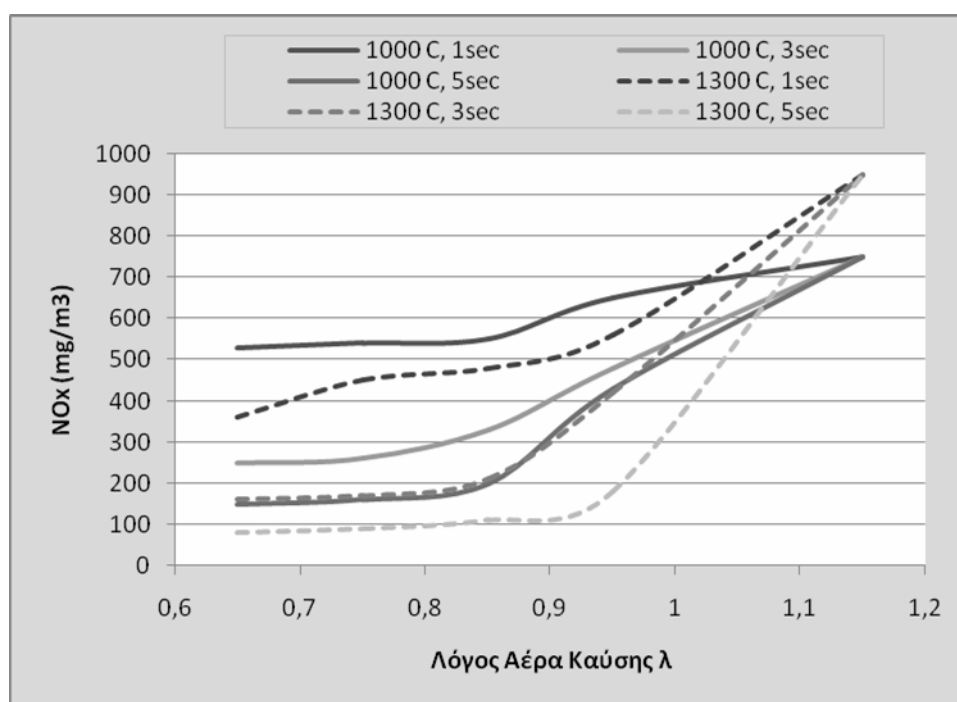
Στην περίπτωση θερμοκρασιών της τάξης των 1500 <sup>0</sup>C, αναμένεται μείωση των εκπομπών ιδιαίτερα σε μικρές τιμές λ, όμως λόγω της εισαγωγής διαβαθμισμένου αέρα καύσης (OFA), για λόγους αντοχής και ελέγχου της αδιαβατικής θερμοκρασίας καύσης, αυξάνεται ο λόγος αέρα και τα σχηματιζόμενα NO, αυξάνοντας τις εκπομπές NO<sub>x</sub>.

Μια ακόμα παράμετρος που πρέπει να εξεταστεί όσον αφορά τις εκπομπές NO<sub>x</sub>, είναι και το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας του ξηρού λιγνίτη. Στο εσωτερικό του θαλάμου εισάγεται ξηρός λιγνίτης και προστίθεται ατμός στον αέρα καύσης ώστε να

προσομοιαστούν τα φαινόμενα των εκπομπών για περιπτώσεις καυσίμων διαφορετικού ποσοστού υγρασίας. Παρατηρήθηκε ότι οι εκπομπές επηρεάστηκαν ελάχιστα από τις μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας, διατηρώντας σταθερή θερμοκρασία τοιχωμάτων, περίπου στους 1300 °C.

Επιπλέον έγινε έλεγχος για πιθανή επίδραση της κοκκομετρίας του κονιοποιημένου ξηρού λιγνίτη στις εκπομπές, με δεδομένη την αύξηση της τέφρας με την αύξηση της κοκκομετρίας του καυσίμου. Προέκυψε ότι το επίπεδο εκπομπών δε μεταβάλλεται για διαφορετικής κοκκομετρίας ξηρό λιγνίτη.

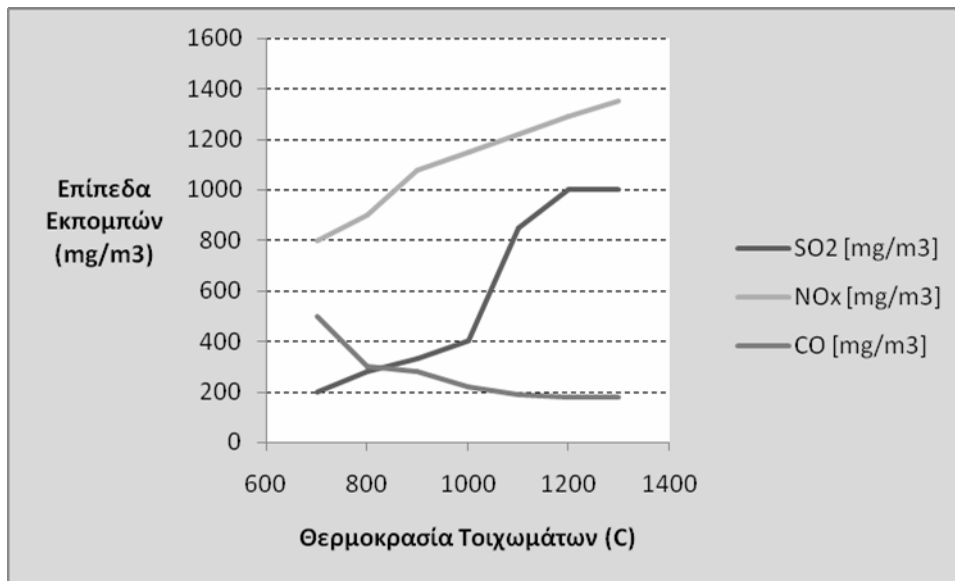
Η επίδραση όλων των παραπάνω παραμέτρων συνοψίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 3.1).



(Σχήμα 3.1) : Επίδραση της Θερμοκρασίας, του Χρόνου Παραμονής και του Λόγου Αέρα Καύσης σε εκπομπές NO<sub>x</sub>

Εκπομπές SO<sub>2</sub> : Γενικά παρατηρήθηκαν υψηλές εκπομπές SO<sub>2</sub>, πιθανώς λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας του λιγνίτη σε Θείο. Όσον αφορά την επίδραση της κοκκομετρίας, διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στις εκπομπές.

Ενδιαφέρον, ωστόσο παρουσιάζει και η συμπεριφορά των εκπομπών σε συνάρτηση με την αύξηση της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων. Μια ενδεικτική τάση της αναμενόμενης μεταβολής αυτών δίνεται στο (Σχήμα 3.2). Συμπεριλαμβάνεται και η επίδραση που παρατηρείται στις εκπομπές του CO, αφού ανάλογα με την ποσότητα του αέρα που τροφοδοτείται στο εσωτερικό της εστίας, ενδέχεται να αυξηθούν σημαντικά οι εκπομπές CO.



(Σχήμα 3.2) : Εκπομπές SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO συναρτήσει Θερμοκρασίας Τοιχωμάτων Λέβητα

Σημαντικό στοιχείο αποτελεί και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην ημιβιομηχανική μονάδα 500 kWth (KSVA). Πρέπει να αναφερθεί ότι η συνολική τιμή του λόγου αέρα καύσης τέθηκε ίση με 1.15, ο δευτερεύων αέρας και ο αέρας στη ζώνη ακαύστων θερμάνθηκαν στους 300 °C και επιπλέον ο χρόνος αναμονής κυμαινόταν από 1.7 έως 2.2 sec.

#### Εκπομπές NO<sub>x</sub> :

Όπως και προηγουμένως με αύξηση του λόγου αέρα καύσης, κυρίως σε τιμές μεγαλύτερες του 0.8, παρατηρήθηκε αύξηση και των εκπομπών NO<sub>x</sub>. Βασική παράμετρος είναι εκτός των άλλων και το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας σε συνδυασμό με τους λόγους αέρα καύσης. Γενικά με  $\lambda > 0.9$  αυξάνονταν οι τιμές των εκπομπών NO<sub>x</sub>, ωστόσο δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές κατά την καύση δειγμάτων λιγνίτη διαφορετικής περιεχόμενης υγρασίας.

#### Εκπομπές SO<sub>2</sub> :

Παρατηρήθηκαν υψηλές εκπομπές για μεγάλους λόγους αέρα καύσης, όμως μικρότερες σε σχέση με τα πειράματα στην εργαστηριακή διάταξη των 20 kW, πιθανώς λόγω μικρότερων χρόνων παραμονής (1 sec).

#### Θερμοκρασία καυσαερίων :

Οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν στη διαμόρφωση των προφίλ θερμοκρασιών στο εσωτερικό του λέβητα είναι :

- i. Παροχή μάζας καυσαερίων ανακυκλοφορίας,
- ii. Ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας κονιοποιημένου καυσίμου,
- iii. Είδος καυσίμου,
- iv. Κοκκομετρία κονιοποιημένου καυσίμου,
- v. Λόγος αέρα καύσης.

Η μείωση της περιεχόμενης υγρασίας με τη χρησιμοποίηση ξηρού λιγνίτη, όπως ήταν αναμενόμενο, οδηγεί σε αύξηση της αδιαβατικής θερμοκρασίας καύσης. Ωστόσο λόγοι αντοχής των υλικών των τοιχωμάτων επιβάλλουν τη μείωση των θερμοκρασιών σε χαμηλότερα επίπεδα, καθώς παράλληλα εντείνεται η εμφάνιση επικαθίσεων και η δημιουργία ζωνών με τοπικά υψηλή θερμοκρασία. Η τροφοδότηση του λέβητα με καυσαέρια ανακυκλοφορίας, συνήθως θερμοκρασίας 200 °C, επιφέρει την επιθυμητή μείωση θερμοκρασιών, ώστε να επιτυγχάνεται η ομοιομορφία κατά καύση. Όσον αφορά την επίδραση της κοκκομετρίας του καιγόμενου καυσίμου, μικρότερο μέγεθος κόκκων συμβάλλει στην γρηγορότερη ανάμιξη καυσίμου-αέρα και στη μείωση της τέφρας καθώς και του φαινομένου των επικαθίσεων.

### 3.1.2.2 Πειραματική διερεύνηση επικαθίσεων σε μονάδα 150 MWe

Βασικό στόχος των συγκεκριμένων πειραμάτων που διεξήχθησαν σε βιομηχανικό λέβητα παραγωγής 150 MWe από το τμήμα Χημικών Μηχανικών του Πολυτεχνείου της Δανίας ήταν ο έλεγχος της συμπεριφορά της τέφρας και του φαινομένου των επικαθίσεων, τα οποία παρατηρούνται κατά τη διεργασία της καύσης στερεών καυσίμων [16]. Κατά κύριο λόγο, διερευνήθηκε η τάση για επικαθίσεις στην έξοδο της εστίας, στους υπερθερμαντήρες που ακολουθούν αυτήν καθώς και στον οικονομητήρα.

Είναι γνωστό ότι τα ορυκτά καύσιμα, κατ' επέκταση και ο λιγνίτης, αποτελείται σε ένα μεγάλο ποσοστό από ανόργανα στοιχεία. Κατά τη διεργασία της καύσης λόγω χημικών και φυσικών μεταβολών που λαμβάνουν χώρα, γίνεται μετατροπή των ανόργανων αυτών στοιχείων σε τέφρα. Έντονη είναι η παρουσία ενώσεων αλκαλίων, όπως  $K_2SO_4$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $KCl$ , όσο και διαφόρων οξειδίων ( $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $SiO_2$  κ.λ.π.). Ωστόσο η μη ομοιογενής καύση ευνοεί την εμφάνιση περιοχών χαμηλότερης θερμοκρασίας, όπου είναι πιθανό να παρατηρηθεί συμπύκνωση χημικών ενώσεων, αφού δεν θα μπορούν να διατηρηθούν σε κατάσταση ατμοποίησης, κι έτσι να σχηματιστούν στρώματα επικαθίσεων.

Προκειμένου να γίνει καταγραφή τόσο των επικαθίσεων όσο και των θερμοκρασιών, τοποθετήθηκαν σε διάφορα επίπεδα του λέβητα υδρόψυκτοι ή αερόψυκτοι λήπτες ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες.

#### Αποτελέσματα- Συμπεράσματα :

Μια πρώτη εκτίμηση της συμπεριφοράς της τέφρας μπορεί να προκύψει από την οπτική διερεύνηση της επιφάνειας των ληπτών επικαθίσεων. Συνήθως διακρίνονται πέντε διαφορετικές δομές με τις οποίες εμφανίζονται οι επικαθίσεις πάνω στους λήπτες :

- i. Πολύ λεπτό στρώμα σκόνης (τέφρας),
- ii. Παχύτερο στρώμα σκόνης,
- iii. Λεπτό στρώμα σκόνης με κόκκους,
- iv. Παχύτερο στρώμα σκόνης με κόκκους και αιχμές,
- v. Παχύ στρώμα σκόνης με αιχμές και συσσωματώματα.

Ωστόσο οι όποιες οπτικές παρατηρήσεις πρέπει να συσχετιστούν με τις θερμοκρασίες στο εσωτερικό του λέβητα, τον τύπο του λιγνίτη, την επιφανειακή θερμοκρασία του λήπτη, σε κάθε περίπτωση.

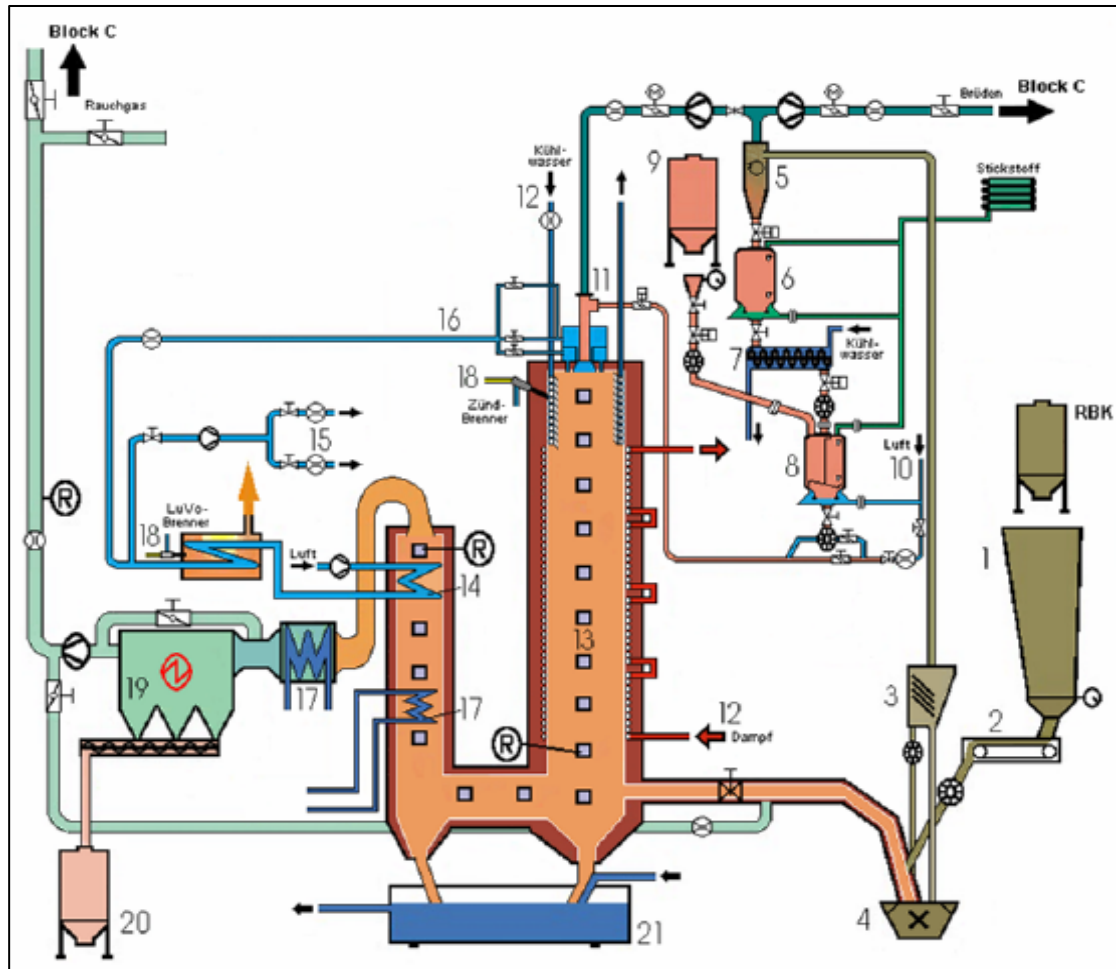
Ενδιαφέρον παρουσιάζουν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την τάση για επικαθίσεις, κυρίως στην έξοδο της εστίας (αντίστοιχα με τη θέση 10 για την περίπτωση των πειραμάτων καύσης ελληνικού λιγνίτη στην εγκατάσταση VVA).

- Παρατηρήθηκε μεγαλύτερη τάση επικαθίσεων, όπως και ήταν αναμενόμενο κατά την καύση λιγνίτη με μεγαλύτερο ποσοστό τέφρας
- Με την αύξηση του χρόνου έκθεσης αυξήθηκε το ποσό των επικαθίσεων
- Αυξημένες περιεκτικότητες των  $Fe_2O_3$  και  $SiO_2$
- Τα δείγματα των επικαθίσεων είχαν τη μορφή κόκκων ή σε κάποιες περιπτώσεις αιχμών.

Τα παραπάνω συμπεράσματα όσον αφορά τις εκπομπές, τα θερμοκρασιακά προφίλ καθώς και την τάση για επικαθίσεις αποτελούν ένα πρώτο στοιχείο για σύγκριση κατά τη διερεύνηση της μικτής καύσης ελληνικού λιγνίτη στην εγκατάσταση της VVA καθώς και στα πειράματα σε βιομηχανική κλίμακα στον λέβητα του «ΑΗΣ Λιπτόλ».

### **3.2 Πειραματική εγκατάσταση κονιοποιημένου καυσίμου (VVA)**

Με βάση όσα έχουν προαναφερθεί η χρήση της τεχνολογίας ξήρανσης WTA παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, γεγονός το οποίο ωθεί στην εφαρμογή αυτής σε βιομηχανική κλίμακα. Ως αρχικός στόχος τίθεται η χρησιμοποίηση ξηρού λιγνίτη (WTA ξήρανση) σε συνδυασμό με φυσικό λιγνίτη (παραδοσιακές τεχνικές ξήρανσης), ενώ στη συνέχεια θα επιχειρηθεί η προσομοίωση της λειτουργίας της όλης εγκατάστασης μόνο με ξηρό λιγνίτη (WTA ξήρανση). Προκειμένου να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα και οι παράμετροι λειτουργίας της συνδυαστικής χρήσης ξηρού και φυσικού λιγνίτη πραγματοποιήθηκαν πειράματα στην εγκατάσταση κονιοποιημένου καυσίμου (VVA) που δίνεται παρακάτω (Σχήμα 3.3) [17].



(Σχήμα 3.3) : Πειραματική εγκατάσταση κονιοποιημένου καυσίμου (VVA)

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| 1. Σιλό φυσικού λιγνίτη            | 11. Καυστήρας                          |
| 2. Δοσομετρικός μάντας τροφοδοσίας | 12. Σωληνοτοίχωμα ψύξης εστίας         |
| 3. Διαχωριστής                     | 13. Εστία                              |
| 4. Μύλος κονιοποίησης              | 14. Προθερμαντής αέρα καύσης           |
| 5. Κυκλώνας                        | 15. Παροχή για αέρα OFA                |
| 6. Ενδιάμεσο σιλό απόθεσης         | 16. Αέρας καύσης προς καυστήρα         |
| 7. Ψυχόμενος κοχλίας μεταφοράς     | 17. Εναλλάκτης για ψύξη των καυσαερίων |
| 8. Κύριο σιλό απόθεσης             | 18. Καυστήρας έναυσης                  |
| 9. Κιβώτιο μεταφοράς ξηρού λιγνίτη | 19. Η/Φ                                |
| 10. Αέρας μεταφοράς                | 20. Σιλό απόθεσης ιπτάμενης τέφρας     |
|                                    | 21. Σύστημα απαγωγής υγρής τέφρας      |
|                                    | ® Θέση αναλυτή απαερίων                |

Η πειραματική εγκατάσταση αποτελείται από κατακόρυφη εστία κυλινδρικής διατομής, με ενδιάμεσο οριζόντιο και κατακόρυφο τμήμα ανόδου πριν την έξοδο των καυσαερίων. Έχει τη δυνατότητα λειτουργίας με φυσικό λιγνίτη (υγρασίας 50-56%) καθώς επίσης με ξηρό λιγνίτη (εναπομένουσας υγρασίας 10-25%). Χρησιμοποιώντας ως καύσιμο αναφοράς το λιγνίτη της περιοχής της Βόρειας Ρηνανίας Βεσφαλίας για μέγιστη εισερχόμενη θερμική ισχύ 1.0 MW, απαιτείται παροχή μάζας φυσικού λιγνίτη 300 kgr/h. Ο φυσικός λιγνίτης τοποθετείται σε σιλό αποθήκευσης [1],

προερχόμενος από τους χώρους εναπόθεσης των ορυχείων, όπου μέσω του δοσομετρικού ιμάντα [2], οδηγείται στο μύλο κονιοποίησης [4] για να κονιοποιηθεί και ταυτόχρονα να γίνει η ξήρανσή του με παροχή θερμών καυσαερίων. Η ύπαρξη διαχωριστή [3] οδηγεί το μείγμα υδρατμών (από την αφύγρανση του φυσικού λιγνίτη) απαερίων στον κυκλωνικό διαχωριστή (κυκλώνας) [5], όπου εκεί θα γίνει ο διαχωρισμός τους από τον ξηρό λιγνίτη. Ωστόσο ανάλογα με τον επιθυμητό τρόπο λειτουργίας της εγκατάστασης, υπάρχει η δυνατότητα τα θερμά απαέρια και ο παραγόμενος υδρατμός είτε να οδηγηθούν σε αγωγό απαερίων είτε να εισέλθουν στη εστία του καυστήρα. Ο ξηρός λιγνίτης με τη σειρά του μεταφέρεται από το ενδιάμεσο σιλό αποθήκευσης μέσω ψυχόμενου τροφοδοτικού κοχλία, βαλβίδας ελέγχου και κατακόρυφο περιστροφικό τροφοδότη στο κύριο σιλό απόθεσης [8] του ξηρού λιγνίτη. Η παρουσία περιστροφικού τροφοδότη τοποθετημένου κάτω από το σιλό καθορίζει την παροχή του ξηρού λιγνίτη, ο οποίος θα μεταφερθεί μαζί με αέρα τροφοδοσίας στο εσωτερικό του καυστήρα. Προκειμένου να είναι εφικτή η διεύρυνση των δυνατοτήτων της εγκατάστασης, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ξηρού λιγνίτη παραχθέντος από εξωτερική πηγή με τη βοήθεια ειδικών κιβωτίων μεταφοράς [9]. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο που επιτρέπει τη λειτουργία της εγκατάστασης υπό διαφορετικές συνθήκες είναι η ύπαρξη καυστήρων διαφορετικής γεωμετρίας. Έτσι ανάλογα με τις επιθυμητές συνθήκες στο εσωτερικό της εστίας μπορεί να γίνει επιλογή της πηγής τροφοδοσίας ξηρού λιγνίτη από την αίθουσα ελέγχου της μονάδας. Στον αγωγό απαερίων υπάρχει εναλλάκτης [14] για την προθέρμανση του αέρα καύσης, όπου σε συνδυασμό με τη χρήση καυστήρα προπανίου (LUVO) [18], επιτυγχάνεται η απαιτούμενη θερμοκρασία του αέρα για την πραγματοποίηση της καύσης. Επιπλέον ανάλογα αν επιθυμείται διαβαθμισμένη καύση γίνεται εισαγωγή του αέρα σε διαφορετικά επίπεδα στο εσωτερικό της εστίας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η λειτουργία της εγκατάστασης VVA μπορεί να συνδυάσει φυσικό λιγνίτη και ξηρό λιγνίτη. Κατά τη λειτουργία με ξηρό λιγνίτη η διαχωρισθείσα στον κυκλώνα ποσότητα υδρατμού και απαερίων οδηγείται μέσω αγωγού απαερίων προς το περιβάλλον. Η εναπομένουσα υγρασία του λιγνίτη κυμαίνεται σε αυτήν την περίπτωση μεταξύ 12 και 17%. Στην περίπτωση λειτουργίας με «φυσικό λιγνίτη» η ποσότητα υδρατμού και απαερίων που έχει διαχωριστεί στον κυκλώνα εισέρχεται κατά ένα μέρος στον καυστήρα. Για τη διασφάλιση της σταθερής λειτουργίας και των συνθηκών έναυσης στην είσοδο της εστίας η μέγιστη δυνατή ποσότητα των υδρατμών και καυσαερίων περιορίζεται στα 350 m<sup>3</sup>/h για παροχή φυσικού λιγνίτη 250kg/h. Οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές για λιγνίτη Βόρειας Ρηνανίας Βεστφαλίας. Η ποσότητα αυτή μπορεί στη συνέχεια να καθοριστεί μεταξύ 0 και 350 m<sup>3</sup>/h ανάλογα με το σκοπό του πειράματος.

