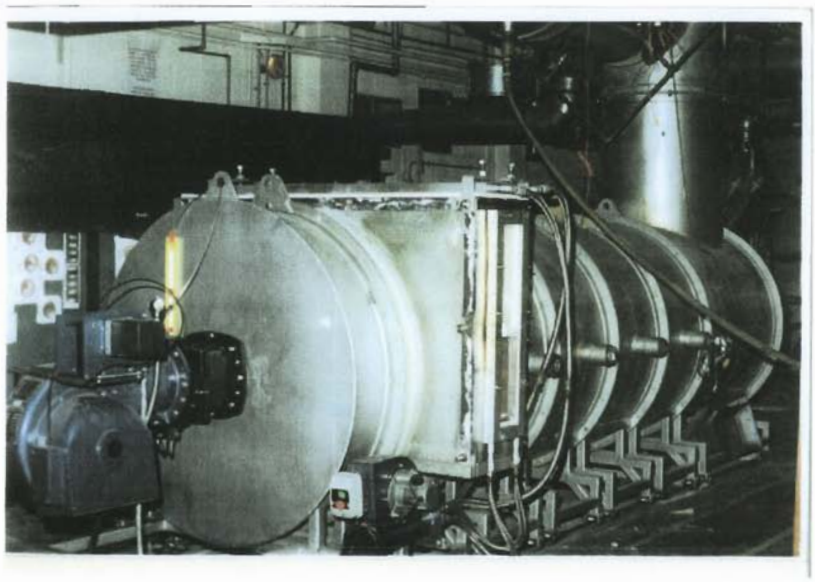
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : **κα. Μ. ΦΟΥΝΤΗ**

ΘΕΜΑ : « ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΚΛΙΒΑΝΟΥ ΙΣΧΥΟΣ 2 MW ΜΕ ΚΑΥΣΙΜΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΟΣΟΝ ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NOx) »



ΑΝΤΩΝΗΣ ΒΟΥΛΓΑΡΗΣ
(Α.Μ.02107630)

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2010

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά καύσης του πρόσφατα εγκατεστημένου κλιβάνου ισχύος 2 MW, με καύσιμο μίγμα πετρελαίου ντήζελ και gas oil, κυλινδρικής διατομής τούνελ, του εργαστηρίου καύσης του Πανεπιστημίου της Ουαλίας (Κάρντιφ).

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου, ειδικά στα NO, NO_2 και N_2O με την λήψη και επεξεργασία δειγμάτων καυσαερίων από το εσωτερικό του θαλάμου και από το σύστημα απαγωγής τους καθώς και στον προσδιορισμό των θερμοκρασιακών κατανομών στο εσωτερικό του φούρνου κατά την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος και κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας δημιουργήθηκαν με την μεταβολή του λόγου αέρα/καυσίμου, της πίεσης και παροχής αέρα και καυσίμου αντίστοιχα.

Έγινε μία βιβλιογραφική έρευνα των τρόπων σχηματισμού των οξειδίων του αζώτου, οι εκπομπές των οποίων και οι τρόποι μείωσής τους, έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον εξαιτίας της συμβολής τους σε μεγάλα προβλήματα περιβαλλοντικής ρύπανσης.

Η μελέτη της λειτουργίας του κλιβάνου περιελάμβανε μετρήσεις και δειγματοληψίες τόσο κατά την διάρκεια της μεταβατικής φάσης, ανύψωσης της θερμοκρασίας όσο και της μετέπειτα φάσης σταθερής κατάστασης καύσης όπου είχε επιτευχθεί η ισορροπία των αντιδράσεων καύσης.

Οι μετρήσεις λαμβάνονταν από διάφορες θέσεις του εσωτερικού του θαλάμου καύσης με την χρήση ζευγών θερμοστοιχείων, με τρόπο ώστε να καταγραφούν τα προφίλ αξονικής και ακτινικής κατανομής θερμοκρασιών.

Αναλυτές αερίων χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή δεδομένων εκπομπών NOx τόσο από την ζώνη καύσης (εσωτερικό του κλιβάνου) όσο και από τα καυσαέρια, στο τμήμα απαγωγής καυσαερίων. Οι τεχνικές και διαδικασίες πειραματικών μετρήσεων περιγράφονται στα κεφάλαια 3 και 4.

Διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες και λόγοι μείγματος καυσίμου, δημιουργήθηκαν και δοκιμάστηκαν, με την μεταβολή σε ισχύ, πίεση και παροχή αέρα και καυσίμου του μείγματος. Παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα για δύο κυρίως λόγους αέρα/καυσίμου και για περιοχή ισχύος λειτουργίας από 0.4 ως 1.1 MW. Η συζήτηση των αποτελεσμάτων γίνεται αναφορικά με τις επιδράσεις των διαφορετικών παραμέτρων λειτουργίας, στα θερμοκρασιακά προφίλ και τον σχηματισμό εκπομπών NOx.

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν και αναλύθηκαν δεδομένα που συνελλέγησαν στην αρχική φάση Ξήρανσης του Κλιβάνου, για την εξαγωγή συμπερασμάτων για χαρακτηριστικά του συστήματος.

Όπως φαίνεται στο Κεφάλαιο 6, εξάχθηκαν κάποια συμπεράσματα για την συμπεριφορά του συστήματος και επίσης επιχειρήθηκε να γίνουν κάποιες προτάσεις για μελλοντική εργασία και τρόπους βελτίωσης της παρακολούθησης και κατανόησης των χαρακτηριστικών του συστήματος και για την παραγωγή χαμηλότερου επιπέδου εκπομπών.

Τα αποτελέσματα τέλος, συγκρίνονται και συσχετίζονται με υπάρχοντα δεδομένα από το προγνωστικό μοντέλο με την χρήση προγράμματος Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, που είχε γίνει στο UWCC, ώστε να διαπιστωθεί η συμφωνία τους ή όχι με τις θεωρητικές προβλέψεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ i

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ iii

ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ - ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ vi

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ viii

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ 1

1.1. Καύση και Σχηματισμός Ρύπων 1

1.2. Σκοπός της Εργασίας 5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ - ΘΕΩΡΙΑ 8

2.1. Εκπομπές Οξειδίων του Αζώτου 8

2.2. Διαδικασία της Καύσης 10

2.3. Τύποι και Μηχανισμοί Σχηματισμού NOx 12

2.3.1. Θερμικό NOx – Μηχανισμός Zeldovich 12

2.3.2. Σχηματισμός NO - Καυσίμου 16

2.3.3. Διοξείδιο του Αζώτου και Άλλα Οξείδια του Αζώτου 19

2.4. Μέθοδοι Περιορισμού των Εκπομπών NOx 21

2.5. Μέθοδος Καύσης σε Βαθμίδες 23

2.6. Μείωση των NOx με την χρήση NH_3 24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3–ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΟ & ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ 26

3.1. Περιγραφή του Συστήματος Καυστήρα/Κλιβάνου ισχύος 2 MW 26

3.1.1. Διάταξη Καύσης 26

3.1.2. Σύστημα Τροφοδοσίας Καυσίμου 29

3.1.3. Περιγραφή του Καυστήρα 30

3.1.4. Λεπτομέρειες Λειτουργίας & Έναυσης του Καυστήρα 33

3.2. Λοιπός Πειραματικός Εξοπλισμός 35

3.2.1. Μετρήσεις Παροχής με χρήση Pitot - tube 35
3.2.2. Αναλυτής NOx 36
Σχήματα Πειραματικής Διάταξης (Σχήματα 2 & 3.1-3.11) 40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ 51
4.1. Λειτουργία Συστήματος Καύσης 51
4.2. Μετρήσεις Θερμοκρασίας 52
4.2.1. Μέθοδος Λήψης Μετρήσεων 52
4.2.2. Αιτίες για Ανακρίβειες των Μετρήσεων Θερμοκρασίας 54
4.3. Μετρήσεις Συγκέντρωσης Αερίου 55
4.4. Μετρήσεις Παροχών Αέρα/Καυσίμου και Υπολογισμοί Ισχύος 57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥΣ 59
5.1. Μετρήσεις NOx και Θερμοκρασιακών Κατανομών 59
5.2. Προφίλ (Διαγράμματα Κατανομής) Θερμοκρασιών 60
5.2.1. Αποτελέσματα Σταθερής Κατάστασης (Steady – State) 60
5.2.2. Αποτελέσματα Φάσης Προθέρμανσης. 66
5.3. Σημείωση για την Διόρθωση Θερμοκρασίας 69
5.4. Μετρήσεις NO_X στα Καυσαέρια 70
5.5. Διαγράμματα Συγκέντρωσης Αερίων 71
5.5.1. Παράγοντες που Επηρεάζουν τον σχηματισμό NO_X 73
5.5.2. Μορφές Σχηματισμού NO_X εντός φλόγας 75
5.6. Επίδραση της Θερμοκρασίας στα NO_X 75
5.7. Επίδραση Στοιχειομετρίας στα NO_X 77
5.8. Μετρήσεις Τελευταίας Θυρίδας 79
5.9. Αξονικά Διαγράμματα NO (Σταθερή Κατάσταση) 80
5.10. Μετρήσεις NO_X στην Φάση Προθέρμανσης 81
5.11. Επίπεδα N_2O 82
5.12. Διαφορές στα Αποτελέσματα λόγω των Οργάνων Δειγματοληψίας 82
5.13. Μετρήσεις-Υπολογισμοί Ταχύτητας Αέρα Εισαγωγής 83

5.14. Κάποια Στοιχεία σχετικά με τα Δεδομένα από την διαδικασία Ξήρανσης 85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Α Σχήματα & Γραφικές Παραστάσεις 5.1.1. ÷ 5.8.8. 88

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Β Δεδομένα Δοκιμών 1÷11 και Διαδικασίας Ξήρανσης – Μετρήσεις 114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 128

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 133

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ 138

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ CFD 141

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΙΣΧΥΟΣ 154

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – ΤΕΧΝΙΚΑ ΦΥΛΛΑΔΙΑ ΠΥΡΑΝΤΟΧΟΥ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΚΑΥΣΙΜΟΥ 158

ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ - ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Σύμβολο	Ερμηνεία
UWCC	Πανεπιστήμιο της Ουαλίας, Κολλέγιο Κάρντιφ
CFD	Υπολογιστική Ρευστοδυναμική
LDA	Ανεμομετρία λέηζερ Doppler
PDA	Ανεμομετρία φάσης Doppler
Ki	Σταθερές εμπρός και πίσω ρυθμού αντίδρασης (i = 1,2,-1,-2....)
R	Σταθερά αερίου (1.987)
Ko	Σταθερά ρυθμού ισορροπίας για τον σχηματισμό NOx
T	θερμοκρασία
P	πίεση
ΔP	πτώση πίεσης
u	ταχύτητα, αέρα ή αερίου
h	μανομετρική διαφορά ύψους
g	επιτάχυνση της ταχύτητας
Aa,Ab	Συντελεστές στην εξίσωση ρυθμού σχηματισμού του NO
Ef	Ενέργεια ενεργοποίησης
eq	Κατάσταση ισορροπίας
Nu	Αριθμός Nusselt
Re	Αριθμός Reynolds
Pr	Αριθμός Prandtl
e.m.f.	electromotive force
hν	φωταύγεια
O3	όζον
C.V.	gross (κατωτέρα) θερμογόνος δύναμη
U	Συντελεστής ταχύτητας στην διεύθυνση-x
V	Συντελεστής ταχύτητας στην διεύθυνση-y

Χημικά σύμβολα

NOx	Οξείδια του Αζώτου
CO2	Διοξείδιο του Άνθρακα
SOx	Οξείδια του Θείου
NO	Μονοξείδιο του Αζώτου
NO2	Διοξείδιο του Αζώτου
NH3	Αμμωνία
H2	Υδρογόνο
OH	Υδροξύλιο
O2	Οξυγόνο
CH4	Μεθάνιο
N2O	Υποξείδιο του Αζώτου
HCN	Υδροκυάνιο
CN	Κυάνιο
d(NO)/dt	Ρυθμός σχηματισμού NO ανά μονάδα χρόνου
[fuel]	Mole/ m^3 καυσίμου

[N2]	Mole/m^3 αζώτου
[O2]	Mole/ m^3 οξυγόνου
Ni	νικέλιο
Rh	ρόδιο
Pt	λευκόχρυσος
Si	σιλικόνη
N2	Άζωτο
Al2O3	Οξείδιο του αλουμινίου

Σύμβολα στα Ελληνικά

φ	Λόγος (αέρα/καυσίμου) μίγματος
λ	Λόγος περίσσειας αέρα
ρ	πυκνότητα (αέρα/νερού)

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 :	Πορεία αντίδρασης για τον σχηματισμό ενώσεων αζώτου από άζωτο καυσίμου
Σχήμα 2 :	Φωτογραφία – Πειραματική διάταξη, Σύστημα καυστήρα/κλιβάνου με τμήμα αγωγού απαγωγής καυσαερίων και κύκλωμα νερού ψύξης
Σχήμα 3.1 :	Περιγραφικό διάγραμμα της διάταξης του κλιβάνου
Σχήμα 3.2 :	Πειραματική διάταξη, σύστημα καυστήρα/κλιβάνου
Σχήμα 3.3 :	Παράδειγμα διάταξης spill-back atomiser
Σχήμα 3.4 :	Παράδειγμα διάταξης απλού swirl pressure jet atomiser
Σχήμα 3.5 :	Σχέδιο του ακροφυσίου
Σχήμα 3.6 :	Σχέδιο του air cam
Σχήμα 3.7 :	Διάγραμμα της πλήρους πειραματικής διάταξης
Σχήμα 3.8 :	Διάγραμμα της τροφοδοσίας καυσίμου
Σχήμα 3.9 :	Λεπτομέρειες του καυστήρα πετρελαίου καυσίμου
Σχήμα 3.10 :	Σχέδιο του οργάνου δειγματοληψίας με χαλαζιακή επένδυση
Σχήμα 3.11 :	Διάγραμμα βασικής αρχής λειτουργίας του Αναλυτή NO_X
Σχήμα 5.1.1 :	Ακτινικά προφίλ θερμοκρασίας, θυρίδες 1, 2, 3, 4, σταθερή κατάσταση λειτουργίας, 8 mbar
Σχήμα 5.1.2 :	Ακτινικά προφίλ θερμοκρασίας, θυρίδα 1 μόνον, σταθερή κατάσταση λειτουργίας, 8 mbar
Σχήμα 5.1.3 :	Ακτινικά προφίλ θερμοκρασίας, θυρίδα 2 μόνον, σταθερή κατάσταση λειτουργίας, 8 mbar
Σχήμα 5.1.4 :	Ακτινικά προφίλ θερμοκρασίας, θυρίδα 3 μόνον, σταθερή κατάσταση λειτουργίας, 8 mbar
Σχήμα 5.1.5 :	Ακτινικά προφίλ θερμοκρασίας, θυρίδα 4 μόνον, σταθερή κατάσταση λειτουργίας, 8 mbar
Σχήμα 5.1.6 :	Ακτινικά προφίλ θερμοκρασίας, θυρίδα 1 μόνον, σταθερή κατάσταση λειτουργίας, 5 mbar πίεση αέρα
Σχήμα 5.1.7 :	Ακτινικά προφίλ θερμοκρασίας, θυρίδες 1 & 2, σταθερή κατάσταση λειτουργίας, 5 mbar
Σχήμα 5.1.8 :	Ακτινικά προφίλ θερμοκρασίας, θυρίδες 3 & 4, σταθερή κατάσταση λειτουργίας, 5 mbar

Σχήμα 5.1.9 :	Ακτινικά προφίλ θερμοκρασίας, θυρίδες 2 & 4, σταθερή κατάσταση λειτουργίας, 5 mbar, δοκιμή νο.10
Σχήμα 5.1.10:	Μέγιστες θερμοκρασίες προς την Ακτινική απόσταση, 5 mbar & 8 mbar
Σχήμα 5.2.1 :	Προφίλ θερμοκρασιών αξονικά, σταθερή κατάσταση, 8 mbar πίεση αέρα
Σχήμα 5.2.2 :	Θερμοκρασία στον άξονα, σταθερή κατάσταση, 8 mbar
Σχήμα 5.2.3 :	Προφίλ θερμοκρασιών αξονικά, ακτινικές θέσεις 300 mm & 350 mm, 8 mbar πίεση αέρα
Σχήμα 5.2.4 :	Προφίλ θερμοκρασιών αξονικά, ακτινικές θέσεις 150 mm & 200 mm, 5 mbar πίεση αέρα
Σχήμα 5.2.5 :	Προφίλ θερμοκρασιών αξονικά, ακτινικές θέσεις 30 mm, 8 mbar πίεση αέρα
Σχήμα 5.2.6 :	Προφίλ θερμοκρασιών αξονικά, ακτινικές θέσεις 200 mm, 8 mbar πίεση αέρα
Σχήμα 5.2.7 :	Προφίλ θερμοκρασιών αξονικά, ακτινικές θέσεις 370 mm, 5 mbar πίεση αέρα
Σχήμα 5.2.8 :	Μέγιστες θερμοκρασίες ανά αξονική απόσταση, Σύγκριση μεταξύ 5 mbar και 8 mbad
Σχήμα 5.2.9 :	Μέγιστες θερμοκρασίες, Σύγκριση μεταξύ 5 mbar και 8 mbar
Σχήμα 5.3.1-5.3.6 :	Συγκεντρώσεις NO ανάλογα με ακτινική απόσταση, από θυρίδες 1, 2, 3, 4 και τελευταία θυρίδα για 5 mbar και 8 mbar πίεση αέρα σε σταθερή κατάσταση
Σχήμα 5.4.1 -5.4.4 :	Προφιλ NO και Θερμοκρασιών, θυρίδες 1,2,3,4 για 8 mbar πίεση αέρα, σταθερή κατάσταση
Σχήμα 5.5.1-5.5.3 :	Αξονικά προφίλ NO, για διαφορετικές ακτινικές θέσεις, 8 mbar, σταθερή κατάσταση
Σχήμα 5.6.1 – 5.6.5 :	Μεταβολή θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της Ανύψωσης Θερμοκρασίας, για 5 mbar και 8 mbar πίεση αέρα
Σχήμα 5.7.1 – 5.7.3 :	Συγκεντρώσεις NO & NO_X κατά την διάρκεια της Ανύψωσης Θερμοκρασίας, από την τελευταία θυρίδα (αγωγός καυσαερίων), για πιέσεις 5 και 8 mbar
Σχήμα 5.8.1 – 5.8.7 :	Αποτελέσματα της δοκιμής 11, για NO, NOX και N2O συναρτήσει του χρόνου από την έναυση, την θερμοκρασία και ισχύ, κατά τις φάσεις θέρμανσης και σβέσης
Σχήματα Παραρτήματος Α (Α1 – Α9):	**Προβλέψεις του μοντέλου CFD :** (α) Κατανομή θερμοκρασιών (Α-1) (β) Συγκέντρωση NO (Α-2) (γ) Ταχύτητες U και V (Α-3, Α-4) (δ) Συγκέντρωση CO_2, O_2 και HCN (Α-5, Α-6, Α-7) (ε) Τροχιές σταγονιδίων εντός του κλιβάνου (Α-8) (ε) Κινετική ενέργεια της τυρβώδους ροής (Α-9)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1. Καύση και σχηματισμός Ρύπων :

Η δυνατότητα αποδοτικής καύσης ορυκτών καυσίμων αποτέλεσε τον κύριο παράγοντα που συνέβαλε στην παγκόσμια βιομηχανική ανάπτυξη των τελευταίων αιώνων. Η καύση υπήρξε επίσης η βασική μορφή παραγωγής ενέργειας από την πρώτη χρήση της φωτιάς και παρά την σύγχρονη αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας εξακολουθεί σήμερα να αντιπροσωπεύει περισσότερο από 85% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας [1].

Ο υψηλός βαθμός απόδοσης των συστημάτων καύσης, είχε πάντα υψηλό ενδιαφέρον, για πρακτικές εφαρμογές, λόγω του οικονομικού οφέλους από τις σχετική εξοικονόμηση ενέργειας. Ο προσδιορισμός της απόδοσης τέτοιων συστημάτων και η διερεύνηση μεθόδων βελτίωσης της, έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών ερευνών. Ειδικότερα σήμερα, με το πρόβλημα της εξάντλησης των ορυκτών καυσίμων ήδη ορατό και το αυξανόμενο κόστος που επιβάλλεται στα καύσιμα λόγω της σπανιότητας των πηγών, το ενδιαφέρον γύρω από την αποδοτική καύση είναι συνεχώς αυξανόμενο.

Μολαταύτα, κάθε εφαρμογή καύσης συνοδεύεται πάντοτε από την παραγωγή αερίων ρύπων, και από επιπτώσεις στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η ατμοσφαιρική ρύπανση σαν αποτέλεσμα της χρήσης του άνθρακα διαπιστώθηκε από αιώνες ειδικά στην Μεγάλη Βρετανία και άλλες πρώϊμα εκβιομηχανισθείσες χώρες. Με την εκτεταμμένη χρήση των καυσίμων προϊόντων πετρελαίου στο τελευταίο μισό του προηγούμενου αιώνα, τα προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης πολλαπλασιάσθηκαν και καινούριες, πιο εμφανείς και διαδεδομένες μορφές ρύπανσης παρουσιάσθηκαν όπως το ''φαινόμενο του θερμοκηπίου'', το ''φωτοχημικό νέφος'' ή η ''όξινη βροχή.

Σήμερα, θεωρείται ότι η καύση των ορυκτών καυσίμων είναι αδιαμφισβήτητα η κύρια αιτία ρύπανσης του αέρα στην σύγχρονη κοινωνία [2]. Σε μεγάλα

βιομηχανικά κέντρα η απειλή για την δημόσια υγεία, η υποβάθμιση του περιβάλλοντος και η ζημία σε περιουσιακά στοιχεία και στο τοπίο που προκαλούνται από την ρύπανση έχουν φτάσει σε κρίσιμα επίπεδα (2).

Η αυξημένη ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης πάνω στα περιβαλλοντικά ζητήματα, που παρακινείται από την διόγκωση των προβλημάτων ρύπανσης τα τελευταία 30 χρόνια και ο κίνδυνος από τα αυξανόμενα επίπεδα συγκέντρωσης ορισμένων ρυπαντών στην ατμόσφαιρα, έχουν οδηγήσει τις αρχές όλων των βιομηχανοποιημένων χωρών (ΕΕ, ΗΠΑ κλπ), να εισάγουν από κοινού ή μεμονωμένα, αυστηρές νομοθεσίες στις εκπομπές αερίων ρύπων από βιομηχανικά συστήματα και μηχανές καύσης. Αυτά τα νομοθετικά μέτρα, στοχεύουν στον προσδιορισμό και την μείωση των επιτρεπτών επιπέδων εκπομπών αερίων ρύπων από μηχανές και συστήματα καύσης, όπως οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας , οι κλίβανοι και τα βιομηχανικά συγκροτήματα, καθώς και τα αυτοκίνητα και άλλα μέσα μεταφοράς, εφαρμόζοντας συνεχώς αυστηρότερα πρότυπα.

Η αναζήτηση για "καθαρότερες" διατάξεις καύσης και τα συνεχώς αυστηρότερα πρότυπα που θέτουν κυβερνήσεις και διεθνείς οργανισμοί, έχουν οδηγήσει σε εκτεταμμένη έρευνα στο αντικείμενο του περιορισμού της παραγωγής και εκπομπής αερίων ρύπων.

Μερικοί από τους βασικούς ή πρωτεύοντες ρυπαντές που αποτελούν προϊόντα καύσης ορυκτών καυσίμων σε μεγάλου μεγέθους συστήματα καύσης, όμοια με τα προαναφερόμενα, είναι τα οξείδια του θείου, τα οξείδια του αζώτου, το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα, τα σωματίδια και οι οργανικές ενώσεις. Πρωτεύοντες ατμοσφαιρικοί ρύποι, χαρακτηρίζονται οι ρύποι που εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα, σαν αποτέλεσμα μιας καύσης, ενώ υπάρχουν και οι δευτερεύοντες ρύποι οι οποίοι προέρχονται από τις χημικές και φωτοχημικές αντιδράσεις των πρωτευόντων ρύπων στην ατμόσφαιρα [2].

Κάποια από τα προϊόντα της καύσης, όπως οι υδρατμοί και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) για παράδειγμα, δεν έχουν άμεσες επιπτώσεις στην υγεία, μπορούν ωστόσο να επιφέρουν σημαντικές κλιματικές επιπτώσεις, όπως είναι η περίπτωση του "φαινομένου του θερμοκηπίου". Η πλειονότητα ωστόσο των ρυπαντών, συμπεριλαμβανομένων των NO_X , SO_X και των οξυγονωμένων υδρογονανθράκων είναι τοξικοί ή επιβλαβείς και μπορούν να προκαλέσουν την μόλυνση των υδάτων ή

του εδάφους μέσω της βροχής ή να διαβρώσουν μέταλα και κτίρια [2], πέρα από τους άμεσους κινδύνους για την υγεία.

Εκτός από τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων σε αέρια φάση, υγρά και στερεά σωματίδια μπορεί να ενοπισθούν σε αιώρηση. Οι υγρές εκπομπές οφείλονται σε μη καύση ή μερική καύση του καυσίμου, ενώ τα βασικά στερεά σωματίδια αποτελούνται από αιθάλη. Άλλα στερεά προϊόντα μπορεί να είναι διάφορες άκαυστες μεταλλικές ενώσεις και ορυκτά υλικά. Οι μεταλλικές ενώσεις είναι τοξικές, ιδιαίτερα εκείνες που περιέχουν μόλυβδο. Επίσης ορισμένοι από του οξυγονομένους υδρογονάνθρακες έχει βρεθεί ότι είναι καρκινογόνοι [2]. Αλλά και οι δυνατές οσμές κάποιων προϊόντων της καύσης, όπως οι ενώσεις του θείου, συνιστούν επίσης κίνδυνο για την υγεία.

Ειδικά ο έλεγχος των εκπομπών NO_x έχει γίνει αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για τους ερευνητές της καύσης τις τελευταίες δεκαετίες. Όπως προαναφέρθηκε, συνεχώς αυστηρότερη νομοθεσία εφαρμόζεται για τον περιορισμό των εκπομπών NO_x εξαιτίας της σχέσης τους με την "όξινη βροχή" και πιο πρόσφατα με το πρόβλημα του στρώματος όζοντος.

Πολλές μέθοδοι για την μείωση των οξειδίων του αζώτου έχουν ερευνηθεί και δοκιμασθεί [1]. Η χρήση της τεχνικής της καύσης πολλών βαθμίδων (staged combustion) είναι η πιο συνηθισμένη λύση που εφαρμόζεται, και έχει σήμερα εγκατασταθεί σε πολλά συστήματα καύσης ορυκτών καυσίμων.

Η διαδικασία της εκπομπής οξειδίων του αζώτου, σε κάποιο βαθμό δεν έχει ακόμη προσδιορισθεί πλήρως. Τα δύο βασικά οδείδια του αζώτου που εκπέμπονται από διεργασίες καύσης είναι το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO_2), που αποκαλούνται συνήθως από κοινού εκπομπές NO_X. Ανάλογα με τις συνθήκες της καύσης, η δημιουργία NO μπορεί να αντιπροσωπεύει μόνον ένα μικρό ποσοστό της συγκέντρωσης αζώτου μετά την καύση. Ωστόσο ακόμη και μικρές ποσότητες νιτρικού οξέως, απαιτείται να ελέγχονται καθώς το NO μετατρέπεται με ταχύτητα σε διοξείδιο του αζώτου (NO_2) αντιδρώντας με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Το NO_2 δε είναι τοξικό σε χαμηλές συγκεντρώσεις ενώ συσχετίζεται επίσης με την δημιουργία του 'νέφους' [2].

Οι κίνδυνοι για την υγεία από την έκθεση σε οξείδια του αζώτου είναι ποικίλοι. Το μονοξείδιο του αζώτου από μόνο του επιδρά άμεσα στο νευρικό σύστημα και μεταβάλλει την αιμοσφαιρίνη του αίματος, παρουσιάζοντας μεγάλη χημική συνάφεια με την αιμοσφαιρίνη. Ωστόσο, λόγω της ταχείας μεταμόρφωσής του σε NO_2, μέσω της οξείδωσης, στο δέρμα, το NO δεν θεωρείται περισσότερο τοξικό από το διοξείδιο του αζώτου. Το διοξείδιο έχει ερεθιστική δράση στους πνεύμονες, προκαλώντας οιδήματα, και επίσης επηρεάζει την άνω αναπνευστική οδό και τα μάτια. Επίσης θεωρείται ότι μειώνει την αρτηριακή πίεση, προκαλεί νευρικότητα και μπορεί να λειτουργήσει σαν ναρκωτικό [2].