### **3.2.1 Συνοπτική περιγραφή πειραμάτων σε εγκατάσταση VVA**

Είναι γεγονός ότι η ποιότητα του ελληνικού λιγνίτη χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλή θερμογόνο δύναμη και ιδιαίτερα αυξημένο ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε τις διακυμάνσεις της θερμογόνου ικανότητας στις διάφορες περιοχές της χώρας : 3800-4600 KJ/kgf σε Μεγαλόπολη - Αμύνταιο - Δράμα, 5200-5600 KJ/kgf σε ευρύτερη περιοχή Πτολεμαΐδας, 7500-9600 KJ/kgf σε Φλώρινα – Ελασσόνα [18]. Με δεδομένα τα παραπάνω στοιχεία κρίνεται απαραίτητη η ανάγκη βελτίωσης του βαθμού απόδοσης των λιγνιτικών μονάδων και προς αυτή την κατεύθυνση πραγματοποιήθηκαν πειράματα στην πειραματική εγκατάσταση VVA με καύση ποσοτήτων ελληνικού λιγνίτη.

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την συμπεριφορά δειγμάτων ελληνικού λιγνίτη, κατά τη διεργασία της καύσης αυτών, σχεδιάστηκαν δύο κύριες σειρές πειραμάτων (Α και Β). Σε κάθε περίπτωση έγιναν μετρήσεις σε διαφορετικά επίπεδα της παροχής των θερμών καυσαερίων. Το επίπεδο αναφοράς και για τις δύο σειρές πειραμάτων θεωρήθηκε το ίδιο ( $A_0=B_0$ ) (phase 0), και η ροή μάζας των καυσαερίων, που ανακυκλοφορείται στο εσωτερικό της εστίας, τέθηκε στη μέγιστη δυνατή τιμή. Όσον αφορά τις θερμοκρασίες στην ευρύτερη περιοχή των καυστήρων καθώς και στην έξοδο της εστίας θεωρήθηκαν ως σταθερές τιμές και αντιπροσωπευτικές των συνθηκών καύσης σε βιομηχανικούς μεγάλης κλίμακας ελληνικούς λέβητες. Η παροχή του ξηρού λιγνίτη, που απαιτείται ώστε να πετύχουμε τις θερμοκρασίες αναφοράς, καταγράφεται σε κάθε περίπτωση. Ως κατάσταση '1' (phase 1) λαμβάνεται η περίπτωση κατά την οποία έχουμε μειώσει την παροχή ανακυκλοφορίας των καυσαερίων μέσα στην εστία στο 50%, δηλαδή προσομοίωση των συνθηκών μικτής καύσης ξηρού λιγνίτη. Ενώ ως κατάσταση '2' (phase 2), όταν η παροχή αυτή τεθεί στην ελάχιστη τιμή της, δηλαδή προσομοίωση των συνθηκών καύσης ξηρού λιγνίτη. Επιπλέον για κάθε μία από τις καταστάσεις '1' και '2' πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων. Στην πρώτη σειρά πειραμάτων (Α) μειωνόταν η παροχή ξηρού λιγνίτη, διατηρώντας τη θερμοκρασία εξόδου της εστίας σε μια σταθερή τιμή, ίση με τις θερμοκρασίες αναφοράς, ενώ στη δεύτερη σειρά (Β) η ροή του ξηρού λιγνίτη παρέμενε σταθερή και παράλληλα γινόταν καταγραφή της αύξησης της θερμοκρασίας της εστίας. Η συνολική δομή των πειραμάτων παρατίθεται στον Πίνακα 3.1.

	Σειρά Α	Σειρά Β
<p><u>“Περίπτωση 0” Κατάσταση Αναφοράς</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ποσότητα υδρατμών που εισέρχεται στην εστία ίση με το 100% της μέγιστης δυνατής</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Προσαρμογή της θερμοκρασίας στην περιοχή του καυστήρα και της θερμοκρασίας εξόδου από την εστία σε τιμές αντίστοιχες ελληνικών σταθμών</li> <li>- Καταγραφή της απαιτούμενης παροχής μάζας ξηρού λιγνίτη για την διατήρηση των παραπάνω θερμοκρασιών</li> </ul>	
<p><u>“Περίπτωση 1”</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Μείωση της ποσότητας καυσαερίων-υδρατμών στο 50%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Διατήρηση σταθερής της θερμοκρασίας</li> <li>- Αναγκαστική ελάττωση της παροχής μάζας του ξηρού λιγνίτη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Σταθερή παροχή ξηρού λιγνίτη</li> <li>- Αναμένεται αύξηση της θερμοκρασίας</li> </ul>
<p><u>“Περίπτωση 2”</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Μείωση της ποσότητας καυσαερίων-υδρατμών στο 0% - Καθαρή καύση ξηρού λιγνίτη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Διατήρηση σταθερής της θερμοκρασίας</li> <li>- Αναγκαστική ελάττωση της παροχής μάζας του ξηρού λιγνίτη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Σταθερή παροχή ξηρού λιγνίτη</li> <li>- Αναμένεται περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας</li> </ul>

(Πίνακας 3.1) : Δομή πειραμάτων σε εγκατάσταση (VVA)

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων αποφασίστηκαν συγκεκριμένες αλλαγές στον αρχικά καθορισμένο πειραματικό προγραμματισμό, προκειμένου να είναι εφικτή η αξιόπιστη και συνεχής λειτουργία της εγκατάστασης (VVA) με ελληνικό λιγνίτη, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι ο αρχικός σχεδιασμός της μονάδας είναι για λειτουργία με



λιγνίτη υψηλής Θερμογόνου Ικανότητας, όπως συμβαίνει με το λιγνίτη της Ρηνανίας Βεσπφαλίας. Η θερμοκρασία αναφοράς στο χώρο εξόδου της εστίας για την πειραματική εγκατάσταση (VVA) αυξήθηκε από τους 950-980<sup>0</sup>C, όπου τίθεται κατά την λειτουργία των ελληνικών λεβήτων, στους 1050<sup>0</sup>C, ώστε να ανταποκρίνεται στις τιμές αναφοράς των λεβήτων της Ρηνανίας Βεσπφαλίας. Η μόνιμη λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες εξόδου εστίας δεν ήταν δυνατή για την πειραματική εγκατάσταση (VVA), λόγω προβλημάτων κατά την ξήρανση του φυσικού λιγνίτη, κυρίως υπό συνθήκες χαμηλού φορτίου. Η αύξηση της συγκεκριμένης τιμής της θερμοκρασίας δεν επηρεάζει τα κύρια αποτελέσματα και τα συμπεράσματα των πειραμάτων, καθώς οι σημαντικότερες παράμετροι, όπως οι θερμοκρασίες, οι εκπομπές, οι επικαθίσεις, τα άκαυστα σωματίδια, μετριοούνται σε διάφορα σημεία κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα της εστίας. Η ροή των καυσαερίων-υδρατμών ποικίλει ανάμεσα στις τιμές των 80 Nm<sup>3</sup>/h και 350 Nm<sup>3</sup>/h για την περίπτωση ελληνικού λιγνίτη. Έτσι μια παροχή όγκου της τάξης των 80-100 Nm<sup>3</sup>/h λαμβάνεται ως ελάχιστη, ενώ ως μέγιστη τιμή θεωρείται της τάξης των 300-350 Nm<sup>3</sup>/h. Στην περίπτωση των πειραμάτων της κατάστασης '1', όπου έχουμε ροή καυσαερίων-υδρατμών στο 50%, δεχόμαστε μια παροχή όγκου της τάξης των 200-220 Nm<sup>3</sup>/h.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έγιναν οι παρακάτω μετρήσεις :

➤ Προφίλ Θερμοκρασιών

Σε 9 διαφορετικά επίπεδα κατά μήκος του κεντρικού κατακόρυφου άξονα μετρήθηκαν τα προφίλ των θερμοκρασιών. Επιπλέον έγινε μια ακόμα μέτρηση (10η) λίγο πριν την έξοδο.

➤ Εκπομπές

Η συγκέντρωση των καυσαερίων (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>) έχει καταγραφεί συνεχώς σε δύο θέσεις : στην έξοδο της εστίας, στο τέλος του θερμαινόμενου τμήματος, και κατά την εξαγωγή των καυσαερίων στο τέλος της εγκατάστασης. Επίσης, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων της σειράς A, μετρήθηκαν προφίλ εκπομπών σε 7 διαφορετικά επίπεδα κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα, όπου αναμένονταν υψηλές θερμοκρασίες. Ο συνολικός χρόνος μέτρησης σε κάθε θέση ήταν 20 λεπτά.

➤ Ιπτάμενη Τέφρα

Δείγματα ιπτάμενης τέφρας ελήφθησαν με ισοκινητικής δειγματοληψίας χρησιμοποιώντας λήπτες σε 8 διαφορετικά επίπεδα στον άξονα της εστίας.

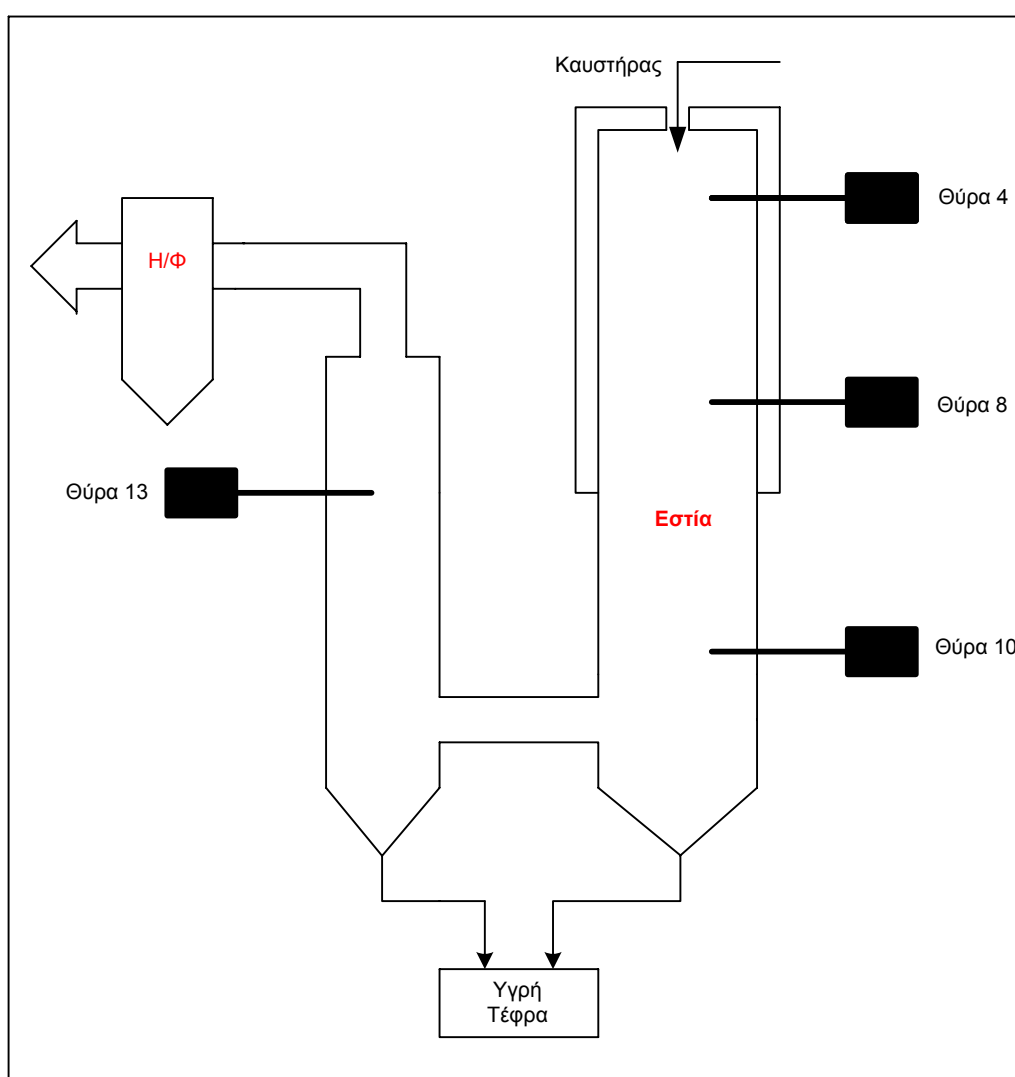
➤ Τέφρα στα Ηλεκτροστατικά Φίλτρα και στην Τεφρολεκάνη της Εστίας

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ελήφθησαν, επίσης, δείγματα τέφρας από τα Ηλεκτροστατικά Φίλτρα, καθώς και δείγμα υγρής τέφρας από τον πυθμένα της εστίας.

➤ Μετρήσεις των επικαθίσεων

Προκειμένου να διερευνηθεί το φαινόμενο των επικαθίσεων των δειγμάτων ελληνικού λιγνίτη, τοποθετήθηκαν λήπτες μέτρησης επικαθίσεων σε διαφορετικά επίπεδα στον κατακόρυφο άξονα της εστίας. Μετρήσεις έγιναν μόνο κατά τη διάρκεια της σειράς πειραμάτων A, και στις 3 φάσεις. Τοποθετήθηκαν 4 λήπτες

επικαθίσεων σε διαφορετικά επίπεδα κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα. Ο πρώτος κοντά στην περιοχή των καυστήρων (Θύρα 4, 2.10m από την έξοδο του καυστήρα), ο δεύτερος μετά την είσοδο του διαβαθμισμένου αέρα καύσης (Θύρα 8, 4.50m από την έξοδο του καυστήρα), ο τρίτος στην έξοδο της εστίας (Θύρα 10, 5.70m από την έξοδο του καυστήρα) και ο τέταρτος στη διαδρομή των καυσαερίων πριν την έξοδο του από το λέβητα (Θύρα 13, 10.70m από την έξοδο του καυστήρα). Οι λήπτες αποτελούνται από μεταλλικό τμήμα, το οποίο πρέπει να ψύχεται πετυχαίνοντας μια θερμοκρασία της τάξης των 500<sup>0</sup>C, ενώ το υπόλοιπο κεραμικό τμήμα δεν ψύχεται ώστε να προσομοιώνει επιφάνεια αυλού με τηγμένες επικαθήσεις. Ενδεικτική απεικόνιση των θέσεων τοποθέτησης των ληπτών δίνεται στη συνέχεια (Σχήμα 3.4).

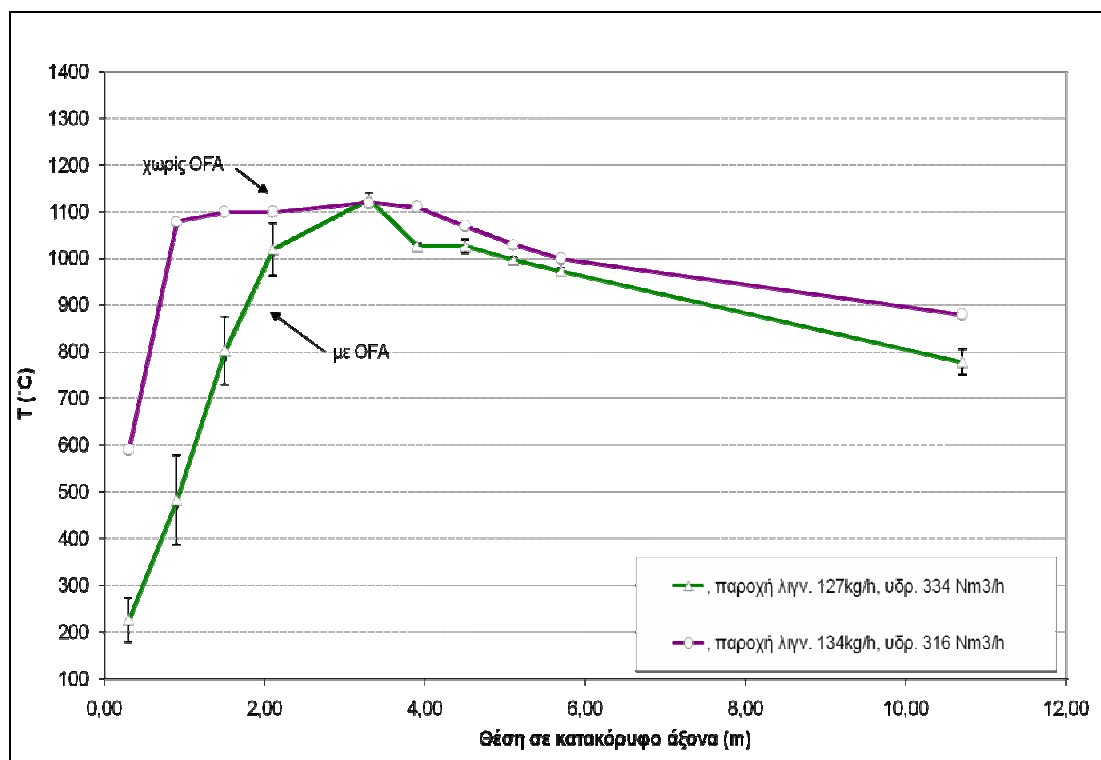


(Σχήμα 3.4): Θέσεις δειγματοληψίας επικαθήσεων τέφρας

### 3.2.2 Επεξεργασία μετρήσεων – σχολιασμός αποτελεσμάτων

#### 3.2.2.1 Μεταβολή θερμοκρασιών στις δύο σειρές πειραμάτων

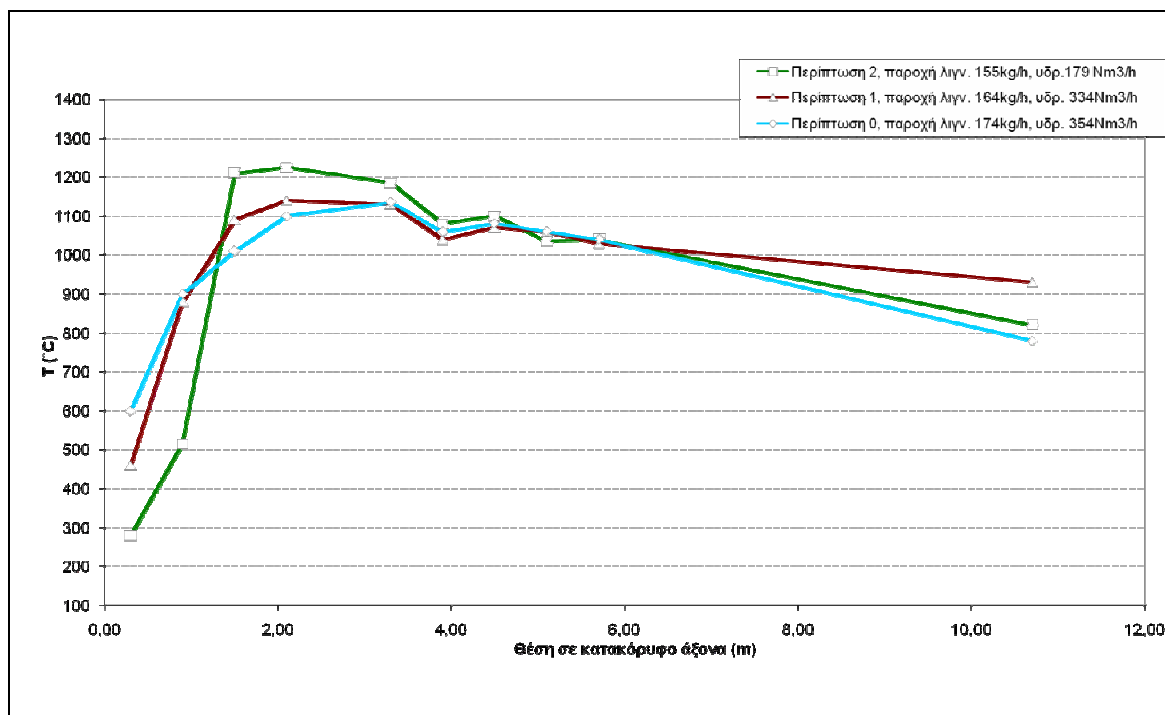
Κατά την καύση παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον η εξέλιξη των μεταβολών της θερμοκρασίας, αφού επηρεάζονται τόσο η λειτουργία της εστίας ως προς την απόδοση, καθώς και οι εκπομπές. Στην περίπτωση της μη-διαβαθμισμένης καύσης παρατηρήθηκαν υψηλές θερμοκρασίες σε μεγαλύτερο εύρος και επίσης πιο απότομη άνοδος της θερμοκρασίας. Έτσι οι εκπομπές ήταν αρκετά μεγαλύτερες αφού ο λόγος αέρα καύσης ήταν  $\lambda > 1$ . Ωστόσο κατά τη διαβαθμισμένη καύση παρατηρήθηκε λιγότερο γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ υπήρχε και καλύτερος έλεγχος του λόγου  $\lambda$  με την εισαγωγή διαβαθμισμένου αέρα καύσης [18]. Τα θερμοκρασιακά προφίλ κατά τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις καύσης δίνονται στη συνέχεια (Σχήμα 3.5).



(Σχήμα 3.5) : Θερμοκρασιακά προφίλ σε διαβαθμισμένη και μη-διαβαθμισμένη καύση

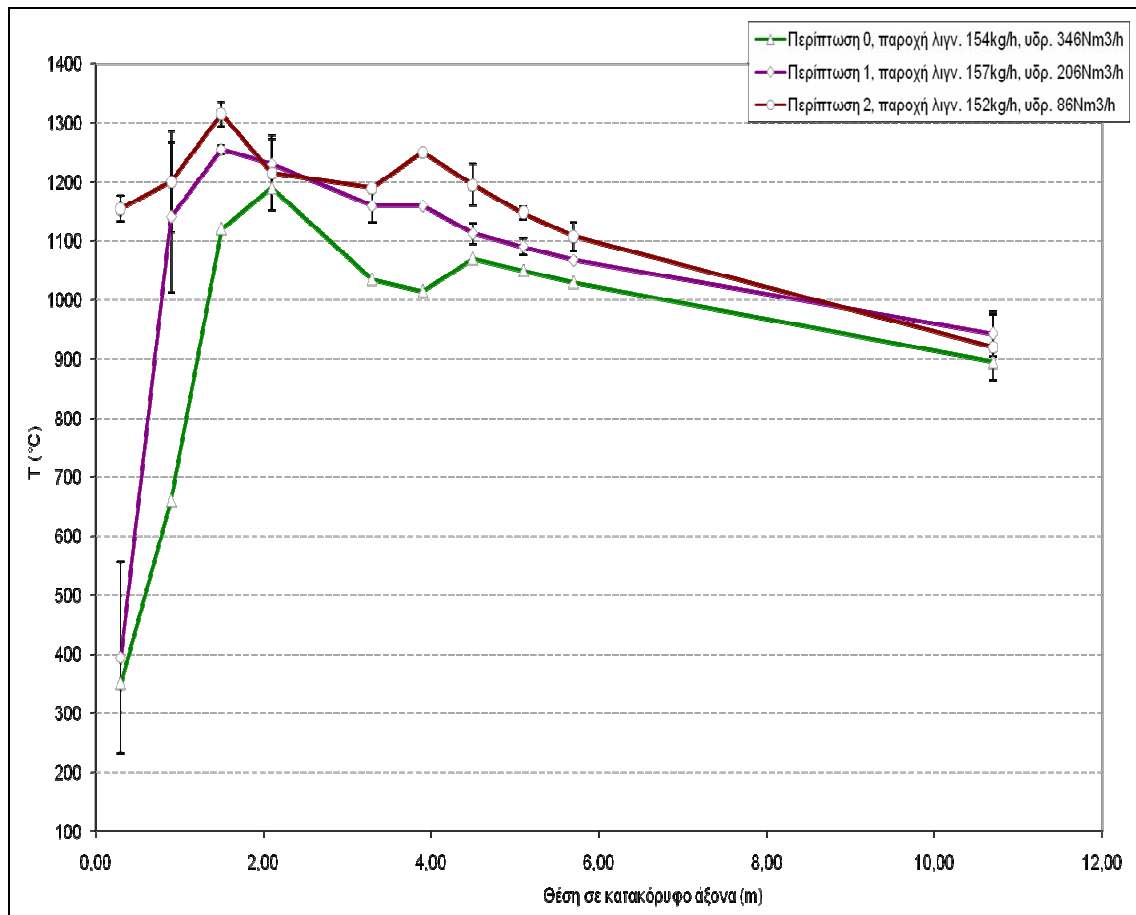
Ωστόσο πρέπει να διερευνηθεί και η εξέλιξη των μεταβολών της θερμοκρασίας με τη μείωση του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών. Στη σειρά πειραμάτων Α, όπου γίνεται προσομοίωση των συνθηκών μικτής καύσης του ξηρού λιγνίτη, η θερμοκρασία στην έξοδο της εστίας παρέμεινε σταθερή, αφού είχε ήδη προεπιλεγεί το εύρος θερμοκρασιών των υπερθερμαντών. Ανάμεσα στις περιπτώσεις “0” και “2” μετρήθηκε θερμοκρασιακή διαφορά 200K στην περιοχή κοντά στους καυστήρες.

Επίσης η παροχή του ξηρού λιγνίτη μειώθηκε στην περίπτωση “2” κατά 10%, γεγονός το οποίο σημαίνει κέρδος σε εισερχόμενο καύσιμο για την ίδια τελική θερμοκρασία εξόδου της εστίας. Οι αντίστοιχες θερμοκρασιακές μεταβολές παρατίθενται στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 3.6).



(Σχήμα 3.6) : Θερμοκρασιακά προφίλ κατά τη μείωση του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών (Σειρά πειραμάτων A)

Στη σειρά πειραμάτων B παρατηρήθηκε ότι στην περιοχή των καυστήρων η θερμοκρασία αυξάνεται σημαντικά, έως και 100K, γεγονός το οποίο προέκυψε και στη σειρά πειραμάτων A. Στην έξοδο της εστίας μετρήθηκε μικρή αύξηση της θερμοκρασίας, περίπου 40K για κάθε μια από τις περιπτώσεις “1” και “2”. Οι θερμοκρασιακές αυτές μεταβολές παρατίθενται στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 3.7).



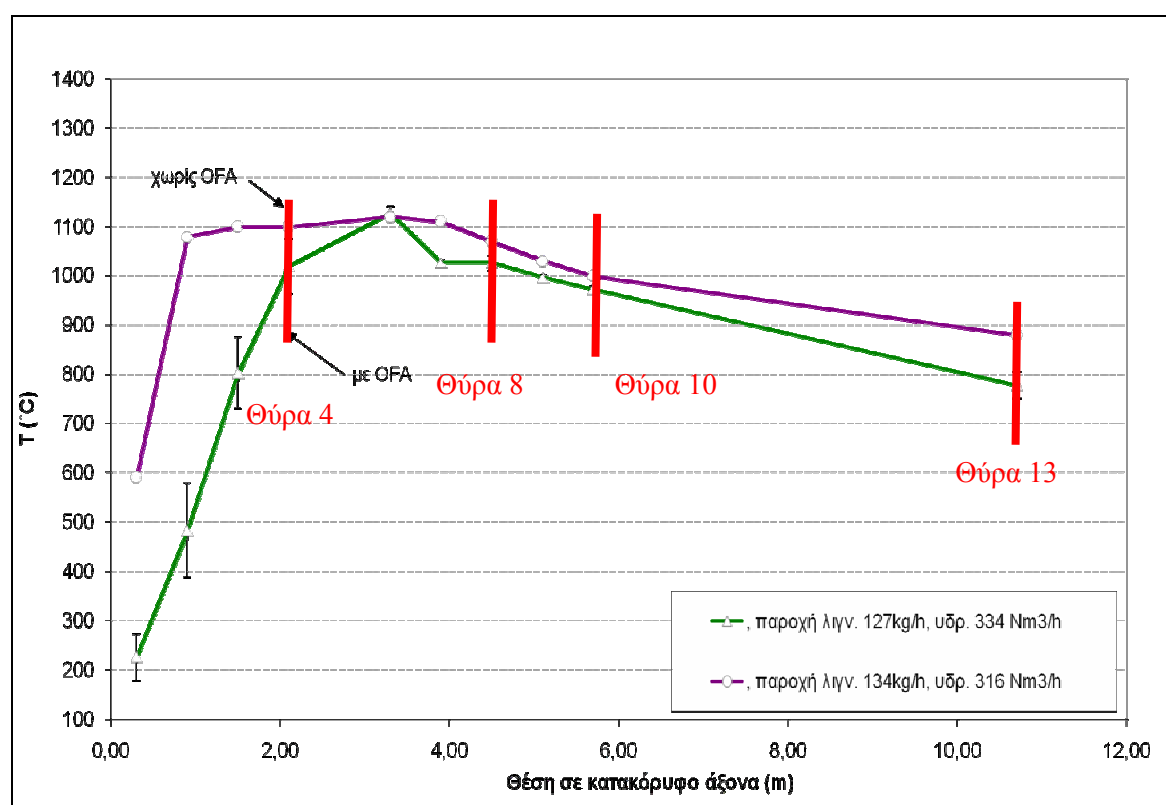
(Σχήμα 3.7) : Θερμοκρασιακά προφίλ κατά τη μείωση του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών (Σειρά πειραμάτων Β)

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η διερεύνηση της μεταβολής των εκπομπών των  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  και  $\text{CO}_2$ . Με μετρήσεις που έγιναν στην έξοδο των θερμών καυσαερίων παρατηρήθηκε ότι οι εκπομπές των  $\text{NO}_x$  μειώθηκαν σημαντικά στην περίπτωση “1” και στις δύο σειρές πειραμάτων, ενώ στις περιπτώσεις “0” και “2” ήταν αυξημένες. Επιπλέον για τιμές του λόγου αέρα καύσης  $\lambda > 1$ , κυρίως στην αναγωγική ζώνη καύσης, υπήρχαν υψηλές τιμές εκπομπών  $\text{NO}_x$  με τη μείωση του μείγματος υδρατμών-καυσαερίων. Το συμπέρασμα αυτό επαληθεύεται και από προηγούμενες έρευνες [11,19]. Σχετικά με τις εκπομπές των  $\text{CO}$  και  $\text{CO}_2$  παρατηρήθηκε μια μικρή μείωση στις περιπτώσεις “1” και “2”, ωστόσο δεν μπορούμε να πούμε ότι υπήρχε μια σαφής τάση.

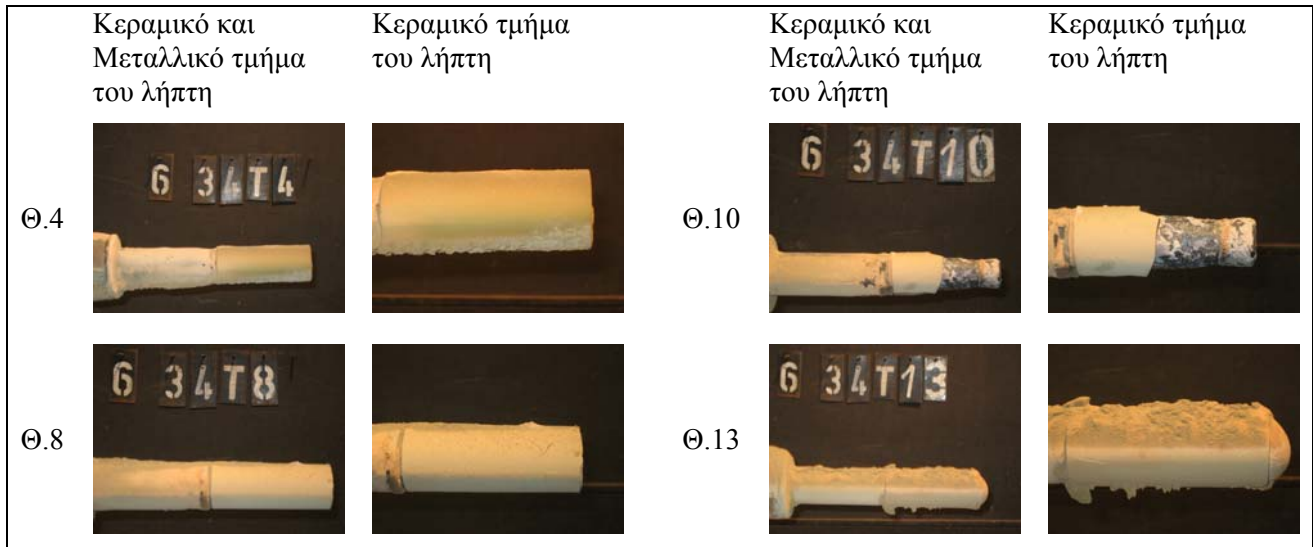
### 3.2.2.2 Διερεύνηση συμπεριφοράς της τέφρας – Τάση για επικαθίσεις

Η επίδραση του φαινομένου των επικαθίσεων αποτελεί, εκτός των άλλων σημαντικό παράγοντα για την αποδοτική καύση στο εσωτερικό της εστίας, αφού μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία περιοχών με τοπικά υψηλή θερμοκρασία και επομένως να έχουμε ανομοιομορφες συνθήκες, γεγονός ιδιαίτερα ανεπιθύμητο.

Στα αρχικά πειράματα για τον έλεγχο των επικαθίσεων η θερμοκρασία στην έξοδο της εστίας ήταν 950-980<sup>0</sup>C ενώ ο συνολικός χρόνος έκθεσης ήταν 36 ώρες. Τα επίπεδα θερμοκρασιών στις διαφορετικές θέσεις των ληπτών επικαθίσεων δίνονται στο Σχήμα 3.8. Σύμφωνα και με τις φωτογραφίες των αντίστοιχων ληπτών (Σχήμα 3.9), δεν βρέθηκαν επικαθίσεις, γεγονός το οποίο δείχνει ότι υπάρχει πολύ μικρή τάση επικαθίσεων των δειγμάτων του ελληνικού λιγνίτη για την περίπτωση θερμοκρασίας εξόδου της εστίας της τάξης των 950-1100<sup>0</sup>C.



(Σχήμα 3.8) : Μεταβολή της θερμοκρασίας στις διαφορετικές θέσεις των ληπτών επικαθίσεων

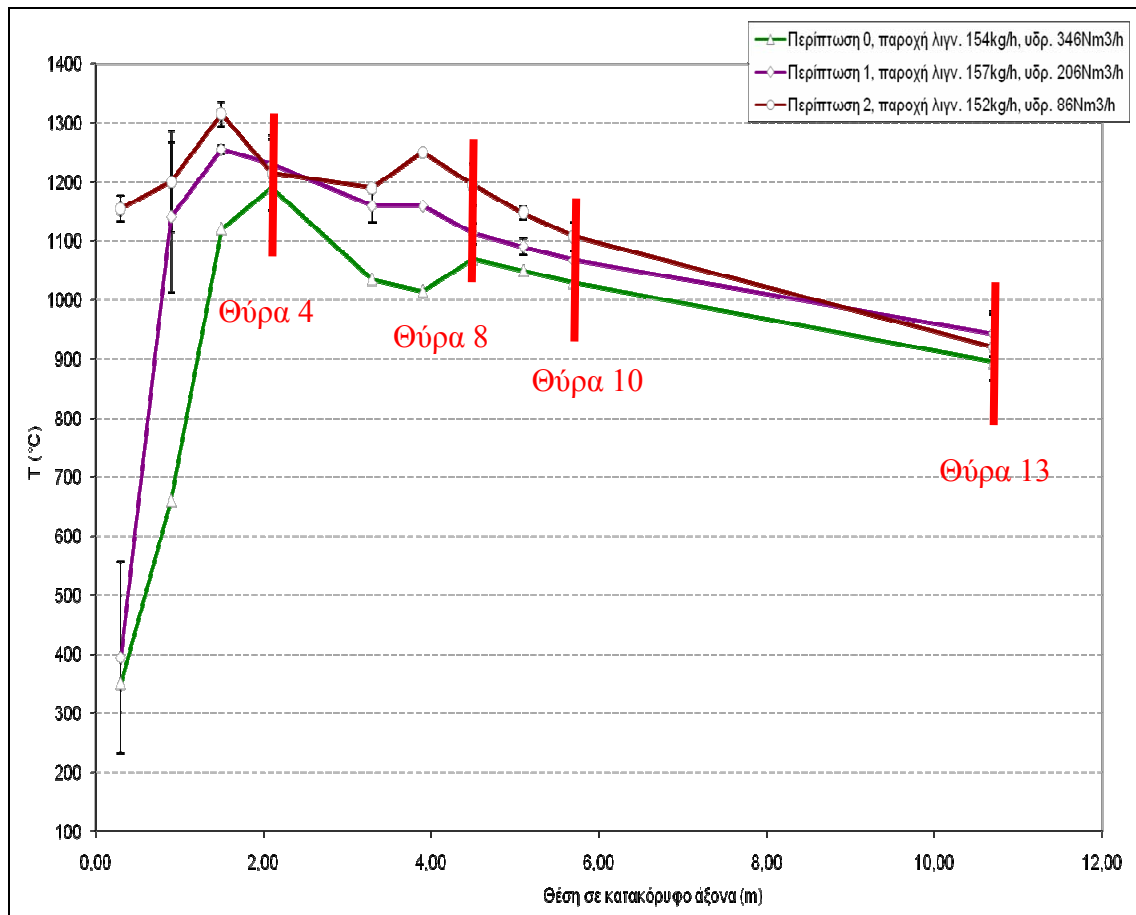


(Σχήμα 3.9) : Φωτογραφίες ληπτών επικαθίσεων

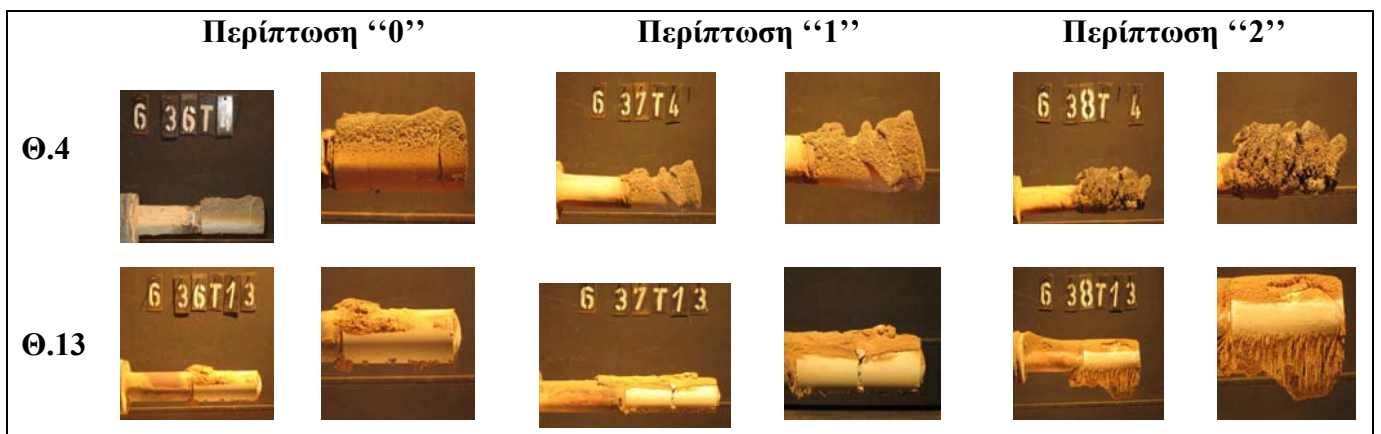
Ωστόσο για να είναι εφικτή η διερεύνηση του φαινομένου των επικαθίσεων έγινε αύξηση των θερμοκρασιών έκθεσης των ληπτών στους  $1250^{\circ}\text{C}$ . Οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν στις διάφορες θέσεις των ληπτών επικαθίσεων παρατίθενται στο Σχήμα 3.10. Λαμβάνοντας υπ' όψιν και τις οπτικές παρατηρήσεις των ληπτών (Σχήμα 3.11) συμπεραίνουμε ότι δεν βρέθηκαν επικαθίσεις στις Θύρες 8 και 10, ενώ έντονη ήταν η τάση αυτών στις Θύρες 4 και 13.

Το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκαν επικαθίσεις στις Θύρες 8 και 10, ακόμα και όταν μειώθηκε η ποσότητα του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών (περιπτώσεις “1” και “2”) αποτελεί μια θετική επίδραση της καύσης ξηρού λιγνίτη σε συνδυασμό με φυσικό για τις περιοχές της εξόδου της εστίας, καθώς και για τις επιφάνειες των υπερθερμαντών.

Όσον αφορά την τάση για επικαθίσεις κοντά στην περιοχή των καυστήρων, ήταν ιδιαίτερα αυξημένη, κυρίως κατά την περίπτωση “2”, όπου είχε μειωθεί το μείγμα καυσαερίων-υδρατμών στο 0%. Ωστόσο η έντονη αυτή τάση για επικαθίσεις παρατηρήθηκε σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των  $1150^{\circ}\text{C}$ .



(Σχήμα 3.10) : Μεταβολή της θερμοκρασίας στις διαφορετικές θέσεις των ληπτών επικαθίσεων



(Σχήμα 3.11) : Φωτογραφίες ληπτών επικαθίσεων



Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις της περιεκτικότητας διαφόρων οξειδίων. Όπως έχει προαναφερθεί οι χημικές ενώσεις του  $Al_2O_3$ , του  $SiO_2$ , του  $CaO$ , καθώς και του  $Fe_2O_3$  αποτελούν τα κυριότερα συστατικά της τέφρας [20]. Επιπλέον τα περιεχόμενα στην τέφρα αλκάλια  $Na$ ,  $K$  ( $Na_2O$ ,  $K_2O$ ) εντείνουν την τάση για επικαθίσεις, αφού μετά την ατμοποίησή τους, συμπυκνώνονται σε περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας, δημιουργώντας επιφανειακά στρώματα που αυξάνουν την αντίσταση στη ροή θερμότητας.

Τρεις είναι οι βασικότερες παράμετροι που δείχνουν τη συμπεριφορά της τέφρας και της καύσης :

- i. Η περιεκτικότητά της σε  $Na_2O$ .
- ii. Ο χαρακτηριστικός αριθμός αλκαλίων  $A$ ,
- iii. Ο παράγοντας των βασικών/ όξινα συστατικά της τέφρας  $RF$ .

Ο χαρακτηριστικός αριθμός αλκαλίων δίνεται από την σχέση :

$$A = Na_2O + 0.659 * K_2O ,$$

ενώ για τον παράγοντα  $RF$  ισχύει :

$$RF = \left( \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{Si_2O + Al_2O_3 + TiO_2} \right) * Na_2O$$

Ανάλογα με τις τιμές των τριών παραπάνω παραμέτρων καθορίζεται η τάση για ρύπανση της τέφρας, όπως φαίνεται στη συνέχεια (Πίνακας 3.2).