Η στροφή προς τα βαρύτερα και υψηλότερου βαθμού διάσπασης (highly cracked) πετρελαιοειδή σαν αποτέλεσμα των προσπαθειών να ανακτηθεί το μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό καυσίμων μεγαλύτερης ενεργειακής απόδοσης [14] επιδείνωσε το πρόβλημα των εκπομπών σωματιδίων από την καύση βαρέου πετρελαίου (μαζούτ) και παρουσιάσθηκαν τα αντίστοιχα προβλήματα της παρουσίας NO_X , λόγω της αύξησης σε περιεχόμενο άζωτο στο καύσιμο και του σχηματισμού NO_X από την καύση σωματιδίων [1]. Η μελέτη των εκπομπών καύσης πετρελαίου καυσίμου (μαζούτ – ντήζελ κλπ) έχει συνεπώς αυξανόμενο ενδιαφέρον.

Για τον έλεγχο των εκπομπών ρύπων προϊόντων της καύσης και των επιπτώσεών τους στο περιβάλλον, υπάρχουν συνοπτικά τρεις τρόποι δράσης : Η αποτροπή του σχηματισμού, η καταστροφή τους μετά τον σχηματισμό τους και τέλος η επεξεργασία των καυσαερίων ή η αντικατάσταση της διαδικασίας που τις παράγει.

Μολονότι η αποτροπή του αρχικού σχηματισμού τους είναι η δραστικότερη λύση, δεν είναι εφαρμόσιμη σε όλες τις περιπτώσεις. Τα προϊόντα ατελούς καύσης λειτουργούν συχνά σαν ενδιάμεσοι παράγοντες στην οξείδωση των καυσίμων υδρογονανθράκων και συνεπώς ο σχηματισμός τους είναι αναπόφευκτος κατά την διάρκεια της καύσης [3].

Μία πρόσθετη δυσκολία προέρχεται από το γεγονός ότι η παραγωγή εκπομπών NO_X συνδέεται άμεσα με την αύξηση του βαθμού απόδοσης των κύκλων σύγχρονων συστημάτων καύσης (π.χ. μηχανών παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος), στοιχείο που αποτελεί εμπόδιο στις προσπάθειες μείωσής τους με δεδομένη την

συνεχή αναζήτηση μεγαλύτερης αποδοτικότητας των συγκεκριμένων μηχανών και περιορισμό του οικονομικού τους κόστους.

Για τις αζωτούχες εκπομπές πλέον κατάλληλη μέθοδος αποτροπής είναι μέσω μεταβολής της διαδικασίας καύσης ή του ελέγχου της διαδικασίας. Μέθοδοι για την αποτροπή των αζωτούχων εκπομπών με μετατροπή της διαδικασίας καύσης [10] έχουν αποδειχθεί πολύ επιτυχείς, οδηγώντας στην ασφαλή απόρριψη στην ατμόσφαιρα καταλοίπων σχηματισμού NO_X. Από αυτές τις τεχνικές η καύση δύο βαθμίδων είναι η περισσότερο γνωστή και χρησιμοποιημένη χωρίς ωστόσο να έχει ακόμη κατανοηθεί πλήρως θεωρητικά. Σε άλλες περιπτώσεις η απομάκρυνση του σχηματισμένου NO_X έχει επιχειρηθεί μέσω τεχνικών μείωσης, προσρόφησης και διαχωρισμού [11], που εξηγούνται περαιτέρω στα επόμενα.

1.2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι στόχοι της παρούσας πειραματικής εργασίας ήταν να ερευνηθεί η απόδοση ενός πραγματικού συστήματος καύσης με καυστήρα ψεκασμού (μείγμα light / gas fuel oil), και συγκεκριμένα του κλιβάνου ισχύος 2MW που υπάρχει στο σχετικό εργαστήριο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου της Ουαλίας Κολλέγιο Κάρντιφ (UWCC) (πρόσφατα μετονομάσθηκε σε Πανεπιστήμιο του Κάρντιφ), καταγράφοντας τα χαρακτηριστικά κατανομής της θερμοκρασίας και των αερίων ρύπων που εκλύονται από το σύστημα αυτό με ιδιαίτερη έμφαση στις εκπομπές NO_X και επιχειρώντας να εξετασθούν οι λειτουργικοί παράγοντες που καθορίζουν το επίπεδο των εκπομπών, καθώς και να μελετηθούν και προταθούν τρόποι μείωσης των επιπέδων εκπομπών.

Δεδομένα σχετικά με τις εκπομπές NO_X έχουν καταγραφεί από πολυάριθμους ερευνητές και για διάφορα είδη συστημάτων καύσης προϊόντων πετρελαίου ωστόσο το μεγαλύτερο μέρος τους έχει επικεντρωθεί στις εκπομπές καυσαερίων. Στην συγκεκριμένη εργασία επιχειρήθηκε να ληφθούν μετρήσεις τόσο από τις θέσεις λήψεις καυσαερίων όσο και από τις περιοχές του εσωτερικού της φλόγας (in-flame) όσο και μετά την φλόγα (post-flame).

Οι μετρήσεις στο εσωτερικό της φλόγας ή κοντά στην περιοχή της φλόγας γίνονται με κύριο σκοπό να προσδιορισθούν οι ρυθμοί μετάδοσης θερμότητας, μεταβολής μάζας και ορμής εντός της φλόγας και από την φλόγα προς τις

επιφάνειες που την περιβάλλουν. Οι μετρήσεις απεικονίζουν τις κατανομές θερμοκρασίας στον χώρο, την ταχύτητα, πίεση, συγκέντρωση αερίων και στερεών ή υγρών σωματιδίων και άλλα.

Τα προγνωστικά μοντέλα που υπάρχουν επιτρέπουν, θεωρητικά, τον προσδιορισμό των πιο πάνω μεγεθών επιλύοντας τις σχετικές εξισώσεις καύσης και χρησιμοποιώντας γνωστές αρχικές και τελικές οριακές συνθήκες. Ωστόσο, παρά το ότι έχει γίνει σημαντική πρόοδος στην χρήση αριθμητικών μεθόδων για την επίλυση εξισώσεων και την αυξανόμενη υπολογιστική ισχύ, η γνώση για τα πραγματικά συστήματα φλόγας εξαρτάται κυρίως από την άμεση παρατήρηση. Επιπλέον, η ανάπτυξη και βελτίωση των προγνωστικών μοντέλων διευκολύνεται από την ύπαρξη λεπτομερών μετρήσεων που επαληθευθούν τις διάφορες θεωρήσεις και παραδοχές, όπως για τα περίπλοκα χαρακτηριστικά των περιοχών τυρβώδους ροής.

Σκοπός έτσι ήταν η συλλογή αυτών των πειραματικών αποτελεσμάτων και πληροφοριών να χρησιμοποιηθεί και για την επαλήθευση προγνωστικών μοντέλων για την απόδοση του συστήματος. Για αυτό το σκοπό τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με προκαταρκτικές προβλέψεις που είχαν γίνει με το πακέτο λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής FLUENT και παρουσιάζονται στο σχετικό Παράρτημα Α.

Τέλος, αντικείμενο της εργασίας ήταν να γίνει επεξεργασία των δεδομένων που συνελλέγησαν και κατά την διάρκεια της επί 72 ώρες συνεχούς δοκιμαστικής λειτουργίας του καυστήρα που έγινε για το Στέγνωμα του Κλιβάνου (Drying – Out Run), και πραγματοποιήθηκε λίγο μετά την εγκατάσταση του κλιβάνου. Τα δεδομένα αυτά θα γίνονταν αντικείμενο επεξεργασίας προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος, όσον αφορά κυρίως το προφίλ θερμοκρασιών και ισχύος.

Ο κλίβανος που αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της εργασίας είχε τεθεί πρόσφατα σε λειτουργία στο εργαστήριο Καύσης του Πανεπιστημίου του Κάρντιφ Ουαλίας. Τα όργανα λήψης θερμοκρασιών και δειγματοληψίας αερίων εγκαταστάθηκαν σε συγκεκριμένες θυρίδες θαλάμου καύσης του χαλύβδινου κλιβάνου, που ήταν κυλινδρικής διατομής μορφής τούνελ, με επένδυση από πυρίμαχο υλικό και διαστάσεις : 4.2 μέτρα σε μήκος και 0.8 μέτρα εσωτερική διάμετρο. Παρουσιάζεται σχηματικά στο επόμενο κεφάλαιο και στο Σχήμα 3.1.

Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα μίγμα light fuel oil (ντήζελ) αναμεμιγμένο με ένα ποσοστό gas oil (SHELL Gas Oil). Επισυνάπτεται το φύλλο προδιαγραφών του Gas Oil.

Πριν την παρουσίαση της πειραματικής διάταξης, της διαδικασίας μετρήσεων και των αποτελεσμάτων της, εκτίθεται μία συνοπτική παρουσίαση της βιβλιογραφικής έρευνας για τα συστήματα καύσης τύπου ψεκασμού με ιδιαίτερη αναφορά στην δημιουργία NO_X και την εκπομπή τους, στο Κεφάλαιο 2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ – ΘΕΩΡΙΑ

2.1. Εκπομπές Οξειδίων του Αζώτου

Τα δύο βασικά οξείδια του αζώτου που παράγονται από τις διαδικασίες καύσης είναι το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO_2). Αυτά τα δύο αέρια συνήθως αναφέρονται από κοινού ως εκπομπές NO_X.

Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου κατά την διάρκεια της καύσης, έχουν απασχολήσει μηχανικούς και γενικά επιστήμονες από πολύ καιρό, καθώς είναι ένας εξακριβωμένος παράγοντας δημιουργίας του "φωτοχημικού νέφους".

Το άζωτο μπορεί να αντιδράσει με οξυγόνο και να παράγει υποξείδιο του αζώτου (N_2O), N_2O_3, τετροξείδιο του αζώτου (N_2O_4), πεντοξείδιο του αζώτου (N_2O_5) και τριοξείδιο του αζώτου (NO_3). Ωστόσο εκτεταμμένες έρευνες έχουν αποδείξει ότι το μονοξείδιο του αζώτου (NO) είναι το κυρίαρχο οξείδιο που εκπέμπενται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση από τις διεργασίες καύσης, μαζί με το NO_2 και κατά συνέπεια οι πειραματικές μελέτες έχουν επικεντρωθεί σε αυτά τα δύο παράγωγα. Διάφορες έρευνες [25, 28] έχουν δείξει ότι οι συγκεντρώσεις NO_2 που παράγονται είναι επίσης σημαντικές, ωστόσο οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις εξαρτώνται και από τα ειδικά χαρακτηριστικά του συστήματος, καθώς μπορούν εύκολα να γίνουν αντιδράσεις μετατροπής του NO σε NO_2 μέσα στο σύστημα μέτρησης, για παράδειγμα κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας. Ένα παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο γίνεται αυτή η μετατροπή από την βιβλιογραφία [32], παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Πρόσφατες έρευνες δείχνουν ότι τα επίπεδα εκπομπών N_2O αντιστοιχούν φυσιολογικά σε κατά μέγιστο 10% των συνολικών εκπομπών NO_X (NO + NO_2) [11]. Συνεπώς η συζήτηση επικεντρώνεται κυρίως στην παραγωγή του μονοξειδίου του αζώτου (NO).

Κατά την διάρκεια της καύσης ενός καυσίμου, έχουν διακριθεί τρεις κατηγορίες σχηματισμού μονοξειδίου του αζώτου, ανάλογα με την πηγή του αζώτου και την χημική κινητική της οξείδωσης του αζώτου. Οι δύο κύριες πηγές NO στην

καύση των συμβατικών καυσίμων είναι από την οξείδωση του ατμοσφαιρικού αζώτου (θερμικό NO) και από την οξείδωση των ενώσεων που περιέχουν άζωτο μέσα στο καύσιμο (NO καυσίμου). Το θερμικό NO αναφέρεται σε αυτό που σχηματίζεται με τον μηχανισμό Zeldovich και στις περισσότερες διατάξεις καύσης αυτή η διεργασία θεωρείται η κυρίαρχη πηγή NO_X. Ωστόσο, σε συστήματα που χρησιμοποιούν αργό πετρέλαιο ή άνθρακα, τα οποία συνήθως περιέχουν σημαντικά ποσά οργανικών ενώσεων αζώτου, το άζωτο καυσίμου είναι μία σημαντική πηγή NO. Ο σχηματισμός NO καυσίμου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την στοιχειομετρία της φλόγας.

Η άλλη πηγή NO προκύπτει από έναν μηχανισμό που περιλαμβάνει την αντίδραση των σωματιδίων υδρογονανθράκα και του μοριακού αζώτου μέσα στην φλόγα, ο οποίος είναι γνωστός σαν μηχανισμός σχηματισμού "αμέσου" NO [14]. Ο μηχανισμός αυτός είναι επίσης γνωστός σαν μηχανισμός Fenimore.

Το άμεσο NO έχει μία ασθενή εξάρτηση από την θερμοκρασία, σύντομο χρόνο ζωής και είναι σημαντικό μόνον για φλόγες πολύ πλούσιες σε καύσιμο. Ο Hayhurst et al [15] έχει αποφανθεί ότι το άμεσο NO είναι αμελητέο όταν συγκρίνεται με το καύσιμο NO.

Οι μηχανισμοί για τον σχηματισμό οξειδίων του αζώτου, προσλαμβάνουν το άζωτο είτε από τον αέρα, όπως το θερμικό ή το άμεσο NO ή από μέρη του καυσίμου (NO καυσίμου). Ενώ το NO έχει παραδοσιακά θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει περισσότερο από 95% των αζωτούχων προϊόντων της καύσης, μία εξέταση των πρόσφατων δεδομένων υποδεικνύει ότι ένα ποσοστό 76% είναι καλύτερη εκτίμηση [3], το υπόλοιπο ποσοστό αντιστοιχεί σε NO_2, N_2O κλπ. Το ποσοστό διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την πηγή της καύσης. Αυτού του είδους οι ενώσεις τείνουν να μετατραπούν σε άλλες πολύ εύκολα, ένα χαρακτηριστικό που κάνει την μέτρησή τους δύσκολη.

Έχουν μελετηθεί και δοκιμασθεί διάφορες θεωρητικές, πειραματικές και αριθμητικές μέθοδοι για τη μείωση των εκπομπών NOx. Σε αυτές περιλαμβάνεται η χρήση της έγχυσης νερού, η λειτουργία χωρίς προθέρμανση του αέρα, η καύση πολλών βαθμίδων, καθώς και η μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας, όπως η χρήση περίσσειας αέρα, ο ρυθμός έναυσης, η κατανομή καυσίμου-αέρα, η προανάμιξη καυσίμου και αέρα, πυρίμαχη επένδυση των καυστήρων, αποσύνθεση του μονοξειδίου του αζώτου σε υψηλή θερμοκρασία με τη βοήθεια των σωλήνων κρούσεως, προσθήκη ατμού και χρήση των καταλυτικών μετακαυστήρων. Ορισμένες

από αυτές τις μεθόδους αναπτύσσονται σε επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

Οι αζωτούχες ενώσεις επιδέχονται περισσότερο μείωση, μέσω της τροποποίησης ή του ελέγχου της διαδικασίας καύσης, και σημαντικές επιτυχίες έχουν σημειωθεί στον τομέα αυτόν, ιδίως στην περίπτωση των οξειδίων του αζώτου που παράγονται από την οξείδωση του ατμοσφαιρικού αζώτου, όπως τα θερμικά NOx. Εκτός από αυτό, υπάρχουν δυνατότητες για την αξιοποίηση του περιβάλλοντος καύσης ώστε να περιορισθεί η παραγωγή τους ή να ενισχυθεί η καταστροφή τους.

2.2. Διαδικασία της Καύσης

Τρία διαφορετικά στοιχεία υπάρχουν σε κάθε σύστημα καύσης: το καύσιμο, το οξειδωτικό και οι διαλύτες. Ένα καύσιμο περιέχει ενώσεις πλούσιες σε ενέργεια, όπως οι ενώσεις άνθρακα - άνθρακα, διοξειδίου του άνθρακα - υδρογόνου και υδρογόνου – δεσμών υδρογόνου και είναι η κοινή πηγή χημικού ενεργειακού δυναμικού. Κατά τη διάρκεια της καύσης, τα καύσιμα οξειδώνονται και το χημικό ενεργειακό δυναμικό τους μετατρέπεται σε θερμική και ενίοτε μηχανική ενέργεια.

Κατά τη διάρκεια της καύσης, η αντίδραση του οξειδωτικού με το καύσιμο μετατρέπει το χημικό ενεργειακό δυναμικό που υπάρχει αποθηκευμένο στο καύσιμο, σε θερμική ενέργεια. Το πιο κοινό οξειδωτικό είναι το μοριακό οξυγόνο, ένα συστατικό του αέρα. Το οξειδωτικό μπορεί να είναι σε αέρια μορφή όπως και σε στερεή ή υγρή.

Το τρίτο στοιχείο που μπορεί να υπάρχει σε ένα σύστημα καύσης είναι ο διαλύτης. Ο διαλύτης είναι μια ουσία που συμμετέχει φυσικά και όχι χημικά στην διαδικασία της καύσης, όπως ένα καύσιμο ή όπως ο παράγονας οξείδωσης και συχνά επηρεάζει τη διαδικασία της καύσης.

Ο πιο κοινός διαλύτης είναι το άζωτο, το οποίο αποτελεί ποσοστό άνω του 78% κατ' όγκον του ατμοσφαιρικού αέρα [5]. Συστατικά του αέρα, όπως οι υδρατμοί και τα αδρανή αέρια είναι επίσης διαλύτες, όπως και οι ανόργανες ενώσεις τέφρας που εμφανίζονται στον άνθρακα και τα προϊόντα πετρελαίου.

Ένα στοιχειομετρικό μείγμα καυσίμου και οξειδωτικού ορίζεται ως το μείγμα στο οποίο η ποσότητα του οξειδωτικού παράγοντα είναι ακριβώς αρκετή για να οξειδωθεί πλήρως το καύσιμο, δηλαδή στοιχειομετρικό μείγμα είναι εκείνο στο οποίο

η αναλογία καυσίμου προς οξειδωτικό είναι ακριβώς αυτή που θεωρητικά απαιτείται, για την πλήρη οξείδωση (καύση).

Ο στοιχειομετρικός λόγος αέρα / καυσίμου για το συγκεκριμένο σύστημα δόθηκε ότι είναι 14,44.

Ένα εύφλεκτο μείγμα που περιέχει περίσσεια αέρα (ή οξειδωτικό) αναφέρεται ως «φτωχό». Το αντίθετο συμβαίνει όταν υπάρχει ανεπάρκεια οξειδωτικού για την πλήρη οξείδωση του διαθέσιμου καυσίμου, και τότε το μείγμα αναφέρεται ως «πλούσιο». Στην πλούσια καύση τα προϊόντα είναι ένα μείγμα από μερικώς και πλήρως οξειδωμένα είδη. Το μονοξείδιο του άνθρακα, το υδρογόνο, η αιθάλη και μικρές ποσότητες των υψηλότερων υδρογονανθράκων είναι μερικά από τα προϊόντα της μερικής οξείδωσης του μεθανίου, η ακριβής σύνθεση είναι ανάλογη με το βαθμό "πλούτου" της διαδικασίας καύσης.

Συχνά είναι επιθυμητό να συγκριθούν διαφορετικές διαδικασίες και/ή διαφορετικά καύσιμα με βάση την περίσσεια ή ανεπάρκεια οξειδωτικού. Ο λόγος ανάμιξης (δηλαδή ο λόγος 'αέρα/καυσίμου'), φ, είναι μία παράμετρος που διευκολύνει σε αυτό το είδος της σύγκρισης, και ορίζεται ως εξής :

φ = (πραγματικός λόγος αέρα καυσίμου) / (στοιχειομετρικός λόγος αέρα καυσίμου)

Συνεπώς το $\varphi > 1$ ορίζει πτωχή διεργασία καύσης

και το $\varphi \leq 1$ ορίζει πλούσια ή στοιχειομετρική διαδικασία καύσης αντίστοιχα.

Διάφοροι ορισμοί του φ μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία, ο ορισμός που αναφέρεται παραπάνω (αναλογία αέρα / καυσίμου) είναι αυτή που χρησιμοποιείται σε αυτή την πειραματική εργασία.

Ο πραγματικός λόγος αέρας/καυσίμου ορίζεται ως ο λόγος της παροχής αέρα προς την παροχή καυσίμου, που μετράται στο σύστημα καύσης.

Η σημασία των πλούσιων σε καύσιμο διεργασιών καύσης είναι ότι μπορούν να σχεδιασθούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε ρύποι όπως τα οξείδια του αζώτου, που παράγονται από το άζωτο που βρίσκεται αρχικά δεσμευμένο στο καύσιμο, μπορούν να μειωθούν από τα μερικώς καμμένα προϊόντα. Το 'Άμεσο ΝΟ' έχει αποδειχθεί ότι

αυξάνεται σε καύση με περίσσεια καυσίμου ή σε καύση κοντά στο στοιχειομετρικό λόγο μείγματος και αυτό είναι σημαντικό σε χαμηλότερες θερμοκρασίες καύσης.

2.3 Τύποι και Μηχανισμοί Σχηματισμού NO_X :

2.3.1. Θερμικό NOx – Ο μηχανισμός Zeldovich :

Θερμικό NOx σχηματίζεται από την αντίδραση ατμοσφαιρικού αζώτου με οξυγόνο, σύμφωνα με τον μηχανισμό που προτάθηκε από τον Zeldovich [49,50,51] και συμβαίνει αποκλειστικά σε υψηλότερες θερμοκρασίες δηλαδή στην περιοχή των 1500÷1800 K.

Ο μηχανισμός του Zeldovich ορίζεται ως εξής :

$$N_2 + O \rightarrow NO + N \quad (1)$$
$$N + O_2 \rightarrow NO + O \quad (2)$$

και αναφέρεται ότι τα άτομα – Ο προέρχονται από την ισορροπία : $O_2 = 2O$.

Οι σταθερές εμπρός και πίσω ρυθμού για τις αντιδράσεις (1) και (2) έχουν μετρηθεί σε πολυάριθμες πειραματικές μελέτες και βρέθηκαν ότι είναι (Baulch et al - Hamdi) :

$$K_1 = 7.6 \times 10 \text{ ^}13 \exp(-75.4\text{kcal/RT}) \quad (3)$$
$$K_2 = 6.4 \times 10 \text{ ^}9\text{Texp}(-6.25\text{kcal/RT}) \quad (4)$$

Η αντίδραση (1) είναι σήμερα γενικά αποδεκτή ως το βήμα προσδιορισμού του ρυθμού (βήμα ένα) για τον σχηματισμό σχεδόν όλου του NO στο αέριο μετά την φλόγα ('post - flame'), δηλαδή στην περιοχή όπου ο ριζικός ανασυνδυασμός έχει σχεδόν ολοκληρωθεί και η θερμοκρασία είναι πλέον καθορισμένη.

Έχει αναφερθεί επίσης [19] ότι σε φλόγες σχεδόν στοιχειομετρικές ή πλούσιες σε καύσιμο, υπάρχει επίσης συμβολή στον σχηματισμό NO, μέσω της αντίδρασης :

$$N + OH \Longrightarrow H + NO \quad (5)$$

της οποίας η σταθερά ρυθμού αναφέρεται στα επόμενα ως K_3.

Οι πιο πάνω αντιδράσεις είναι γενικά γνωστές σαν επέκταση του μηχανισμού Zeldovich. Μπορεί να διαπιστωθεί ότι ο ρυθμός σχηματισμού NO εξαρτάται από την συγκέντρωση των ριζών και κυρίως από αυτή των ατόμων-O. Έτσι, η ακριβής εκτίμηση αυτής της συγκέντρωσης είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της εκπομπής NO_X.

Οι ρυθμοί σχηματισμού αυτών των αντιδράσεων είναι σημαντικοί μόνον σε υψηλότερες θερμοκρασίες, μεγαλύτερες από 1500-1800 K και έχει βρεθεί ότι διπλασιάζονται για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας φλόγας της τάξης των 40 K [52]. Ο ρυθμός επίσης αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης οξυγόνου.

Έτσι ο ρυθμός σχηματισμού του θερμικού NO εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία, ώστε οι μειώσεις της τοπικής θερμοκρασίας φλόγας και της συγκέντρωσης οξυγόνου μπορούν να βοηθήσουν στην μείωση του σχηματισμού NO.

Γενικά, η εξίσωση του ρυθμού σχηματισμού του NO προσεγγίζεται, για την καύση πτωχών μειγμάτων καυσίμου-αέρα με την :

$$\frac{d(NO)}{dt} = 2K_1[N_2][O] \quad (6)$$

Ο ακριβής προσδιορισμός του ρυθμού σχηματισμού NO έχει γίνει αντικείμενο συζήτησης από πολλούς ερευνητές. Ωστόσο έχει αποδειχθεί ότι όταν λειτουργεί ο μηχανισμός Zeldovich, οι τιμές των ατόμων-O υπερβαίνουν σημαντικά την τιμή ισορροπίας τους και αυτό είναι ένα σημαντικό στοιχείο σχετικό με την εξάρτηση του μηχανισμού, από την ύπαρξη ατόμων O [8-Combustion Science].

Οι Campbell και Thrush [21] έχουν προσδιορίσει, στις μελέτες τους, ότι η αναλογία της σταθεράς ρυθμού K_3 για την αντίδραση [5], είναι σε αντιστοιχία με την σταθερά ρυθμού για την αντίδραση :

$$O + OH \rightarrow O_2 + H \quad (7) \quad \text{στους 320 K,}$$

που οδηγεί σε τιμή του $K_3 = 3.3 \pm 1.6 \times 10^{13}$ cm^3/mole.sec, στους 320 K.

Αν υποτεθεί μία προσέγγιση σταθερής κατάστασης (steady state) για την συγκέντρωση ατόμων Αζώτου, και επίσης υποθέτοντας ότι η αντίδραση [7] είναι σε ισορροπία, ο ρυθμός σχηματισμού NO μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη έκφραση :

$$d(NO)/dt = 2K1[O][N_2]\left(\frac{1-[NO]^2/K[O_2][N_2]}{1+K_{-1}[NO]/K_2[O_2]+K_3[OH]}\right) \quad (8)$$

όπου $K = (K_1 / K_{-1})(K_2/K_{-2})$ = είναι η σταθερά ισορροπίας για την αντίδραση :

$$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO \quad (9)$$

Καθώς οι τιμές των σταθερών ρυθμού για τις εξισώσεις (1), (2), (5) είναι σχετικά προσδιορισμένες, ο υπολογισμός του ρυθμού σχηματισμού NO απαιτεί τιμές των τοπικών θερμοκρασιών και των τοπικών συγκεντρώσεων O_2, N_2, O και OH.

Θεωρώντας ξανά την προσέγγιση του ρυθμού σχηματισμού NO με την εξίσωση (7), η έκφραση μπορεί να επεκταθεί συνυπολογίζοντας την επίδραση της συγκέντρωσης ατόμων-O.

Η ισορροπία της συγκέντρωσης ατόμων-O δίνεται από την εξίσωση :

$$[O]_{eq} = \left(\frac{K_o}{RT^{1/2}}\right)[O_2]^{1/2}{}_{eq} \quad (10)$$

όπου το Ko ορίζει την σταθερά ισορροπίας για την αντίδραση :

$$\frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow O \quad (11)$$

Χρησιμοποιώντας την τιμή που έχει δοθεί για την K1 και μία έκφραση για την Ko = 3.6 x 10 ^3 exp [-31,090/T]atm^1/2 από την παραπομπή (22) ο ρυθμός σχηματισμού NO μπορεί να γραφεί :

$$\frac{d(NO)}{dt} = 6\times10^{16}\,T_{eq}^{-1/2}\exp[-69090/T_{eq}]\times[O_2]^{1/2}{}_{eq}[N_2]_{eq}\ \text{moles}/\text{cm}^3\cdot\text{sec} \quad (12)$$

όπως πρότεινε ο Bowman [23] για την καύση των περισσοτέρων ισχνών μειγμάτων καυσίμου-αέρα. Αυτή η έκφραση δείχνει ξανά ότι οι υψηλές θερμοκρασίες και οι υψηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου στα αέρια μετά την καύση οδηγούν σε υψηλούς ρυθμούς σχηματισμού NO. Έτσι, ο σχηματισμός θερμικού NO είναι βασικά εξαρτημένος από την υπερ-ισορροπία σχηματισμού ατόμων-O.

Σύμφωνα με συμπεράσματα του Zeldovich και των συνεργατών του [16] οι ρυθμοί σχηματισμού NO είναι σημαντικά μικρότεροι από τον ρυθμό καύσης και έτσι το περισσότερο NO σχηματίζεται μετά την ολοκλήρωση της καύσης.

Στην ζώνη καύσης, λόγω της υπερ-ισορροπίας συγκέντρωσης ριζών, οι ρυθμοί σχηματισμού NO είναι σημαντικά υψηλότεροι από ότι στην ζώνη μετά την φλόγα. Αυτό το ταχέως σχηματιζόμενο NO αποκαλείται 'άμεσο NO'.

Σύμφωνα με τον Fenimore [14], σε πλούσιες σε καύσιμο φλόγες, το άμεσο NO μπορεί επίσης να σχηματισθεί, από τις αντιδράσεις :

$$N_2 + CH \rightarrow HCN + N \qquad (13)$$
$$N_2 + C_2 \rightarrow 2CN \qquad (14)$$

Σχηματισμός του NO προκύπτει έτσι από την οξείδωση των HCN και CN (δείτε και την επόμενη παράγραφο B). Σε κάθε περίπτωση ο σχηματισμός 'αμέσου NO' απαιτεί την συμμετοχή σωματιδίων υδρογονανθράκων τα οποία αντιδρούν με το μοριακό άζωτο, σύμφωνα με την αντίδραση (14).