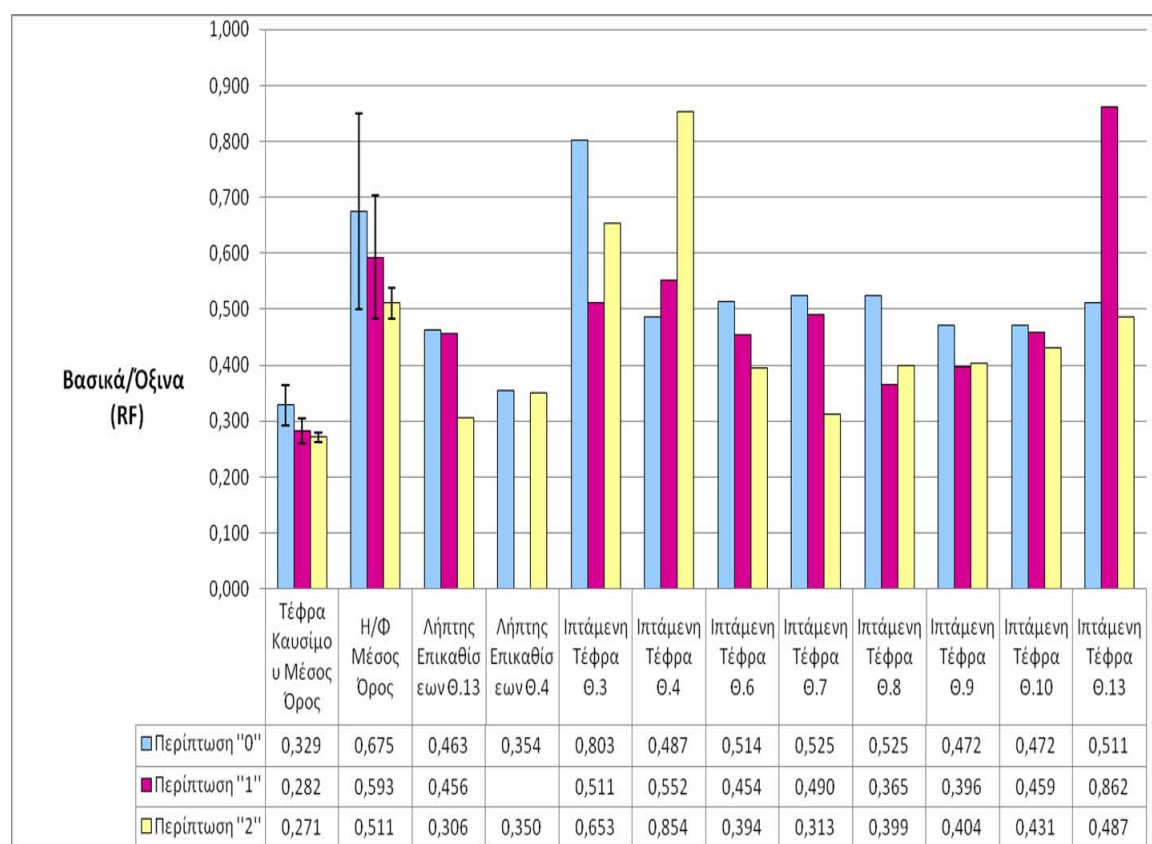
<b>Τάσεις για ρύπανση</b>	<b>RF</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>A</b>
Μικρή	< 0.2	< 0.5	< 0.3
Μέση	0.2 ÷ 0,5	0.5 ÷ 1	0.3 ÷ 0.45
Υψηλή	0.5 ÷ 1	1 ÷ 2.5	0.45 ÷ 0.6
Πολύ υψηλή	> 1	> 2.5	> 0.6

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, κατά τη διάρκεια των τριών περιπτώσεων πειραμάτων έγιναν μετρήσεις των διαφόρων αλκαλίων και οξειδίων. Πραγματοποιήθηκαν λήψεις δειγμάτων ιπτάμενης τέφρας σε διαφορετικά επίπεδα στο εσωτερικό του λέβητα, καθώς και επικαθίσεων χρησιμοποιώντας κατάλληλους λήπτες επικαθίσεων. Στη συνέχεια έγινε υπολογισμός των παραπάνω παραμέτρων προκειμένου να διαπιστωθεί η συμπεριφορά της τέφρας.

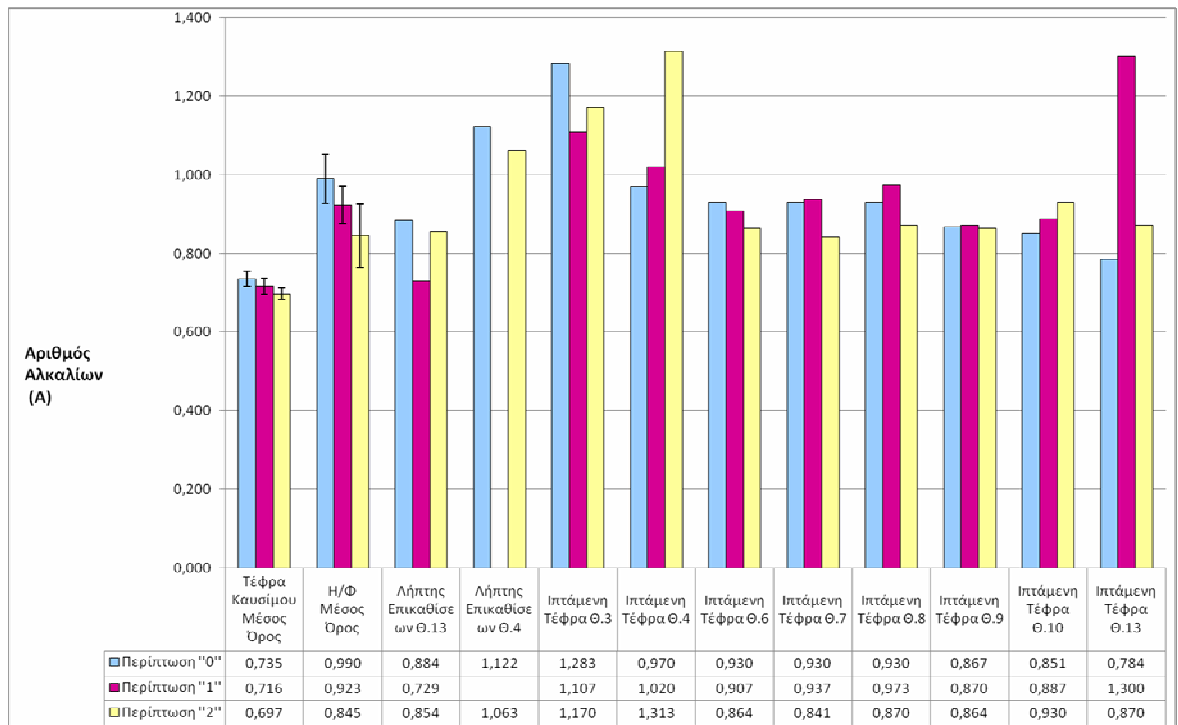
Οι μεταβολές του παράγοντα βασικών προς όξινων συστατικών  $RF$  δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3.12). Παρατηρήθηκε υψηλή τάση για ρύπανση, τόσο στην περιοχή των ηλεκτροστατικών φίλτρων, όσο και κοντά στους καυστήρες, αφού οι τιμές του είναι >0.6, με αποτέλεσμα να εντείνεται και η τάση για επικαθίσεις. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι για την περίπτωση “1”, όπου έχουμε μείωση της ποσότητας του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών στο 50%, δεν έχουμε τιμές του δείκτη  $RF$  μεγαλύτερες του 0.6 στις ίδιες περιοχές, γεγονός το οποίο δείχνει μικρότερη τάση για εμφάνιση επικαθίσεων.

Οι αντίστοιχες μεταβολές για τον χαρακτηριστικό αριθμό αλκαλίων A παρατίθενται στο (Σχήμα 3.13). Παρατηρείται σε γενικές γραμμές υψηλή τάση για ρύπανση, αφού οι τιμές στα περισσότερα δείγματα τέφρας είναι μεγαλύτερες του 0.8, ενώ στις περιοχές των ηλεκτροστατικών φίλτρων και κοντά στον καυστήρα, έχουμε ακόμα μεγαλύτερη ρύπανση ( $A > 1$ ), όπως και προηγουμένως. Ομοίως για τις ίδιες θέσεις εμφανίζεται λιγότερη τάση για επικαθίσεις κατά την περίπτωση “1”.

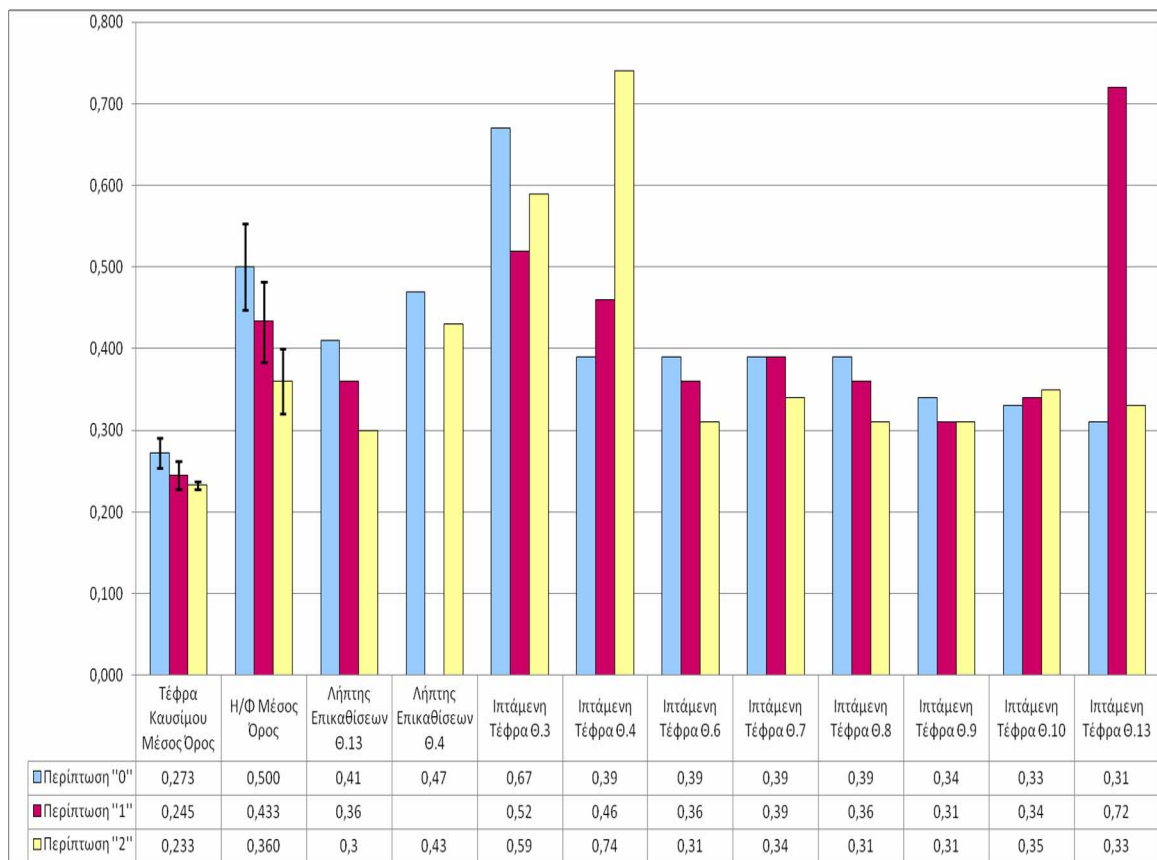
Ένα επιπλέον στοιχείο ενδεικτικό για τη συμπεριφορά της τέφρας είναι και η περιεκτικότητα αυτής σε  $\text{Na}_2\text{O}$ . Το Σχήμα 3.14 δείχνει τις τιμές που προκύπτουν για τα διαφορετικά επίπεδα δειγματοληψίας στο εσωτερικό του λέβητα. Επικρατεί μια μέση τάση για ρύπανση, με εξαίρεση τις περιοχές κοντά στον καυστήρα καθώς και στα ηλεκτροστατικά φίλτρα, με τιμές  $> 0.5$ .



(Σχήμα 3.12) : Λόγος βασικών/όξινων συστατικών τέφρας (RF)



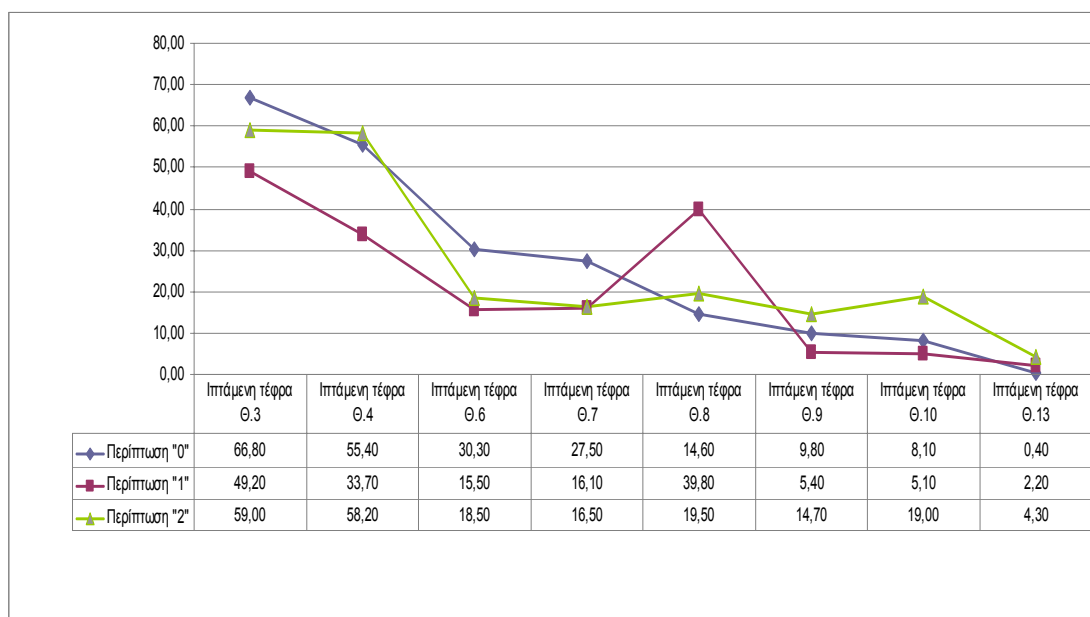
(Σχήμα 3.13) : Αριθμός Αλκαλίων διαφόρων δειγμάτων τέφρας



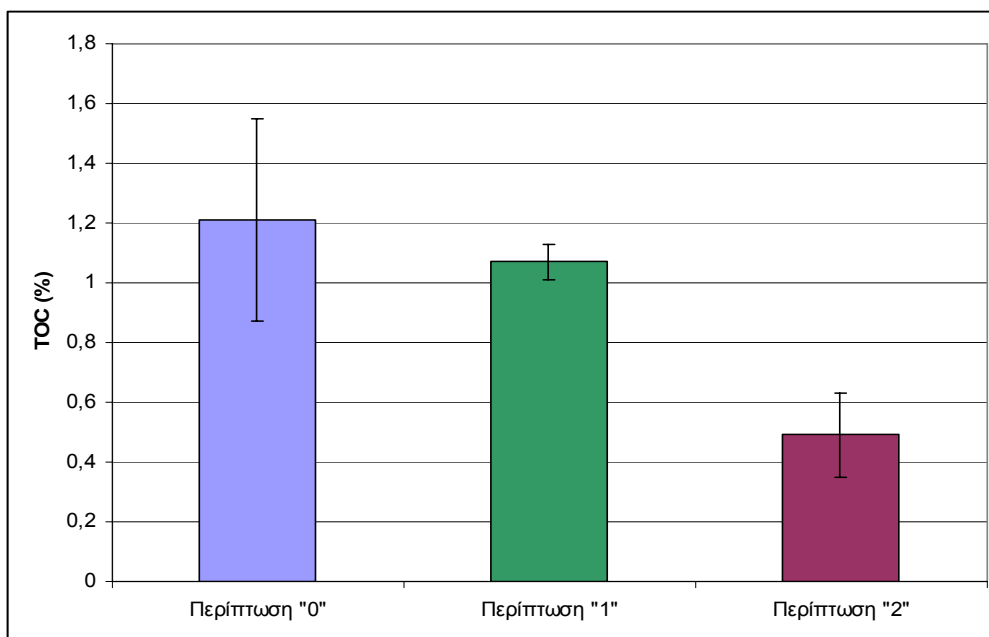
(Σχήμα 3.14) : Περιεκτικότητα τέφρας σε  $Na_2O$

### 3.2.2.3 Μεταβολή συγκέντρωσης ακαύστων σωματιδίων κατά την καύση

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η διερεύνηση της μεταβολής της συγκέντρωσης των ακαύστων (TOC) στα διάφορα επίπεδα στο εσωτερικό της εστίας. Αναφέρουμε ότι έγιναν αναλύσεις σε δείγματα ιπτάμενης τέφρας σε διαφορετικά επίπεδα κατά μήκος της εστίας, στο εσωτερικό των ηλεκτροστατικών φίλτρων, καθώς και στο λήπτη επικαθίσεων στη Θύρα 13, λίγο πριν την έξοδο του Λέβητα. Όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήματα 3.15-16), η συγκέντρωση των ακαύστων σωματιδίων μειώνεται, με την ελάττωση της ποσότητας του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών. Ωστόσο τα αποτελέσματα είναι καλύτερα κατά την περίπτωση "2" των πειραμάτων, δηλαδή όταν έχουμε μείωση στο 50% του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών. Επίσης η συγκέντρωση ακαύστων είναι υψηλότερη κοντά στους καυστήρες, όπως αναμενόταν, ενώ μειώνεται προς την έξοδο της εστίας. Στα ηλεκτροστατικά φίλτρα τα ποσοστά των ακαύστων είναι πολύ χαμηλά (< 1.5%) και μειώνονται ακόμα περισσότερο με την μείωση του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών.



(Σχήμα 3.15) : Μεταβολή συγκέντρωσης ακαύστων σωματιδίων σε δείγματα ιπτάμενης τέφρας κατά μήκος της εστίας (TOC)



(Σχήμα 3.16) : Μεταβολή συγκέντρωσης ακάστων σωματιδίων στα ηλεκτροστατικά φίλτρα (TOC)

### 3.3 Συμπεράσματα

#### Προσομοίωση μικτής καύσης ξηρού λιγνίτη:

- Αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή κοντά στους καυστήρες μέχρι και 200K για την περίπτωση της μείωσης της ποσότητας καυσαερίων-υδρατμών στην ελάχιστη τιμή.
- Σταθερή τιμή της θερμοκρασίας στην έξοδο της εστίας, με τη μείωση του φορτίου κατά 10%.
- Κέρδος σε παροχή καυσίμου κατά 10% με τη μείωση της ποσότητας του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών.
- Όχι συγκεκριμένη τάση για τις εκπομπές NO<sub>x</sub> και CO, αν και μειωμένες εκπομπές NO<sub>x</sub> στην περίπτωση "1".

#### Προσομοίωση καύσης ξηρού λιγνίτη:

- Αύξηση της θερμοκρασίας στην έξοδο της εστίας κατά 40K για κάθε μια από τις περιπτώσεις μείωσης της ποσότητας του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών.
- Αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή των καυστήρων κατά 100K, όπως προέκυψε και για τη σειρά πειραμάτων Α.
- Για λόγους αέρα καύσης  $\lambda > 1$  και μειώνοντας την ποσότητα του ανακυκλοφορούμενου μείγματος καυσαερίων-υδρατμών παρατηρήθηκε αύξηση των εκπομπών  $\text{NO}_x$ .
- Για λόγους αέρα καύσης  $\lambda < 1$  και μειώνοντας την ποσότητα του ανακυκλοφορούμενου μείγματος καυσαερίων-υδρατμών παρατηρήθηκε μείωση των εκπομπών  $\text{NO}_x$ .

Οι παρατηρήσεις αυτές για τις εκπομπές  $\text{NO}_x$  κατά την καύση ξηρού λιγνίτη επιβεβαιώνονται και από παλαιότερες έρευνες [13-15].

#### Επικαθήσεις:

- Χαμηλή τάση για επικαθήσεις στην έξοδο της εστίας για θερμοκρασίες της τάξης των 950-1150 °C.
- Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1150°C έντονη τάση για επικαθήσεις στην περιοχή κοντά στους καυστήρες.
- Σε κάθε περίπτωση στις θύρες 8 και 10 δεν παρατηρήθηκαν επικαθήσεις, γεγονός το οποίο δείχνει ότι η καύση ξηρού λιγνίτη δεν επιφέρει προβλήματα στην περιοχές στην έξοδο της εστίας καθώς και στους υπερθερμαντές.
- Στην περίπτωση “2” και για θερμοκρασίες μεγαλύτερες 1150°C παρατηρήθηκαν ακόμα και συσσωματώματα επικαθήσεων, φαινόμενο το οποίο πρέπει να διερευνηθεί προσεκτικά για την αποφυγή προβλημάτων.
- Η έντονη τάση για επικαθήσεις στην περιοχή κοντά στους καυστήρες επιβεβαιώνεται και από τους αντίστοιχους δείκτες για την συμπεριφορά της τέφρας, δηλαδή την περιεκτικότητά της σε  $\text{Na}_2\text{O}$ , τον χαρακτηριστικό αριθμός αλκαλίων A και τον παράγοντα των βασικών/ όξινα συστατικά της τέφρας RF, όπως έχει προαναφερθεί.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>**

### **ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΤΟ ΛΕΒΗΤΑ ΤΟΥ «ΑΗΣ ΛΙΠΤΟΛ»**

#### **4.1 Εισαγωγή - Σκοπός ερευνητικών δραστηριοτήτων**

Ο «ΑΗΣ Λιπτόλ» είναι μια από τις πρώτες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ευρύτερη περιοχή της Πτολεμαΐδας. Περιλαμβάνει 2 μονάδες παραγωγής, συνολικής ισχύος 43 MW, ενώ λειτουργεί από το 1959. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται τώρα για την τηλεθέρμανση της πόλης της Κοζάνης, παράλληλα με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Λόγω της παρουσίας εργοστασίου παραγωγής λιγνιτοπλίνθων (μπρικέτες) πολύ κοντά στον ΑΗΣ Λιπτόλ, υπήρχε από τα πρώτα χρόνια λειτουργίας δυνατότητα καύσης σκόνης ξηρού λιγνίτη. Προς αυτή την κατεύθυνση επιζητείται η διερεύνηση της δυνατότητας καύσης ξηρού λιγνίτη σε συνδυασμό με το μείγμα καυσαερίων-κονιοποιημένου λιγνίτη που προέρχεται από τους μύλους, ώστε να ελεγχθεί κατά πόσο υπάρχει βελτίωση του βαθμού απόδοσης και αν επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών του συγκεκριμένου σταθμού, με δεδομένη την παλαιότητα των εγκαταστάσεων.