Η αποσύνθεση του NO γίνεται με την αντίδραση (2) στην αντίστροφη διεύθυνση.

Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 1800 K και κάτω από συνθήκες πτωχού καυσίμου, έχει αναφερθεί [24, Malte & Pratt] ότι το N_2O μπορεί επίσης να παίξει σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό NO, μέσω των ακόλουθων αντιδράσεων :

$$N_2 + O + M = N_2O + M$$
$$N_2 + OH = N_2O + H$$
$$N_2O + O = NO + NO$$

Ο σχηματισμός του NO από αυτές τις αντιδράσεις είναι ωστόσο χαμηλότερος σε σύγκριση με τον συνολικό σχηματισμό NO στην κλίμακα θερμοκρασιών πάνω από τους 1800 K και μπορεί να είναι σημαντικος σε περιοχές χαμηλότερων θερμοκρασιών για φλόγες πτωχού λόγου καυσίμου-αέρα. Έχει σημειωθεί [24] ότι το NO που παράγεται με αυτό τον τρόπο είναι πιθανό να έχει πρακτική σημασία μόνον κάτω από συνθήκες όμοιες με αυτές αναδευόμενου αντιδραστήρα.

Καθοδηγούμενος από αυτή την παρατήρηση, ο Fenimore συμπέρανε ότι αντιδράσεις που περιλαμβάνουν είδη υδρογονανθράκων έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην διαδικασία σχηματισμού NO (άμεσου NO), καθώς το 'άμεσο NO' που δημιουργείται σε φλόγες υδρογονανθράκων πλούσιες σε καύσιμο, δεν μπορεί να εξηγηθεί από τις συγκεντρώσεις υπερ-ισορροπίας O προς OH, καθώς οι συγκεντρώσεις που απαιτούνται για να εξηγήσουν τους παρατηρηθέντες ρυθμούς σχηματισμού NO ήταν σημαντικά μεγαλύτερα από τις τιμές μερικής ισορροπιας.

2.3.2. Σχηματισμός NO καυσίμου :

Ο σχηματισμός του NO μέσω του καυσίμου αζώτου όπως προαναφέρθηκε εξαρτάται άμεσα από την στοιχειομετρία της φλόγας. Η εκπομπή NOx από την καύση του καυσίμου με άζωτο χημικά δεσμευμένο αυξάνεται από το αποκαλούμενο NO καυσίμου, το οποίο αντιπροσωπεύει το NO που σχηματίζεται από το καύσιμο άζωτο.

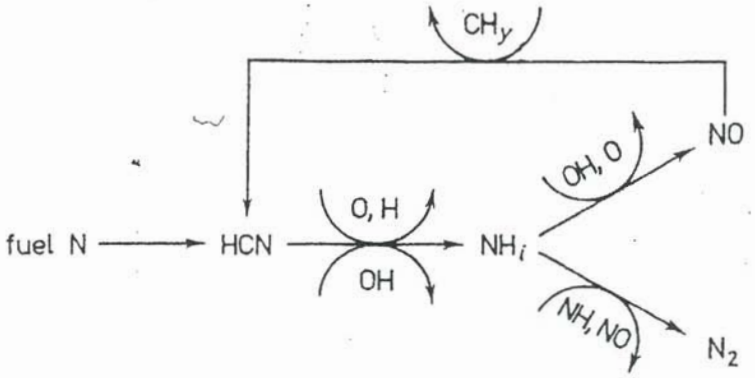
Οι ενώσεις που περιέχουν άζωτο μέσα στο καύσιμο αποτελούν μία σημαντική πηγή NO. Όπως αναφέρεται [Martin et al – 25], η μετατροπή καυσίμου – αζώτου σε NO μπορεί να είναι 2 ως 15 φορές περισσότερη από το NO που παράγεται από την θερμική δέσμευση του ατμοσφαιρικού αζώτου κατά την διάρκεια της καύση πετρελαίου.

Η ακριβής διάκριση των επιμέρους ποσοστών θερμικού NO και NO καυσίμου στις συνολικές εκπομπές NO, είναι δύσκολη και έτσι ο βαθμός μετατροπής του καυσίμου αζώτου σε NO δεν είναι γνωστός με ακρίβεια. Το περιεχόμενο σε άζωτο των ορυκτών καυσίμων μπορεί να διαφέρει σημαντικά μεταξύ διαφορετικών καυσίμων. Τυπικές τιμές του περιεχομένου αζώτου κατά βάρος για διάφορα καύσιμα είναι [47] 1-2% για τον άνθρακα, 0,65% για το αργό πετρέλαιο (κατά μέσο όρο), 1,5 - 2% για τα βαρέα - αποσταγμάτων πετρελαίου και κάτω του 0,1% (0,07% κατά μέσο όρο) για τα ελαφρά αποστάγματα.

Δεν μετατρέπεται όλο το άζωτο του καυσίμου σε NO κατά την διάρκεια της καύσης. Το κλάσμα του περιεχόμενου στο καύσιμο αζώτου που μετατρέπεται σε NO κατά την καύση αποκαλείται 'αποδιδόμενο NO' και για στοιχειομετρικά, πτωχά καύσιμα λαμβάνεται ως 1. Το αποδιδόμενο NO είναι επίσης ανεξάρτητο της θερμοκρασίας. Καθώς η αναλογία αυξάνει πάνω από την μονάδα, η μετατροπή σε NOx σταδιακά μειώνεται. Το αποδιδόμενο NO είναι ανεξάρτητο από τον χρόνο παραμονής στην ζώνη μετά την φλόγα και συνεπώς η μετατροπή του NO καυσίμου συμβαίνει κυρίως στην περιοχή του μετώπου της φλόγας [2]. Επίσης φαίνεται ότι είναι ανεξάρτητη με την δομή των αζωτούχων ειδών, καθώς και με την θερμοκρασία της φλόγας. Ωστόσο, η μετατροπή επηρεάζεται από τον ρυθμό ανάμιξης του οξειδωτικού και του καυσίμου [9, 25].

Έχει παρατηρηθεί [20 – Sarofim et al] σε εργαστηριακό καυστήρα, ότι 15 ως 100% του καυσίμου αζώτου του μαζούτ μετατρέπεται σε NO. Χρησιμοποιώντας ένα καύσιμο με χαμηλότερο περιεχόμενο σε άζωτο καταγράφονται υψηλότερες αποδόσεις μετατροπής.

Ερευνητές έχουν μελετήσει τον χημικό μηχανισμό του σχηματισμού ενώσεων του αζώτου από το καύσιμο άζωτο στην φλόγα. Ένα απλοποιημένο μοντέλο, που παρουσιάζεται πιο κάτω στο σχήμα 1, και δίνει το περίγραμμα της αντίδρασης είναι γενικά αποδεκτό για την παρουσίαση του μηχανισμού. Ο μηχανισμός προτάθηκε κυρίως από τους Fenimore και De Soete [26] :



Σχήμα 1 : Πορεία αντιδράσεων για τον σχηματισμό ενώσεων αζώτου από καύσιμο N σε καύση πλούσιου μείγματος [2].

Στο μοντέλο μπορεί να παρατηρηθεί ότι το καύσιμο άζωτο που εισέρχεται στην φλόγα θεωρείται ότι μετατρέπεται πλήρως σε HCN, το οποίο εν συνεχεία

αντιδρά για να σχηματίσει αμίνες (NHi). Αυτές οι υδρογονωμένες αζωτούχες ενώσεις οξειδώνονται στην συνέχεια δίνοντας μονοξείδιο του αζώτου ή μετατρέπονται σε N_2, μέσω αντιδράσεων με μονοξείδιο του αζώτου ή με άλλα είδη αμινών. Το HCN σχηματίζεται από την μείωση των οξειδίων του αζώτου και αντιδρά με OH, O και ρίζες H σε μια σειρά αντιδράσεων, όπως οι εξής :

$$HCN + OH \rightarrow CN + H_2O$$
$$HCN + H \rightarrow CN + H_2$$
$$HCN + O \rightarrow CN + OH$$
$$NCO + OH \rightarrow NH + CO$$

Μία λίστα αντιδράσεων που περιλαμβάνουν καύσιμο άζωτο κατά την διάρκεια καύσης πλούσιου μείγματος παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα :

Πίνακας 1 :

i)	Fuel N	→	HCN
ii)	HCN + OH	→	HNCO + H
iii)	HCN + H	→	CN + H2
iv)	CN + OH	→	NCO + H
v)	HNCO + H	→	NH2 + CO
vi)	NH2 + H	→	NH + H2
vii)	NH + OH	→	N + H2O
viii)	NH + O	→	N + OH
ix)	HNCO + H	→	NH2 + CO
x)	NH2 + OH	→	NH + H2O
xi)	NH + O	→	NO + H

Ο ρυθμός σχηματισμού φαίνεται γενικά ότι αυξάνεται με την συγκέντρωση οξυγόνου, αλλά μειώνεται με την αύξηση του περιεχομένου καυσίμου αζώτου.

Σε συνθήκες 'πτωχού' καυσίμου οι αντιδράσεις του HCN με ρίζες O θεωρούνται αντιδράσεις καθορισμού του ρυθμού για τον σχηματισμό NO :

$$HCN + O \rightarrow NH + CO \qquad (22)$$
$$HCN + O \rightarrow NCO + H \qquad (23)$$
$$HCN + O \rightarrow CN + OH \qquad (24)$$

Ο ρυθμός σχηματισμού καυσίμου NO ελέγχεται από την αντίδραση (22) και αποδεικνύεται ότι δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$\frac{d(NO)}{dt} = \left[A_a[O_2]^a / A_b[\text{fuel - N}]\right]^{0.5} \exp E_f / 2T \qquad (25)$$

που προέρχεται από τον De Soete [26], όπου Aa and Ab είναι οι προεκθετικοί παράγοντες, Ef είναι η ενέργεια ενεργοποίησης, a είναι ο βαθμός της αντίδρασης και [fuel - N] είναι η μοριακή συγκέντρωση του καυσίμου αζώτου η οποία είναι συνάρτηση του χρόνου. Η εξαγωγή των τιμών για τον προεκθετικό παράγοντα και την ενέργεια ενεργοποίησης βασίζεται στην υπόθεση ότι όλο το καύσιμο άζωτο αρχικά μετατρέπεται σε HCN.

Στην σύγχρονη πραγματικότητα, ο μηχανισμός NO καυσίμου έχει ενσωματωθεί σε διάφορα υπολογιστικά μοντέλα, πάντα με κάποιες απλοποιητικές παραδοχές.

Υπάρχουν δύο γνωστές μέθοδοι για την μείωση των εκπομπών NOx στα καυσαέρια από την καύση πλούσιων μειγμάτων καυσίμων με περιεχόμενο άζωτο, συγκεκριμένα (α) η σταδιακή καύση με μία πλούσια πρωτεύουσα ζώνη για την μετατροπή του μέγιστου δυνατού καυσίμου αζώτου σε N2 και (β) η επιλεκτική μείωση των NOx στο προϊόν αέριο με αντίδραση με το NH_3 ή άλλα είδη αμινών. Και οι δύο μέθοδοι συζητώνται περαιτέρω στα επόμενα.

2.3.3. Διοξείδιο του Αζώτου και Λοιπά Οξείδια του Αζώτου :

Τη δεύτερη μεγαλύτερη συμβολή στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου από συστήματα καύσης έχει το NO_2. Το NO_2 μπορεί να υπάρξει μόνον σαν ένα μεταβατικό είδος στις συνθήκες της φλόγας. Θεωρείται ότι το μονοξείδιο του αζώτου είναι το πιο σταθερό οξείδιο του αζώτου στις υψηλές θερμοκρασίες καύσης, ενώ το διοξείδιο του αζώτου είναι πιο σταθερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος [17].

Αρκετές έρευνες έχουν δείξει ότι NO_2 παράγεται από μία ακολουθία αντιδράσεων στην καύση. Αυτή η ακολουθία προκύπτει σαν αποτέλεσμα της τυρβώδους ροής στην ζώνη της φλόγας που προκαλείται από την ταχεία ανάμιξη θερμών προϊόντων καύσης και ψυχρού αέρα καύσης που εισέρχεται στον θάλαμο της καύσης [28]. Η συγκέντρωση NO_2 αυξάνεται κανονικά με την αύξηση του ρυθμού

ψύξης του αέρα καύσης και την αρχική θερμοκρασία του αερίου [29]. Έχει προταθεί ότι το NO που παράγεται από αζωτούχες ρίζες καταναλώνεται με γρήγορο ρυθμό στην περιοχή ορατής φλόγας από ρίζες HO_2, οι οποίες παράγουν NO_2 το οποίο εν συνεχεία παρατηρείται να μετατρέπεται ξανά σε NO στην περιοχή αμέσως μετά την φλόγα. 'Ετσι τα ποσοστά NO_2/NO είναι υψηλότερα στη ζώνη καύσης και χαμηλότερα στην περιοχή μετά τη φλόγα και αυξάνουν όσο αυξάνεται η αρχική συγκέντρωση NO [29]. Μελέτες έδειξαν σημαντικά επίπεδα λόγων NO_2/NO κοντά στην ζώνη καύσης και μέσα στην ζώνη της φλόγας.

Οι πειραματικές παρατηρήσεις αυτές ήταν σύμφωνες με έναν μηχανισμό αντίδρασης με τον οποίο το NO που σχηματίζεται στην περιοχή της φλόγας μετατρέπεται γρήγορα σε NO_2 , μέσω των πιο κάτω αντιδράσεων :

$$NO + HO_2 = NO_2 + OH \qquad (26)$$
$$NO_2 + O = NO + O_2 \qquad (27)$$

ειδικά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Άλλες αντιδράσεις που μπορεί να παίξουν σημαντικούς ρόλους στην χημεία NO-NO_2 σε φλόγες είναι :

$$NO_2 + H = NO + OH \qquad (28)$$
$$NO_2 + OH = NO + HO_2 \qquad (29)$$

Όπως συνέστησε ο Sano [30], και με αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί διάσπαση του NO_2, σε εξάρτηση με την θερμοκρασία και την σύσταση του αερίου. Έχει επίσης σημειωθεί ότι η μέγιστη τιμή του ρυθμού σχηματισμού NO_2 ελέγχεται από την συγκέντρωση του άμεσου NO και τον ρυθμό σχηματισμού του και από την συγκέντρωση HO_2.

Ένα άλλο οξείδιο του αζώτου το οποίο θεωρείται να έχει σημαντική επίδραση στην ρύπανση της ατμόσφαιρας είναι το υποξείδιο του αζώτου (N_2O). Αυτό συμμετέχει στο ''φαινόμενο του θερμοκηπίου'' και διακρίνεται σαν ένα από τα αέρια που είναι υπεύθυνα για την αραίωση του στρώματος του όζοντος. Στα συστήματα καύσης το N_2O μπορεί να σχηματισθεί από τις ακόλουθες αντιδράσεις :

$$NH + NO \rightarrow N_2O + H \qquad (30)$$
$$NCO + NO \rightarrow N_2O + CO \qquad (31)$$

και καταστρέφεται από ρίζες H στο τέλος της ζώνης οξείδωσης με τις ακόλουθες αντιδράσεις :

$$N_2O + H \rightarrow NH + NO \qquad (32)$$

$$N_2O + H \rightarrow N_2 + OH \qquad (33)$$

Οι Hao et al [31] σημείωσαν ότι το περισσότερο N_2O, δηλαδή μέχρι και 12% του καυσίμου αζώτου που μετατρέπεται σε N_2O σε φλόγες πετρελαίου, προέρχεται από την οξείδωση του καυσίμου αζώτου. Η συγκέντρωση N_2O συσχετίζεται με τα NOx κατά μήκος της φλόγας και στα καυσαέρια. Επίσης παρατήρησαν ότι η εκπομπή NO είχε τον ίδιο ρυθμό μείωσης με τα NOx, όταν υπόκεινται σε σταδιακή καύση. Έχει εκφρασθεί η άποψη ότι οι μετρήσεις του N_2O υπόκεινται σε μεγάλα σφάλματα και ότι τα επίπεδα που έχουν καταγραφεί συσχετίζονται με την τεχνική δειγματοληψίας.

Διεργασίες που συμβαίνουν στα συστήματα δειγματοληψίας μπορεί να είναι αιτία για την εμφάνιση υψηλότερων επιπέδων N_2O [32- Muzio et al]. Σημαντικές μειώσεις των επιπέδων N_2O έχουν σημειωθεί μετά από αλλαγή της ακολουθίας δειγματοληψίας τους. Για παράδειγμα, μία τεχνική που ακολουθήθηκε αφορούσε την αποθήκευση του δείγματος που περιείχε SO_2 , NOx και H_2O, το οποίο οδήγησε σε σχηματισμό N_2O, που δεν υπήρχε πριν. Οι μετρήσεις μειώθηκαν σε 3 ppm από 300 ppm, μετά την αφαίρεση του H_20 και SO_2 πριν την αποθήκευση του δείγματος.

2.4. Μέθοδοι Περιορισμού των Εκπομπών NOx :

Ο έλεγχος των εκπομπών οξειδίων του αζώτου απαιτεί την κατανόηση των διαφόρων διεργασιών που βρίσκουν εφαρμογή κατά τον σχηματισμό τους, όπως η μετατροπή του καυσίμου - αζώτου σε NOx και ο σχηματισμός NOx από το άζωτο του ατμοσφαιρικού αέρα. Ο μετριασμός των εκπομπών NOx από τα συστήματα καύσης έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών ερευνών, και διάφορες δοκιμασμένες μεθόδοι μείωσης περιλαμβάνουν την χρήση χαμηλής περίσσειας αέρα, την ανακυκλοφορία καυσαερίων, την θερμοκρασία του αέρα καύσης (προθέρμανση), την έγχυση ατμού ή νερού, την τροποποίηση του καυστήρα, την σταδιακή καύση και την έγχυση αμμωνίας [33].

Δεδομένου ότι οι συγκεντρώσεις ατόμων οξυγόνου και οι θερμοκρασίες φλόγας μειώνονται σε συνθήκες 'πλούσιων' σε καύσιμο μειγμάτων, πολλές μέθοδοι

ελέγχου των εκπομπών NOx έχουν υιοθετήσει αυτή την τεχνική. Η λειτουργία με χαμηλή περίσσεια αέρα μειώνει τη συγκέντρωση οξυγόνου στην ζώνη αντίδρασης και είναι μια από τις απλούστερες τεχνικές. Συνήθως, περιλαμβάνει καύση δύο σταδίων [7]. Το πρώτο στάδιο της καύσης γίνεται με συνθήκες πλούσιου καυσίμου και επιπλέον αέρας προστίθεται αργότερα, κατά το δεύτερο στάδιο, για να ολοκληρωθεί η καύση. Με τον τρόπο αυτό, τόσο η συγκέντρωση ατόμων οξυγόνου και η αιχμή της θερμοκρασίας φλόγας, μειώνονται και έτσι ο ρυθμός σχηματισμού NO μειώνεται επίσης. Αλλά πρέπει να ληφθεί μέριμνα για να διασφαλιστεί ότι η μείωση των NOx δεν συνοδεύεται από αύξηση των εκπομπών άκαυστων υδρογονανθράκων, CO και αιθάλης.

Η ανακυκλοφορία καυσαερίων μειώνει το επίπεδο των NOx με την εκ νέου εισαγωγή των καυσαερίων στη ζώνη αντίδρασης. Η επανακυκλοφορία του οξυγόνου ελαττωματικών προϊόντων καύσης, χρησιμεύει για τη μείωση της συγκέντρωσης του O_2 και ως εκ τούτου της θερμοκρασίας φλόγας. Κατά συνέπεια, υπάρχει μείωση στο σχηματισμό NO. Επιπλέον, ποσοστό του NO που υπάρχει στα καυσαέρια καταστρέφεται με το πέρασμά του από τη ζώνη φλόγας. Ο Turner [34] σχολίασε ότι κατά την καύση πετρελαίου σε πειραματική διάταξη, το πρώτο 30% της ανακύκλωσης καυσαερίων στη ζώνη καύσης είχε την μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην μείωση των εκπομπών NO. Πέρα από το 30% ανακύκλωσης, ο βαθμός μείωσης ήταν υπερβολικά μικρός για να αξίζει τον κόπο. Επίσης, πρότεινε ότι αυτή η μέθοδος έχει αποτελέσματα μόνον για το θερμικό NO. Το κόστος εφαρμογής της μεθόδου, η εγκατάσταση των αγωγών που απαιτούνται, κάνουν επίσης τη μέθοδος αυτή οικονομικά μη ελκυστική σε σύγκριση με κάποιες εναλλακτικές τεχνικές.

Η μείωση της θερμοκρασίας προθέρμανσης του αέρα επηρεάζει άμεσα τη θερμοκρασία φλόγας. Έτσι μειώνονται οι εκπομπές NOx. Ο Pershing [35] ανέφερε ότι σε συστήματα που 'καίνε' πετρέλαιο μείωση της θερμοκρασίας του αέρα προθέρμανσης από 560 σε 420 K οδήγησε σε σημαντική πτώση των εκπομπών Nox σαν αποτέλεσμα της μείωσης θερμικών NOx. Επίσης, ανέφερε ότι με συνθήκες χαμηλής περίσσειας αέρα και χαμηλής θερμοκρασίας προθέρμανσης, τα NOx που παράγονται από το μαζούτ σχετίζονται με την οξείδωση του καυσίμου – αζώτου.

Μία άλλη μέθοδος ψύξης της ζώνης καύσης, η έγχυση ατμού ή νερού μειώνει την θερμοκρασία φλόγας και μπορεί να αυξήσει την συγκέντρωση ριζών

μέσα στην φλόγα. Ο Duterque [36] πρότεινε ότι σε φλόγες υδρογονανθράκων η έγχυση νερού, κυρίως επιδρά στον σχηματισμό θερμικών και αμέσων NOx.

Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του καυστήρα μπορεί να αποτελέσει μία αποτελεσματική μέθοδο για την μείωση των επιπέδων NOx. Η μεταβολη της ορμης των ρευμάτων καυσίμου και άερα, η συστροφή του ρεύματος αέρα, η τοποθέτηση του ακροφυσίου καυσίμου, η μείωση της διαμέτρου σταγονιδίων ψεκασμού καυσίμου και η ανάμιξη του καυσίμου με αέρα μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες διαφορές στις εκπομπές NO. Επίσης η διάταξη Κλιβάνου/Καυστήρα παίζει σημαντικο ρόλο στον έλεγχο των NOx.

Η σταδιακή καύση και η έγχυση αμμωνίας θεωρούνται ότι είναι οι πλέον αποτελεσματικές τεχνικές για τον έλεγχο του NO σε συστήματα καύσης. Αυτές οι τεχνικές παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

2.4. Μέθοδος Σταδιακής Καύσης και Μείωση των NOx :

Η σταδιακή καύση, ή καύση δύο σταδίων (βαθμίδων), έχει αποδειχθεί ότι είναι μία ιδιαίτερα αποδοτική μέθοδος ελέγχου των NOx. Στην σταδιακή καύση, συνθήκες πλούσιου καυσίμου εφαρμόζονται για την αρχική καύση του καυσίμου και δευτερεύον αέρας προστίθεται σε επόμενο στάδιο για να ολοκληρωθεί η πλήρης καύση του CO, της αιθάλης και των άκαυστων υδρογονανθράκων. Εξαιτίας της ατελούς καύσης και πιθανώς της αύξησης σε μεταφορά θερμότητας διά ακτινοβολίας, η θερμοκρασία του αερίου διατηρείται χαμηλά στο πρώτο στάδιο. Αυτό χαμηλώνει τον σχηματισμό NO. Επίσης, καθώς η περιοχή της φλόγας είναι πλούσια σε καύσιμο και το άζωτο του καυσίμου μετατρέπεται σχηματίζοντας N_2, HCN, NO και NH_3 (λόγω της πτώσης της συγκέντρωσης οξυγόνου). Ο Takagi [37] πρότεινε ότι το NH_3 και HCN που σχηματίζονταν σε καυστήρα πετρελαίου στο πρώτο στάδιο από τις αντιδράσεις $C_3H_8 + NH_3$ ή $CO + H_2 + NH_3$, καίγονταν μετά το δεύτερο στάδιο καύσης, και οι εκπομπές NO μειώνονταν σημαντικα σε σχέση με καύση ενός σταδίου, με τον ίδιο συνολικό λόγο ισοδυναμίας.

Όταν πλέον έχει ολοκληρωθεί η καύση, με την έγχυση του δευτερεύοντος ρεύματος αέρα και έχουν καταναλωθεί το CO και οι υδρογονάνθρακες που έχουν απομείνει από το πρώτο στάδιο, η θερμοκρασία του αερίου είναι πλέον αρκετά χαμηλή ώστε ο σχηματισμός NO να περιορίζεται κινητικά.

Η σταδιακή καύση επίσης μειώνει τα θερμικά NOx καθώς οι κορυφαίες θερμοκρασίες φλόγας συμβαίνουν στην περιοχή όπου η συγκέντρωση οξυγόνου είναι περιορισμένη. Οι Yamagishi et al [38] σημείωσαν ότι το θερμικό NO παράγεται ορισμένες φορές στο δεύτερο στάδιο λόγω της καύσης των μερικά άκαυστων αερίων του πρώτου σταδίου με τον δευτερεύοντα αέρα.

Η διατήρηση της βέλτιστης στοιχειομετρίας της πλούσιας πρωτεύουσας ζώνης, έχει αποδειχθεί ότι ενισχύει τα αποτελέσματα της σταδιακής καύσης, για καύσιμα υψηλού περιεχομένου αζώτου, όπως ο λιθάνθρακας και το πετρέλαιο.

2.6. Μείωση NOx με την χρήση NH_3 :

Η μείωση του NO με την χρήση αμμωνίας χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια. Η χρήση NH_3 σαν αναγωγικό μέσο, οδηγεί σε επιλεκτική μείωση ομογενούς αέριας φάσης του NO. Το NO ανάγεται κανονικά στην μορφή αζώτου και νερού με μία απλή αντίδραση αποσύνθεσης όπως η εξής :

$$4NH_3 + 6NO \rightarrow 5N_2 + 6H_2O \quad (34)$$

$$4NH_3 + 4NO + O2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O \quad (35)$$

$$4NH_3 + 2NO + O2 \rightarrow 3N_2 + 6H_2O \quad (36)$$

Σε υψηλότερες θερμοκρασίες (πάνω από τους 1000 °C) η οξείδωση της αμμωνίας σε NOx, περιπλέκει το πρόβλημα.

Η NH_3 μπορεί να οξειδωθεί με απευθείας αντιδραση με το O_2 ειδικά σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τους 1000 °C και σχηματίζει άζωτο και νερό :

$$4NH_3 + 3O_2 \rightarrow N_2 + 6H_2O \quad (37)$$

Σε άλλες περιπτώσεις η εκπομπή NO μπορεί ακόμη και να αυξηθεί, μέσω της :

$$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 3NO + 6H_2O \quad (38)$$

Ο Fenimore συνέστησε ότι στην θερμοκρασιακή περιοχή των 1100 ως 1500 K η μείωση του NO από την NH_3 συμβαίνει μέσω του ακόλουθου μηχανισμού :

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΟ, ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι πειραματικές τεχνικές και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη και επεξεργασία των μετρήσεων. Επίσης οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των θερμοκρασιακών προφίλ και των επιπέδων συγκέντρωσης NOx, των λόγων καυσίμου/αέρα και των υπολογισμών παροχής αέρα και καυσίμου.

3.1 Περιγραφή του Συστήματος Κλιβάνου/Καυστήρα ισχύος 2 MW με καύσιμο πετρέλαιο

3.1.1 Γενική Διάταξη Καύσης

Ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία περιελάμβανε έναν κλίβανο κυλινδρικής διατομής, μορφής σήραγγας, κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής, επενδεδυμένο εσωτερικά με πυράντοχο υλικό. Η διάταξη παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 3.1 και φωτογραφικά στο Σχήμα 3.2. Ο κλίβανος περιελάμβανε κυλινδρικό θάλαμο καύσης εσωτερικής διαμέτρου 0,8 μ και μήκους 4,2 μ.

Τα χαλύβδινα κυλινδρικά τοιχώματά του ήταν επενδεδυμένα με στρώση χυτού πυράντοχου κεραμικού υλικού πάχους 0,22 μ. Η επένδυση αυτή θερμικής μόνωσης έγινε με την χρήση πυκνού κεραμικού πυρίμαχου υλικού (Intracast GL). Το πυρίμαχο αυτό υλικό ήταν υδρο-κεραμικής διαμόρφωσης και το κύριο συστατικό του ήταν το τριοξείδιο του αλουμινίου (Al_2O_3 bubbles). Εγκαταστάθηκε με την μέθοδο χύτευσης με δόνηση και η μέγιστη συνιστώμενη θερμοκρασία λειτουργίας του είναι οι 1650 °C. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις ιδιότητες και την σύνθεση της πυρίμαχης επένδυσης δίνεται στο παράρτημα Γ.

Για την καύση χρησιμοποιήθηκε ένας τυποποιημένος βιομηχανικού τύπου καυστήρας πετρελαίου Nu-Way, πλήρως αυτοματοποιημένος, υψηλής πίεσης

ψεκασμού και μέγιστης ονομαστικής ισχύος 2 MW, περιλαμβανόταν στο σύστημα και παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9. Ο καυστήρας έκανε οριζόντια εκτόξευση δέσμης στο εσωτερικό της σήραγγας του κυλινδρικού χαλύβδινου κλιβάνου.

Τα παραγόμενα καυσαέρια απομακρύνονταν μέσω ενός συστήματος αγωγών καυσαερίων συνδεδεμένο στην σχετική έξοδο του κλιβάνου. Το σύστημα απαγωγής καυσαερίων ήταν εφοδιασμένο με ένα σύστημα ψύξης με νερό, αποτελούμενο από 4 ακροφύσια ψεκασμού νερού και τις σχετικές σωληνώσεις διανομής, αντλία και δοχείο αποθήκευσης. Τα ακροφύσια ήταν προσαρμοσμένα σε τέτοια διάταξη ώστε η δέσμη ψεκασμού νερού να κατευθύνεται κατάντη του ρεύματος των θερμών αερίων που αναρροφούνται από τους αγωγούς, ώστε να μειώνεται η θερμοκρασία των θερμών αερίων, μέσα στην κύρια καμινάδα καυσαερίων και πριν αυτά φτάσουν τον κεντρικό ανεμιστήρα απαγωγής καυσαερίων.

Σύμφωνα με οδηγίες από τον κατασκευαστή του, η θερμοκρασία στον ανεμιστήρα απαγωγής δεν έπρεπε να ξεπεράσει τους 150°C, για λόγους προστασίας του εξοπλισμού, δηλαδή της πτερωτής και των λοιπών κινούμενων μερών του.

Το σύστημα νερού ψύξης τροφοδοτούνταν με νερό από το σχετικό σύστημα τροφοδοσίας νερού, αποτελούμενο από δεξαμενή αποθήκευσης και αντλία νερού. Η πίεση παροχής του νερού μπορούσε να ρυθμισθεί χειροκίνητα, μεταξύ 2 και 8 bar, ώστε να είναι δυνατή η αυξομείωση της παροχής και αντίστοιχα της ψυκτικής ισχύος, ανάλογα με τις απαιτήσεις. Η θέση του συστήματος νερού ψύξης και η διάταξή του μπορεί να παρατηρηθεί επίσης στο Σχήμα 3.7 (και στην φωτογραφία 3.2).

Υπήρχαν επίσης δύο τμήματα οπτικής παρατήρησης, στην διάταξη κλιβάνου/καυστήρα, που επέτρεπαν την παρατήρηση και πρόσβαση για μετρήσεις PDA και LDA (laser doppler anemometry) για τον προσδιορισμό ταχύτητας ή μεγέθους σωματιδίων. Για αυτό το σκοπό υπήρχαν δύο παράθυρα χαλαζία (quartz) στο πίσω και στο πλαϊνό τμήμα του θαλάμου καύσης, επιτρέποντας την παρατήρηση της φλόγας. Μία αντλία παρήχε το ρεύμα αέρα για την ψύξη της θυρίδας παρατήρησης LDA προκειμένου να αντέξει τις υπερβολικά υψηλές

θερμοκρασίες ύψους πάνω από τους 1600 °C που μπορούν να αναπτυχθούν στο εσωτερικό του κλιβάνου.

Η φλόγα μπορούσε να παρατηρηθεί από αυτά τα παράθυρα, να έχει χαρακτηριστικό κωνικό σχήμα, πλατιάζοντας προς την πλευρά του μετώπου της φλόγας και σαν ένδειξη καλής καύσης θα έπρεπε να είναι έντονη αλλά χωρίς σπινθηρισμούς.

Όλα τα υπόλοιπα τμήματα του φούρνου, καθένα μήκους 600 mm, ήταν συνδεδεμένα μεταξύ τους με κοχλιωτές συνδέσεις και ήταν εξοπλισμένα με θυρίδες δειγματοληψίας ανά τακτά διαστήματα (αποστάσεις 600 mm) κατά μήκος του κλιβάνου, που επέτρεπαν την πρόσβαση στο εσωτερικό του θαλάμου για λήψη δειγμάτων τόσο από την περιοχή εντός της φλόγας όσο και εκτός αυτής, όπως και για λήψη συγκεντρώσεων αερίου, θερμοκρασιών ή και μετρήσεων LDA. Έτσι το τμήμα που περιείχε τα παράθυρα χαλαζία, μπορούσε να μετακινηθεί και να κοχλιωθεί σε άλλες θέσεις κατά μήκος του φούρνου (ένας από τους λόγους της κατασκευής σε κοχλιωτά τμήματα) επιτρέποντας να γίνουν μετρήσεις LDA σε πολλές θέσεις κατά μήκος του κλιβάνου. Η διάταξη των θυρίδων λήψεων μετρήσεων φαίνεται στα σχήματα 3.1 και 3.7.

Όπως προαναφέρθηκε, λίγο μετά από την εγκατάστασή του, ο κλίβανος υποβλήθηκε σε διαδικασία (λειτουργία) ξήρανσης (Drying-out) επί 72 ώρες, διαδικασία απαραίτητη για την σωστή λειτουργία της πυρίμαχης επένδυσης. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας ξήρανσης (Drying-out), το σύστημα λειτούργησε αρχικά με χαμηλή φλόγα, και χαμηλή ισχύ περίπου 0,1 MW. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν διαρκώς αυξανόμενα επίπεδα ισχύος, με κατάληξη μία συνεχή λειτουργία επί 5 ώρες σε ισχύ μεγαλύτερη των 1,5 MW στο τελικό στάδιο, οπότε και επετεύχθησαν θερμοκρασίες υψηλότερες των 1600 °C. Η αύξηση της ισχύος πραγματοποιήθηκε με αργό και ομοιόμορφο ρυθμό, χρησιμοποιώντας μικρά βήματα ισχύος ισοκατανεμημένα στην διάρκεια των 72 ωρών της διαδικασίας. Τα καταγεγραμμένα δεδομένα θερμοκρασίας, συγκεντρώσεων αερίων και ισχύος από την διαδικασία Ξήρανσης ήταν διαθέσιμα για να προσφέρουν πληροφορίες σχετικά με τα γενικά χαρακτηριστικά καύσης του συστήματος και γίνεται συζήτησή τους σε επόμενο κεφάλαιο.

Τέλος, το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα μίγμα Light Fuel Oil και Gas – Oil (SHELL Gas Oil) του οποίου τα ειδικά χαρακτηριστικά αναφέρονται στο Παράρτημα Γ .

Η πλήρης πειραματική διάταξη φαίνεται επίσης στα Σχήματα 3.1 και 3.7.

3.1.2. Σύστημα Τροφοδοσίας Καυσίμου :

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε σαν καύσιμο ένα μείγμα light fuel oil και gas – oil (Shell Gas Oil). Το καύσιμο αυτό είναι παρόμοιο, όσον αφορά τις ιδιότητές του με ελαφρύ απόσταγμα πετρελαίου πυκνότητας 1.5 -5.5 cSt στους 40 °C και οι προδιαγραφές του καυσίμου δίνονται στο Παράρτημα Γ.

Το σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου περιελάμβανε εσωτερική και εξωτερική δεξαμενή αποθήκευσης. Η εσωτερική χρησίμευε για την προσωρινή αποθήκευση του καυσίμου προς χρήση κατά την διάρκεια της εργασίας. Επίσης, υπήρχε ένα κύκλωμα σωληνώσεων ανακυκλοφορίας για την τροφοδοσία του απαιτούμενου καυσίμου στον καυστήρα και την επιστροφή του μη χρησιμοποιημένου τμήματος στην δεξαμενή αποθήκευσης. Η δεξαμενή και το κύκλωμα σωληνώσεων ήταν εφοδιασμένα με εξωτερικό ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης συνοδείας (heat tracing) προκειμένου να προθερμαίνεται (στην δεξαμενή) το καύσιμο στην απαιτούμενη για την ομαλή ροή του θερμοκρασία και να διατηρείται αυτή η θερμοκρασία και η ομαλή, ελεύθερη ροή κατά μήκος όλων των σωληνώσεων. Η παροχή καυσίμου και η πίεση μπορούσε να ρυθμισθεί ορίζοντας την πίεση τροφοδοσίας της αντλίας καυσίμου η οποία ήταν επίσης προσαρμοσμένη στον καυστήρα. Η πίεση επιστροφής υγρού καυσίμου (spill-back) μπορούσε επίσης να ρυθμισθεί για τον έλεγχο του ρυθμού παροχής καυσίμου καθώς και της πίεσης του καυσίμου απευθείας από βαλβίδα τοποθετημένη στην αντλία.

Δεν γινόταν διασκορπισμός ολόκληρης της ποσότητας του καυσίμου, αλλά ένα κλάσμα της συνολικής ποσότητας που απέμενε οδηγούνταν πίσω στις δεξαμενές αποθήκευσης μέσω της βαλβίδας ανακυκλοφορίας και σχετικής σωλήνωσης.

Η στάθμη του καυσίμου στο εσωτερικό της δεξαμενής υποδεικνύονταν από έναν βαθμονομημένο σωληνοειδή δείκτη στάθμης αναρτημένο στην δεξαμενή, μπορούσαν έτσι να ληφθούν ενδείξεις της στάθμης του καυσίμου σε cm.

Διάγραμμα του συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου, παρουσιάζεται επίσης στο Σχήμα 3.8.

3.1.3. Περιγραφή του Καυστήρα :

Η αποδοτική και αξιόπιστη λειτουργία του καυστήρα και του διασκορπιστή είναι πολύ σημαντική για το σύστημα καθώς έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση καύσης και τα αποτελέσματα που καταγράφονται. Όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε τυποποιημένος βιομηχανικός, πλήρως αυτόματος, καυστήρας Nu-Way, εφοδιασμένος με διασκορπιστή συστροφής τζετ υψηλής πίεσης. Η μέγιστη ονομαστική τιμή ισχύος του καυστήρα ήταν 2 MW, ωστόσο μόνον επίπεδα ισχύος μέχρι 1,6 MW, είχαν εφαρμοσθεί στην πράξη. Τα επιμέρους τμήματα του καυστήρα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.9.

Περιγραφικά τα τμήματα του καυστήρα έχουν ως εξής :

1) Ο ηλεκτρικός κινητήρας που κινεί την αντλία καυσίμου και τον ανεμιστήρα προσαγωγής αέρα καύσης.
2) Ηλεκτρόδια (σπινθηριστής) για τον σπινθήρα έναυσης.
3) Μία αντλία καυσίμου, εξοπλισμένη με ρυθμιστή πίεσης και βαλβίδα άμεσης ενέργειας για την διατήρηση της ρυθμισμένης πίεσης.
4) Το ακροφύσιο ψεκασμού πίεσης με διάταξη συστροφής και γωνία ψεκασμού 60 μοίρες.
5) Ο ηλεκτρικός προθερμαντής καυσίμου για την προθέρμανση του καυσίμου στην απαιτούμενη θερμοκρασία πριν την εκνέφωση.
6) Ο δίσκος διάχυσης του αέρα σταθερά προσαρμοσμένος στην κεφαλή ψεκασμού του καυστήρα.
7) Το πτερύγιο ρύθμισης της εισαγωγής αέρα για τον έλεγχο της παροχής του αέρα καύσης που εισέρχεται μέσα στον θάλαμο καύσης.
8) Μία σωληνοειδής βαλβίδα για την διακοπή της παροχής καυσίμου όταν ο καυστήρας είναι εκτός λειτουργίας, επιτρέποντας να γίνει καθαρισμός του

καύσης και για την αποτροπή της εισροής καυσίμου μέσα στον θάλαμο καύσης, όταν το σύστημα είναι εκτός λειτουργίας.
9) Ο ανιχνευτής φλόγας για την θέση του καυστήρα εκτός λειτουργίας σε περίπτωση ατυχήματος ή βλάβης.

Όπως προαναφέρθηκε, ο καυστήρας χρησιμοποιούσε ακροφύσιο τύπου διασκορπιστή επιστροφής (spill atomiser). Οι διασκορπιστές επιστροφής υγρού χρησιμοποιούνται συχνά στον σχεδιασμό των καυστήρων, σε μία προσπάθεια αύξησης της περιοχής λειτουργίας του καυστήρα. Στους διασκορπιστές επιστροφής (spill - back ή return flow atomisers), η πτώση σε απόδοση διασκορπισμού του διασκορπιστή δέσμης (τζετ) πίεσης αποτρέπεται σε ένα βαθμό, διατηρώντας μία ταχεία ροή καυσίμου πίσω στην αντλία. Το Σχήμα 3.3 δίνει μία εικόνα της διάταξης με την οποία επιτυγχάνεται αυτό.

Γενικά στα ακροφύσια σπρέϊ πίεσης, το καύσιμο εγχύεται με μια συστροφική κίνηση (διασκορπιστές συστροφής (Swirl) ή Simplex) και αυτό επιτυγχάνεται με την έγχυση διαμέσω εφαπτομενικών εγκοπών μέσα στον θάλαμο στροβιλισμού. Όταν βρεθεί εκει το καύσιμο περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα και διαφεύγει με την μορφή ψεκασμού τζετ (δείτε και το σχετικό Σχήμα 3.4).

Στο πειραματικό σύστημα, ο καυστήρας ήταν εξοπλισμένος με ένα σύστημα ακροφυσίου πίεσης με διασκορπιστή επιστροφής (spill-back), το οποίο επιτρέπει να γίνονται μεταβολές της ισχύος, ενώ διατηρείται καλή ποιότητα διασκορπισμού κάτι το οποίο είναι απαραίτητο για την καλή απόδοση της καύσης. Η πίεση και ο διασκορπισμός (εκνέφωση) παραμένουν σταθερά σε αυτό το σύστημα, ενώ οι παροχές μπορεί να μεταβάλλονται, λόγω της σχέσης της παροχής κατάθλιψης με την πίεση "by-pass" (παράκαμψης), αντί της σχέσης με την πίεση παροχής η οποία ισχύει στην περίπτωση των ακροφυσίων τύπου simplex (συστροφής). Ο λόγος μέγιστης προς ελάχιστη παροχή εξόδου σε σταθερή πίεση τροφοδοσίας είναι χαρακτηριστικό στοιχείο του διασκορπιστή ("λόγος μέγιστης/ελάχιστης ροής" - turndown-ratio).

Με τα συστήματα ακροφυσίων διασκορπισμού επιστροφής (spill-back) μπορούν να επιτευχθούν μεγαλύτερους λόγους μέγιστης/ελάχιστης ροής, με καλύτερο διασκορπισμό, ανοίγοντας μία γραμμή παράκαμψης και επιτρέποντας σε ποσότητα υγρού καυσίμου να επιστρέψει στην δεξαμενή τροφοδοσίας όταν

εφαρμόζεται μειωμένη παροχή εξόδου. Χρησιμοποιώντας μία σταθερή πίεση τροφοδοσίας, η παροχή εξόδου μεταβάλλεται κατά προσέγγιση σύμφωνα με το τετράγωνο της πίεσης παράκαμψης, έτσι ώστε σε ελάχιστες ροές η πίεση διασκορπισμού να είναι μειωμένη κατά περίπου 35%. Με το ακροφύσιο απλής συστροφής (simplex) η παροχή εξόδου φαίνεται να μεταβάλεται σε αναλογία με την τετραγωνική ρίζα της πίεσης παροχής, οπότε προκειμένου να διατηρηθεί το ήμισυ της παροχής σχεδιασμού, η πίεση τροφοδοσίας πρέπει να μειωθεί σε επίπεδο πολύ χαμηλό για να επιτρέπει τον καλό διασκορπισμό.

Ο καυστήρας ήταν εφοδιασμένος με κωνικού τύπου ακροφύσιο τύπου DELAVAN Variflo με γωνία ψεκασμού 60°, ενώ ακροφύσια με γωνίες ψεκασμού 30 και 45 μοιρών, ήταν διαθέσιμα και μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν. Δείτε και το σχετικό Σχήμα 3.5.

Παρακολουθούνταν επίσης η παροχή αέρα καύσης, ο οποίος εισάγονταν μέσω πτερυγιοφόρου στομίου συστροφής έτσι ώστε να εξασφαλίζεται καλή ανάμιξη ενώ η παροχή του μπορούσε να ρυθμισθεί με την χρήση κατάλληλων πτερυγίων (air flaps) έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός λόγος καυσίμου/αέρα.

Μετά την αρχική θέση του σε λειτουργία (αρχική έναυση), ο καυστήρας ακολουθούσε ("έτρεχε") μία αυτοματοποιημένη ακολουθία, αλλά η ισχύς και ο λόγος καυσίμου/αέρα μπορούσαν να ρυθμισθούν με "κοχλίες" ρύθμισης των πτερυγίων της εισαγωγής αέρα από τον πίνακα ελέγχου. Οι οδηγίες του κατασκευαστή υποδείκνυαν ότι για καλή απόδοση καύσης έπρεπε να διατηρείται αναλογία 12 % CO_2 - 4% O_2.

Η εισαγωγή αέρα ήταν αφαιρούμενη, για την διευκόλυνση της πρόσβασης προς ή την αφαίρεση της πτερωτής του ανεμιστήρα του καυστήρα και του άξονά του χωρίς την αφαίρεση του κινητήρα.

Μία διάταξη σωλήνα pitot χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της παροχής αέρα εισαγωγής στον θάλαμο καύσης, και τον προσδιορισμό του λόγου καυσίμου/αέρα που χρησιμοποιούνταν. Ο ογκομετρικός ρυθμός παροχής του αέρα καύσης ρυθμιζόταν με την αλλαγή της θέσης (της γωνίας) του πτερυγίου εισαγωγής αέρα.

Κατά την διάρκεια λειτουργίας του καυστήρα, η προθέρμανση του καυσίμου επιτυγχάνονταν στον προθερμαντήρα με την χρήση μίας μεγάλης επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας συνδυασμένη με την σχετική χαμηλή παροχή καυσίμου. Αυτή η ταχεία θέρμανση σε μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής απέτρεπε επίσης την τοπική υπερθέρμανση και την απανθράκωση του καυσίμου.

Ένας ειδικός ηλεκτρονικός ελεγκτής της ακολουθίας, καθόριζε τον τρόπο λειτουργίας του καυστήρα. Ο καυστήρας μετά την αρχική έναυση λειτουργούσε με μία ακολουθία αυτοματισμών, και οι παράμετροι λειτουργίας του όπως η παροχή καυσίμου, η ισχύς, η πίεση αέρα εισαγωγής μπορούσαν να ρυθμισθούν μέσω ενός πίνακα ελέγχου διαθέσιμου πάνω στην μονάδα του καυστήρα. Οι ρυθμιστικοί κοχλίες του πτερυγίου εισαγωγής αέρα επέτρεπαν μεταβολές στην πίεση του αέρα καύσης, για να αντισταθμίζονται αλλαγές στην πίεση τροφοδοσίας καυσίμου. Σε διαφορετική περίπτωση, οι παραπάνω παράμετροι ρυθμίζονταν αυτόματα από το σύστημα ελέγχου και για κάθε θέση ρύθμισης αέρα εισαγωγής.

3.1.4 Λεπτομέρειες Λειτουργίας και Έναυσης του Καυστήρα :

Στον καυστήρα, υπάρχουν δύο ακροφύσια εκνέφωσης (διασκορπισμού) τοποθετημένα κατακόρυφα το ένα πάνω από το άλλο και ελεγχόμενα από δύο μαγνητικές βαλβίδες. Το πάνω ακροφύσιο ψεκάζει μόνον σε συνθήκες χαμηλής φλόγας ενώ και τα δύο ακροφύσια ψεκάζουν μαζί σε συνθήκες υψηλής φλόγας. Ο έλεγχος της εισαγωγής αέρα γίνεται με υδραυλική μονάδα, με εσωτερικό ελατήριο ρύθμισης σε θέση χαμηλής φλόγας και υδραυλική επεκτεινόμενη σε υψηλή φλόγα.

Η χειροκίνητα ρυθμιζόμενη βαλβίδα (air cam) διευκολύνει τον έλεγχο της εισαγωγής αέρα. Στην αρχη του κύκλου καύσης, υπάρχει ένας πρώτος καθαρισμός με βεβιασμένη ροή αέρα και έναυση. Μετά από μια χρονοκαθυστέρηση, η μαγνητική βαλβίδα χαμηλής φλόγας ενεργοποιείται επιτρέποντας στο καύσιμο να ρεύσει προς το πάνω ακροφύσιο. Ο καυστήρας τότε ανάβει με χαμηλή φλόγα. Το χειροκίνητο ντάμπερ πρέπει να ρυθμισθεί ώστε να δίνει μία καθαρή (ομοιόμορφου χρωματισμού) αλλά χωρίς σπινθηρισμούς, φλόγα όταν παρατηρούμε μέσα από το παράθυρο επιθεώρησης στο πλάϊ του φούρνου, προκειμένου να υπάρχει καλή καύση του καυσίμου. Μετά από μία περαιτέρω χρονοκαθυστέρηση η μαγνητική βαλβίδα υψηλής φλόγας ενεργοποιείται επίσης, επιτρέποντας ροή καυσίμου προς το

κάτω ακροφύσιο υψηλής φλόγας και να λειτουργήσει στο σημείο ελέγχου υψηλής φλόγας.

Κατά την διάρκεια του κύκλου λειτουργίας, η μαγνητική βαλβίδα υψηλής φλόγας ενεργοποιείται από τον έλεγχο υψηλής/χαμηλής, όμως για λόγους ασφαλείας είναι πάντοτε απενεργοποιημένη σε κάθε έναυση του καυστήρα, προσφέροντας έτσι την αναγκαία χαμηλή φλόγα κατά την έναυση. Όταν έχουν επιτευχθεί οι συνθήκες λειτουργίας, ο θερμοστάτης ανοίγει και ο ηλεκτρονικός ελεγκτής θέτει εκτός λειτουργίας τον κινητήρα και κλείνει τις μαγνητικές βαλβίδες. Υπάρχει διαθέσιμος και ένας χειροκίνητος μηχανισμός επανέναρξης της μονάδας.

Η τυποποιημένη κεφαλή του καυστήρα χρησιμοποιεί ένα σταθερά αναρτημένο δακτυλιοειδή δίσκο ή διαχύτη, με το κεντρικό στόμιό του σε θέση λίγο μπροστά από τα ακροφύσια, για καλύτερη διάχυση του ρεύματος αέρα. Ένας αυλός κατεύθυνσης της φλόγας από υλικό υψηλής ανθεκτικότητας στην θερμοκρασία περιβάλλει τον διαχύτη και προεκτείνεται προς τα εμπρός, καταλήγοντας σε έναν λαιμό συστολικής μορφής. Η διάταξη ακροφυσίου / ηλεκτροδίου περιβάλλεται από ένα σωλήνα ο οποίος είναι τοποθετημένος σε μία εσοχή 45 μοιρών του στηρίγματος του διαχύτη. Ο αέρας που εισέρχεται στο σωλήνα μπορεί να εμποδισθεί για να μειωθεί η ταχύτητα του αέρα που διαφεύγει από το κεντρικό στόμιο πάνω από τα ηλεκτρόδια και περικυκλώνει το ακροφύσιο. Η πλήρης πίεση αέρα εφαρμόζεται στις οπές του διαχύτη και το διάκενο μεταξύ του διαχύτη και του φλογοσωλήνα (δείτε και το Σχήμα 11).

Κατά την πρώτη θέση σε λειτουργία, σύμφωνα και με τις οδηγίες του κατασκευαστή, η φλόγα θα πρέπει να είναι καθαρή, όταν παρατηρείται από το παράθυρο επιθεώρησης, και οι εγκοπες του διαχύτη του καυστήρα πρέπει να εκπέμπουν ένα σταθερό λαμπερό φως, για να είναι εξασφαλισμένη η πλήρης καύση. Ένα συνεχές στεφάνι φωτός πρέπει επίσης να είναι ορατό γύρω από την εξωτερική ακμή του διαχύτη και αυτές οι παρατηρήσεις πρέπει να γίνονται τόσο σε συνθήκες χαμηλής όσο και υψηλής φλόγας. Οι λόγοι έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα.

3.2. Λοιπός Πειραματικός Εξοπλισμός

3.2.1. Μετρήσεις παροχής αέρα με Pitot - tube :

Η παροχή εισαγωγής αέρα καύσης μετρήθηκε με την χρήση ενός Pitot – tube και προσδιορίσθηκε η ταχύτητα αέρα εισαγωγής. Οι ενδείξεις στατικής πίεσης από το pitot tube μετατράπηκαν στα αποτελέσματα παροχής.

Ένα τυπικό pitot tube αποτελείται από ένα κεντρικό σωλήνα μέσα στον οποίο η ολική πίεση μετριέται από την επίδραση της ροής πάνω στην πλευρά του σωλήνα που αντιμετωπίζει το επερχόμενο ρεύμα.

Η στατική πίεση λαμβάνεται μέσω μίας ή περισσοτέρων περιφερειακών οπών σε ορθές γωνίες με την κατεύθυνση της ροής. Για τις μετρήσεις του αέρα εισαγωγής ή για μικρες φλόγες με σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, μικροί σωλήνες δειγματοληψίας από χαλαζία ή ανοξείδωτο χάλυβα, χρησιμοποιούνται συνήθως. Η ταχύτητα υπολογίζεται από την μέτρηση της διαφορικής πίεσης και από την πυκνότητα των αερίων, σύμφωνα με την ακόλουθη μέθοδο.

Η βασική εξίσωση του Pitot-tube είναι η εξής :

$$\Delta P = P_1 - P_2 = ½ \rho_a u^2$$

ή

$$h = \Delta P/\rho_w g = ½ \rho_a u^2 / \rho_w g = u^2 / 2g$$

όπως δίνεται από την θεωρία της μηχανικής ρευστών [41].
Από αυτή την εξίσωση μπορεί να υπολογισθεί η ταχύτητα u :

$$u^2 = 2 \rho_w g h / \rho_a$$

όπου :

u: ταχύτητα (m/s)
h: μέτρηση διαφοράς ύψους (m)
g : επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s^2)
p_w : πυκνότητα του νερού (~1000 kg/m)
p_a :πυκνότητα του αέρα (1.225 kg/m)

P_1 : στατική πίεση (Pa)

P_2 : δυναμική πίεση (Pa)

Οι μετρήσεις ύψους έχουν ληφθεί σε οκτώ διαφορετικές οριζόντιες θέσεις μέσα στον αγωγό αέρα, σε εκατοστά νερού πάνω σε ένα κεκλιμένο (20 μοίρες) μανόμετρο. Οι ταχύτητες αέρα σε όλες τις θέσεις μέτρησης υπολογίσθηκαν από την ακόλουθη εξίσωση :

$$u = \sqrt{\frac{2\rho_W gh}{\rho_a}} = \sqrt{16016 \times h}$$

Οι μετρήσεις με το Pitot tube επιβεβαιώθηκαν με τις μετρήσεις ταχύμετρου στις ίδιες θέσεις.

3.2.2 Αναλυτής NOx :

Χρησιμοποιήθηκε ο Αναλυτής Αερίων Γενικής Χρήσης Horriba CLA-510SS. Ο αναλυτής αυτός χρησιμοποιεί την τεχνική χημειοφωταύγειας (chemiluminescence) για τις μετρήσεις.

Η μονάδα του Αναλυτή περιλαμβάνει διάφορα εξαρτήματα, όπως η αντλία κενού, ο θάλαμος αντίδρασης, η γεννήτρια όζοντος, ο φωτοπολλαπλασιαστής, οι ρυθμιστές οξυγόνου και πίεσης δείγματος, ο σταγονοσυλλέκτης που συλλέγει το θειϊκό οξύ που περιέχεται στο δείγμα καυσαερίου, ο ηλεκτρονικός ψύκτης που χρησιμεύει για την ψύξη του αερίου δείγματος, ο μετατροπέας NO – Nox και βαλβίδες για την επιλογή μεταξύ λειτουργίας NO ή Nox.