Προκειμένου να εξεταστεί η αποδοτικότητα δειγμάτων ελληνικού λιγνίτη κατά τη συνδυασμένη καύση φυσικού και ξηρού λιγνίτη έγιναν πειράματα στην πειραματική εγκατάσταση κονιοποιημένου καυσίμου VVA, τα αποτελέσματα των οποίων ήταν θετικά τόσο για τις εκπομπές όσο και την τάση για επικαθήσεις.

Ωστόσο ο σχεδιασμός και η πραγματοποίηση πειραμάτων σε βιομηχανική κλίμακα μπορούν να δώσουν συμπεράσματα για τη δυνατότητα ευρείας εφαρμογής της μικτής καύσης ξηρού λιγνίτη. Ιδιαίτερα για χώρες οι οποίες βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην καύση λιγνίτη για ηλεκτροπαραγωγή, η αποδοτικότερη και με λιγότερες εκπομπές λειτουργία των θερμικών σταθμών κρίνεται απαραίτητη. Έτσι σχεδιάστηκαν πειράματα στο βιομηχανικό λέβητα του «ΑΗΣ Λιπτόλ» από το Εργαστήριο Ατμοπαραγωγών και Θερμικών Εγκαταστάσεων του ΕΜΠ με τη συνεργασία της ΔΕΗ και στο πλαίσιο της προετοιμασίας τους συμβάλλει και η παρούσα διπλωματική εργασία.

#### Σημεία προς διερεύνηση:

- i. Έλεγχος λειτουργικής συμπεριφοράς εγκατάστασης,
- ii. Δυνατότητα ορθής και ασφαλούς λειτουργίας με ξηρό λιγνίτη,
- iii. Θερμοκρασιακά προφίλ σε διαφορετικά επίπεδα του λέβητα,
- iv. Συγκεντρώσεις καυσαερίων στην έξοδο της εστίας,
- v. Ποιότητα τέφρας,
- vi. Εκπομπές (κυρίως NO<sub>x</sub>, CO και CO<sub>2</sub>),
- vii. Τάση για επικαθήσεις,
- viii. Χημική ανάλυση τέφρας και επικαθήσεων.

## 4.2 Περιγραφή Βιομηχανικής Εγκατάστασης

Όπως ήδη έχει αναφερθεί ο λέβητας του «ΑΗΣ Λιπτόλ» έχει τη δυνατότητα καύσης σκόνης ξηρού λιγνίτη από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα του εργοστασίου παραγωγής λιγνιτοπλίνθων, γεγονός το οποίο επιδρά και θετικά στον βαθμό απόδοσης του Ατμοπαραγωγού.

Οι λέβητες είναι έτσι κατασκευασμένοι ώστε εκτός από τους δύο καυστήρες καύσης του λιγνίτη που προέρχεται από το μύλο κονιοποίησης, να διαθέτουν και καυστήρες αιωρούμενης σκόνης ξηρού λιγνίτη. Η αιωρούμενη αυτή σκόνη προέρχεται από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα του παρακείμενου εργοστασίου παραγωγής λιγνιτοπλίνθων και τροφοδοτείται με κατάλληλο σύστημα αγωγών. Η ξήρανση του φυσικού λιγνίτη γίνεται με ατμό υψηλής θερμοκρασίας από τον ΑΗΣ Λιπτόλ.

Το σύστημα καύσεως του λιγνίτη του συγκεκριμένου ΑΗΣ αποτελείται από:

- Αγωγό αναρρόφησης καυσαερίων,
- Διακλάδωση του παραπάνω αγωγού σε δύο για τροφοδοσία των μύλων με θερμά καυσαέρια,
- Αγωγούς προσαγωγής του λιγνίτη στους μύλους,
- Δύο μύλους κονιοποίησης του λιγνίτη,
- Κατάλληλα φίλτρα στους μύλους,
- Δύο καυστήρες μετά από κάθε μύλο διατεταγμένοι μετωπικά στο μπροστά τοίχωμα της εστίας.

Ορισμένα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 4.1.

Ατμοπαραγωγή μεγίστου βαθμού απόδοσης και μέγιστη αντίστοιχα	64tn/h , 80tn/h αντίστοιχα
Αναρρόφηση καυσαερίων σε κάθε μύλο	8.25 m <sup>3</sup> /h
Θερμοκρασία αναρρόφησης καυσαερίων	880 °C
Θερμοκρασία θερμού αέρα	300 °C
Εισερχόμενη ποσότητα θερμού αέρα σε κάθε μύλο	2.96 m <sup>3</sup> /h
Θερμοκρασία εισόδου τροφοδοτικού νερού	150 °C
Συνολικός θερμικός βαθμός απόδοσης λέβητα για 64tn/h και 80tn/h ατμοπαραγωγή	82.5% και 82%
Απαιτούμενη ποσότητα λιγνίτη για 64tn/h και 80tn/h ατμοπαραγωγή αντίστοιχα	38.300 kgr/h και 48.000 kgr/h



Χαρακτηριστικά φυσικού λιγνίτη	Περιεκτικότητα σε υγρασία : 60% Περιεκτικότητα σε τέφρα : 11% Πτητικά : 15-30% Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα : 5655 KJ/kg
Χαρακτηριστικά σκόνης ξηρού λιγνίτη ηλεκτροφίλτρων	Περιεκτικότητα σε τέφρα επί ξηρού : 22% Περιεκτικότητα σε υγρασία : 11-12% Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα : 13830-1500 KJ/kg Ανώτερη θερμογόνος ικανότητα : έως 17600 KJ/kg

(Πίνακας 4.1) : Τεχνικά στοιχεία εγκατάστασης «ΑΗΣ Λιπτόλ»

### **Προετοιμασία για τη μοντελοποίηση της εγκατάστασης**

Προκειμένου να γίνει η διερεύνηση της μικτής καύσης ξηρού λιγνίτη στη συγκεκριμένη εγκατάσταση είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση της εστίας καθώς και των υπερθερμαντών και οικονομητήρων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο λέβητας του «ΑΗΣ Λιπτόλ» περιλαμβάνει 4 καυστήρες φυσικού λιγνίτη μόνο από τη μπροστά πλευρά (front side), οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι 2 σε κάθε μύλο, ο ένας κάτω από τον άλλο. Θερμός αέρας καύσης, δηλαδή αέρας που έχει θερμανθεί στον προθερμηντήρα αέρα-καυσαερίου (LUVO), τροφοδοτείται σε διαφορετικά επίπεδα ανάμεσα στους καυστήρες, όχι μόνο από την μπροστά πλευρά του λέβητα, όσο και από τις υπόλοιπες τρεις πλευρές αυτού (back, right, left). Οι καυστήρες του ξηρού λιγνίτη (καυστήρες κόνεως ηλεκτροφίλτρων) βρίσκονται μόνο στο δεξιά και αριστερά τοίχωμα, τοποθετημένοι στο επίπεδο πριν και ανάμεσα των καυστήρων, καθώς και σε ένα υψηλότερο επίπεδο από την εστία και τους αγωγούς τροφοδοσίας του θερμού αέρα. Μετά το λέβητα η διαδρομή των καυσαερίων συναντά 2 υπερθερμαντές και στη συνέχεια μια συστοιχία από 4 οικονομητήρες. Αναφέρουμε επίσης όταν η συγκεκριμένη εγκατάσταση δεν διαθέτει αναθερμαντήρα.

Ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά το σχεδιασμό του μοντέλου του λέβητα είναι η έντονη παρουσία παρασιτικού αέρα με δεδομένο και την παλαιότητα της όλης εγκατάστασης του «ΑΗΣ Λιπτόλ». Έτσι τοποθετήθηκαν επιπλέον εισοδοί αέρα σε καθένα από τα τοιχώματα της εστίας, κατά όσο το δυνατόν ομοιόμορφο τρόπο, ώστε να προσεγγιστούν καλύτερα οι πραγματικές συνθήκες καύσης.

Η κατασκευή του μοντέλου του λέβητα έγινε με το λογισμικό σχεδίασης υπολογιστικών πλεγμάτων Gambit, το οποίο συνεργάζεται με τον εμπορικό κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής Fluent, που θα χρησιμοποιηθεί αργότερα για την υπολογιστική προσομοίωση και επίλυση του προβλήματος της μικτής καύσης ξηρού λιγνίτη.

Στην εικόνα που ακολουθεί (Σχήμα 4.1) φαίνεται το μπροστά τοίχωμα του λέβητα, όπου διακρίνονται τα εξής:

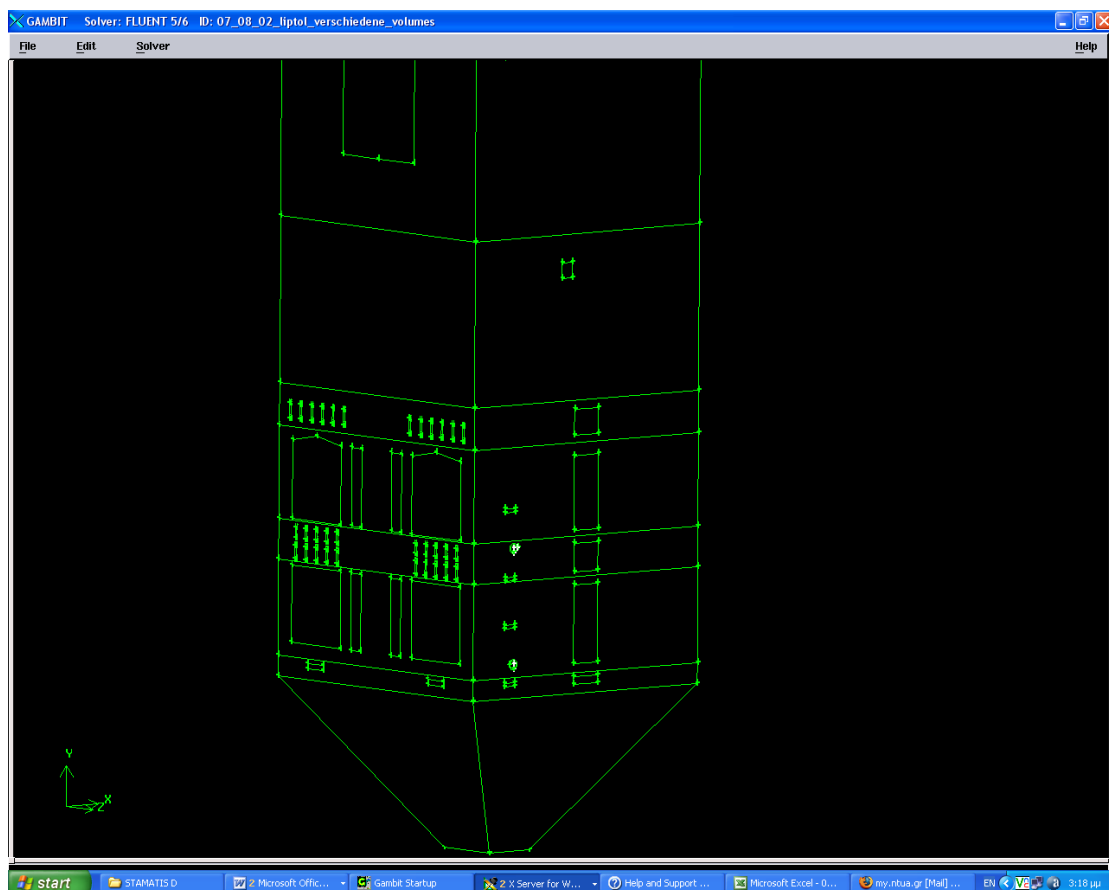
- Αγωγοί τροφοδοσίας θερμού αέρα κάτω από το επίπεδο των καυστήρων,
- Ακολουθεί η πρώτη σειρά καυστήρων φυσικού λιγνίτη,

- Αγωγοί τροφοδοσίας του κυρίου αέρα καύσης,
- Δεύτερη σειρά καυστήρων φυσικού λιγνίτη,
- Αγωγοί τροφοδοσίας θερμού αέρα πάνω από το επίπεδο των καυστήρων,
- Τροφοδοσία παρασιτικού αέρα (false air), δίπλα από τους καυστήρες.

Στο μπροστά τοίχωμα (front) βρίσκεται επίσης ο αγωγός αναρρόφησης καυσαερίων, σε επίπεδο υψηλότερο από την περιοχή της εστίας και πριν τους υπερθερμαντές.

Επίσης διακρίνεται και το δεξιά τοίχωμα (right side) το οποίο είναι συμμετρικό με το αριστερά (left side), όπου μπορούμε να διακρίνουμε τα εξής:

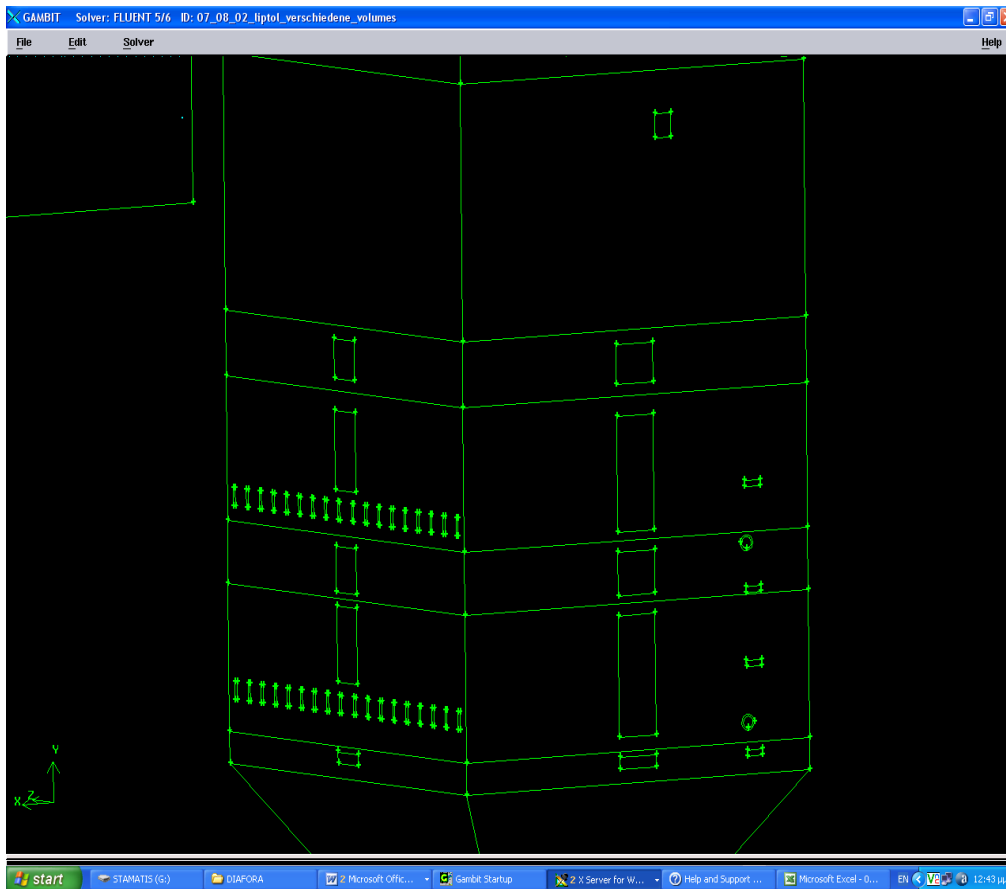
- Αγωγός τροφοδοσίας θερμού αέρα, πριν τον πρώτο καυστήρα,
- Δύο καυστήρες καύσης ξηρού λιγνίτη,
- Αγωγοί τροφοδοσίας θερμού αέρα καύσης ανάμεσα στους καυστήρες του ξηρού λιγνίτη,
- Καυστήρας καύσης ξηρού λιγνίτη υψηλότερα από το επίπεδο της εστίας,
- Τροφοδοσία παρασιτικού αέρα καύσης (false air), σε όλο το μήκος των τοιχωμάτων.



(Σχήμα 4.1) : Μπροστά και δεξιά τοίχωμα λέβητα στο επίπεδο της εστίας

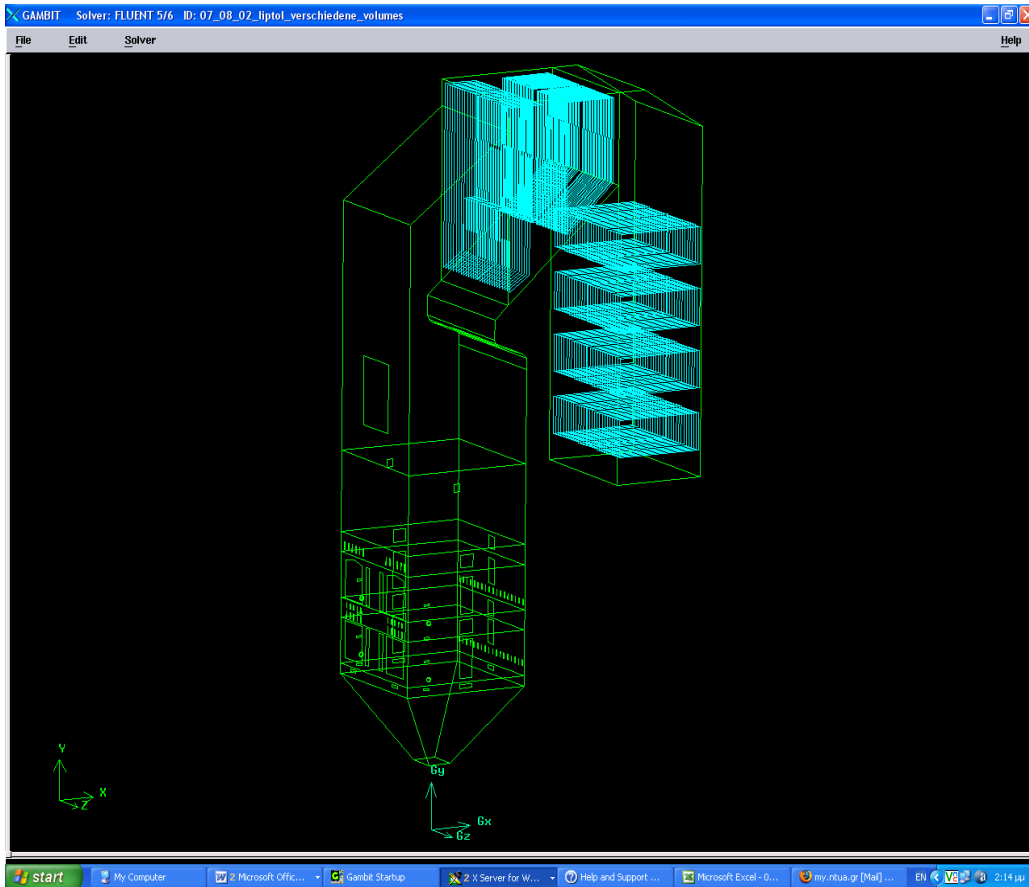
Όσον αφορά το πίσω τοίχωμα της εστίας (Σχήμα 4.2) περιλαμβάνει κυρίως δύο συστοιχίες αγωγών τροφοδοσίας θερμού αέρα καύσης, τοποθετημένους στο επίπεδο

των καυστήρων του φυσικού λιγνίτη. Επίσης προκειμένου να γίνει η προσομοίωση του παρασιτικού αέρα έχουν τοποθετηθεί αγωγοί κατά μήκος της επιφάνειας.

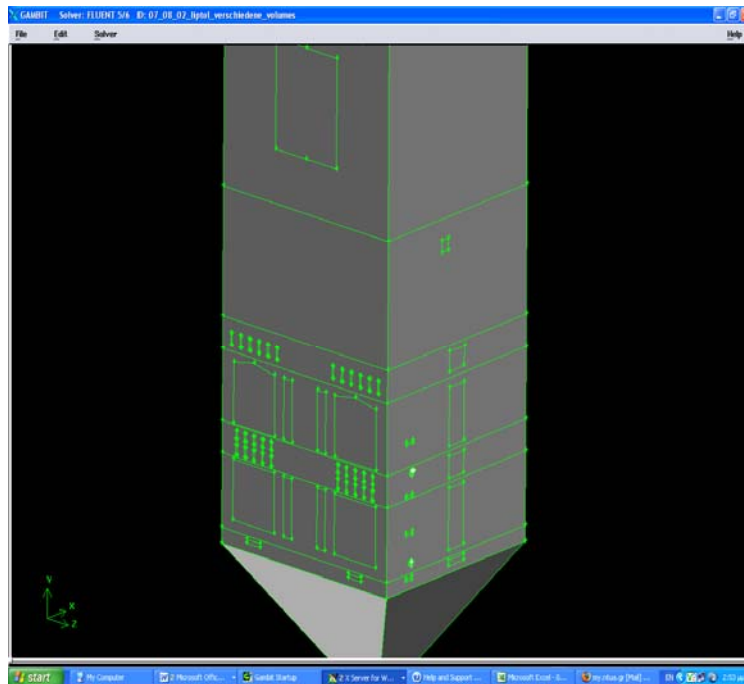


(Σχήμα 4.2) : Πίσω και αριστερά τοίχωμα λέβητα στο επίπεδο της εστίας

Όπως αναφέρθηκε ήδη μετά το λέβητα ακολουθούν οι υπερθερμαντήρες και στη συνέχεια οι οικονομητήρες. Κατά την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης του λέβητα θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν, καθώς ως επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας επηρεάζουν τις ιδιότητες των καυσαερίων μέχρι την έξοδό τους. Το τελικό μοντέλο μαζί με τους υπερθερμαντήρες και τους οικονομητήρες παρατίθενται στη συνέχεια (Σχήματα 4.3-4). Διακρίνονται τόσο οι υπερθερμαντές και οι οικονομητήρες, όσο και οι διαφορετικοί όγκοι στους οποίους έχει χωριστεί το κύριο σώμα του λέβητα προκειμένου να γίνει ορθότερα η αριθμητική επίλυση.