Ο Αναλυτής αποτελείτο από δύο βασικά τμήματα, την μονάδα δειγματοληψίας και την μονάδα ανάλυσης. Η τεχνική της χημειοφωταύγειας εφαρμόζεται από τον Αναλυτή για την μέτρηση των συγκεντρώσεων NO , NOx, στο δείγμα αερίου, σε ppm. Μετρήθηκαν τα δυο κύρια οξείδια του αζώτου, το NO και NO_2, τα οποία συνυπολογιζόμενα δίνουν το συνολικό επίπεδο NOx. Η μονάδα επίσης συμπεριελάμβανε μία γεννήτρια όζοντος. Το όζον που παράγεται από τον αέρα μέσα στην γεννήτρια αντιδρά με το μονοξείδιο του αζώτου και σχηματίζει διοξείδιο του αζώτου και οξυγόνο. Όταν το δείγμα αερίου που περιέχει NO και αέριο

όζον αναμιγνύεται μέσα σε ένα δοχείο, ή αντιδραστήριο, προκαλούνται οι ακόλουθες αντιδράσεις :

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2^* + O_2$$

Το NO_2^* σημαίνει ότι το σωματίδιο του NO_2 βρίσκεται μερικώς σε διεγερμένη κατάσταση. Όταν τα σωματίδια NO_2 στην διεγερμένη κατάσταση επιστρέφουν σε σταθερή κατάσταση, η ενέργεια διέγερσης αποβάλλεται με την μορφή φωτός,

$$NO_2^* \rightarrow NO_2 + h\nu$$

Αυτή η εκπομπή φωτός αποκαλείται χημειοφωταύγεια και είναι σε ευθεία αναλογία με την ποσότητα των σωματιδίων NO πριν από την αντίδραση. Η συγκέντρωση του NO στο δείγμα μπορεί έτσι να προσδιορισθεί, μετρώντας αυτή την φωταύγεια.

Η ένταση του φωτός παρατηρείται μέσω του οπτικού φίλτρου με έναν φωτοπολλαπλασιαστή υψηλής ευαισθησίας, τοποθετημένο στο ένα άκρο του αντιδραστήρα, και αυτή η ένταση φαίνεται ότι μεταβάλλεται γραμμικά με την συγκέντρωση μονοξειδίου του αζώτου.

Το διάγραμμα βασικής αρχής λειτουργίας του Αναλυτή που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 3.11.

Για να διασφαλισθεί η υψηλότερη δυνατή ακρίβεια των μετρημένων αποτελεσμάτων, απαιτείται η συχνή βαθμονόμηση του Αναλυτή, σχεδόν πριν από κάθε διαφορετική μέτρηση. Η βαθμονόμηση γίνεται με τον προσδιορισμό του αερίου βαθμονόμησης και του μηδενικού αερίου.

Το αέριο άζωτο κανονικά χρησιμοποιείται για την ένδειξη μηδενικού αερίου. Μία ήδη γνωστή συγκέντρωση αερίου υψηλής πίεσης με μία βάση N2 χρησιμοποιείται για κάθε συστατικό του αερίου βαθμονόμησης. Το αέριο πρέπει να προετοιμασθεί με μία συγκέντρωση 80 – 90 % της πλήρους κλίμακας βαθμονόμησης. Τόσο το μηδενικό αέριο όσο και το αέριο βαθμονόμησης εισάγονται στον αναλυτή κάτω από τις ίδιες συνθήκες πίεσης και ψυχρομετρίας όπως το δείγμα αερίου.

Η ακρίβεια των μετρήσεων του αναλυτή αυτού είναι της τάξεως του 0.1 ppm και η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων είναι ± 0.5 % της πλήρους κλίμακας (0 - 5000 ppm).

Η μονάδα του Αναλυτή περιλάμβανε επίσης αρχικά έναν καθετήρα δειγματοληψίας. Δύο διαφορετικά τέτοια στελέχη δειγματοληψίας χρησιμοποιήθηκαν στην πράξη κατά την διάρκεια του πειράματος, το πρώτο ήταν ένα υδρόψυκτο πυρόμετρο αναρρόφησης ενώ το δεύτερο ήταν πρόσφατα κατασκευασμένο υδρόψυκτο ανοξείδωτο με επένδυση χαλαζιακή, το τελευταίο δε θεωρούνταν το περισσότερο ακριβές, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσδίδει η χαλαζιακή επένδυση. Η ψύξη με νερό δεν εφαρμοζόταν στην θήκη του στελέχους του πυρόμετρου λόγω των παρατηρήσεων υπερβολικά χαμηλών ενδείξεων συγκέντρωσης NOx, που αποδίδονταν στην συμπύκνωση μέρους του νερού όταν ο σωλήνας δειγματοληψίας υποβάλλονταν στις εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες μέσα στον φούρνο. Το σύστημα ψύξης του πυρόμετρου δεν θεωρούνταν πολύ αποτελεσματικό. Το στέλεχος με την χαλαζιακή επένδυση ήταν συνεχώς ψυχόμενο με νερό (καλύτερη ψύξη) για τις μετρήσεις μέσα στην φλόγα, και η θερμοκρασία του δείγματος βρέθηκε ότι διατηρούνταν σε αποδεκτά, χαμηλά επίπεδα (γύρω στους 30 °C).

Η θερμοκρασία της δειγματοληψίας αερίου επιτηρούνταν κατά την διάρκεια των καταγραφών καθώς οι οδηγίες του κατασκευαστή ήταν ότι η θερμοκρασία του αερίου που εισέρχεται στην μονάδα δειγματοληψίας δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 100 °C. Επίσης προκειμένου να παρακολουθείται η θερμοκρασία του δείγματος αερίου και η επίδρασή της στα αποτελέσματα. Κανονικά παρατηρούνταν θερμοκρασίες στην περιοχή των 30 – 35 °C. Ωστόσο, κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας με το πυρόμετρο ειδικά στις δύο πρώτες (προς την φλόγα) θυρίδες και κοντύτερα στον κεντρικό άξονα, καταγράφηκαν θερμοκρασίες δείγματος μέχρι και 100 βαθμών Κελσίου και σημαντικές διακυμάνσεις των ενδείξεων συγκέντρωσης NO παρατηρήθηκαν στις αντίστοιχες θέσεις. Αυτό θεωρείται αποτέλεσμα της ελλειπούς ψύξης με νερό.

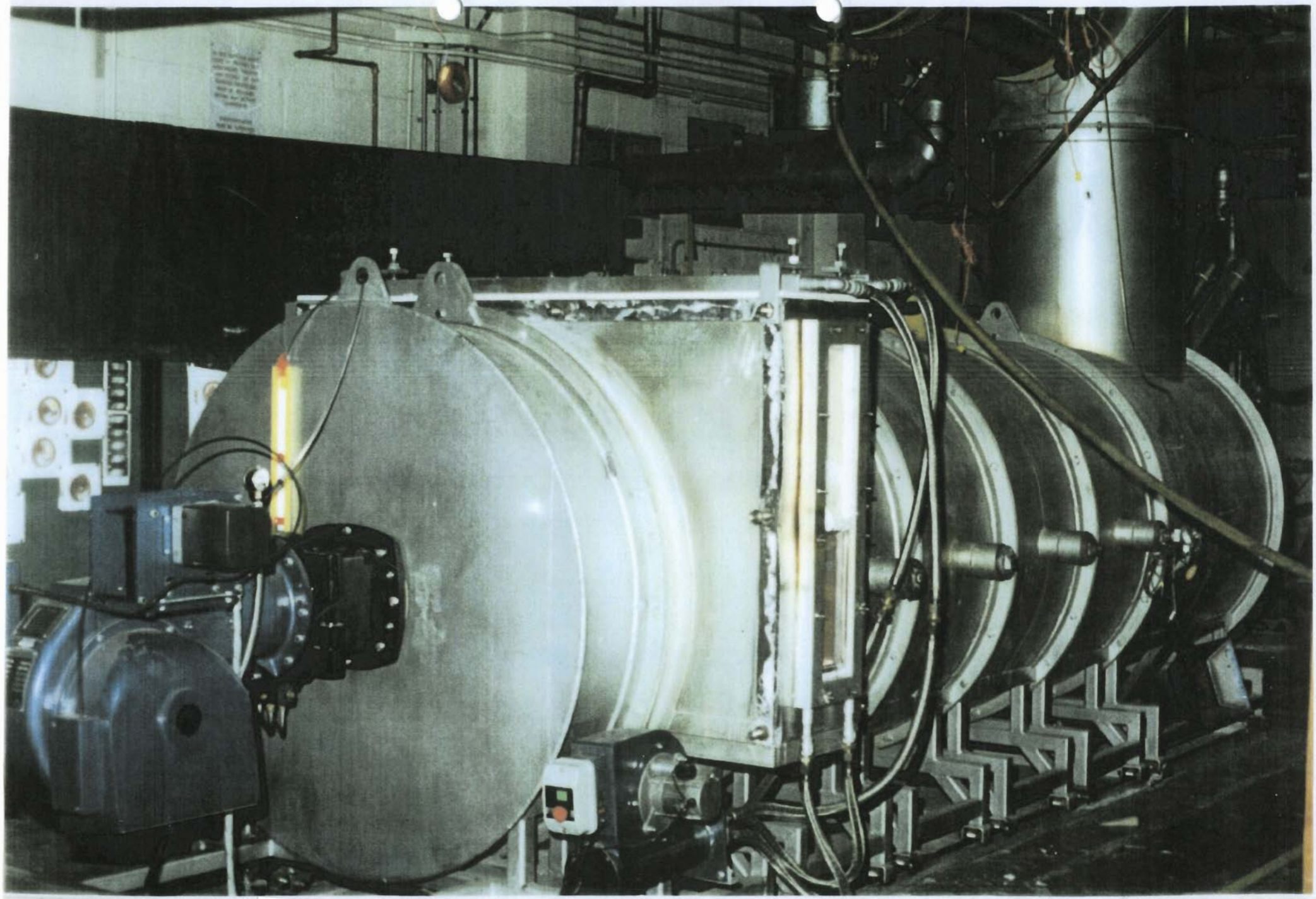
Οι διαστάσεις του στελέχους λήψης του πυρόμετρου ήταν 725 mm σε μήκος, Το πρώτο, το τμήμα δειγματοληψίας ήταν κατασκευασμένο 100% από τριοξείδιο του αλουμινίου (αλουμίνα). Η εσωτερική διάμετρος δειγματοληψίας ήταν 5 mm και η

εξωτερική διάμετρος 8 mm. Η κεφαλή οξειδίου του αλουμινίου στηριζόταν από το πίσω τμήμα (από ανοξείδωτο χάλυβα), και περιλάμβανε το σύστημα νερού ψύξης.

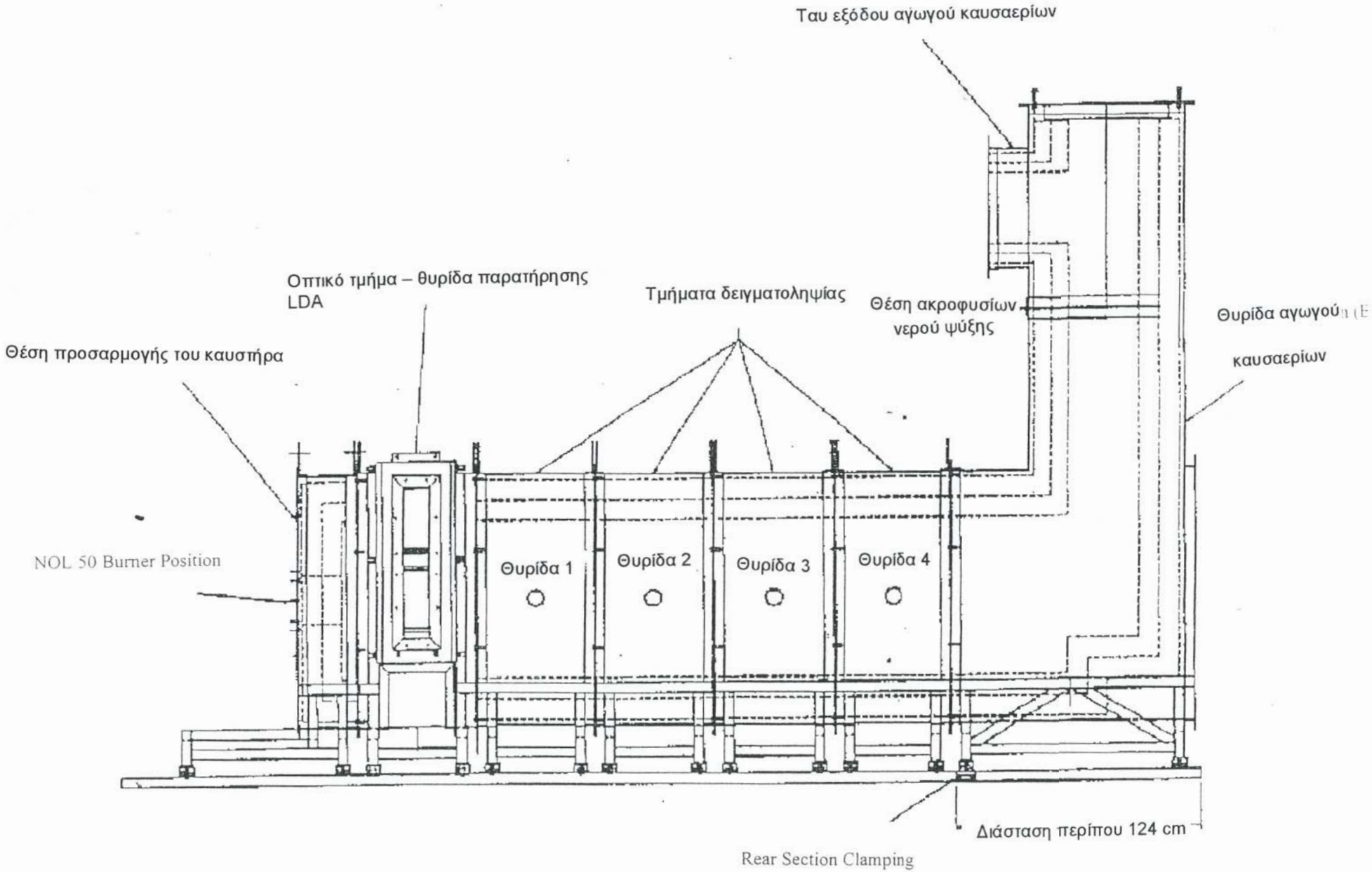
Το άλλο στέλεχος περιλάμβανε το τμήμα δειγματοληψίας με χαλαζιακή επένδυση, εσωτερικης διαμέτρου 6 mm, που υποστηρίζονταν από ένα κάλυμμα ανοξείδωτου χάλυβα με εξωτερική διάμετρο 25 mm και καταλήγοντας σε κωνικού σχήματος κεφαλή. Το σύστημα ψύξης στο πίσω μέρος, αποτελείτο από δύο σωλήνες εισαγωγής νερού και μία εξόδου νερού. Το μήκος του στελέχους ήταν 830 mm.

Το πυρόμετρο με χαλαζιακή επένδυση παρουσιάζεται επίσης γραφικά στο Σχήμα 3.10.

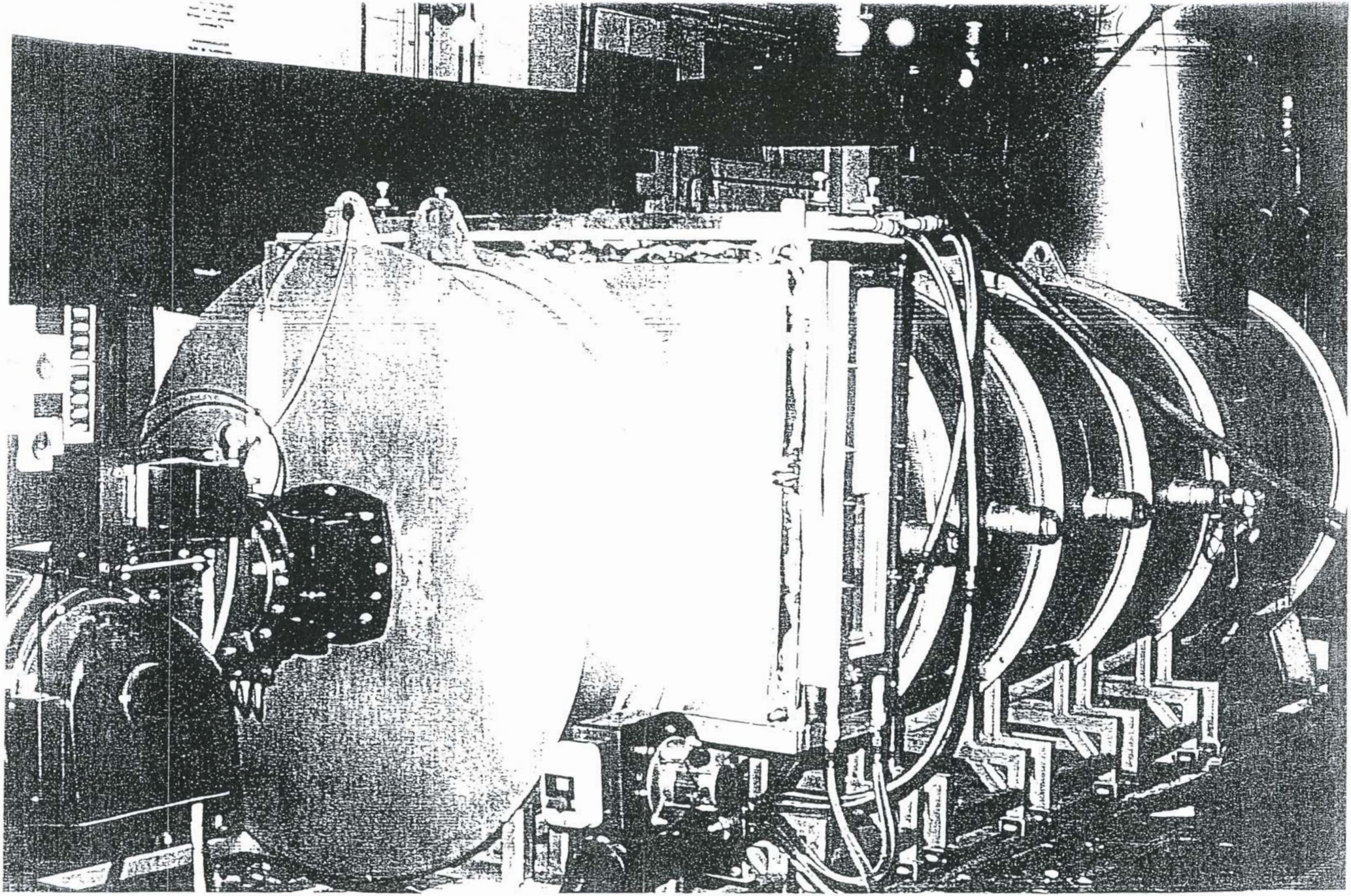
Σχήματα Πειραματικής Διάταξης (Σχήματα 2 & 3.1 ÷ 3.11)



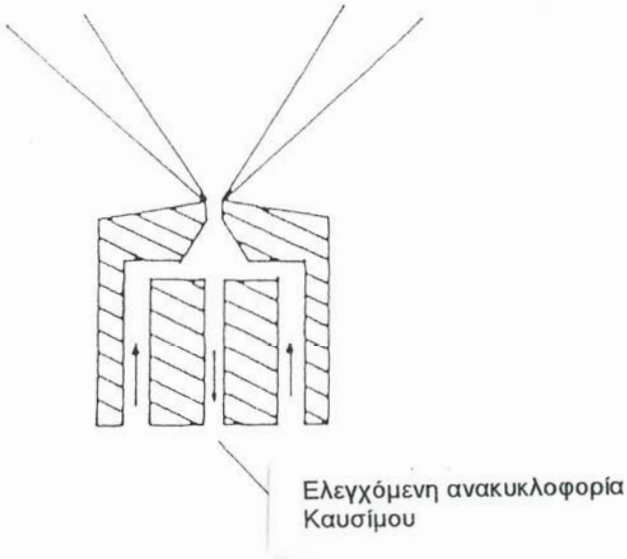
Σχήμα 2 : Φωτογραφία – Πειραματική διάταξη, Σύστημα καυστήρα/κλιβάνου με τμήμα αγωγού απαγωγής καυσαερίων και κύκλωμα νερού ψύξης



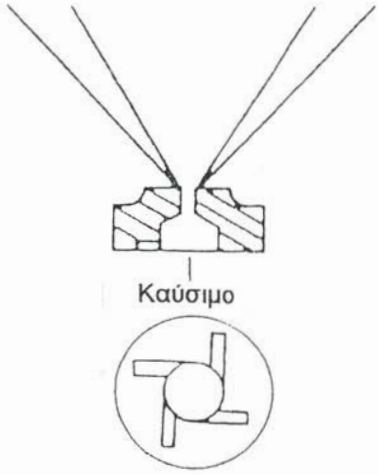
Σχήμα 3.1 : Περιγραφικό διάγραμμα της διάταξης του κλιβάνου



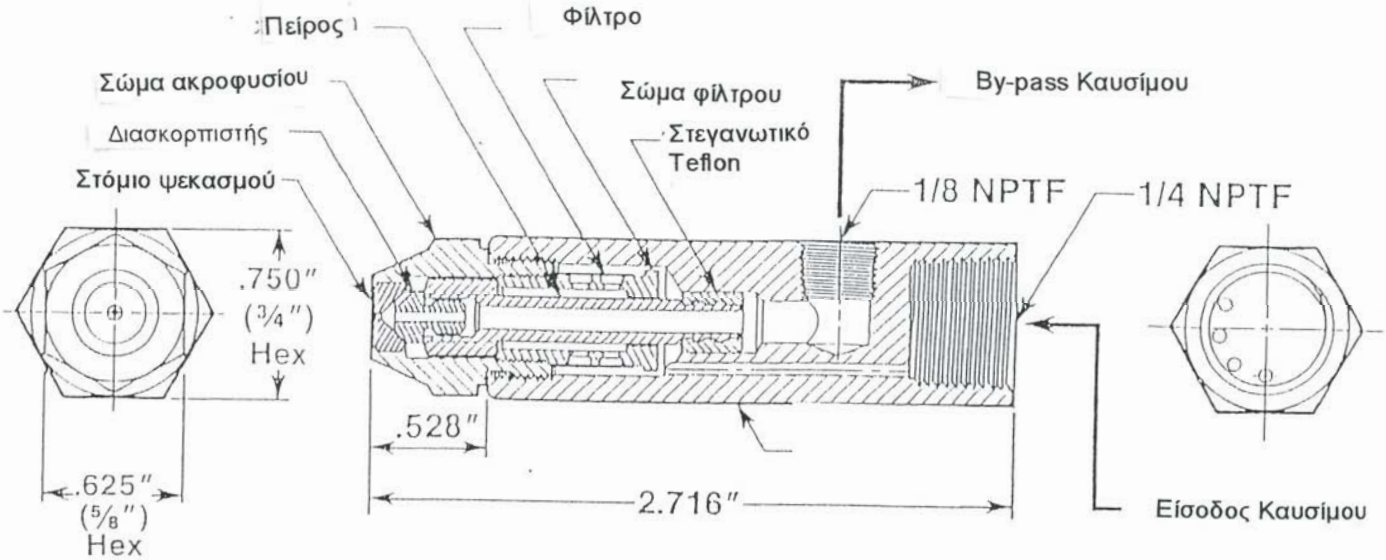
Σχήμα 3.2 : Πειραματική διάταξη, σύστημα καυστήρα/κλιβάνου



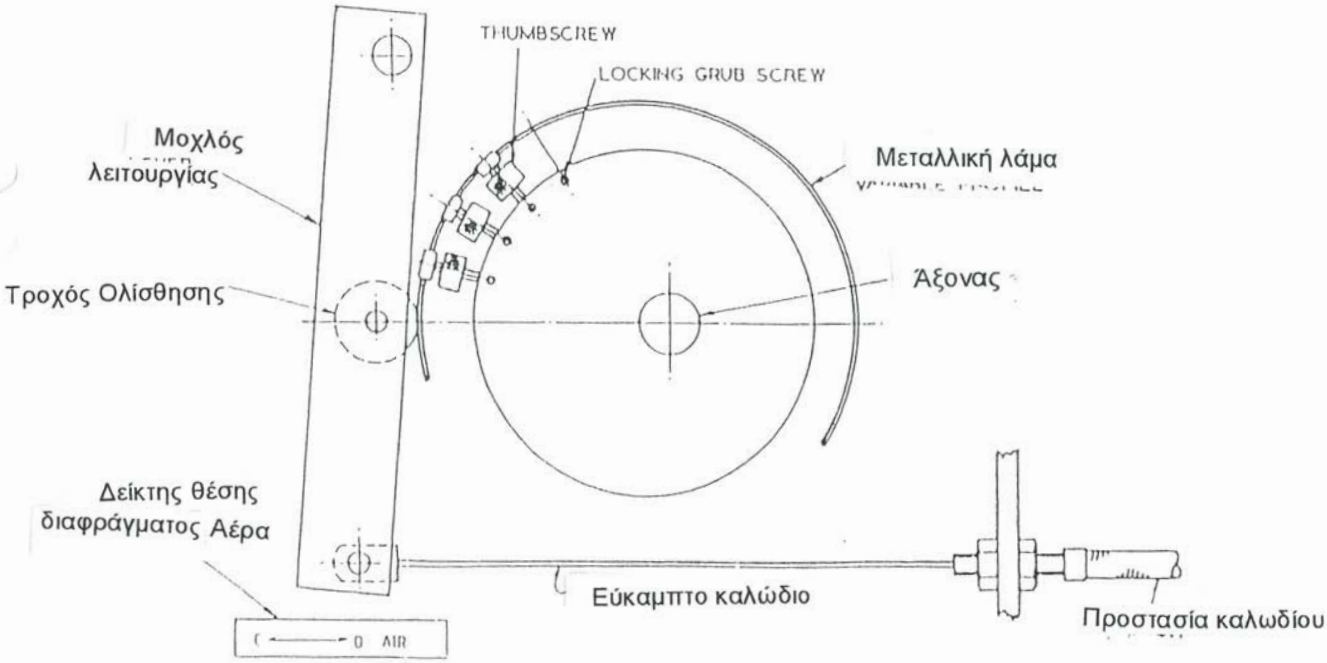
Σχήμα 3.3 : Παράδειγμα διάταξης spill-back atomiser



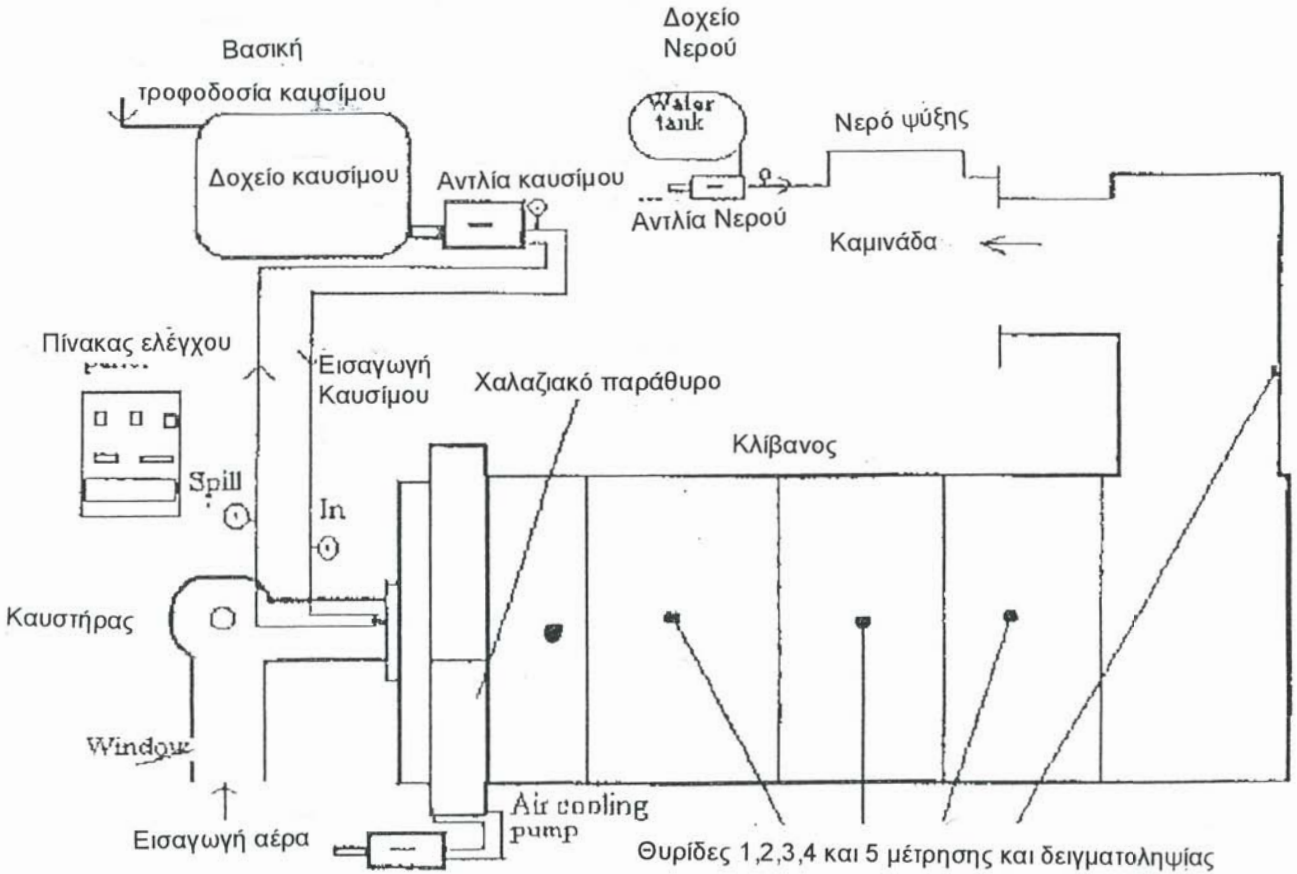
Σχήμα 3.4 : Παράδειγμα διάταξης απλού swirl pressure jet atomiser