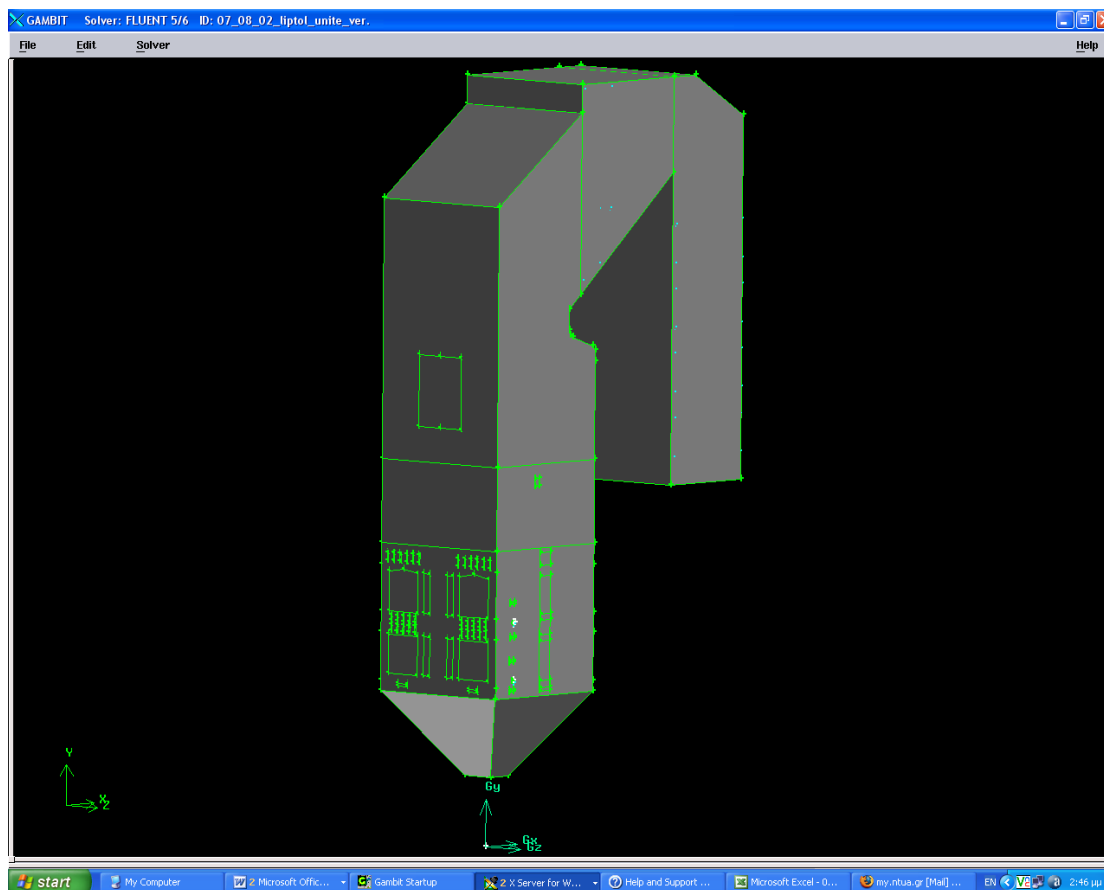


(Σχήμα 4.3) : Μοντέλο προσομοίωσης λέβητα «ΑΗΣ Λιπτόλ»



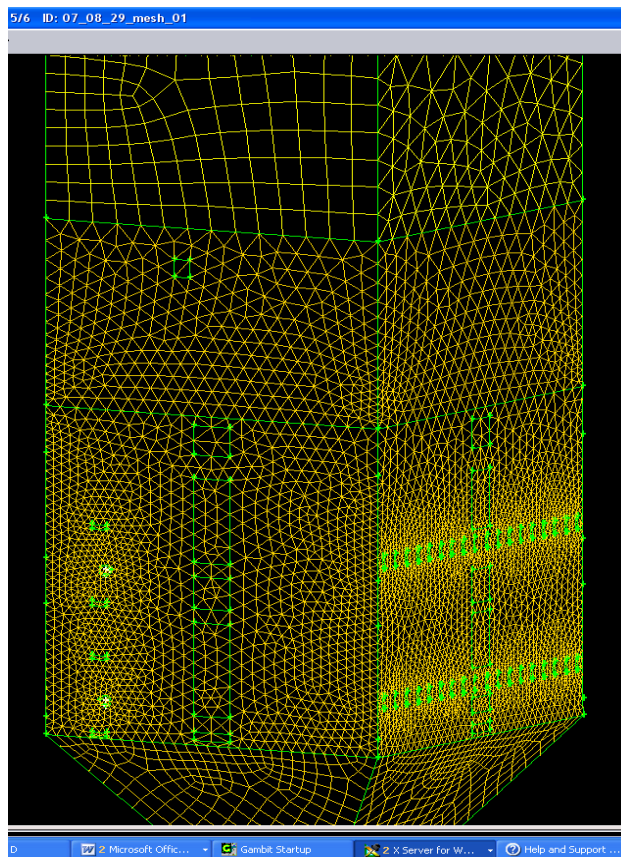
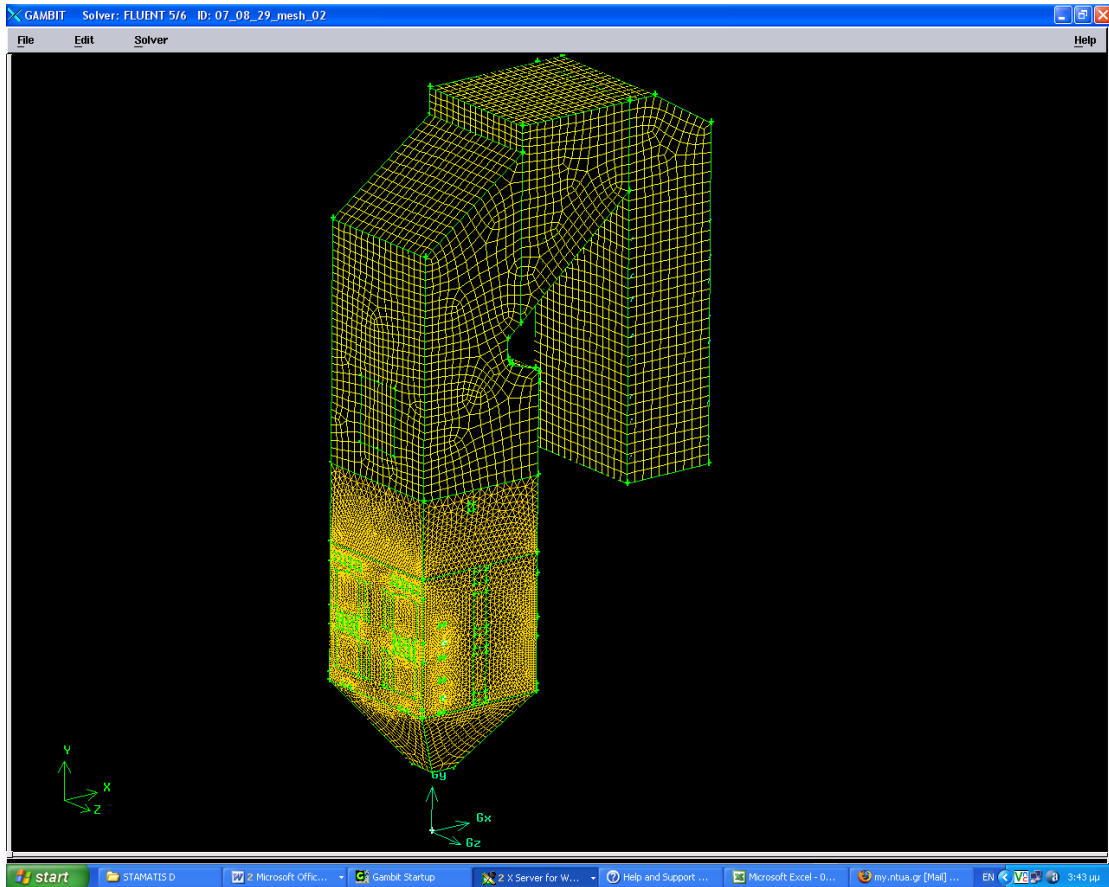
(Σχήμα 4.4) : Κύριο τμήμα λέβητα «ΑΗΣ Λιπτόλ»

Εκτός από το παραπάνω μοντέλο προσομοίωσης που περιλαμβάνει πολλούς διαφορετικούς όγκους όσον αφορά το κύριο σώμα του λέβητα, δημιουργήθηκε και μοντέλο όπου η περιοχή των καυστήρων μαζί με τον αέρα καύσης παρουσιάζεται σε ενιαίο όγκο (Σχήμα 4.5), για την περίπτωση επίλυσης με χρήση μη δομημένου πλέγματος, και ως μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος.



(Σχήμα 4.5) : Μοντέλο προσομοίωσης λέβητα «ΑΗΣ Λιπτόλ», ενιαίος όγκος για την περιοχή των καυστήρων

Ανάλογα με το πιο μοντέλο προσομοίωσης του λέβητα θα χρησιμοποιηθεί κατά την αριθμητική επίλυση του προβλήματος της μικτής καύσης, θα αποφασιστούν και τα αντίστοιχα πλέγματα που θα επιλεγούν για καθένα από τους διαφορετικούς όγκους. Λόγω της έλλειψης συμμετρίας του λέβητα και της ύπαρξης πολλών διαφορετικών γεωμετριών έντονο θα είναι το πρόβλημα της εμφάνισης στρεβλών επιφανειών και όγκων, κυρίως σε σημεία απότομων μεταβολών διατομής και σε περιοχές όπου αλλάζει η μορφή του πλέγματος επίλυσης. Κάποιες ενδεικτικές δομές πλεγμάτων δίνονται ακολούθως για την περίπτωση του μοντέλου προσομοίωσης με πολλούς διαφορετικούς όγκους (Σχήμα 4.6-7).



(Σχήμα 4.6-7) : Δομή πλέγματος επίλυσης μοντέλου προσομοίωσης

Για την αριθμητική επίλυση του μοντέλου προσομοίωσης του λέβητα είναι απαραίτητο να οριστεί η κάθε επιφάνεια καθώς και οι εισόδοι σε καθένα από τα τοιχώματα του λέβητα.

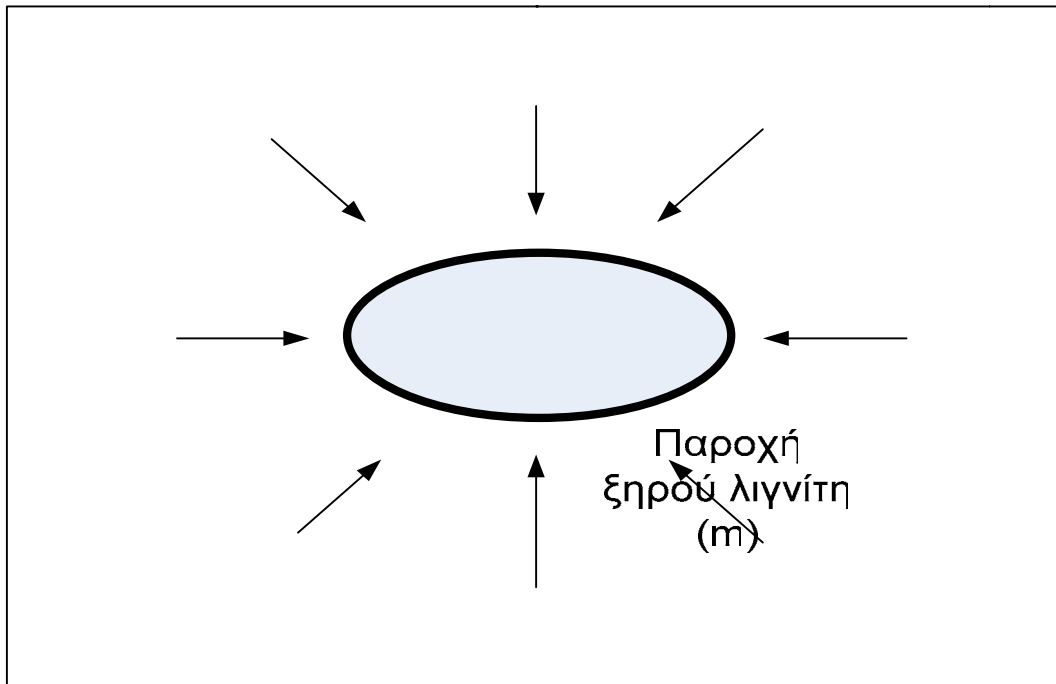
Όσον αφορά τις εισόδους χρειάζεται να δοθούν σε κάθε περίπτωση η θερμοκρασία του ρεύματος (αέρας ή καυσαέριο), το μέτρο και η κατεύθυνση της ταχύτητας και η σύσταση αυτού. Για τα τοιχώματα του λέβητα πρέπει να δοθεί ως αρχική συνθήκη η θερμοκρασία αυτών, καθώς και ένας συντελεστής εκπομπής  $\epsilon$  (συνήθως της τάξης του 0.7). Απαραίτητα δεδομένα για τις εισόδους είναι επίσης το εμβαδόν της κάθε διατομής και η αντίστοιχη υδραυλική διάμετρος αυτής, στοιχεία τα οποία βρίσκονται από τη γεωμετρία του πλέγματος.

Λόγω της πληθώρας εισόδων αέρα στον συγκεκριμένο λέβητα και με δεδομένο τις ποικίλες διαφοροποιήσεις στις διατομές αυτών χρειάζεται να γίνει ισολογισμός μάζας και ενέργειας, ώστε να ελεγχθεί ο τρόπος της κατανομής της παροχής του αέρα, προκειμένου να έχουμε ομαλότερη ανάμιξη κατά την καύση και επιπλέον προσομοίωση στις πραγματικές συνθήκες. Αναπτύχθηκαν έτσι κάποια σενάρια, τα οποία θα ελεγχθούν κατά την επίλυση του προβλήματος, και συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα (4.2) :

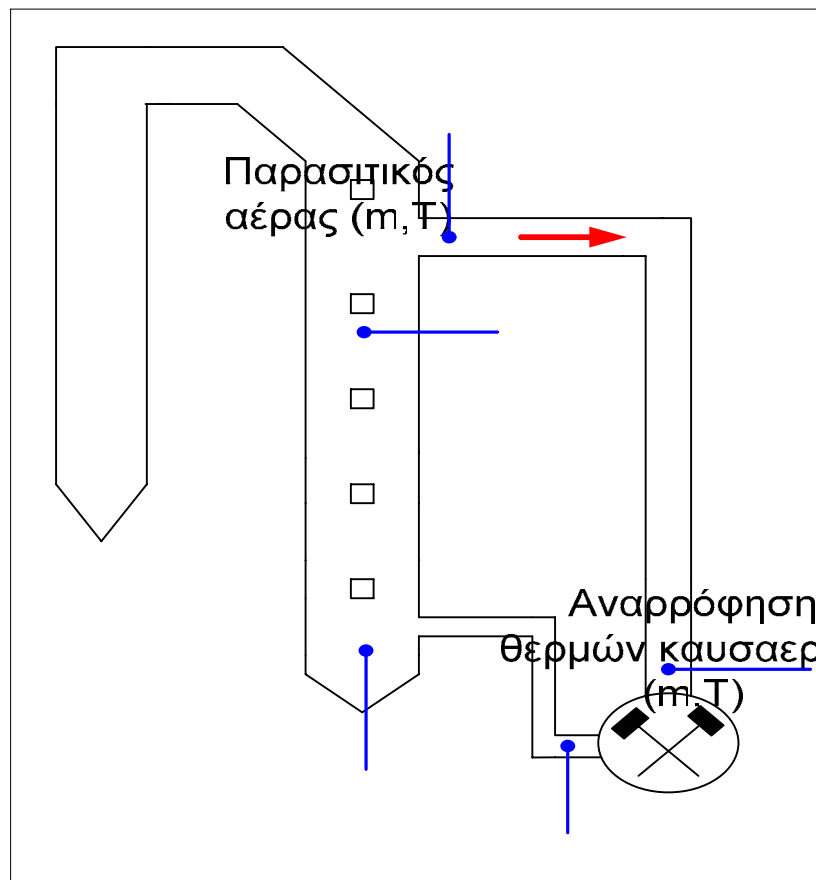
<i>Πιθανά Σενάρια</i>	<b>Ποσοστό εισερχόμενου αέρα καύσης (%)</b>		
	<i>1<sup>ο</sup></i>	<i>2<sup>ο</sup></i>	<i>3<sup>ο</sup></i>
Εισερχόμενος αέρας από το μπροστά τοίχωμα της εστίας (front side)	30	25	35
Εισερχόμενος αέρας από το πίσω τοίχωμα της εστίας (back side)	30	25	25
Εισερχόμενος αέρας από τα πλαϊνά τοιχώματα της εστίας (right-left sides)	34	40	32
Εισερχόμενος αέρας από την τεφρολεκάνη (hopper)	6	10	8

(Πίνακας 4.2): Πιθανά σενάρια κατανομής του εισερχόμενου αέρα καύσης

Ο ισολογισμός μάζας και ενέργειας έγινε σε ένα αρχείο Excel, όπου αρχικά εκτιμήθηκε η σύσταση των καυσαερίων στην έξοδο του λέβητα. Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων στον «ΑΗΣ Λιπτόλ» η παραπάνω σύσταση θα είναι δεδομένη, αφού θα δίνεται από τους αναλυτές καυσαερίων που θα χρησιμοποιηθούν, όπως έχει προαναφερθεί. Κυρίως ενδιαφέρουν στοιχεία για τις εισόδους του λέβητα, τους μύλους κονιοποίησης, την αναρρόφηση των καυσαερίων και τις συνθήκες στο εσωτερικό της εστίας (Σχήμα 4.9). Έτσι μπορούμε στη συνέχεια με εκτιμήσεις των παραπάνω παραμέτρων να προσδιορίσουμε την τελική σύσταση των καυσαερίων και να την συγκρίνουμε με την αρχική. Ο ισολογισμός συνοψίζεται επομένως στο παρακάτω ισοζύγιο μάζας και ενέργειας (Σχήματα 4.8-9).



Θερμοκ  
καυσαερίων



**Ισοζύγιο μ  
ενέργ**

Παρ  
φυσικού  
(m, E)

(Σχήματα 4.8-9) : Ισοζύγιο ενέργειας και μάζας σε λέβητα



### 4.3 Προετοιμασία για την πειραματική ερευνητική δραστηριότητα

Οι βασικοί στόχοι κατά την εκτέλεση των πειραμάτων όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η καταγραφή θερμοκρασιακών προφίλ και συγκεντρώσεων καυσαερίων, η πραγματοποίηση αναλύσεων εκπομπών και τέφρας, καθώς και ο έλεγχος των επικαθίσεων, προκειμένου στη συνέχεια να γίνει διερεύνηση αυτών και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Οι μετρητικές διατάξεις που θα χρησιμοποιηθούν κατά κύριο λόγο μπορούν να συνοψιστούν στις παρακάτω :

- Λήπτες επικαθίσεων
- Αναλυτές καυσαερίων
- Πυρόμετρα

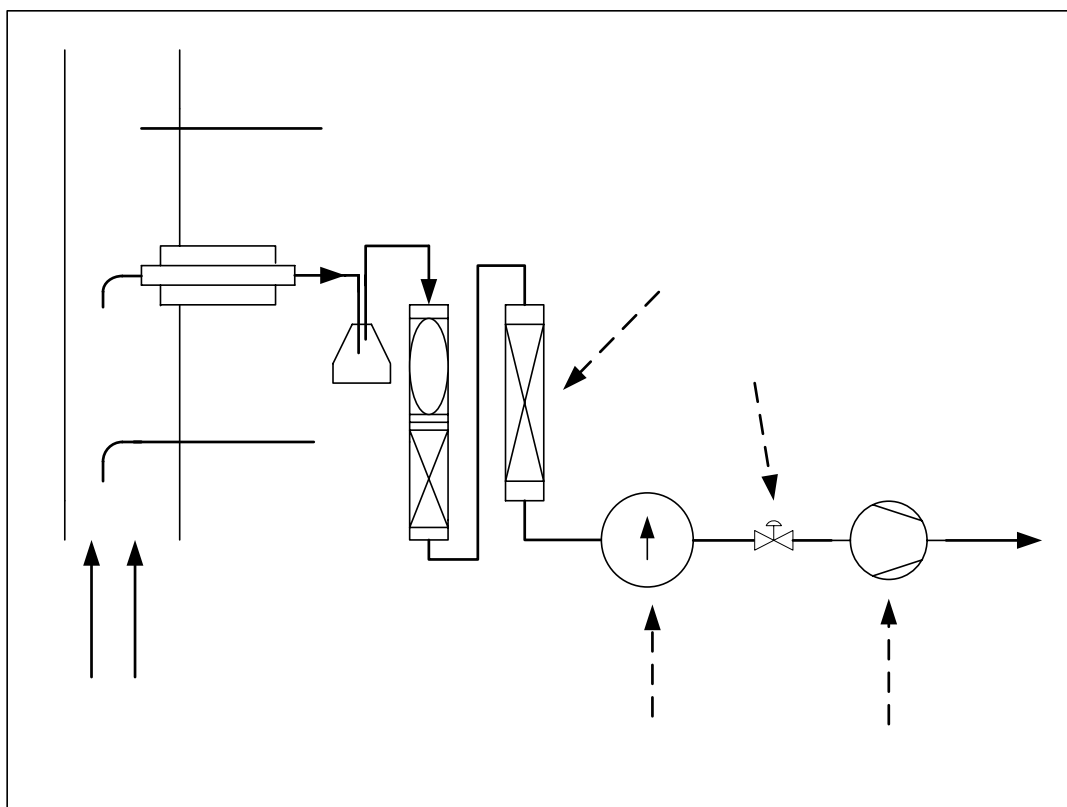
Οι λήπτες επικαθίσεων χρησιμοποιούνται προκειμένου να μελετηθεί η τάση για επικαθίσεις τέφρας στα διαφορετικά επίπεδα στο εσωτερικό του λέβητα. Αποτελούνται από ένα κεραμικό και ένα μεταλλικό τμήμα, όπου λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων αντοχής μπορεί να γίνει προσομοίωση μιας ευρείας κλίμακας θερμοκρασιών. Απαραίτητη είναι η ψύξη των ληπτών για αποφυγή πιθανής αποκόλλησης τμημάτων ή θραύσης κατά τη δειγματοληψία. Το μεταλλικό τμήμα είναι αερόψυκτο, ενώ το κεραμικό υδρόψυκτο. Μια τυπική διάταξη λήπτη επικαθίσεων δίνεται ακολούθως (Σχήμα 4.10). Φαίνονται τόσο τα δύο διαφορετικά τμήματα (μεταλλικό, κεραμικό), καθώς και οι παροχές του συστήματος ψύξης.



(Σχήμα 4.10) : Τυπική διάταξη λήπτη επικαθίσεων

Προκειμένου να γίνει η ανάλυση των καυσαερίων και να έχουμε στοιχεία για τις αντίστοιχες περιεκτικότητες και τις εκπομπές αυτών χρησιμοποιείται φορητός αναλυτής καυσαερίων. Η αρχή μέτρησης βασίζεται στην ισοκινητική δειγματοληψία, όπου γίνεται αναρρόφηση κατά τη ροή των καυσαερίων ώστε να υπάρχει προσομοίωση σε πραγματικές συνθήκες. Ο αναλυτής αποτελείται από θερμοστοιχείο, ακροφύσιο που περιβάλλεται από γυάλινο αγωγό και στοιχείο μέτρησης της πίεσης [21].

Η χρησιμοποίηση αντλίας κενού είναι απαραίτητη για τη δημιουργία υποπίεσης, ώστε να γίνει η αναρρόφηση των θερμών καυσαερίων, ενώ ο γυάλινος αγωγός περιλαμβάνει σύστημα νερού ψύξης για να διατηρείται η θερμοκρασία του δείγματος καυσαερίων σε θερμοκρασίες μικρότερες των 30<sup>0</sup>C. Επιπλέον χρησιμοποιείται ξηραντήρας για αφύγρανση της περιεχόμενης στα καυσαερία υγρασίας, ώστε να είναι εφικτή στη συνέχεια η χημική ανάλυση αυτών. Μια τυπική διάταξη φορητού αναλυτή καυσαερίων δίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 4.11).



(Σχήμα 4.11) : Συνήθης διάταξη φορητού αναλυτή καυσαερίων

Θερμοστοιχείο

Ακροφύσιο  
αναρρόφησης

### 4.3.1 Πυρόμετρο

Η γνώση της τοπικής θερμοκρασίας του καυσαερίου στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης, αλλά και της σύστασής του, αποτελεί ένα ιδιαίτερος σημαντικό στοιχείο, για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της καύσεως και την εκτίμηση των τάσεων για επικαθίσεις και ιπτάμενα σωματίδια. Ωστόσο θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα κατάλληλα μετρητικά όργανα, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις υψηλές θερμοκρασίες, που επιτυγχάνονται στο εσωτερικό της εστίας, και τα κριτήρια που σχετίζονται με την αντοχή των υλικών των μετρητικών διατάξεων.

Οι μετρήσεις θερμοκρασιών πραγματοποιούνται με θερμοστοιχεία, τα οποία τοποθετούνται στην εξωτερική επιφάνεια πυρομέτρων. Λόγω της παρουσίας υψηλής θερμοκρασίας ανάμεσα στο θερμοστοιχείο και τον περιβάλλοντα χώρο, είναι δυνατό να συμβούν φαινόμενα οξειδωσης του θερμοστοιχείου, μειώνοντας την αξιοπιστία του, οδηγώντας σε λανθασμένα αποτελέσματα, και επομένως η προστασία τους κρίνεται απαραίτητη. Συνήθως χρησιμοποιούνται θερμοστοιχεία από πλατίνα και ρόδιο (Pt-PtRh 10%), τα οποία τοποθετούνται στο εσωτερικό προστατευτικού κελύφους από κεραμικό υλικό, ώστε να παρέχεται η απαραίτητη προστασία από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον ο θάλαμος περιβάλλεται από δύο ομόκεντρα καλύμματα για να είναι εφικτή η ψύξη του. Τα θερμά καυσαέρια εισέρχονται ανάμεσα στα δύο καλύμματα και πάνω από το θάλαμο, με ιδιαίτερα υψηλή ταχύτητα (τουλάχιστον 150m/s), προκειμένου οι θερμοκρασιακές συνθήκες στην περιοχή γύρω από την άκρη του θερμοστοιχείου να τείνουν κατά το δυνατό περισσότερο στις πραγματικές. Έτσι επιτυγχάνεται έλεγχος των σφαλμάτων των μετρήσεων μέχρι και 95%.

Δύο τύποι πυρομέτρων αναρρόφησης, που χρησιμοποιούνται ευρέως σε λέβητες καύσης στερεών καυσίμων και κυρίως κονιοποιημένου καυσίμου είναι οι : i) ANSI type S (με θερμοστοιχεία κράματος Pt-PtRh 10%), ii) ANSI type B (με θερμοστοιχεία κράματος Pt-PtRh 30%), οι οποίοι παρέχουν τη δυνατότητα για μετρήσεις θερμοκρασιών 1700<sup>0</sup>C και 1800<sup>0</sup>C, λόγω της ιδιαίτερης κατασκευής τους και των υλικών υψηλής αντοχής. Τα θερμοστοιχεία περιβάλλονται από 3 ομόκεντρα καλύμματα, εκ των οποίων, το εσωτερικό (συνήθως από αλουμίνιο) προστατεύει από χημική δράση με τα καυσαέρια, ενώ ανάμεσα στα άλλα 2 (από κράμα αλουμινίου-πυριτίου) ρέουν τα θερμά καυσαέρια με ταχύτητες αναρρόφησης έως και 250m/s. Η ακρίβεια μιας μέτρησης εξαρτάται κυρίως από την ένταση των ακτινοβολιών στα τοιχώματα, τη γεωμετρία του πυρομέτρου και το μέγεθος της ταχύτητας αναρρόφησης. Συγκρίνοντας τις θερμοκρασίες χωρίς αναρρόφηση και με τη μέγιστη ταχύτητα αναρρόφησης μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για την απόδοση του συστήματος.

Ένας δείκτης ελέγχου της απόδοσης (efficiency=E), που χρησιμοποιείται συνήθως, είναι ο εξής :

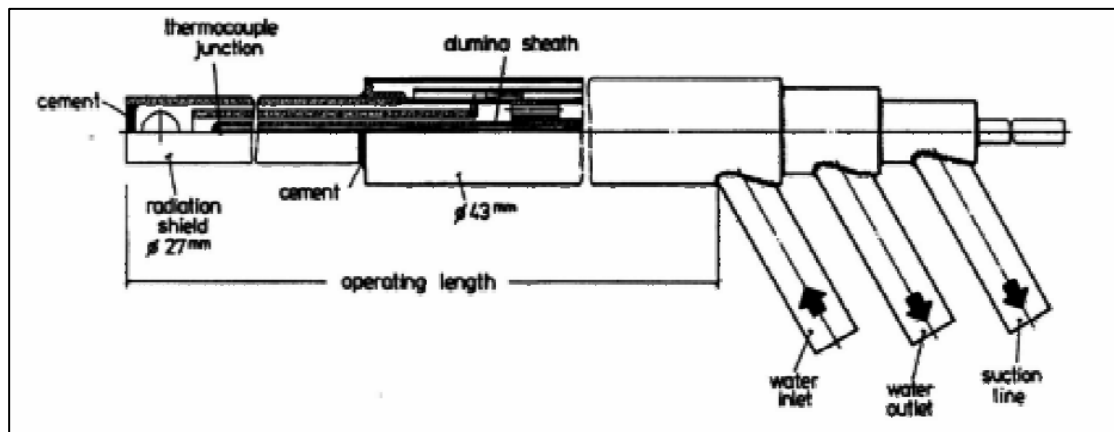
$$E = \frac{T_{\max} - T_{ws}}{T_{gas} - T_{ws}}, \text{ όπου}$$

$T_{\max}$  : Θερμοκρασία με μέγιστη ταχύτητα αναρρόφησης

$T_{ws}$  : Θερμοκρασία χωρίς αναρρόφηση

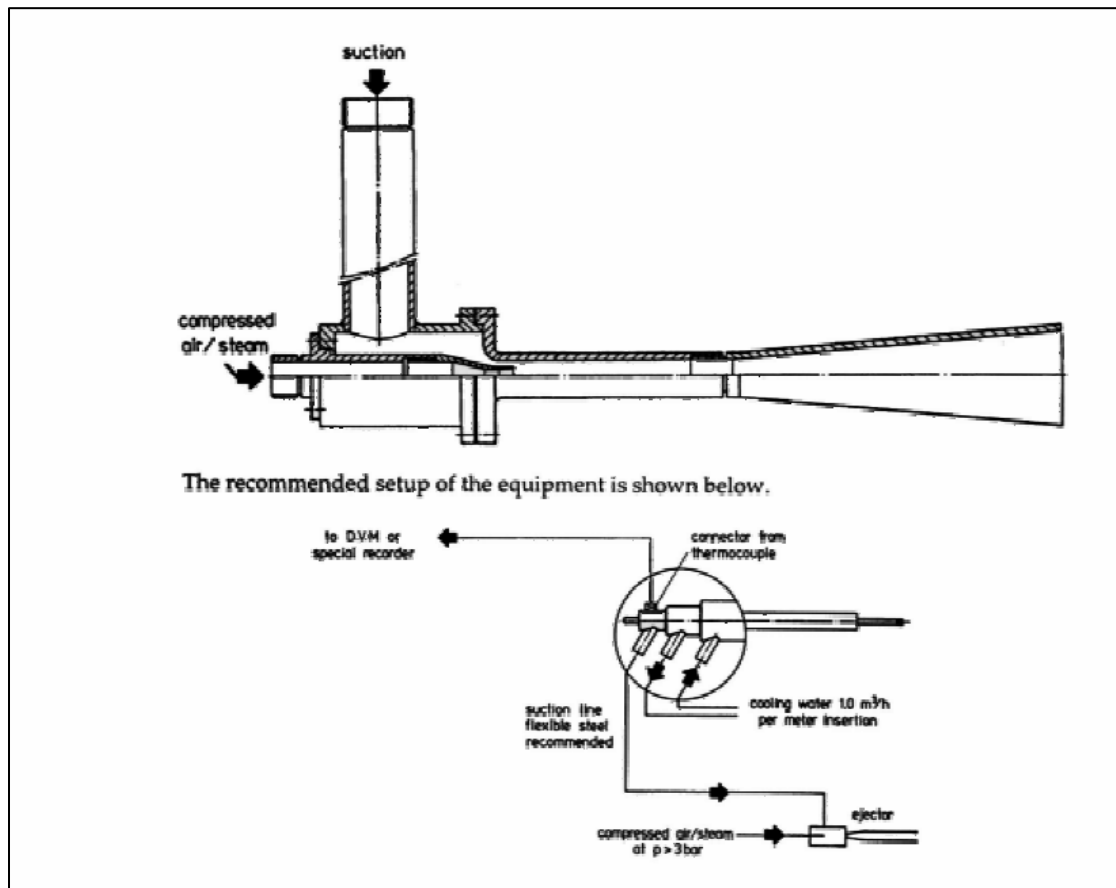
$T_{gas}$  : Πραγματική θερμοκρασία του καυσαερίου

Πειραματικές εφαρμογές έχουν δείξει ότι επιτυγχάνεται ακρίβεια περίπου 97-98%, δηλαδή αποκλίσεις θερμοκρασιών κατά  $\pm 8^{\circ}\text{C}$ . Μια τυπική διάταξη πυρομέτρου αναρρόφησης δίνεται στη συνέχεια (Σχήμα 4.12).



(Σχήμα 4.12) : Τυπική διάταξη πυρομέτρου, Πηγή IFRF [22,23]

Προκειμένου να έχουμε την κατάλληλη ροή μάζας των καυσαερίων στο εσωτερικό του πυρομέτρου, ώστε να επιτυγχάνεται αξιόπιστη μέτρηση, χρησιμοποιείται πεπιεσμένος αέρας ή ατμός, σε πίεση περίπου 3bar. Ο τακτικός έλεγχος της ροής του καυσαερίου κρίνεται, ιδιαιτέρως, απαραίτητος και γι' αυτό το λόγο γίνεται χρήση κατάλληλης διάταξης Venturi για επιτάχυνση της ροής και δημιουργία υποπίεσης (Σχήμα 4.13). Μια συνήθης τιμή για την παροχή όγκου είναι της τάξης των  $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .



(Σχήμα 4.13) : Διάταξη Venturi για δημιουργία υποπίεσης και επιτάχυνση ροής, Πηγή IFRF [22,23]

Για τη σωστή λειτουργία των πυρομέτρων, που θα χρησιμοποιηθούν, χρειάζεται να ληφθεί υπ' όψιν η επαρκής ψύξη στο εσωτερικό του πυρομέτρου. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών συνίσταται η χρήση περίπου 2.5m<sup>3</sup>/h νερού ψύξης, πίεσης 2.5 bar. Επιπλέον, πρέπει να συνυπολογιστεί και η επίδραση του φαινομένου των επικαθίσεων. Κατά τη διάρκεια της καύσης, στο εσωτερικό της εστίας, έντονη είναι η παρουσία ακαύστων σωματιδίων και ιτάνμενης τέφρας. Αυτά έχουν την τάση να επικαθόνται στις επιφάνειες των πυρομέτρων ή και άλλων μετρητικών διατάξεων, όπου τήκονται, δημιουργώντας ένα στρώμα άκαυστης ύλης, και αυξάνοντας τοπικά σε μεγάλο βαθμό την θερμοκρασία. Αναπτύσσονται έντονες θερμικές τάσεις, οι οποίες, υπάρχει περίπτωση, πέρα από τη μείωση του βαθμού απόδοσης της καύσης, να οδηγήσουν σε αποκόλληση κομματιών ή θραύση του πυρομέτρου. Το αποτέλεσμα θα ήταν να δημιουργηθούν προβλήματα στην ομαλή λειτουργία του λέβητα, κίνδυνος πάυσης λειτουργίας για αφαίρεση των κομματιών του πυρομέτρου και συντήρηση, διαδικασίες, ιδιαίτερα χρονοβόρες, Γι' αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή και σωστή διερεύνηση για την αποτελεσματικότητα του συστήματος ψύξης.

### Υπολογισμός παροχής νερού ψύξης σε πυρόμετρο IFRF

Όπως ήδη προαναφέρθηκε λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και των έντονων θερμικών τάσεων υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης κομματιών του πυρομέτρου. Σκοπός του ακόλουθου υπολογισμού είναι η εύρεση της απαιτούμενης παροχής για την ψύξη της διάταξης, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα κατά την λειτουργία του λέβητα ή συνεχείς διακοπές για λόγους συντήρησης.

Είναι γεγονός ότι ανάλογα με το είδος του στερεού καυσίμου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν διαφοροποιήσεις όσον αφορά το ποσό της συναλλασσόμενης θερμότητας  $Q_A$  μέσω των τοιχωμάτων της εστίας [24]. Ορίζεται ως το γινόμενο της πυκνότητας ροής θερμότητας  $q_E$  επί την επιφάνεια συναλλαγής  $A$  της εστίας.

$$\text{Δηλαδή: } Q_A = q_E * A$$

Για την περίπτωση φαιανθράκων (λιγνίτης) μια ενδεικτική τιμή για την πυκνότητα ροής θερμότητας είναι :

$$q_E = 100 \text{ kW} / \text{m}^2$$

Σε μικρές εστίες η πυκνότητα ροής θερμότητας είναι η ίδια σε διαφορετικές θέσεις της εστίας. Ενώ σε περιπτώσεις λεβήτων μεγάλου μεγέθους τα τοιχώματα δέχονται διαφορετική ακτινοβολία από τη φλόγα, έτσι υπάρχουν περιοχές με αυξημένη πυκνότητα παροχής θερμότητας, με μέγιστη τιμή τα 800 kW/m<sup>2</sup>.

#### (A.)

Στον αρχικό υπολογισμό μας θα θεωρηθεί ότι έχουμε σταθερή πυκνότητα ροής θερμότητας ( $q_E = \text{const.}$ ) και θα υπολογιστεί το απαιτούμενο νερό ψύξης του λήπτη.

Βασικές παράμετροι είναι, τόσο οι θερμοκρασίες του ψυκτικού μέσου κατά την είσοδο και έξοδο από το λήπτη, όσο και η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας αυτού με την εστία.

Χρησιμοποιείται συνήθως νερό δικτύου, ως νερό ψύξης, δηλαδή θερμοκρασίας

$$Tl_{in} = 20^{\circ} \text{C}$$

Επιθυμείται η θερμοκρασία του νερού κατά την έξοδο από το εσωτερικό του λήπτη, να είναι μικρότερη των 100<sup>o</sup>C, δηλαδή

$$Tl_{out} = 80 \div 90^{\circ} \text{C}$$

Με βάση τα εγχειρίδια του πυρομέτρου της IFRF έχουμε εξωτερική διάμετρο  $D_{out} = 0.043 \text{m}$ ,

ενώ θεωρούμε ότι ο λήπτης έχει μήκος το μισό του πλάτους του λέβητα, δηλαδή

$$L = 5 \text{m}.$$

Η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας δίνεται από τη σχέση :

$$A = \pi * D_{out} * L$$

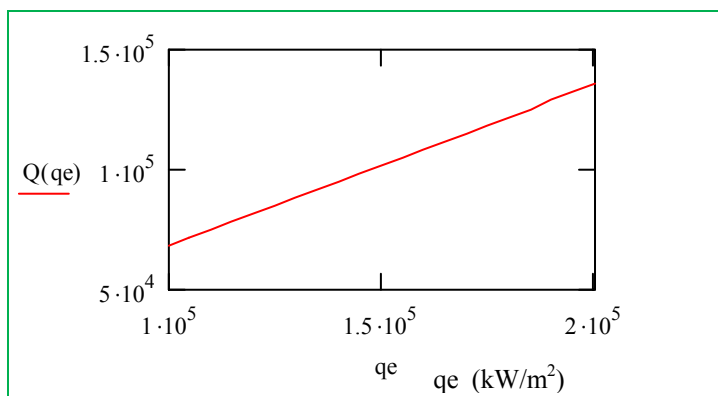
Για την πυκνότητα ροής θερμότητας υποθέτουμε ότι έχουμε μια μέση τιμή ίση με :

$$q_{E,av} = 150 \text{ kW} / \text{m}^2, \text{ και } q_{E,min} = 100 \text{ kW} / \text{m}^2, q_{E,max} = 200 \text{ kW} / \text{m}^2.$$

Το ποσό της συναλλασσόμενης θερμότητας  $Q_A$  μέσω των τοιχωμάτων της εστίας είναι επομένως :

$$Q_A(qe) = qe * A$$

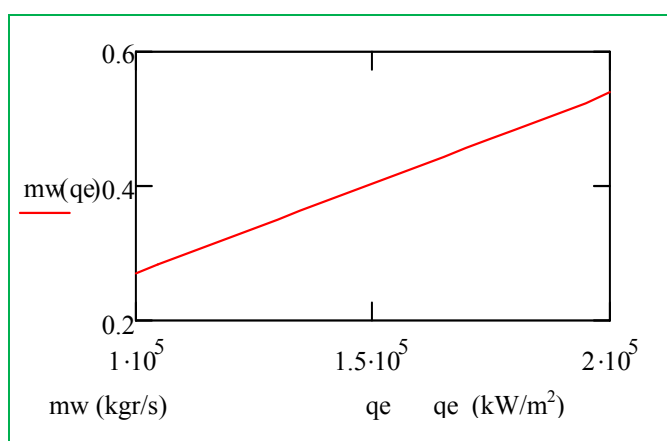
Μετά από εισαγωγή των δεδομένων στο MathCAD προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα για το ποσό θερμότητας  $Q_A$  :



(Σχήμα 4.14) : Μεταβολή της συναλλασσόμενης θερμότητας  $Q_A$

Με δεδομένα την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του νερού ψύξης, την ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού στους 20<sup>0</sup>C ( $C_{pw}=4195 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ ), καθώς και το παραγόμενο ποσό θερμικής ισχύος, μπορεί να γίνει μια πρώτη εκτίμηση για την απαιτούμενη παροχή νερού ψύξης. Οπότε ισχύει :

$$mw(qe) = \frac{Q(qe)}{C_{pw} * (Tl_{out} - Tl_{in})}$$



(Σχήμα 4.15) : Απαιτούμενη παροχή νερού ψύξης συναρτήσει συναλλασσόμενου ποσού θερμότητας

**(B.)**

Ο προηγούμενος υπολογισμός βασίστηκε κυρίως στη θεώρηση κάποιας τιμής για την πυκνότητα ροής θερμότητας, προκειμένου να υπολογιστεί στη συνέχεια η ποσότητα που συναλλάσσεται μεταξύ της εστίας και της επιφάνειας του λήπτη.

Μια από τις κυριότερες παραμέτρους είναι ωστόσο η θερμοκρασία των καυσαερίων ( $\Theta=T_g$ ) στο εσωτερικό του λέβητα, αφού για διάφορες τιμές αυτής προκύπτουν διαφορετικές τιμές για την ειδική θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων, τη δυναμική συνεκτικότητα και την αγωγιμότητα. Οι ιδιότητες αυτές του καυσαερίου υπολογίζονται με απευθείας αναφορά στην αντίστοιχη υπορουτίνα υπολογισμού.

$$\theta := 950,955..1100 \quad , \quad T_g := \theta$$

Ειδική Θερμοχωρητικότητα :

$$C_{pgs}(\theta) := c_{pg}(\theta) \cdot 1000$$

Θερμική Αγωγιμότητα :

$$\lambda_{gs}(\theta) := \lambda_g(\theta)$$

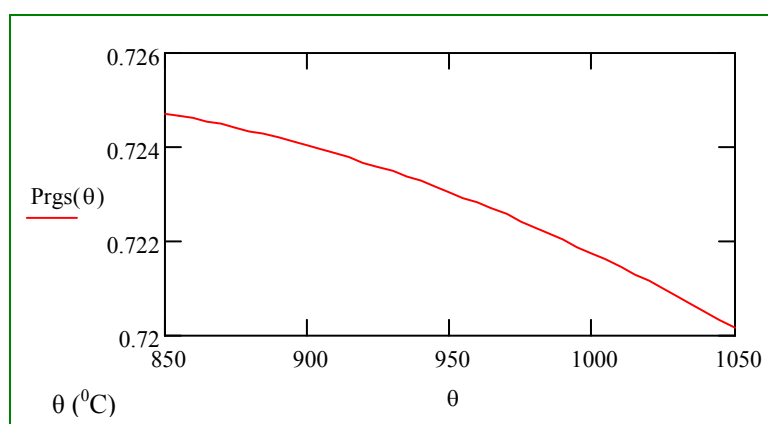
Δυναμική Συνεκτικότητα :

$$n_{gs}(\theta) := n_g(\theta)$$

Με βάση τα παραπάνω μεγέθη μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός Prandtl για την εξωτερική επιφάνεια του λήπτη :

$$Pr_{gs}(\theta) := n_{gs}(\theta) \cdot \frac{C_{pgs}(\theta)}{\lambda_{gs}(\theta)}$$

Ακολουθεί διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η μεταβολή του αριθμού Prandtl συναρτήσει της θερμοκρασίας  $\Theta$  των καυσαερίων :



(Σχήμα 4.16) : Μεταβολή αριθμού Prandtl συναρτήσει θερμοκρασίας καυσαερίου  $\theta$



Μια επιπλέον παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν είναι και η ταχύτητα των καυσαερίων ( $u$ ) στο εσωτερικό της εστίας. Τυπική τιμή για την περίπτωση φαιανθράκων είναι 10 m/sec, ωστόσο κατά τον υπολογισμό θα πάρουμε δύο ακόμα τιμές 8 m/sec και 12 m/sec.

Στην εξωτερική επιφάνεια του πυρομέτρου μεταφέρεται θερμότητα ( $Q$ ) λόγω συναγωγής και λόγω θερμικής ακτινοβολίας από την περιοχή της εστίας [25]. Ισχύει επομένως η παρακάτω σχέση :

$$Q = h_m * A * (T_g - T_{sg}) + \sigma * \varepsilon * (T_g^4 - T_{sg}^4)$$

Σταθερά Stefan – Boltzmann :

$$\sigma := 5.6697 \cdot 10^{-8} \quad (W / m^2 K^4)$$

Συντελεστής εκπομπής πραγματικού σώματος ( $\varepsilon$ ) :

$$\varepsilon := 1.0$$

Θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας λήπτη ( $\Theta_{sg}=T_{sg}$ ) :

Υποθέτουμε τρεις τιμές :  $\Theta_{sg}=750$  K, 800 K, 850 K .