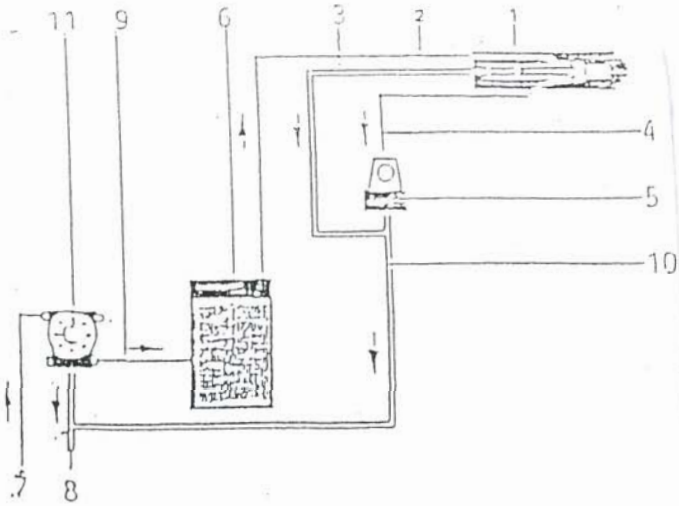
Σχήμα 3.5 : Σχέδιο του ακροφυσίου



Σχήμα 3.6 : Σχέδιο του air cam



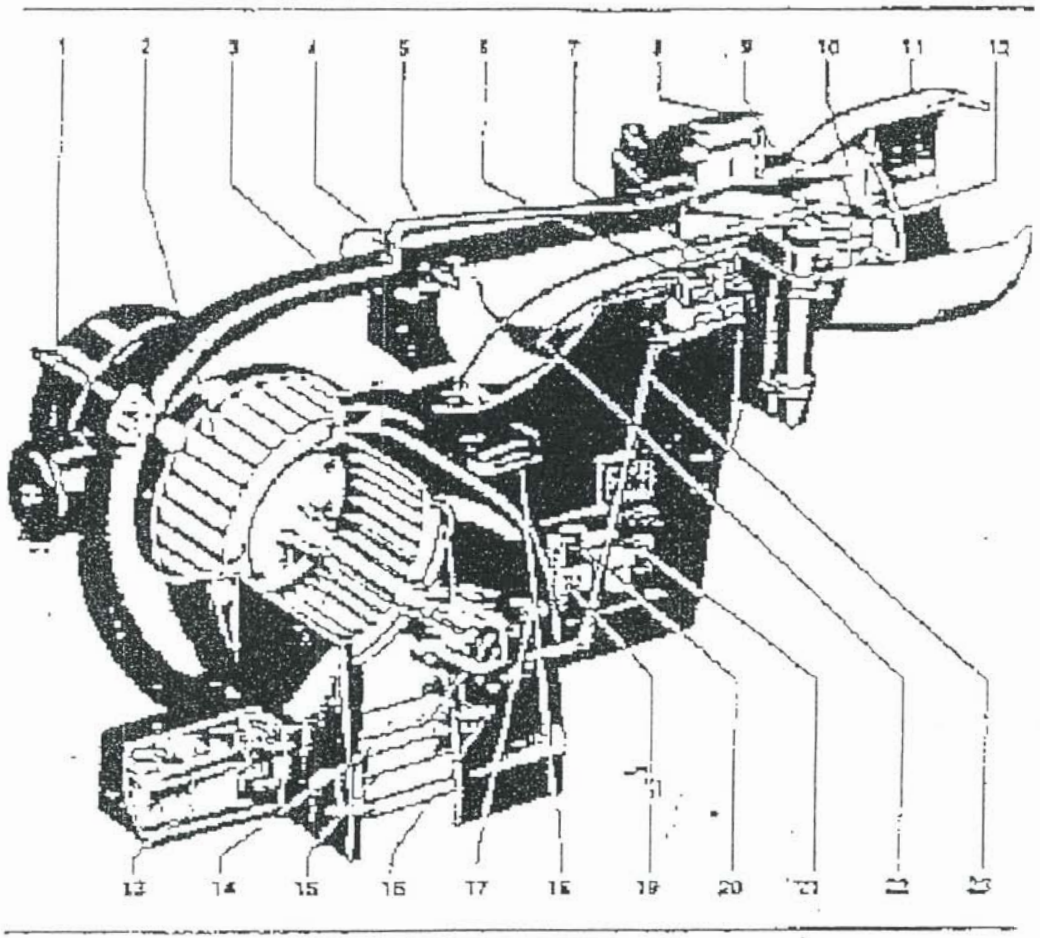
Σχήμα 3.7 : Διάγραμμα της πλήρους πειραματικής διάταξης



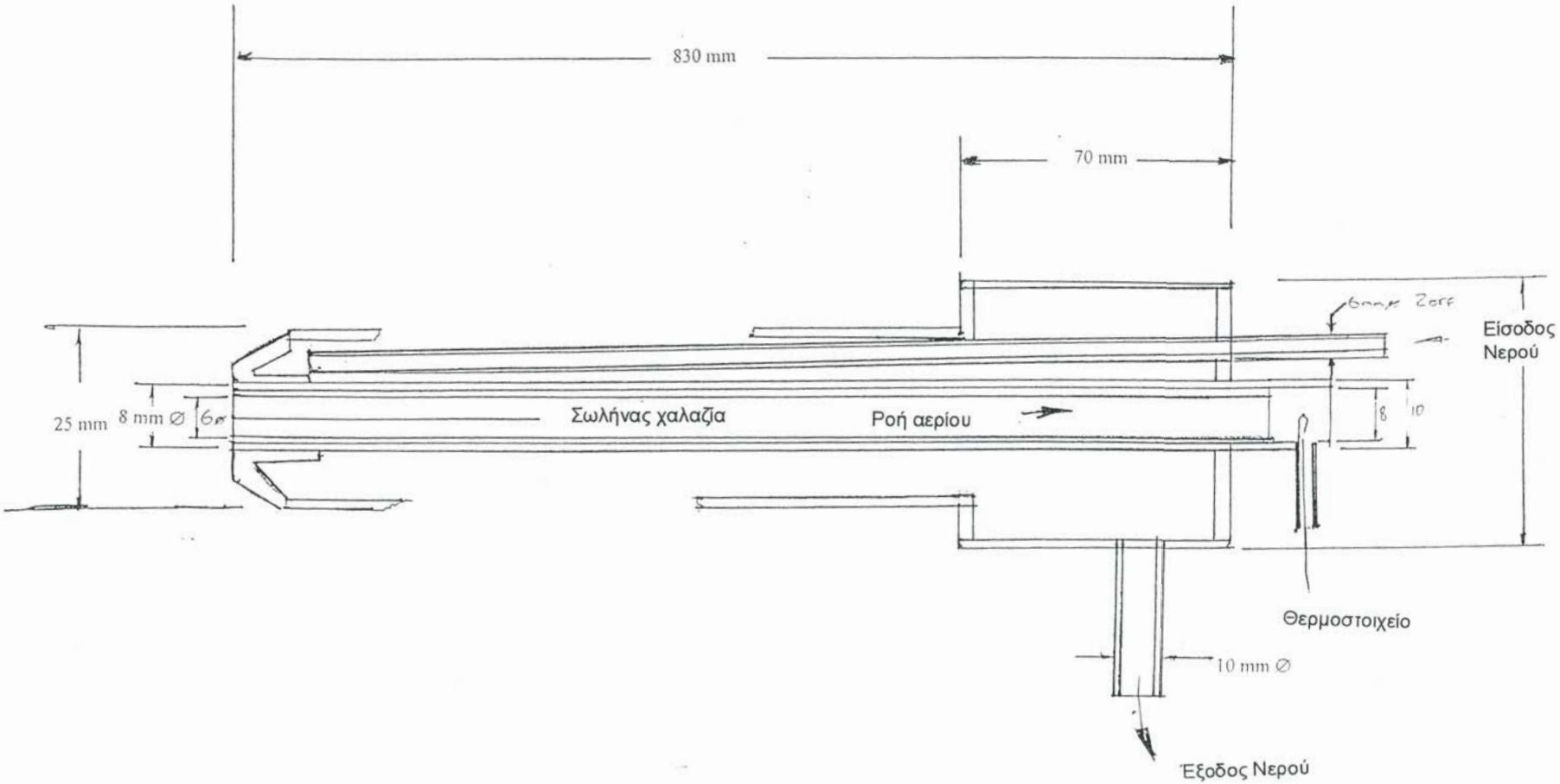
1 – Ακροφύσιο με ανακυκλοφορία
2 – Γραμμή τροφοδοσίας καυσίμου
3 – Γραμμή διαρροής καυσίμου
4 – Γραμμή επιστροφής καυσίμου από το ακροφύσι
5 – Σωληνοειδής βαλβίδα
6 – Προθερμαντήρας καυσίμου
7 – Γραμμή αναρρόφησης αντλίας
8 – Γραμμή επιστροφής αντλίας
9 – Γραμμή κατάθλιψης αντλίας
10 – Βασική γραμμή επιστροφής
11 – Αντλία καυστήρα

Σχήμα 3.8 : Διάγραμμα της τροφοδοσίας καυσίμου

1 – Κινητήρας
2 – Πτερωτή ανεμιστήρα
3 – Έλεγχος
4 – Θυρίδα παρατήρησης
5 – Ανιχνευτής φλόγας
6 – Σωληνοειδής βαλβίδα προς το ακροφύσιο 1
7 – Σωληνοειδής βαλβίδα προς το ακροφύσιο 2
8 – Φλάντζα παλινδρόμησης (μετακινούμενη
9 – Ηλεκτρόδια έναυσης
10 – Δίσκος διάχυσης αέρα
11 – Κεφαλή καύσης
12 – Ακροφύσια
13 – Σερβομοτέρ για έλεγχο ποσότητας αέρα
14 – Κινητό πτερύγιο εισόδου αέρα
15 – Αντλία καυσίμου
16 – Γραμμή επιστροφής καυσίμου
17 – Είσοδος καυσίμου
18 – Μετασχηματιστής έναυσης
19 – Ακροδέκτες ηλεκτρικής σύνδεσης
20 – Διακόπτης λειτουργίας
21 – Επαφή κινητήρα
22 – Καλώδιο έναυσης
23 – Πίεση καυσίμου



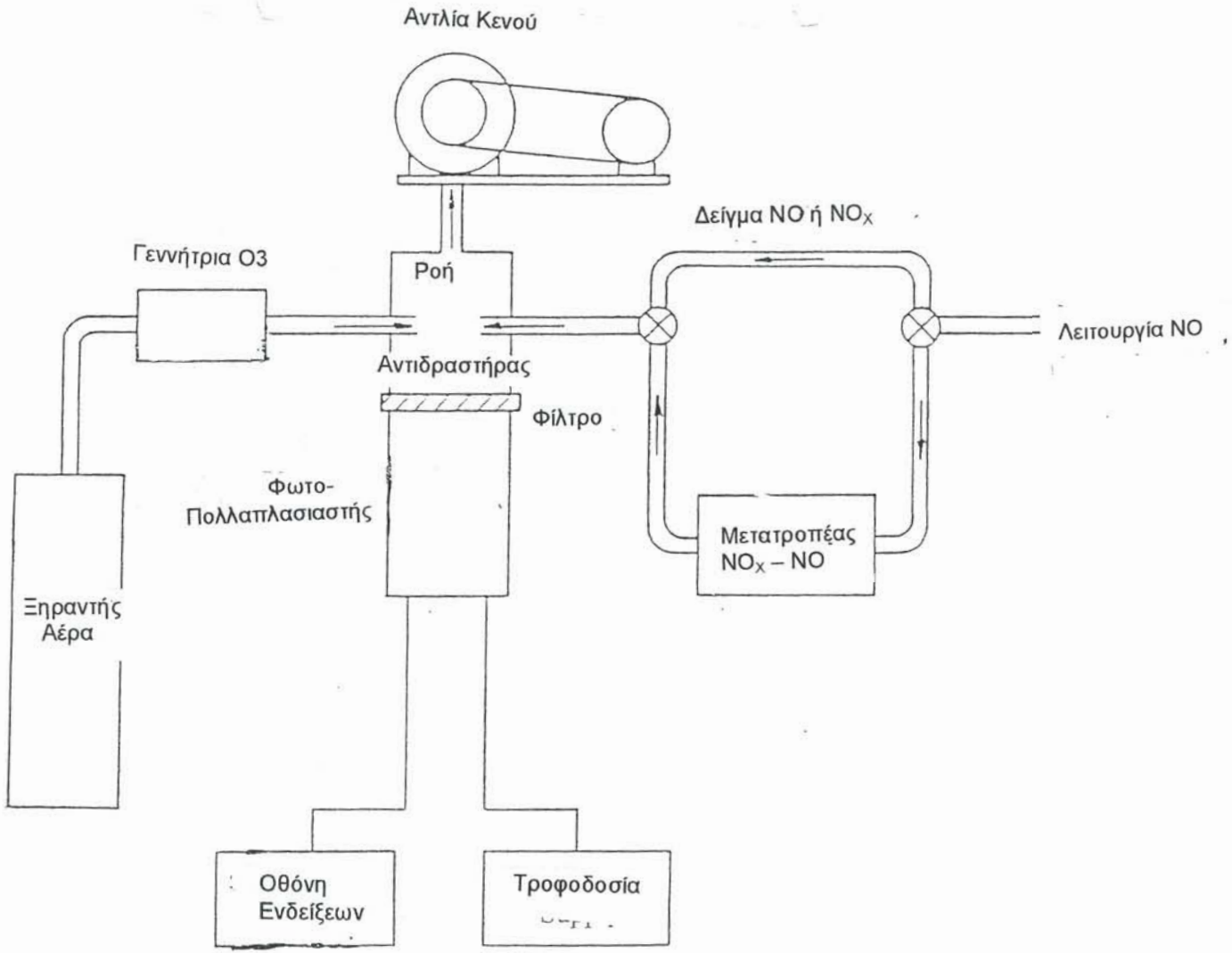
Σχήμα 3.9 : Λεπτομέρειες του καυστήρα πετρελαίου καυσίμου



Σχήμα 3.10 : Σχέδιο του οργάνου δειγματοληψίας με χαλαζιακή επένδυση

Ανοξείδωτοι αυλοί - 18/8

Συγκολλητή κατασκευή



Σχήμα 3.11 : Διάγραμμα βασικής αρχής λειτουργίας του Αναλυτή NO_X

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ

Όπως προαναφέρθηκε, ένα σημαντικό τμήμα των στόχων της εργασίας αυτης ήταν η λειτουργία των οργάνων ελέγχου και ενδείξεων του κλιβάνου. Για αυτό τον λόγο, ένα πλήθος διαφορετικών πειραματικών διατάξεων δοκιμάσθηκαν στο πρώτο μέρος της εργασίας, προκειμένου να επιτευχθεί η κατάλληλη διαμόρφωση των οργάνων και να εγκατασταθεί ένα λειτουργικό σύστημα δειγματοληψίας. Οι αλλαγές που δοκιμάσθηκαν αφορούν κυρίως τις θέσεις των αναλυτών αερίου.

4.1. Λειτουργία του Συστήματος Καύσης

Το καύσιμο προθερμαινόταν με ηλεκτρικούς θερμαντήρες, ως την θερμοκρασία λειτουργίας του, η οποία ήταν περίπου 80 °C, έτσι ώστε να διευκολύνεται η ροή του διαμέσω των σωληνώσεων. Μόλις σταθεροποιούνταν η θερμοκρασία του καυσίμου, γινόταν έναυση του καυστήρα. Η παροχή του καυσίμου ρυθμιζόταν με την κατάλληλη μεταβολή της πίεσης τροφοδοσίας της αντλίας καυσίμου και στραγγαλίζοντας αντίστοιχα την εισαγωγή αέρα. Οι αρχικές λειτουργικές συνθήκες του καυστήρα ρυθμίζονταν αυτόματα από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή. Η παροχή αέρα ρυθμίζονταν μεταβάλλοντας την γωνία θέσης του πτερυγίου εισαγωγής στον καυστήρα με το αντίστοιχη χειροκίνητη ρύθμιση του κοχλία και έτσι μεταβάλλοντας την πίεση εισόδου του αέρα καύσης.

Μόλις διαμορφώνονταν η πίεση καυσίμου, συνήθως περίπου 18 bar και η πίεση αέρα, συνήθως 5 mbar ή 8 mbar, ο κλίβανος αφηνόταν να λειτουργήσει και να ανεβάσει θερμοκρασία και γίνονταν καταγραφες των ενδείξεων των διαφόρων μεταβλητών, όπως η θερμοκρασία, οι συγκεντρώσεις αερίων, η ισχύς, οι παροχές, με τον χρόνο μετά την έναυση. Οι συνθήκες λειτουργίας του καυστήρα, η ισχύς ή ο λόγος αέρα/καυσίμου μπορούσαν να μεταβληθούν κατά την διάρκεια της λειτουργίας, ρυθμίζοντας τα σχετικά χειριστήρια και κάθε τέτοια αλλαγή επίσης καταγράφονταν.

Οι ισχείς που δοκιμάσθηκαν ήταν μεταξύ 0.6 – 1.1 MW, με ιδιαίτερη έμφαση στις συνθήκες για 0.8 MW οι οποίες αντιπροσωπεύουν την μέτρια κατανάλωση καυσίμου και μέση ένταση καύσης. Οι μετρήσεις επικεντρώθηκαν στα 0.8 MW έτσι ώστε να ληφθούν στον διαθέσιμο για την εργασία χρόνο, αρκετά δεδομένα

θερμοκρασιών και συγκέντρωσης NOx, που θα επέτρεπαν να γίνουν συγκρίσεις για διαφορετικούς λόγους καυσίμου/αέρα.

Οι μετρήσεις γίνονταν σε δύο κυρίως φάσεις : Κατά την διάρκεια της προθέρμανσης (σταδιακής αύξησης θερμοκρασίας) του κλιβάνου, η οποία κάτω από τις συνήθεις συνθήκες λειτουργίας του πειράματος, τους ρυθμούς αύξησης της ισχύος και τις παροχές καυσίμου/ αέρα που χρησιμοποιούνταν, διαρκούσε περίπου 5 ώρες. Τα χαρακτηριστικά καύσης του συστήματος κάτω από αυτές τις μεταβατικές συνθήκες έπρεπε επίσης να προσδιορισθούν.

Η δεύτερη φάση αφορά την σταθερή κατάσταση, η οποία προέκυπτε μετά την σταθεροποίηση των συνθηκών καύσης. Αυτή η φάση χαρακτηριζόταν από σχετικά σταθερές θερμοκρασίες σε ολόκληρο το μήκος του θαλάμου καύσης, μετά από μία περίοδο λειτουργίας σε σταθερή παροχή καυσίμου, λόγο καυσίμου/αέρα και ισχύ. Οι μετρήσεις συγκέντρωσης αερίου διεξάγονταν κυρίως σε αυτή την φάση κάτω από συνθήκες σταθεροποιημένης θερμοκρασίας. Οι μετρήσεις σταθερής κατάστασης ισορροπίας ήταν οι πιο σημαντικές, επιτρέποντας τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καύσης του συστήματος σε πραγματική λειτουργία.

4.2. Μετρήσεις Θερμοκρασίας

4.2.1. Μέθοδος λήψης μετρήσεων :

Η σημασία του καθορισμού του προφίλ θερμοκρασιών στα συστήματα καύσης είναι φυσικά μεγάλη, για τον προσδιορισμό των λειτουργικών χαρακτηριστικών και της απόδοσης του συστήματος. Από το πλήθος υλικων που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία των θερμοστοιχείων πολύ λίγα είναι εκείνα τα οποία είναι κατάλληλα για μετρήσεις θερμοκρασίας μέσα σε φλόγα. Αυτά που χρησιμοποιούνται ευρέως έχουν πολύ σταθερά χαρακτηριστικά, ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες και καλή συγκολλησιμότητα για να βοηθηθεί η κατασκευή μικροσκοπικών διατομών θερμοστοιχείων. Τα θερμοστοιχεία που περιέχουν λευκόχρυσο και ρόδιο αποκαλούνται θερμοστοιχεία βασικού μετάλλου. Από αυτά, την ευρύτερη χρήση βρίσκει το θερμοστοιχεία τύπου K, με ένα στοιχείο από chromel, το οποίο περιέχει Νικέλιο, Χρώμιο και Πυρίτιο και το άλλο από alumel, ένωση που περιέχει Ni, Si, Mn και Al [42].

Οι μετρήσεις θερμοκρασίας αερίου έγιναν χρησιμοποιώντας βασικά τέσσερα ζεύγη θερμοστοιχείων τύπου-Κ, 13% ροδίου/λευκόχρυσου. Οι έξοδοι των θερμοστοιχείων συνδέονταν με ψηφιακές λήψεις, για να δίνουν είτε απευθείας ένδειξη της θερμοκρασίας ή να δίνουν μία ένδειξη (ένα σήμα) διαφοράς τάσης που μπορεί να μετατραπεί με την βοήθεια πινάκων αναφοράς.

Τα προφίλ θερμοκρασίας λαμβάνονταν σε διάφορες θέσεις κατάντη του διασκορπιστή του καυστήρα, από τις τέσσερις διαφορετικές θυρίδες δειγματοληψίας στο πλάϊ του κλιβάνου, τοποθετημένες σε τακτικά διαστήματα 600 mm και για κάθε σετ συνθηκών λειτουργίας. Η πρώτη θυρίδα, η πιο κοντινή προς το στόμιο του καυστήρα ήταν σε μία απόσταση 900 mm από αυτό.

Δύο ζεύγη θερμοστοιχείων (13% Rh/Pt) χρησιμοποιήθηκαν, το πρώτο ζεύγος μήκους 850 mm και το άλλο μήκους 450 mm. Το κοντύτερο ζεύγος μπορούσε να δώσει ενδείξεις θερμοκρασίας ακριβώς μέσα από το τοίχωμα του κλιβάνου (30 mm από το τοίχωμα), ενώ τα μακρύτερα θερμοστοιχεία επέτρεπαν την λήψη μετρήσεων στον διαμήκη άξονα του κλιβάνου.

Τα μεγαλύτερου μήκους ζεύγη μπορούσαν να μετακινηθούν ακτινικά και να λάβουν μετρήσεις θερμοκρασίας σε 4 διαφορετικές περιφερειακές θέσεις, σε βήματα 100 mm ή 50 mm, από το κέντρο προς το τοίχωμα του θαλάμου καύσης. Οι επιλεγμένες θυρίδες μπορούσαν να εναλλαγούν έτσι ώστε μετρήσεις με τα θερμοστοιχεία μεγαλύτερου μήκους μπορούσαν να ληφθούν στις διάφορες αξονικές αποστάσεις. Σε όλες τις θέσεις λαμβάνονταν μετρήσεις ανά δέκα λεπτά.

- Για λόγους ασφαλείας του εξοπλισμού κυρίως λαμβάνονταν μετρήσεις θερμοκρασίας και σε 4 σημεία του τμήματος αγωγού καυσαερίων : η θερμοκρασία ακριβώς πριν τον ανεμιστήρα απαγωγής, η οποία για προστασία του μηχανήματος δεν έπρεπε να ξεπερνά τους 150 °C, η θερμοκρασία αμέσως μετά από το κύκλωμα νερού ψύξης, που από τις οδηγίες λειτουργίας έπρεπε να είναι χαμηλότερη των 300 °C, η θερμοκρασία των καυσαερίων ακριβώς πριν τον κύριο αγωγό καυσαερίων του εργαστηρίου και η θερμοκρασία του δείγματος αερίου στην είσοδό του στην μονάδα δειγματοληψίας του αναλυτή NOx, στην πίσω θυρίδα του κλιβάνου, η οποία θα έπρεπε να είναι χαμηλότερη από 100 °C.

Οι μέσες θερμοκρασίες μετρούνταν σε όλες τις περιπτώσεις με απευθείας καταγραφή της ένδειξης διαφοράς τάσης του ζεύγους θερμοστοιχείων με την χρήση

ψηφιακού βολτόμετρου. Οι καταγεγραμμένες διαφορές τάσης μετατρέπονταν σε τιμές θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας σχετικούς πίνακες βαθμονόμησης.

4.2.2. Αιτίες για Ανακρίβειες των Μετρήσεων Θερμοκρασίας :

Οι μετρήσεις με θερμοστοιχεία εμπεριέχουν συχνά πιθανότητες εμφάνισης ανακριβειών. Αν η θερμοκρασία του άκρου του θερμοστοιχείου στοχεύεται να δώσει μια πραγματική ένδειξη αυτής του αερίου, θα πρέπει να εξασφαλισθεί καλή μετάδοση θερμότητας με συναγωγή από το αέριο προς το άκρο αυτό.
Ο συντελεστής συναγωγής, αν υπάρχει στρωτή ή τυρβώδης ροή που προκαλεί βεβιασμένη συναγωγή, θα εξαρτάται από τους αριθμούς Reynolds και Prandtl :

$$Nu = f\,(Re, Pr)$$

Μπορεί να αποδειχθεί [13], σχετικά με την παραπάνω εξίσωση για τον αριθμό Nusselt ότι η μετάδοση θερμότητας διά συναγωγής προς το άκρο του θερμοστοιχείου εξαρτάται βασικά από τον προσανατολισμό του θερμοστοιχείου σε σχέση με την διεύθυνση της ροής του αερίου. Αυτός είναι ένας πρώτος λόγος για την ύπαρξη ενός περιθωρίου αβεβαιότητας για αυτές τις μετρήσεις. Τα υλικά κατασκευής των θερμοστοιχείων είναι επίσης τα ίδια καλοί αγωγοί της θερμότητας και υπάρχει επίσης η πιθανότητα διαρροής θερμότητας με αυτή την αγωγιμότητα.

Γενικά λαμβάνεται υπόψη ότι τα στοιχεία δεν αποκτούν ακριβώς την ίδια θερμοκρασία με αυτή του θερμού αερίου. Η μετάδοση θερμότητας διά ακτινοβολίας επίσης εισάγει έναν βαθμό αβεβαιότητας. Το στοιχείο ακτινοβολεί ενέργεια προς τα ψυχρότερα τοιχώματα (απώλεια ακτινοβολίας) και σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας αυτή η απώλεια αντισταθμίζεται με την διά συναγωγής μετάδοση θερμότητας από το αέριο προς το στοιχείο.

Καθώς η ακτινοβολία από το στοιχείο αυξάνεται ανάλογα με την τέταρτη δύναμη της διαφοράς θερμοκρασίας, η διόρθωση που πρέπει να γίνεται για αυτή την απώλεια αυξάνεται ραγδαία με την θερμοκρασία. Μία σειρά από μελέτες, έχει ασχοληθεί με την διόρθωση θερμοκρασίας και εξισώσεις για την διόρθωση αυτή έχουν αναπτυχθεί [42, 43].

Οι διορθώσεις αυτές λαμβάνονται υπόψιν στους πίνακες αναφοράς–βαθμονόμησης των θερμοστοιχείων, στον μέγιστο δυνατό βαθμό.

Μία άλλη σημαντική αιτία πρόκλησης σφαλμάτων ακρίβειας σε μετρήσεις με θερμοστοιχεία κατασκευασμένα από κράματα ευγενών μετάλλων, ειδικά λευκόχρυσου, είναι η καταλυτική επίδραση αυτών των μετάλων στην φλόγα. Κάτω από κατάλληλες συνθήκες, τα θερμικά κέρδη που προκύπτουν από τις αντιδράσεις μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικά λάθη (ιδιαίτερα αυξημένες θερμοκρασίες). Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την χρήση επικαλύψεων των θερμοστοιχείων με μονωτικές στρώσεις μη καταλυτικών υλικών, όπως είναι τα οξείδια του πυριτίου (όπως και στην περίπτωση των θερμοστοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν).

4.3 Μετρήσεις Συγκέντρωσης Αερίων

Δυο αναλυτές αερίου συνδέθηκαν για δειγματοληψίες : Ο αναλυτής NOx συνδέθηκε όπως έχει αναφερθεί στην πίσων θυρίδα (στην έξοδο των καυσαερίων) για την πρώτη ομάδα μετρήσεων, έτσι ώστε να αποφεύγεται η έκθεση του στοιχείου σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς και σε υψηλές ταχύτητες των αερίων στους αγωγους, οι οποίες μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητα του δείγματος. Το δείγμα του αερίου οδηγούνταν προς το σύστημα ανάλυσης αερίου αρχικά μέσω ενός στελέχους δειγματοληψίας πυρομέτρου με υδρόψυκτη αναρρόφηση. Θεωρήθηκε ότι η θερμοκρασία δείγματος έπρεπε να χαμηλώνεται πριν από την είσοδο στην μονάδα δειγματοληψίας, κάτω από τους 100 °C. Η χρήση ψύξης με νερό όπως αναφέρθηκε εγκαταλείφθηκε αργότερα καθώς βρέθηκε ότι εμπόδιζε την λήψη του αερίου και στην συγκεκριμένη θέση δεν ήταν απαραίτητη. Για μελλοντική εργασία προτάθηκε η ανάπτυξη ενός υδρόψυκτου στοιχείου λήψης με κωνικό άκρο χαλαζιακής επένδυσης. Αυτό θα επέτρεπε την ψύξη αποτρέποντας παράλληλα την πιθανότητα μόλυνσης του δείγματος αερίου από την αντίδραση του αζώτου με στοιχεία του χαλύβδινου σωλήνα, καθώς ο χαλαζίας είναι αδρανής στο άζωτο.