Ο αριθμός Reynolds δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$Re(\theta, u) := (u) \cdot \rho \cdot \frac{D_{out}}{\eta(\theta)}$$

Ο υπολογισμός των αριθμών Nusselt θα γίνει σύμφωνα με τις σχέσεις του VDI-Wärmeatlas. Θα βρεθούν δύο αριθμοί Nusselt για τη ροή κάθετα σε μοναδικό αγωγό, για τις περιπτώσεις στρωτής και τυρβώδους ροής, οι οποίοι θα συνθέσουν τον ολικό μέσω του νόμου των τετραγώνων.

Στρωτή ροή :

$$Nu_{lam}(\theta, u) := 0.664 \sqrt{Re(\theta, u)} \cdot \sqrt[3]{Pr_{gs}(\theta)}$$

Τυρβώδης ροή :

$$Nu_{turb}(\theta, u) := \frac{0.037 Re(\theta, u)^{0.8} \cdot Pr_{gs}(\theta)}{1 + 2.443 Re(\theta, u)^{-0.1} \cdot \left( Pr_{gs}(\theta)^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}$$

Ολικός αριθμός Nusselt αγωγού :

$$\text{Num}(\theta, u) := 0.3 + \sqrt{\text{Nulamf}(\theta, u)^2 + \text{Nulturbr}(\theta, u)^2}$$

Θα ακολουθήσει η εύρεση του συντελεστή ειδικής συναγωγιμότητας ( $h_m$ ) :

$$h_m(\theta, u) := \text{Num}(\theta, u) \cdot \frac{\lambda_{gs}(\theta)}{L_r} \quad , \quad \text{όπου } L_r \text{ ένα χαρακτηριστικό μήκος .}$$

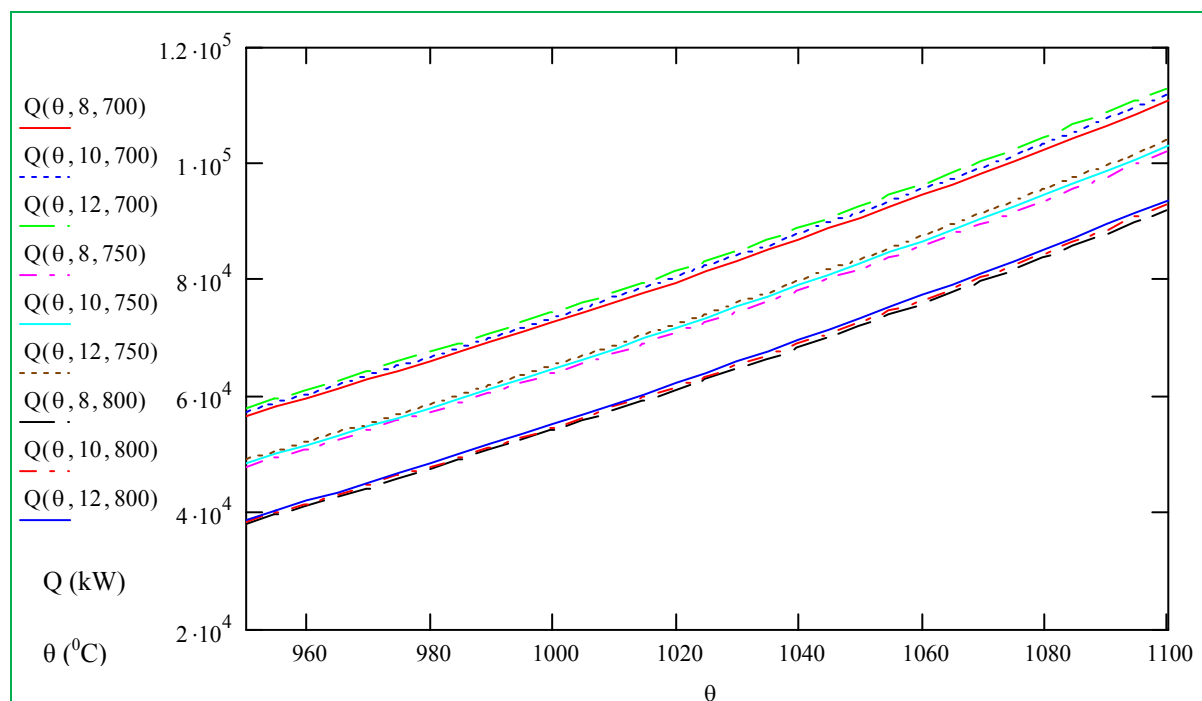
Για την περίπτωση ροή κάθετα σε κύλινδρο το χαρακτηριστικό μήκος είναι :

$$L_r := \frac{\pi}{2} \cdot D_{out} \quad , \quad \text{όπου } D_{out}=0.043\text{m η εξωτερική διάμετρος του λήπτη.}$$

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί η εξωτερική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του λήπτη είναι :

$$A_{\text{ext}} := \pi \cdot D_{out} \cdot L$$

Το ποσό της συναλασσομένης θερμότητας  $Q$  συναρτήσει της θερμοκρασίας των καυσαερίων, της ταχύτητας αυτών και της θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια του λήπτη δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα :



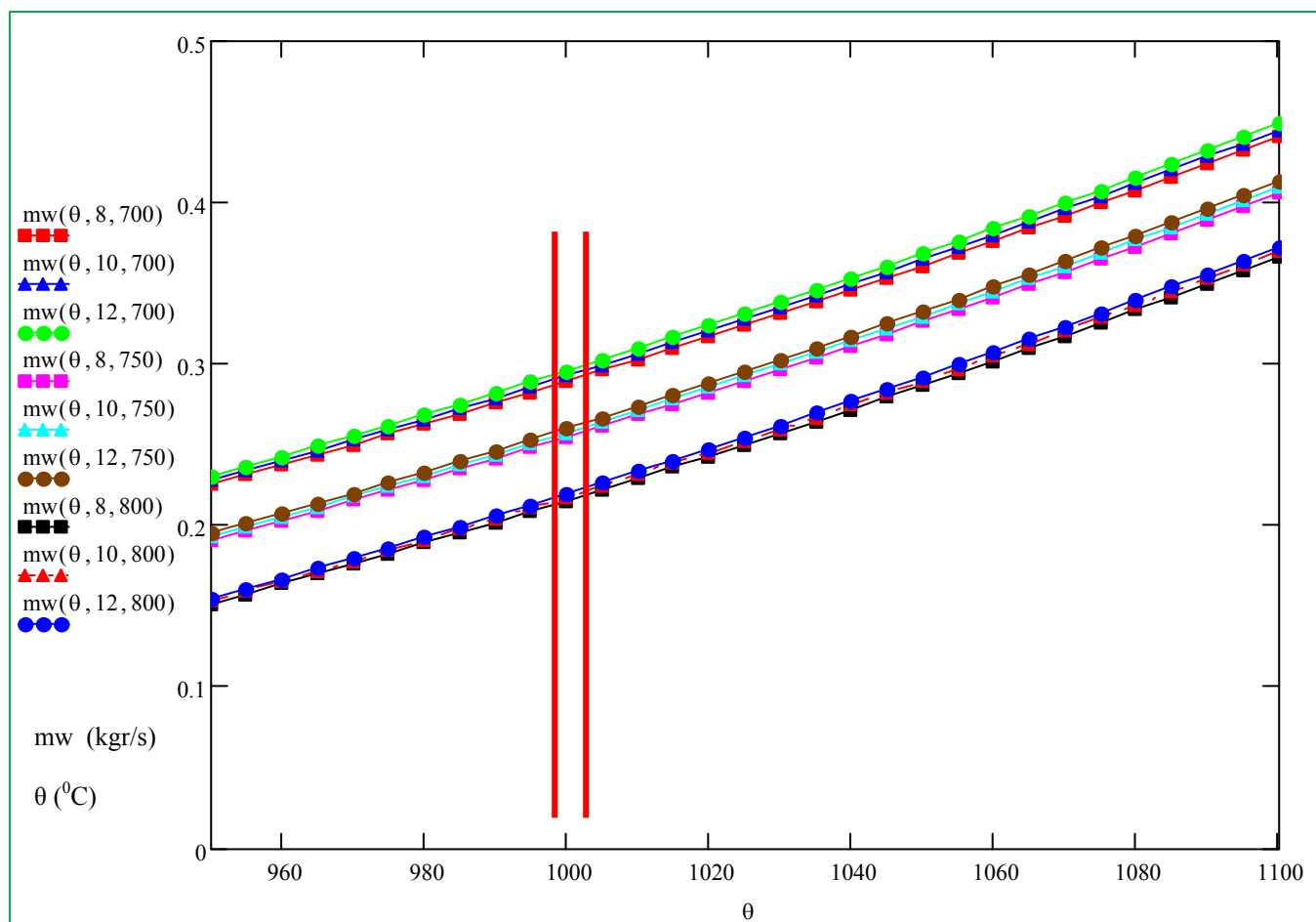
(Σχήμα 4.17) : Μεταβολή συναλασσομένης θερμότητας  $Q$  συναρτήσει θερμοκρασίας καυσαερίων  $\theta$

Θεωρούμε όπως και στον αρχικό υπολογισμό τα εξής :  
 θερμοκρασία εισόδου νερού ψύξης :  $T_{in}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 θερμοκρασία εξόδου νερού ψύξης :  $T_{out}=80\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού στους  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  :  $C_{pw}=4190\text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$

Έτσι η σχέση υπολογισμού του απαιτούμενου νερού ψύξης του λήπτη είναι :

$$mw(\theta, u, \theta_{sg}) := \frac{Q(\theta, u, \theta_{sg})}{C_{pw} \cdot (T_{out} - T_{in})}$$

Οπότε προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα :



(Σχήμα 4.18) : Παροχή μάζας νερού ψύξης συναρτήσει θερμοκρασίας καυσαερίων

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων το εύρος λειτουργίας λαμβάνεται στην περιοχή γύρω από τους  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , οπότε το απαιτούμενο νερό ψύξης του λήπτη είναι της τάξης των  $0.2\text{-}0.3\text{ kg/sec}$ .

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>**

### **ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ**

Η διερεύνηση της μικτής καύσης ξηρού λιγνίτη σε εγκαταστάσεις κονιοποιημένου καυσίμου παρουσιάζει έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, καθώς η μείωση των εκπομπών του CO<sub>2</sub> και η χρήση καθαρότερων ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται επιβεβλημένη για τον περιορισμό των επιπτώσεων του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Από την εξέταση των ήδη υπάρχουσων τεχνολογιών ξήρανσης, που έγινε στο Κεφάλαιο 2, διαπιστώθηκε ότι με την εφαρμογή νέων μεθόδων ξήρανσης είναι δυνατόν να αποφευχθεί η επανατροφοδοσία του αδρανούς μείγματος καυσαερίων-υδρατμών στο εσωτερικό της εστίας, να πραγματοποιηθεί ξήρανση με γρηγορότερο ρυθμό λόγω της πολύ μικρής κοκκομετρίας του καυσίμου, να περιοριστεί η χρήση θερμών καυσαερίων για ξήρανση κερδίζοντας σε προσδιδόμενη θερμική ισχύ και επιπλέον να μην εμφανίζονται αυξημένες ενεργειακές απώλειες. Οι νέες τεχνολογίες ξήρανσης μπορούν να επιτύχουν τελικό ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας μέχρι και 12-15%, ενώ παράλληλα αύξηση του βαθμού απόδοσης των θερμοηλεκτρικών σταθμών κατά 3-7%.

Ειδικότερα η τεχνολογία ξήρανσης WTA χαρακτηρίζεται ως μια αξιόπιστη εφαρμογή, αφού έχει ήδη δοκιμαστεί το περασμένο χρονικό διάστημα σε πρωτότυπα, τα αποτελέσματα των οποίων έδειξαν αύξηση του βαθμού απόδοσης κατά 5-7% καθώς και θετικά στοιχεία όσον αφορά τις εκπομπές και τις επικαθήσεις. Ήδη κατασκευάζονται οι πρώτες εγκαταστάσεις σε βιομηχανική κλίμακα, προκειμένου να ενσωματωθούν σε υπάρχοντες λιγνιτικούς σταθμούς.

Στο πλαίσιο της επεξεργασίας των πειραμάτων καύσης δειγμάτων ελληνικού λιγνίτη, που διεξήχθησαν στην εγκατάσταση κονιοποιημένου καυσίμου (VVA), προέκυψε ότι είναι δυνατή η μικτή καύση ξηρού λιγνίτη, χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα όσον αφορά τη λειτουργική συμπεριφορά των ελληνικών λεβήτων. Όπως έχει προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, η μικτή καύση ξηρού λιγνίτη δεν κατέδειξε προβλήματα επικαθήσεων στην έξοδο της εστίας καθώς και στους υπερθερμαντές. Στην περιοχή των καυστήρων παρατηρήθηκε έντονη τάση για επικαθήσεις κυρίως σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1150<sup>ο</sup>C. Ωστόσο η ποσότητα του μείγματος ανακυκλοφορίας καυσαερίων-υδρατμών μπορεί να συμβάλλει στον έλεγχο των συνθηκών καύσης και των εκπομπών. Συγκεκριμένα για τις εκπομπές NO<sub>x</sub> διαπιστώθηκε μείωση αυτών στην περίπτωση λόγου αέρα καύσης λ<1 και ελαττώνοντας παράλληλα την παροχή του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών. Επιπλέον θετικό χαρακτηρίζεται το γεγονός ότι στην περίπτωση της μικτής καύσης ξηρού λιγνίτη, είναι δυνατή η επίτευξη σταθερής θερμοκρασίας εξόδου της εστίας με τη μείωση του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών, και με αποτέλεσμα κέρδος στην παροχή καυσίμου.

Οι συγκεντρώσεις των ρύπων αποτελούν ένα επιπλέον στοιχείο το οποίο θα μπορούσε μελλοντικά να διερευνηθεί, κυρίως των NO<sub>x</sub>, ώστε να υπάρξει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για το εάν η μικτή καύση ξηρού λιγνίτη συμβάλλει στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Προκειμένου να διαπιστωθεί σε βιομηχανική κλίμακα η συμπεριφορά κατά την καύση του ελληνικού ξηρού λιγνίτη, σχεδιάστηκαν πειράματα στον «ΑΗΣ Λιπτόλ». Η παρούσα διπλωματική εργασία συνέβαλε στην προετοιμασία τους, σε πειραματικό και σε υπολογιστικό επίπεδο, όπως έχει προαναφερθεί.

Συγκεκριμένα μοντελοποιήθηκε η εστία, όπου καταγράφηκαν όλες οι εισοδοί, οι παροχές αέρα και οι συναλλασσόμενες επιφάνειες, ώστε να ακολουθήσει η προσομοίωση της λειτουργίας της. Ακολούθησε ισολογισμός μάζας και ενέργειας, ώστε να είναι διαθέσιμα όλα τα απαιτούμενα δεδομένα για την αριθμητική επίλυση του υπολογιστικού πλέγματος του προβλήματος.

Η τελική δομή των πλεγμάτων καθώς και ο αριθμός των διαφορετικών όγκων που θα χωριστεί ο λέβητας αποτελούν σημεία προς εξέταση και η τελική δομή αυτών θα προκύψει κατά την επίλυση του μοντέλου προσομοίωσης από τον εμπορικό κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής Fluent. Ιδιαίτερα για την κατανομή του απαιτούμενου αέρα καύσης επιλέχθηκαν κάποια σενάρια, τα οποία θα δοκιμαστούν και θα πιστοποιηθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων.

Σε πειραματικό επίπεδο προσδιορίστηκαν οι απαιτούμενες μετρητικές διατάξεις και εξετάστηκαν τα συστήματα ψύξης αυτών, προς αποφυγή προβλημάτων υπερθέρμανσής τους κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής μετρήσεων στο εσωτερικό της εστίας.

Από την παραπάνω διερεύνηση της μικτής καύσης ξηρού λιγνίτη φαίνεται σε πρώτη φάση ότι είναι εφικτή η πραγματοποίησή της με δείγματα ελληνικού λιγνίτη, σύμφωνα και με τα αποτελέσματα των πειραμάτων στην εγκατάσταση κονιοποιημένου καυσίμου VVA, ωστόσο πρέπει να αξιολογηθούν και οι μελλοντικές δοκιμές στο λέβητα του «ΑΗΣ Λιπτόλ» προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τη βιομηχανική εφαρμογή αυτής και να ελεγχθεί η λειτουργική συμπεριφορά και η αποδοτικότητα της εγκατάστασης. Όπως έχει προαναφερθεί θα πραγματοποιηθούν τα εξής:

- Καταγραφή θερμοκρασιών στα διαφορετικά επίπεδα του λέβητα,
- Μετρήσεις συγκεντρώσεων καυσαερίων στην έξοδο της εστίας,
- Έλεγχος ποιότητας τέφρας, τάσης για επικαθήσεις,
- Χημική ανάλυση τέφρας και επικαθήσεων,
- Καταγραφή εκπομπών (κυρίως NO<sub>x</sub>, CO και CO<sub>2</sub>).

Λαμβάνοντας ως δεδομένο την παλαιότητα των εγκαταστάσεων των θερμοηλεκτρικών σταθμών στη χώρα μας και τη χαμηλή ποιότητα των ελληνικών φαιανθράκων, η βελτίωση του βαθμού απόδοσης αυτών επιζητείται σε κάθε περίπτωση, και επομένως η περαιτέρω έρευνα για την εφαρμογή της μικτής καύσης ξηρού λιγνίτη μπορεί να συμβάλλει προς αυτή την κατεύθυνση.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change, Technologies, Policies and Measures for Mitigating Climate Change- IPCC Paper 1996, ([www.ipcc.com](http://www.ipcc.com)).
- [2] Met Office Hadley Centre, ([www.metoffice.gov.uk/research/hadleycentre](http://www.metoffice.gov.uk/research/hadleycentre)).
- [3] Ν. Παπαγεωργίου, Ατμοπαραγωγοί Ι - Γενικές Αρχές, Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα 1991.
- [4] Δρ. Α. Στέγγου-Σαγιά, Συσκευές και Εγκαταστάσεις Θερμικών Διεργασιών, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004.
- [5] E. Kakaras, P. Ahladas, S. Syrmopoulos, “Computer simulation studies for the integration of an external dryer into a Greek lignite-fired power plant”, ([www.fuelfirst.com](http://www.fuelfirst.com)).
- [6] T. J. Kotas, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida 1995, “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”.
- [7] RWE Power, Impetus Investment Innovations, Climate Protection Programme, ([www.rwe.com](http://www.rwe.com)).
- [8] VGB PowerTech 11/2006, RWE Power, WTA Fine Grain Drying – Module for Lignite-Fired Power Plants of the Future, “Development and operating results of the test plant”.
- [9] RWE Power, Essen, Koeln, “Vier Fragen zur WTA-Anlage am Kraftwerk Niederaussem”, ([www.rwe.com](http://www.rwe.com)).
- [10] Dr. Frank Schwendig, Dipl.-Ing. Hans-Joachim Klutz, Dr. Johannes Ewers, RWE Power AG, Beitrag der Dezember-Ausgabe der VGB-Kraftwerkstechnik, “The Dry Lignite-Fired Power Plant”.
- [11] N. Sarunac, M. Ness, C. Bullinger, Third International Conference on Clean Coal Technologies for our Future, 15-17 May 2007, Cagliari, Sardinia, Italy, “One year of operating experience with a prototype fluidized bed coal dryer at Coal Creek Generating Station”.
- [12] J. Maier, K. R. G. Hein, 18<sup>th</sup> International Pittsburgh Coal Conference, Dec. 3-7 2001, “Effect of Pre-drying on P.F. Combustion, Fly Ash and Emission Behavior of Different European Low-Rank Fuels”.
- [13] J. Maier, F. Kluger, M. Hocquel, H. Spliethoff, Klaus R. G. Hein, Proposal for the 23<sup>rd</sup> International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 9-13, 1998, Clearwater, Florida “Investigation of particle and emission behaviour of raw and predried brown coal and bituminous coal in a 20 kW and in a 500 kW test facility”.

- [14] F. Kluger, J. Maier, K. R. G. Hein, J. König, H. Brüggemann, U. Priesmeier, Verbrennung von vorgetrockneter Braunkohle (TBK) – Experimentelle Untersuchung feuerungstechnischer Maßnahmen zur Stickoxidreduktion.
- [15] Dr.-Ing. H. Spiethoff, J. Maier, M. Hocquel, F. Kluger, Prof. K. R. G. Hein, “Effect of Pre-Drying on Combustion Behaviour and Boiler Design”.
- [16] Karin H. Andersen, Flemming J. Frandsen, Peter F. B. Hansen, Ingvar Rasmussen, Kate Wieck-Hansen, Peter Overgaard, Kim Dam-Johansen, March 9-13, 1998, Clearwater, Florida, “Deposit Formation in a 150 Mwe Utility PF-Boiler during Co-combustion of Coal and Straw”.
- [17] E. Kakaras, P. Grammelis, M. Agraniotis, C. Schlechter, I. Nikolaidis, C. Papapavlou, 15-17 May 2007, Cagliari, Sardinia, Italy, “Experimental investigation on the combustion behaviour of Greek brown coal with varying moisture content”.
- [18] Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, “Η ποιότητα του ελληνικού λιγνίτη”, ([www.dei.gr](http://www.dei.gr)).
- [19] J.Hercog, W.Rybak, Wroclaw University of Technology, Institute of Power Engineering and Fluid Mechanics, Third European Combustion Meeting ECM 2007, “NO<sub>x</sub> Emission and Unburned Carbon Loss Under Staged Combustion”.
- [20] R. Cenni, F. Frandsen, T. Gerhardt, H. Spliethoff, K.R.G. Hein, Waste Management 18 (1998) 433-444, “Study on trace metal partitioning in pulverized combustion of bituminous coal and dry sewage sludge”.
- [21] Sick Maihak, Gas Analysis, S700 Modular Gas Analyzer System, Product Information.
- [22] IFRF Research Station b.v., Measurement Equipment, Suction Pyrometer.
- [23] IFRF Doc., ACombustion File downloaded from the IFRF Online Combustion Handbook ISSN 1607-9116, “How do I measure local flame temperatures with IFRF suction pyrometer”.
- [24] Ν. Παπαγεωργίου, Ατμοπαραγωγοί ΙΙ - Εμβάθυνση, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1991.
- [25] Ξ. Κ. Κακάτσιος, Μετάδοση Θερμότητας, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2002.