Μετά την βαθμονόμηση του αναλυτή, ήταν δυνατή η λήψη δεδομένων περιεκτικότητας καυσαερίων σε NOx. Οι μετρήσεις αερίων από την πίσω (τελευταία) θυρίδα του κλιβάνου, στην καμινάδα καυσαερίων, λήφθηκαν κατά την διάρκεια της περιόδου θέρμανσης, από μια σταθερή κεντρική θέση. Μετά την σταθεροποίηση έγιναν μετρήσεις σε ακτινικές θέσεις μέσα στον κλίβανο και από τις άλλες 4 θυρίδες. Με αυτό τον τρόπο συλλέχθηκαν μετρήσεις για λόγους μείγματος 1.14 και 1.63 (αέρα/καυσίμου).

Τα αέρια που μετρήθηκαν ήταν NO και NOx (συνυπολογίζοντας NO και NO_2). Επίσης το εναλλακτικό χαλαζιακής επένδυσης στέλεχος δειγματοληψίας

χρησιμοποιήθηκε στις ίδιες θέσεις ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών συσκευών δειγματοληψίας.

Χρησιμοποιήθηκε επίσης ένας αναλυτής N_2O της εταιρείας CRE Group Ltd, για να δώσει συγκεντρώσεις N_2O (υποξείδιο του αζώτου) στις εκπομπές καυσαερίων του κλιβάνου. Η συγκέντρωση του υποξειδίου στα καυσαέρια της πειραματικής διάταξης προσδιορίσθηκε με την χρήση φωτοακουστικής ανάλυσης υπερύθρων. Χρησιμοποιήθηκε το μόνιτορ αερίου της Bruel and Kjaer Multi (gas Monitor Type 1302) το οποίο είναι ελεγχόμενο με μικροεπεξεργαστή, και είναι αναλυτής αερίου υψηλής ακρίβειας. Η ακρίβειά του ενισχύεται από την δυνατότητα του αναλυτή να αντισταθμίζει διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και επιρροές από τον υδρατμό ή άλλα αέρια που υπάρχουν στο δείγμα. Ο βαθμός ακρίβειας του αναλυτή για το N_2O είναι 5 mg/m3.

Η αρχή λειτουργίας του αναλυτή, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11. Περιλαμβάνει το τράβηγμα ενός δείγματος διαμέσω δύο φίλτρων αέρα, αφαιρώντας τον 'παλιό' αέρα στο σύστημα μέτρησης. Το 'νέο' δείγμα περνά στην συνέχεια μέσα στην κυψέλη ανάλυσης. Φως από μία πηγή υπερύθρων αντανακλάται σε έναν καθρέπτη, στην συνέχεια υποβάλλεται σε πάλμωση (αυξομείωση) και μετά από ένα οπτικό φίλτρο πριν απορροφηθεί επιλεκτικά από το αέριο που παρακολουθείται, κάνοντας την θερμοκρασία του αερίου να αυξηθεί. Η θερμοκρασία και συνεπώς η πίεση του αερίου αυξάνεται και μειώνεται λόγω της πάλμωσης του φωτός. Ο κυματισμός πίεσης που παράγεται είναι απευθείας ανάλογος με την συγκέντρωση του αερίου δείγματος και ανιχνεύεται από δύο μικρόφωνα, αναρτημένα πάνω στο τοίχωμα της κυψέλης.

Τα επίπεδα εκπομπής N_2O προσδιορίσθηκαν επίσης με την χρήση της ασυνεχούς μεθόδου grab. Η διαδικασία 'grab' περιλαμβάνει την συλλογή του δείγματος καυσαερίου με την χρήση μίας αντλίας, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα σχεδιασμένο έτσι ώστε να αποτρέπει τον σχηματισμό 'πλασματικού' N_2O από το SO_2 και άλλα είδη NOx μέσα στο δείγμα. Το καυσαέριο οδηγείται μέσα από ένα παράγοντα καθαρισμού – απόξεσης για την απομάκρυνση του SO_2 και των NOx και στην συνέχεια ξηραίνεται με ένα συγκεκριμένο ειδικό παράγοντα πριν συλλεγεί μέσα σε έναν σάκκο δείγματος αερίου. Το δείγμα αναλύεται στο CRE με την τεχνική Χρωματογραφίας Αερίου χρησιμοποιώντας ένα Ανιχνευτή Παγίδευσης Ηλεκτρονίου (GC - ECD). Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται επαληθεύτηκαν και με τις δύο μεθόδους μέτρησης.

Τα δείγματα λαμβάνονταν από δύο σημεία μέσα στην καμινάδα καυσαερίων, πριν από το σύστημα νερού ψύξης και στην τελευταία θυρίδα δειγματοληψίας στο τέλος του κλιβάνου. Ένα γυάλινο, υδρόψυκτο στοιχείο δειγματοληψίας χρησιμοποιήθηκε το οποίο έψυχε την θερμοκρασία του δείγματος πριν το περάσει στην μονάδα ανάλυσης. Οι συγκεντρώσεις εκπομπών N_2O και επίσης μεθανίου μετρήθηκαν με αυτό τον τρόπο στον κλίβανο. Οι συγκεντρώσεις μεθανίου που καταγράφηκαν πάντως ήταν χαμηλές, μικρότερες από 20 mg/m3 μετά την αρχική έναυση και δοκιμαστική λειτουργία.

- Η πίεση του νερού μπορούσε επίσης να καταγραφεί από την αντλία νερού, και όπως αναφέρθηκε η πίεση του αέρα εισαγωγής στον καυστήρα και η στάθμη του καυσίμου μέσα στην δεξαμενή καυσίμου.

4.4. Μετρήσεις Παροχών Καυσίμου / Αέρα και Υπολογισμοί Ισχύος

Η στάθμη του καυσίμου μέσα στην εσωτερική δεξαμενή καυσίμου χρησιμοποιήθηκε για να προσδιορίζεται η παροχή τροφοδοσίας καυσίμου προς τον καυστήρα, έτσι ώστε να υπάρχει ένδειξη της ισχύος που κατανάλωνε από τον καυστήρα. Η παροχή και η ισχύς υπολογίζονταν αρχικά χρησιμοποιώντας την πυκνότητα του καυσίμου και την θερμογόνο δύναμη, τις διαστάσεις της δεξαμενής και την μεταβολή της στάθμης καυσίμου που δίνουν το αποτέλεσμα σε MJ/sec, ακολουθώντας την σχέση :

Ισχύς (KW) = Μεταβολή στάθμης (cm) x Επιφάνεια Δεξαμενής (cm) x Ειδικό Βάρος Καυσίμου x Θερμογόνος δύναμη /Χρόνος μεταβολής (3600 sec)

Προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων προτείνεται να χρησιμοποιείται ένα ψηφιακό παροχόμετρο που είναι πλέον διαθέσιμο.

Η παροχή αέρα εισαγωγής υπολογιζόταν με την βοήθεια του Pitot tube, με την χρήση των εξισώσεων και της μεθόδου που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, πιο πάνω. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν στο εσωτερικό του αγωγού εισαγωγης αέρα, για λόγους ευκολότερης διάταξης και ρύθμισης του εξοπλισμού. Η στατική και η δυναμική πίεση από το pitot tube μετατρέπονταν σε τιμή ταχύτητας εισαγωγής αέρα, έτσι ώστε γνωρίζοντας το εμβαδόν του αποσπούμενου αγωγού εισαγωγής αέρα, η παροχή του αέρα καύσης που εισερχόταν στον καυστήρα μπορούσε να

προσδιορισθεί και συνεπώς να παρατηρούνται οι μεταβολές του λόγου αέρα/καυσίμου.

Οι μετρήσεις διαφοράς ύψους (σε m) που δίνονταν από το pitot tube στο κεκλιμμένο μανόμετρο (20 μοίρες), ήταν η μετρήσιμη παράμετρος. Η διαφορά στο ύψος καταγράφονταν σε διαφορετικές ακτινικά θέσεις μέσα στον αγωγό, και τα αποτελέσματα μετατρέπονταν σε ταχύτητες (δείτε το Παράρτημα Β). Η μέση ταχύτητα αέρα υπολογίζονταν στην συνέχεια και έτσι μία τιμή για την παροχή και το λόγο αέρα/καυσίμου (του μείγματος) μπορούσε να ληφθεί.

Όλες οι μετρήσεις γίνονταν τελικά στην φάση σταθερής λειτουργίας (ισορροπίας) κάτω από σταθεροποιημένο θερμοκρασιακό προφίλ και σταθερές συνθήκες πίεσης. Μετρήσεις ωστόσο λήφθησαν και στην ασταθή (μεταβατική) φάση έτσι ώστε να διαπιστωθούν τα πλήρη χαρακτηριστικά της καύσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥΣ

5.1. Μετρήσεις NOx και Θερμοκρασιακών Κατανομών

Όπως αναφέρθηκε μία από τις σημαντικότερες πτυχές αυτής της εργασίας ήταν η μέτρηση των προϊόντων καύσης, κυρίως, όσον αφορά τα επίπεδα NO και NOx στην περιοχή της φλόγας και στα καυσαέρια. Σκοπός της πειραματικής εργασίας ήταν ο χαρακτηρισμός του κλιβάνου, όσον αφορά τις εκπομπές NOx υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας διαμορφώθηκαν, με μετρήσεις της ταχύτητας ροής του αέρα που εισέρχεται στον καυστήρα μέσω του αποσπούμενου αγωγού. Δύο βασικές συνθήκες λειτουργίας δοκιμάσθηκαν με αυτό τον τρόπο, ανάλογα με την παροχή εισερχόμενου αέρα καύσης για σταθερή παροχή καυσίμου. Πιέσεις αέρα 5 mbar και 8 mbar χρησιμοποιήθηκαν, καθορίζοντας τον λόγο αέρα / καυσίμου (ή μείγμα αέρα/καυσίμου) σε 1,16 και 1,63 αντίστοιχα, που αντιπροσωπεύουν ένα πλουσιότερο σε καύσιμο (κοντά στο στοιχειομετρικό) και ένα πτωχότερο μείγμα.

Οι μετρήσεις επικεντρώθηκαν σε ισχύ 0.8 MW, αν και σε ορισμένες δοκιμές η ισχύς μεταβλήθηκε, μεταξύ 0.45 και 1.1 MW, με την αύξηση της τροφοδοσίας καυσίμου ή την πίεση εισόδου καυσίμου.

Ορισμένες λειτουργίες και μετρήσεις έγιναν επίσης με 6 mbar πίεση εισόδου του αέρα. Οι πιέσεις τροφοδοσίας του ακροφυσίου καυσίμου και επιστροφής ήταν 20 και 18 bar αντίστοιχα, σε όλες τις δοκιμές.

Οι διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, επιλέχθηκαν για την παραγωγή διαφορετικών τύπων φλόγας, και αποτελεσμάτων προφίλ θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων αερίων. Τα αποτελέσματα σε αυτές τις συνθήκες εμφανίζονται στα διαγράμματα και πίνακες που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5 – Α.

Η μελέτη των χαρακτηριστικών καύσης του φούρνου χωρίστηκε σε δύο

κύριες φάσεις: α) την φάση της προθέρμανσης (Warming-up), κατά την οποία η θερμοκρασία αυξανόταν σταδιακά και β) τη φάση Σταθερής Κατάστασης, δηλαδή όταν έχει επιτευχθεί η ισορροπία – σταθερότητα της καύσης, αρκετές ώρες μετά την αρχική ανάφλεξη. Τα αποτελέσματα για την φάση προθέρμανσης παρουσιάζονται στα διαγράμματα 5.6.1 – 5.8.7, ενώ τα διαγράμματα 5.1.1 – 5.5.3 περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα σε Σταθεροποιημένη Κατάσταση. Τα δεδομένα μετρήσεων κάθε μίας από τις 11 δοκιμαστικές λειτουργίες και από την διαδικασία ξήρανσης παρουσιάζονται επίσης σε αντίστοιχους πίνακες στο Κεφάλαιο 5-Β.

Σκοπός των δοκιμών σε λειτουργία κάτω από διάφορες συνθήκες λειτουργίας και διαφορετικούς ρυθμούς αύξησης της ισχύος, ήταν 1) να γίνουν παρατηρήσεις του χρόνου που απαιτείται για να φτάσει στην κατάσταση σταθεροποίησης, 2) να προσδιορισθούν τα χαρακτηριστικά του συστήματος όσον αφορά την θερμοκρασιακή κατανομή και τις συγκεντρώσεις NOx, κατά την διάρκεια των δύο φάσεων και 3) να επιβεβαιωθεί η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων.

5.2. Προφίλ Θερμοκρασιών (Διαγράμματα Κατανομής Θερμοκρασιών)

5.2.1. Σταθεροποιημένη Κατάσταση

Τα διαγράμματα 5.1.6 ÷ 5.1.10 και 5.2.1 ÷ 5.2.7 απεικονίζουν την θερμοκρασιακή κατανομή με την ακτινική απόσταση από τον κεντρικό άξονα του κλιβάνου και από τις διαφορετικές θυρίδες (1, 2, 3, 4) στο πλαϊνό τμήμα του κλιβάνου. Παρατηρείται γενικά ότι η υψηλότερη θερμοκρασία για πίεση 5 mbar καταγράφεται στην $2^{η}$ θυρίδα, σε κάποια απόσταση από το στόμιο του καυστήρα. Για τα 8 mbar η μέγιστη θερμοκρασία καταγράφεται στην $1^{η}$ θυρίδα, δηλαδή πλησιέστερα προς το στόμιο του καυστήρα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το τμήμα απαγωγής καυσαερίων (καμινάδα) ήταν αναμενόμενο να επηρεάζει την συμμετρία της ροής και των φλογών, μέσα στον θαλαμο καύσης, οδηγώντας στην εμφάνιση υψηλότερων θερμοκρασιών στο πάνω μισό τμήμα της διατομής, ενώ οι μετρήσεις από τις 4 θυρίδες λαμβάνονταν στο μεσαίο και χαμηλότερο τμήμα.

Η επιρροή του λόγου αέρα/καυσίμου στα επίπεδα θερμοκρασίας μέσα στον κλίβανο παρουσιάζεται επίσης στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Γενικά με την αύξηση του λόγου αέρα/καυσίμου από τιμή κοντά στην στοιχειομετρική (1.16) σε μία αρκετά 'πτωχότερη' τιμή (1.63), έχουμε σημαντική πτώση των θερμοκρασιακών επιπέδων. Οι διαφορές των υψηλών της θερμοκρασίας παρατηρείται ότι είναι σημαντικές και ενδεικτικές του γενικού επιπέδου του λόγου αέρα/καυσίμου.

Για πίεση αέρα καύσης 8 mbar, τα θερμοκρασιακά προφίλ που προκύπτουν φαίνονται στο διάγραμμα 1.1. και υποδεικνύουν ότι η υψηλότερη τιμή από όλες τις θυρίδες, προκύπτει σε σημείο μεταξύ 100 – 200 mm μακριά από το κέντρο (τον άξονα), και κυμαίνεται μεταξύ 1133 – 1200 °C. Υπενθυμίζεται ότι η ακτίνα του θαλάμου καύσης ήταν 400 mm. Αυτή η απόκλιση αποδίδεται κατά βάση στον ελκυσμό της καμινάδας απαγωγής καυσαερίων.

Η θερμοκρασία εμφανίζεται να πέφτει οριακά στα πιο ψηλά σημεία, προσεγγίζοντας τον διαμήκη άξονα, μολονότι αυτό το αποτέλεσμα δεν συμβαδίζει με τις θεωρητικές προβλέψεις του μοντέλου CFD (Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής), όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό από το σχήμα Α1 στο Παράρτημα Α. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι λόγω της έλλειψης συμμετρίας τα σημεία εμφάνισης των υψηλότερων θερμοκρασιών αναμένονται να αποκλίνουν ελαφρά από τον άξονα, προς το πάνω μισό της διατομής του κλιβάνου. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι αν λαμβάνονταν μετρήσεις επίσης σε ύψος μεγαλύτερο αυτού του άξονα οι κορυφαίες θερμοκρασίες που θα καταγράφονταν θα ήταν μεγαλύτερες. Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι οι διαφορές μεταξύ των θερμοκρασιών στον κεντρικό άξονα και των γενικά κορυφαίων τιμών είναι της τάξης των 15-25 °C, κοντά στο αναμενόμενο σφάλμα των πειραματικών μετρήσεων (0,1 %). Το σφάλμα αυτό μπορεί να εξηγήσει ορισμένες τέτοιου είδους αποκλίσεις από τις αναμενόμενες κατανομές θερμοκρασίες που παρατηρήθηκαν σε ορισμένα από τα διαγράμματα προφίλ.

Ακτινικά, για την πίεση αέρα 8 mbar, οι θερμοκρασίες καταγράφονται χαμηλότερες στο κέντρο (στον άξονα), αυξανόμενες μέχρι περίπου μία απόσταση 100-200 mm από το τοίχωμα και μετά ελαττώνονται στην ελάχιστη τιμή τους στα όρια του τοιχώματος του κλιβάνου, για τις θυρίδες 1 και 4, και σε θέσεις ελαφρά πλησιέστερες προς τον άξονα για τις θυρίδες 2 και 3.

Καθώς απομακρυνόμαστε από το στόμιο εξόδου του καυστήρα, οι κορυφαίες τιμές προκύπτουν σε χαμηλότερη θέση (από τον άξονα). Η μέγιστη θερμοκρασία 1190°C καταγράφεται στην θυρίδα 1.

Η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας σε κάθε θυρίδα επίσης πέφτει όπως είναι αναμενόμενο, σε θέσεις πιο μακριά από την έξοδο του καυστήρα. Η ελάχιστη τιμή 1036 °C παρουσιάζεται στην θυρίδα 1 και πάλι, σε θέση κοντά στο τοίχωμα. Αυτό συμβαδίζει με την πρόβλεψη της ψυχρότερης περιοχής από το μοντέλο ΥΡΔ (CFD) (σχήμα Α1).

Καθώς το καύσιμο ψεκάζεται με μεγάλη αξονική (οριζόντια) ταχύτητα U στον κεντρικό άξονα, οι κύριες αντιδράσεις καύσης συμβαίνουν κοντά στον άξονα αυτό, ενώ σε θέσεις περισσότερο απομακρυσμένες το μέτωπο της φλόγας πλαταίνει, παίρνοντας το χαρακτηριστικό κωνικό του σχήμα. Η θερμότητα που εκλύεται κατευθύνεται κυρίως προς το πάνω μέρος του κλιβάνου καθώς τα θερμά αέρια έλκονται προς αυτή την κατεύθυνση και από το σύστημα απαγωγής. Έτσι οι περιοχές κοντύτερα στα τοιχώματα και την έξοδο (το σωλήνα ψεκασμού) του καυστήρα έχουν τα χαμηλότερα θερμοκρασιακά προφίλ (δείτε και το σχήμα Α1 του Παραρτήματος). Επιπλέον, η ανακυκλοφορία των αερίων από την ζώνη της φλόγας που συμβαίνει λόγω της συστροφής και της τυρβώδους ροής, στην περιοχή κοντά στην έξοδο του καυστήρα και προς το τοίχωμα του κλιβάνου, προκαλεί επίσης την εμφάνιση χαμηλότερων θερμοκρασιών σε αυτά τα σημεία.

Σημειώνονται οι μέγιστες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν για κάθε θυρίδα είναι οι εξής :

Θυρίδα 1 – 1190 °C, Θυρίδα 2 – 1177 °C, Θυρίδα 3 – 1140 °C, Θυρίδα 4 – 1133 °C. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι δεν εμφανίζεται μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στις 4 θυρίδες, με τα μέγιστα να κυμαίνονται μεταξύ 1130 και 1190 °C. Αυτή η παρατήρηση εξηγείται από την ιδιαίτερα υψηλή μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία της φλόγας. Είναι γνωστό ότι η μετάδοση θερμότητας διά ακτινοβολίας είναι το κύριο χαρακτηριστικό λειτουργίας των κλιβάνων με καυστήρες πετρελαίου.

Τα αξονικά προφίλ θερμοκρασιών, παρουσιάζονται στα διαγράμματα 5.2.1 – 5.2.7, που βασίζονται στα πινακοποιημένα δεδομένα του κεφαλαίου 5-Β: Αυτά τα διαγράμματα δείχνουν την μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του κλιβάνου, μακριά από τον διασκορπιστή του καυστήρα για διαφορετικές ακτινικές θέσεις των θερμοστοιχείων, και για τις 4 θυρίδες μετρήσεων.

Η μορφή της διακύμανσης της θερμοκρασίας στην αξονική διεύθυνση περιγράφεται από την τάση ανύψωσης της θερμοκρασίας μέχρι και την δεύτερη θυρίδα (στα 1500 mm) και μείωσης σε μεγαλύτερη απόσταση από τον καυστήρα (στα 2100 και 2700 mm), όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τα διαγράμματα 5.2.1 και 5.2.2.

Αυτή η τάση εμφανίζεται να διακόπτεται μόνον στην περίπτωση των προφίλ σε ακτινική απόσταση 200 mm και 300 mm και για την 1^{η} θυρίδα, για την οποία μετρήθηκαν οι μέγιστες θερμοκρασίες των 1170 και 1190°C, κοντύτερα στην έξοδο του καυστήρα και την φλόγα. Να σημειωθεί ότι αυτή η περιοχή προβλεπόταν και από το θεωρητικό μοντέλο CFD να είναι η θερμότερη εντός του κλιβάνου.

Γενικά, η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας κατάντη του ακροφυσίου ψεκασμού του καυστήρα δεν είναι σημαντική, και μπορεί να παρατηρηθεί στα διαγράμματα 5.2.2 – 5.2.4, αυτές οι διαμήκεις αξονικές μεταβολές κυμαίνονται μεταξύ 30 – 50°C. Η μεγαλύτερη διαφορά καταγράφηκε σε ακτινικές θέσεις 200 και 300 mm (45 και 50°C, αντίστοιχα), όπου παρατηρήθηκε και το προφίλ με την μεγαλύτερη κλίση (διαγράμματα 5.2.3, 5.2.4, 5.2.6).

Πλησίον του τοιχώματος (30 mm), το αξονικό προφίλ της θερμοκρασίας παρουσιάζει μία διαφορετική μορφή με υψηλές θερμοκρασιές 1135°C, σε μεγαλύτερη απόσταση από τον καυστήρα (περιοχή 1800 – 2000 mm) και υψηλότερη τιμή (1096°C) στο πιο απομακρυσμένο σημείο από ότι κοντύτερα στον καυστήρα, ενώ επίσης διατηρούνται υψηλότερες θερμοκρασίες για μεγαλύτερες αποστάσεις (διαγράμματα 5.2.1 & 5.2.5). Επίσης η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, είναι υψηλότερη (περίπου 100 °C), πιθανώς λόγω της ανακυκλοφορίας των ψυχρότερων αερίων και των συστροφικών χαρακτηριστικών της ροής στην περιοχή αυτή.

Για την πίεση εισαγωγής αέρα 5 mbar, η γενική μορφή της θερμοκρασιακής κατανομής που είχαμε για την πίεση των 8 mbar, επαναλαμβάνεται, και οι ίδιες τάσεις μεταβολής των θερμοκρασιών παρατηρούνται, όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.1.6 – 5.1.10 και 5.2.6 – 5.2.9 ή για παράδειγμα από την σύγκριση των διαγραμμάτων 5.1.6 και 5.1.2 για την θυρίδα 1, στα 5 και 8 mbar.

Η μέγιστη θερμοκρασία σε αυτή την περίπτωση καταγράφεται στην θυρίδα 2 σε ακτινική θέση 100 mm από τον οριζόντιο άξονα του φούρνου. Η μέγιστη αυτή θερμοκρασία είναι 1520 C, ενώ όπως φαίνεται στο σχήμα 1.10, μία υψηλή θερμοκρασία, πολύ κοντά στην κορυφαία (1505 °C) προκύπτει επίσης στο κέντρο. Γενικά η θερμοκρασία στον άξονα αποκλίνει μέχρι 10 °C από την μέγιστη.

Η χαμηλότερη θερμοκρασία είναι αυτή των 1325°C, στην θυρίδα 1, σε απόσταση 30 mm από το τοίχωμα.

Τα επίπεδα θερμοκρασιών είναι όπως αναμένεται υψηλότερα στην χαμηλότερη πίεση αέρα καύσης.

Σε ακτινική κατεύθυνση τα θερμοκρασιακά προφίλ φαίνεται ότι είναι γενικά όμοια με εκείνα που περιγράφονται για την πίεση των 8 mbar, με την κορυφαία τιμή να προκύπτει σε απόσταση 100 mm από τον οριζόντιο άξονα (σχεδόν αξονικά δηλαδή) με ελαφρά μείωση στο κέντρο, όπως είναι φυσιολογικό. Η μόνη εξαίρεση είναι η θυρίδα 3 (διάγραμμα 5.1.8), όπου σημειώνεται η κορυφαία τιμή στο κέντρο 1435 C, (στα 300 mm) με την θερμοκρασία να μειώνεται προς τα τοιχώματα του κλιβάνου, όπως δείχνεται στα διαγράμματα 5.1.7 και 5.1.8. Η μείωση στην κατεύθυνση των τοιχωμάτων, ήταν και πάλι λιγότερο σημαντική στην περιοχή ανάμεσα στα 200 mm και 370 mm όπως φαίνεται στα ίδια διαγράμματα, εκτός από την περίπτωση της θυρίδας 3.

Σε πίεση 5 mbarm, η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας ήταν πιο σημαντική από ότι στα 8 mbar, ενώ η θερμοκρασία ήταν γενικά υψηλότερη (δείτε τα σχήματα 5.1.10, 5.2.7 και τους πίνακες δοκιμών 7, 8, 10).

Οι θερμοκρασιακές διαφορές που βρέθηκαν κυμαίνονταν μεταξύ 60 – 135 °C, 135 °C για την θυρίδα 1, 90 °C για την θυρίδα 4, 60 °C για την θυρίδα 3 και 110 °C για την θυρίδα 2.

Πρέπει ωστόσο να υπογραμμισθεί ότι τα αποτελέσματα των 5 mbar θα πρέπει να εξετασθούν σε 2 ομάδες. Στα διαγράμματα 5.1.6 – 5.1.9 και τους πίνακες δοκιμών 7, 8, τουλάχιστον οι τελικές θερμοκρασίες που καταγράφηκαν είναι πολύ υψηλότερες (1435 – 1520 °C) από εκείνες που παρουσιάζονται στα διαγράμματα 5.1.9 και τους πίνακες για τις δοκιμαστικές λειτουργίες 10, 11 (1180 – 1234 °C). Η μέγιστη θερμοκρασία είναι 1234 °C, για τις τελευταίες δοκιμές. Αυτό αποδίδεται σε μία όχι πλήρως ελεγχόμενη τεχνική αλλαγή στην διάταξη του συστήματος, η οποία

συνέβη στην περίοδο μεταξύ των δύο σετ μετρήσεων και οδήγησε σε αρκετές εκατοντάδες βαθμούς Κελσίου διαφορές στα αποτελέσματα, με τις ίδιες συνθήκες. Η αλλαγή του ακροφυσίου του καυστήρα για λόγους συντήρησης, μολονότι ακριβώς ο ίδιος τύπος τοποθετήθηκε, με πανομοιότυπα θεωρητικά χαρακτηριστικά, μπορεί να είναι αιτία για αυτή την ασυνέχεια των αποτελεσμάτων. Το πιθανότερο ωστόσο είναι, ότι διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας δημιουργήθηκαν με κάποια αλλαγή (μείωση) της τροφοδοσίας καυσίμου, ή των πιέσεων τροφοδοσίας και επιστροφής καυσίμου πριν το δεύτερο σετ μετρήσεων. Η υψηλότερη πίεση τροφοδοσίας καυσίμου (εκτιμάται σε περίπου 25 bar) που εφαρμοζόταν προηγούμενα (στο πρώτο σετ μετρήσεων) οδήγησε στην ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών, για χαμηλότερες θέσεις στραγγαλισμού του αέρα (χαμηλότερη παροχή αέρα καύσης). Αυτή η ασυνέχεια δεν επηρεάζει την ανάλυση των αποτελεσμάτων, ωστόσο τα δύο σετ μετρήσεων πρέπει να διακρίνονται.

Η παραπάνω ανάλυση της θερμοκρασιακής κατανομής, για τα 5 mbar πίεσης αέρα, αναφέρεται στο πρώτο σετ δεδομένων.

Επίσης, τα δεδομένα στην δοκιμή 6 (test run 6), είχαν ληφθεί με 5 mbar πίεση αέρα, όμως η παροχή καυσίμου είχε διακυμάνσεις, μεταβάλλοντας τον λόγο Αέρα/Καυσίμου, μεταξύ φ = 0.96 και 1.16.

Τέλος, να σημειωθεί ότι μετρήσεις σε πίεση αέρα 8 mbar, ελήφθησαν επίσης και κατά την διάρκεια της δεύτερης περιόδου.

Τα ακτινικά προφίλ θερμοκρασίας για την δοκιμή No 10, που παρουσιάζονται στο διάγραμμα 1.9, δείχνουν παρόμοιες τάσεις με εκείνες που περιγράφηκαν για το πρώτο σετ αποτελεσμάτων, παρότι εμφανίζεται μία σημαντικότερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των κεντρικών σημείων και της αμέσως επόμενης περιφερειακής (ακτινικής) θέσης (100 mm) π.χ. 1215 – 1250 °C για την θυρίδα 2, ενώ γενικά σημειώνονται χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αυτή η παρατήρηση επίσης ισχύει και για τα δεδομένα των 8 mbar, από τις τελευταίες 5 δοκιμαστικές λειτουργίες.

Εξετάζοντας τα αξονικά προφίλ θερμοκρασιών στα διαγράμματα 5.2.6 και 5.2.7, για πίεση αέρα 5 mbar, που προέρχονται από το πρώτο σετ μετρήσεων (όπως ορίσθηκε παραπάνω), οι τάσεις που παρατηρούνται είναι όμοιες με εκείνες των προφίλ των 8 mbar. Συγκρίνοντας τα σχήματα 5.2.2 – 5.2.5 και 5.2.6 – 5.2.7 η θερμοκρασία αυξάνεται προς την θυρίδα 2, με μια ακόλουθη πτώση σε πιο

απομακρυσμένα από τον καυστήρα σημεία στις θυρίδες 3 και 4. Για την θέση με ακτινική απόσταση 200 mm από τον οριζόντιο άξονα, το προφίλ θερμοκρασίας που φαίνεται στο σχήμα 5.2.6, μοιάζει με εκείνο για τα 8 mbar για την ίδια θέση, με μέγιστη θερμοκρασία 1452 °C να εμφανίζεται κοντά στην έξοδο του καυστήρα, και συνεχή μείωση της θερμοκρασίας με την απόσταση από αυτή.

Γενική παρατήρηση, αναμενόμενη δε, είναι ότι οι μεταβολές του λόγου αέρα/καυσίμου για σταθερή κατανάλωση καυσίμου και ισχύος, επιδρουν σημαντικά στις θερμοκρασίες της φλόγας.

5.2.2. Θερμοκρασιακά Προφίλ στην Φάση Προθέρμανσης (Warming-up)

Αντικείμενο της εργασίας ήταν επίσης ο προσδιορισμός και των χαρακτηριστικών φάσης προθέρμανσης του κλιβάνου, όσον αφορά τα θερμοκρασιακά προφίλ.

Ήταν απαραίτητο για να καθορισθούν οι συνθήκες που απαιτούνται για να επιτευχθεί η σταθεροποίηση της καύσης και για να καθορισθούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος σε όλες τις φάσεις.

5 mbar : Σε γενικές γραμμές, το σύστημα χρειαζόταν να περάσει μία περίοδο προθέρμανσης (warm-up) πριν σταθεροποιηθούν οι συνθήκες της καύσης καθώς και οι συνθήκες λειτουργίας της πυρίμαχης επένδυσης, έτσι ώστε να διαμορφωθεί ένα σταθερό προφίλ θερμοκρασιών σε ολόκληρο τον θάλαμο καύσης.

Σε κάθε περίπτωση, όπως δείχνεται στα διαγράμματα 5.6.1 ως 5.6.5 και 5.7.1, η θερμοκρασία σε οποιοδήποτε σημείο μέσα στον κλίβανο, υπόκειται αρχικά σε άνοδο μετά από την έναυση, με εκθετικό ρυθμό, που διαρκεί για αρκετές ώρες πριν να σταθεροποιηθεί, μετά από το πέρασμα μίας ασταθούς περιόδου αύξησης σε μία αποδεκτά σταθερή θερμοκρασία.

Ο χρόνος που χρειάζεται για την προθέρμανση αυτή, εξαρτάται από τις στοιχειομετρικές συνθήκες που χρησιμοποιούνται, την παροχή καυσίμου, την παροχή εισερχόμενου αέρα, την χρησιμοποιούμενη ισχύ, και επηρεάζεται σημαντικά από τον βαθμό και τον ρυθμό μεταβολής αυτών των παραμέτρων. Οι σταθερές συνθήκες λειτουργίας (steady state) είναι απαραίτητες.

Θεωρώντας και πάλι τις δύο κύριες συνθήκες λειτουργίας, στην περίπτωση των 5 mbar που δείχνεται στα διαγράμματα 5.6.3 – 5.6.5 και τους πίνακες των δοκιμών 8, 10 και στις δύο αυτές δοκιμές, οι συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας επιτεύχθηκαν μετά από 5 ώρες λειτουργίας σε παρόμοιες συνθήκες, ισχύος, αέρα εισαγωγής και πίεσης, με μέγιστη ισχύ 807 KW που εφαρμόστηκε μετά την αρχική άνοδο της θερμοκρασίας, και στις δύο περιπτώσεις. Η ισορροπία δηλαδή των αντιδράσεων καύσης επήλθε μετά από 5 ώρες. Για την περίπτωση των 8 mbar, οι συνθήκες ισορροπίας επιτεύχθηκαν στις δοκιμές 10 και 12 μετά από 4:30 ώρες συνεχούς λειτουργίας σε όμοιες συνθήκες ισχύος και πίεσης (843 – 800 KW, οι μέγιστες ισχείς αντίστοιχα).

Οι σταθερές συνθήκες θα μπορούσαν να επιτευχθούν νωρίτερα, αν το σύστημα είχε αφεθεί να λειτουργήσει σε σταθερή ισχύ, ή τροφοδοσία καυσίμου, κάτω από τα 800 KW. Ο ρυθμός παροχής του καυσίμου έπρεπε να ρυθμίζεται κατά την διάρκεια της καύσης προκειμένου να αναπτυχθεί η ισχύς στα επιθυμητά επίπεδα του 0.8 MW ή και παραπάνω, ενώ η πίεση του αέρα διατηρούνταν σταθερή.

Από τις τιμές για το διάστημα προθέρμανσης, για 8 mbar πίεση αέρα, η μορφή της αύξησης θερμοκρασίας δείχνεται να ακολουθεί το αναμενόμενο μοντέλο, που περιγράφηκε νωρίτερα, με μία αρχική εκθετική αύξηση, και η σταθεροποίηση φαίνεται να ξεκινά μετά από 1 ½ ώρα από την τελευταία αλλαγή της θέσης ρύθμισης της παροχής τροφοδοσίας (παροχή καυσίμου), που αντιστοιχεί σε αύξηση στην τροφοδοσία καυσίμου. Όπως μπορεί να δει κανείς στα διαγράμματα (π.χ. 5.6.2.) ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας πέφτει γρήγορα μετά την τελευταία αλλαγή παροχής τροφοδοσίας καυσίμου και η καμπύλη αποκτά μία σχεδόν σταθερή κλίση σύντομα μετά, οδηγώντας σε σταθεροποίηση. Οι κορυφές που παρατηρούνται κατά την διάρκεια της αύξησης της θερμοκρασίας, αντιστοιχούν στην ρύθμιση χρήσης υψηλότερης παροχής αέρα από τον πίνακα ελέγχου του καυστήρα.

Στα διαγράμματα 5.6.1 – 5.6.2 (για τα 8 mbar), η θερμοκρασία παρατηρείται να πέφτει προσωρινά, ακολουθώντας μία αύξηση στην πίεση παροχής αέρα, λόγω της περίσσειας αέρα που υπάρχει στα μίγματα και ο οποίος λειτουργεί σαν δεξαμενή θερμότητας, καθώς πρέπει να θερμανθεί μέχρι την θερμοκρασία ανάφλεξης και έτσι καταναλώνει ενέργεια που έχει εκλυθεί από την καύση, ενώ επίσης ενισχύει την οξείδωση του καυσίμου.

Από την άλλη πλευρά η θερμοκρασία φαίνεται να αυξάνεται με ταχύτητα μετά από μία αύξηση της τροφοδοσίας καυσίμου, παρότι υπάρχει παράλληλα περίσσεια αέρα.

Από τα ίδια διαγράμματα μπορεί να παρατηρηθεί ότι η θερμοκρασία είναι υψηλότερη προς την πρώτη θυρίδα, που είναι κοντύτερα στην έξοδο του καυστήρα, και μειώνεται σταδιακά όσο απομακρυνόμαστε από τον καυστήρα στις θυρίδες (3, 4). Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί πιο καθαρά στο σχήμα 5.6.4 όπου οι θερμοκρασίες που απεικονίζονται αναφέρονται σε μετρήσεις από την ίδια περιφερειακή θέση.

Οι θερμοκρασιακές διαφορές αναμεσα σε διαφορετικές θυρίδες φαίνεται ότι είναι μεγαλύτερες κατά την φάση της προθέρμανσης, αλλά είναι σημαντικά χαμηλότερες (όπως δίνεται από την διαφορα στο ύψος μεταξύ των σχεδιασμένων σημείων) όταν αρχίζει η επικράτηση σταθερών συνθηκών και κατά την διάρκεια της λειτουργίας σε Σταθερή Κατάσταση. Αυτό φαίνεται στο διάγραμμα 5.6.1 (για τα 5 mbar) και .

Οί ίδιες ή παρόμοιες, γενικές τασεις μπορούν να παρατηρηθούν και στα σχήματα που αντιστοιχούν σε πίεση αέρα 5 mbar (5.6.3 – 5.6.5). Η βασική διαφορά συνίσταται στις θερμοκρασιακές στάθμες που για πλουσιότερα μίγματα, με 5 mbar, είναι περίπου 50 – 200 °C υψηλότερες, τουλάχιστον όσον αφορά τις τελικές τιμές που επιτυγχάνονται κατά την σταθερή κατάσταση, όπως μπορεί να διαπιστωθεί με την σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών 9 και 10 για 5 mbar και 8 mbar αντίστοιχα.

Η καμπύλη αύξηση της θερμοκρασίας έχει, όπως αναμένεται, την ίδια μορφή και στις 4 θυρίδες εφόσον λαμβάνονται υπόψη ίδιες ακτινικές θέσεις.

Γενικά, οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται στην 1^{η} θυρίδα, κοντύτερα στην έξοδο του καυστήρα, και προς τον κεντρικό άξονα. Στην περίπτωση που απεικονίζεται στο σχήμα 5.6.5, όπου παρουσιάζονται θερμοκρασίες κοντά στα τοιχώματα του θαλάμου, οι ενδείξεις από την θυρίδα 1 δίνουν τις χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας, για τους λόγους που έχουν συζητηθεί στα προηγούμενα, σχετικά με την ανακυκλοφορία άκαυστων αερίων στα άκρα του θαλάμου και στην περιοχή κοντά στην έξοδο του καυστήρα, όπως επίσης απεικονίζεται από τα σχήματα του πακέτου CFD, A2 για αξονική ταχύτητα U και A1 για θερμοκρασία (Παράρτημα A).

Οι υψηλότερες τιμές σε αυτή την περιοχή καταγράφονται τότε στην θυρίδα 2, ενώ οι τιμές στην θυρίδα 3 αυξάνονται προοδευτικά σε σχέση με εκείνες από την θυρίδα 2, με τάση να τις υπερβούν τελικά στην σταθεροποιημένη κατάσταση.

Τα καταγεγραμμένα αποτελέσματα για την θερμοκρασία τοιχώματος και οι παροχές καυσίμου και αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν δεδομένα που θα εισαχθούν για την μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών καυσης του συστήματος, με την χρήση πακέτων ανάλυσης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD), όπως το FLUENT (του οποίου αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα – σχετικό Παράρτημα Α).

Μία ειδική περίπτωση αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα από την δοκιμή 11. Κατά την διάρκεια αυτής της δοκιμής, η ισχύς αυξανόταν συνεχώς μέχρι περίπου τα 1.1 MW (1.076 MW) κατά την φάση προθέρμανσης και κατόπιν βαθμιαία μειώνονταν, στην διαδικασία σβέσης, σε σταθερή πίεση αέρα 5 mbar, προκειμένου να ερευνηθούν κυρίως οι επιρροές αυτών των αλλαγών στα επίπεδα NOx. Για την δοκιμή 6 επίσης, ακολουθήθηκε μία διαφορετική διαδικασία, με κυμαινόμενη ισχύ, που οδήγησε σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

5.3. Σημείωση για την Διόρθωση Θερμοκρασίας

Πρέπει σε αυτό το σημείο να υπενθυμίσουμε, ότι μπορεί να υπάρχει μία διαφορά μεταξύ των καταγεγραμμένων θερμοκρασιών και των ακριβών θερμοκρασιών του αερίου στο εσωτερικό του κλιβάνου. Προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια, εφαρμόζονται μέθοδοι διόρθωσης θερμοκρασίας, όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα [42, 43].

Ωστόσο, από μελέτες πάνω στις μεθόδους διόρθωσης της θερμοκρασίας [43], οι σχετικές εξισώσεις που έχουν εξαχθεί δείχνουν ότι η σημαντική παράμετρος για την εκτίμηση των ανακριβειών, είναι η διακύμανση μεταξύ μεγίστων και ελαχίστων θερμοκρασιών. Από τα αποτελέσματα βρήκαμε διαφορές ελαχίστων – μεγίστων θερμοκρασιών της τάξης των 50 – 150 °C, οι οποίες δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές. Επίσης οι ελάχιστες θερμοκρασίες σε σταθερή λειτουργία (ισορροπίας), που αντιστοιχούσαν σε θέσεις κοντά στα τοιχώματα, ήταν σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερες των 1030°C. Έτσι εκτιμάται ότι μπορεί να απαιτείται μία συγκριτικά μικρή διόρθωση, της τάξης των 30 °C.

5.4. Μετρήσεις (NOx) στα Καυσαέρια

Η μέτρηση των επιπέδων NO_X και η ανάλυση των καυσαερίων ήταν από τις σημαντικές απαιτήσεις της εργασίας. Η ανάλυση των μετρήσεων στα καυσαέρια, με ιδιαίτερη έμφαση στα NO_X, είναι μία απαραίτητη διαδικασία για όλους τους καυστήρες πετρελαίου. Η ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται επιτρέπει την αξιολόγηση των διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας και την διόρθωσή τους, για την μείωση των ρυπαντικών επιπτώσεων. Οι διεθνείς εκκλήσεις για την ελάττωση των τελικών εκπομπών καυσαερίων και ιδιαίτερα των εκπομπών NO_X από συστήματα καύσης, που σχετίζονται με το θέμα της 'όξινης βροχής, του 'φαινομένου του θερμοκηπίου' και άλλων περιβαλλοντικών προβλημάτων, μαζί με τους αυστηρούς περιορισμούς της σύγχρονης περιβαλλοντικής νομοθεσίας, οδήγησαν στην αφιέρωση πολλών ερευνητικών προσπαθειών σε αυτό τον τομέα.

Η διαπίστωση ότι μεταβολές στον σχεδιασμό του καυστήρα και του θαλάμου καύσης, τα λειτουργικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, μπορούν να βοηθήσουν στην μείωση των επιπέδων εκπομπών NO_X, μπορεί να γίνει και από τα αποτελέσματα αυτής της πειραματικής εργασίας.

Οι εκπομπές NO_X μετρήθηκαν παράλληλα με τις μετρήσεις θερμοκρασιών και στις ίδιες αντίστοιχες συνθήκες λειτουργίας. Οι μετρήσεις έγιναν για πίεση αέρα 5 mbar και 8 mbar, και σε ισχείς μέχρι 850 KW. Οι μετρήσεις αερίων έγιναν κατά μήκος του εσωτερικού του θαλάμου καύσης, από τις 4 διαθέσιμες θυρίδες και επίσης στο τμήμα εξόδου των καυσαερίων στην τελευταία θυρίδα στο πίσω μέρος του κλιβάνου. Τα αέρια που μετρήθηκαν ήταν κυρίως NO, NO_X και N_2O.

Τα σχήματα 5.3.1 ως 5.5.3 και 5.7.1 ως 5.8.7, παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των δοκιμων που έγιναν για να ερευνηθούν οι στάθμες αυτών των αερίων, στο εσωτερικό του κλιβάνου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις NO/NO_X για τις δύο πιέσεις αέρα 5 mbar και 8 mbar έγιναν με το δεύτερο σετ συνθηκών, που σχολιάσθηκε στα προηγούμενα. Τα χαμηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα (μέγιστη 1234 °C, στην θυρίδα 2) αντιστοιχούν σε πίεση 5 mbar. Επίσης πρέπει να υπογραμμισθεί ότι τα επίπεδα NO σε σταθεροποιημένη κατάσταση μέσα στον κλίβανο, μετρήθηκαν από τις θυρίδες 1 και 3 όπως φαίνεται στα σχετικά διαγράμματα (5.3.5 – 5.3.6).

Τα εξαγόμενα συμπεράσματα από τα προφίλ αυτά και οι επιδράσεις των διαφόρων παραμέτρων στις γενικές συγκεντρώσεις NOx σχολιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

5.5. Διαγράμματα Συγκέντρωσης Αερίων

Το σχήμα 5.3.7 δείχνει τις διακυμάνσεις των επιπέδων NO και NO_X με την αύξηση της παροχής αέρα καύσης, όπως αυτή λαμβάνονταν από τις ενδείξεις παροχής με τα αποτελέσματα του Pitot - tube.

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα επίπεδα NO (και NO_X) αυξάνονται με την μείωση της παροχής αέρα καύσης, στα 5 mbar. Έχει διαπιστωθεί ότι ο λόγος Αέρα/Καυσίμου είναι μία σημαντική παράμετρος για τον σχηματισμό NO_X δηλ. όσο πτωχότερο το μείγμα, τόσο χαμηλότερες οι εκπομπές NO_X [45]. Αυτή η τάση γενικά οφείλεται στην μείωση της μετατροπής του αζώτου του καυσίμου σε NO καθώς λιγότερο οξειδωτικό μέσο είναι διαθέσιμο με την μείωση του αέρα καύσης.

Επίσης η μείωση της θερμοκρασίας φλόγας που προκαλείται από την περίσσεια αέρα, στα 8 mbar ή στην περίπτωση μειγμάτων πλουσιότερων σε καύσιμο, οδηγεί στην παραγωγή λιγότερο θερμικού NO κυρίως, το οποίο όπως έχει περιγραφεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, είναι μια βασική πηγή σχηματισμού NOx στον κλίβανο και στα καυσαέρια.

Στα αποτελέσματα για πίεση αέρα 5 και 8 mbar στις δοκιμές 9,10 και 11, (σχετικοί πίνακες και διαγράμματα 5.3.1 ως 5.5.3), όπου άλλες συνθήκες λειτουργίας κρατήθηκαν σταθερές, και στην Σταθερή Κατάσταση, το επίπεδο NO έφτασε την μέγιστη τιμή των 78 ppm για μείγμα κοντά στο στοιχειομετρικό, στα 5 mbar και φ =1.16. Στον μεγαλύτερο λόγο Αέρα/Καυσίμου, η μείωση των συγκεντρώσεων NOx που καταγράφηκε αποδίδεται στην αραίωση των προϊόντων της καύσης από το πλεόνασμα αέρα. Για τα 8 mbar, το κορυφαίο επίπεδο NO βρέθηκε να είναι περίπου 60 ppm (δείτε τα σχήματα 5.3.1, 5.4.1).

Γενικά, τα επίπεδα συγκέντρωσης NO_X που μετρήθηκαν, θεωρούνται σχετικά χαμηλά και εντός των αποδεκτών από την νομοθεσία ορίων [48], δείχνοντας ότι το σύστημα δεν έχει ρυπογόνο συμπεριφορά, ακόμη και χωρίς την χρησιμοποίηση ειδικών φίλτρων κατακράτησης των ρύπων. Τα όρια αυτά για το μέγεθος αυτό

καυστήρα/κλιβάνου ήταν κατά τον χρόνο της εργασίας περίπου 400 mg/m3 [48], πολύ υψηλότερα δηλαδή από την μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή των 117 ppm για την μέγιστη ισχυ (1.076 MW). Η λειτουργία του κλιβάνου μπορεί να χαρακτηρισθεί συνεπώς φιλική προς το περιβάλλον.

Οι καταγεγραμμένες τιμές περιλαμβάνουν κατά κύριο λόγο τις συγκεντρώσεις NO. Μετρήσεις συνολικών NO_X έγιναν επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις. Οι περισσότερες μετρήσεις ελήφθησαν στην φάση σταθερής κατάστασης, για σταθεροποιημένες θερμοκρασιες, ώστε οι διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας να μην επηρεάζουν τα ακτινικά και αξονικά προφίλ NO_X.

Έγιναν επίσης μετρήσεις των επιπέδων NO και NO_X κατά την διάρκεια της Θέρμανσης, από το τμήμα της εξόδου καυσαερίων (σχήμα 5.7.1). Η παρακολούθηση των NO_X επικεντρώθηκε στον προσδιορισμό της μέσης ποσοστιαίας (%) τιμής των NO_X που αντιπροσωπεύεται από το NO.

Οι ενδείξεις N_2O καταγράφηκαν κατά την φάση αύξησης της θερμοκρασίας και της σβέσης στην ειδική περίπτωση της δοκιμής 11 (σχήματα 5.8.1 – 5.8.8).

Το γενικό συμπέρασμα που εξάγεται από την μελέτη των αποτελεσμάτων που απεικονίζονται στα διαγράμματα 5.3.1, 5.3.2, 5.7.1 για τα 5 mbar και 5.3.3 – 5.3.5, 5.4.1 – 5.5.3 για τα 8 mbar, είναι ότι υπήρχε (συγκριτικά) μικρή διαφοροποίηση των μετρημένων επιπέδων NO_X, τόσο στην ακτινική όσο και στην αξονική διεύθυνση, σε όλο το μήκος του εσωτερικού του φούρνου, στα προφίλ αυτά, ειδικά δε για την πίεση αέρα 8 mbar η διαφοροποίηση είναι πρακτικά ανύπαρκτη. Τα κορυφαία επίπεδα NO καταγράφονται κοντά στην έξοδο του καυστήρα στον κεντρικό άξονα, ενώ σε πιο απομακρυσμένες από τον καυστήρα θέσεις όπου συμβαίνει πιο ομοιόμορφη ανάμιξη, φαίνονται σταθερά ακτινικά προφίλ.

Για τα 5 mbar παρουσιάζονται ελαφρώς διαφοροποιημένα αποτελέσματα, με σχετικά ψηλότερες αλλά πάντα όχι σημαντικές μεταβολές της τάξης των 40 ppm κατά μέγιστο, μεταξύ των διαφορετικών ακτινικών και αξονικών θέσεων, ενώ για τα 8 mbar η κλίμακα των αποτελεσμάτων έχει μέγιστο της τάξης των 20 ppm.

Υψηλότερες τιμές των NO/NO_x μετρήθηκαν για την φάση προθέρμανσης (ανύψωσης της θερμοκρασίας) και για μεγαλύτερη ισχύ εξόδου του καυστήρα, μέχρι 1.1 MW, που φαίνεται στα αποτελέσματα της δοκιμής 11, σχήμα 5.8.7.-5.8.8.

Επίσης από την μελέτη των αποτελεσμάτων μπορεί να υποστηριχθεί ότι οι συγκεντρώσεις NO στα καυσαέρια και το εσωτερικό του κλιβάνου, αντιστοιχούν σε (τουλάχιστον) 95 – 99% των συνολικών εκπομπών NO_X, του συστήματος καύσης (καυστήρας/φούρνος), όπως φαίνεται στα σχήματα 7.1 – 7.3, για 5 mbar και 8 mbar αντίστοιχα. Αυτή η παρατήρηση δείχνει ότι οι εκπομπές NO_2 ήταν σταθερά κάτω από το 5% των συνολικών NO_X, μολονότι οι τιμές αυτές καταγράφηκαν στο σύστημα απαγωγής καυσαερίων. Η συγκέντρωση NO_2 αναμένεται ότι ήταν υψηλότερη μέσα στην ζώνη καύσης. Το χαμηλό NO_2 μπορεί να αιτιολογηθεί και στο χαμηλό επίπεδο τυρβώδους ροής μέσα στην ζώνη της φλόγας.

Ελάχιστες ως αμελητέες συγκεντρώσεις N_2O μέχρι και 3 ppm, βρέθηκαν επίσης μέσα στα καυσαέρια, κατά την διάρκεια της φάσης Θέρμανσης όπως φαίνεται στα σχήματα 5.8.1 και 5.8.6, κάτι που ήταν επίσης θεωρητικά αναμενόμενο.

Ενας αριθμός γραφημάτων για τις διαφορετικές μετρήσεις των εκπομπων στις δοκιμές παρουσιάζονται για κάθε σετ συνθηκών λειτουργίας, δείχνοντας τα χαρακτηρικστικα σχηματισμού NO_X του συστήματος καυστήρα/κλιβάνου.

5.5.1. Παράγοντες που επηρεάζουν τον Σχηματισμό NOx

Σε συστήματα καύσης, όπως αυτό υπό εξέταση, ο σχηματισμός μονοξειδίου του αζώτου φαίνεται ότι επηρεάζεται από τον συνδυασμό επιδράσεων της στοιχειομετρίας του μείγματος, της ανακυκλοφορίας των προϊόντων της καύσης και της αρχικής θερμοκρασίας φλόγας.

Ο σχηματισμός μονοξειδίου του αζώτου καθορίζεται κυρίως από τις μέγιστες θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται κατά την διάρκεια της καύσης, σύμφωνα με τον μηχανισμό του σχηματισμού θερμικού NO που έχει περιγραφεί. Αυτές οι θερμοκρασίες, εξαρτώνται από μεταβλητές όπως η στοιχειομετρία του μείγματος, η παρουσία και ποσότητα διαλυτών, η σύνθεση του καυσίμου και η αρχική θερμοκρασία του μείγματος καυσίμου/αέρα.

Η εξάρτηση της παραγωγής θερμικού NO από την θερμοκρασία εξόδου είναι σημαντικό πρόβλημα σχεδιασμού του ελέγχου των εκπομπών σε πρακτικά συστήματα καύσης, όπου η επίτευξη μεγαλύτερης θερμοκρασίας εξόδου είναι επιθυμητή και συναρτάται με τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.

Όταν η κινητική της καύσης περιορίζει τον σχηματισμό μονοξειδίου [46], ο μεγαλύτερος χρόνος διατήρησης υψηλών θερμοκρασιών στο σύστημα, οδηγεί σε μεγαλύτερο σχηματισμό μονοξειδίου του αζώτου, που αποτελεί την βασική εκπομπή NO_X σε πρακτικά συστήματα. Αυτό ισχύει εφόσον το μείγμα διατηρείται σε ισορροπία.

Έτσι, ο σχηματισμός του μονοξειδίου του αζώτου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμο από την θερμοκρασία της φλόγας. Η θερμοκρασία της φλόγας είναι μέγιστη σε στοιχειομετρικό ή περίπου στοιχειομετρικό μείγμα καυσίμου/αέρα, ενώ ο μέγιστος ρυθμός σχηματισμού μονοξειδίου του αζώτου συμβαίνει συνήθως σε σημεία πτωχότερα από το στοιχειομετρικό. Αυτό το τελευταίο φαινόμενο προκαλείται λόγω της εξάρτησης του ρυθμού σχηματισμού του μονοξειδίου του αζώτου από την θερμοκρασία και την συγκέντρωση ατόμων οξυγόνου. Μολονότι οι μέγιστες θερμοκρασίες δημιουργούνται με μείγμα κοντά στο στοιχειομετρικό, οι συγκεντρώσεις ατόμων οξυγόνου αυξάνονται όσο το μείγμα γίνεται πτωχότερο. Το καθαρό αποτέλεσμα της εξάρτησης του ρυθμού σχηματισμού από την θερμοκρασία και την συγκέντρωση ατόμων οξυγόνου είναι ο μέγιστος σχηματισμός μονοξειδίου του αζώτου σε ελαφρώς πτωχότερο λόγο μείγματος.

Η καύση πλούσιων μειγμάτων οδηγεί σε σημαντική μείωση του σχηματισμού NO. Παράλληλα, μεγάλες ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου μπορεί να παραχθούν σε αυτή την περίπτωση.

Ένα μέσο για την μείωση των εκπομπών μονοξειδίου του αζώτου, είναι η ρύθμιση του μείγματος καυσίμου/αέρα έτσι ώστε αυτό να είναι 'μη-στοιχειομετρικό'. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί την περίσσεια άερα ή καυσίμου για να ψυχθεί το μείγμα που αντιδρά (σαν δεξαμενή θερμότητας-heat sink).

Οι τρεις βασικές μέθοδοι για την μείωση της παρουσίας μονοξειδίου του αζώτου σε συστήματα καύσης μπορούν να συνοψισθούν ως εξής :
i) Καύση ελαφρά 'μη-στοιχειομετρική', κατά προτίμηση χρησιμοποιώντας πλουσιότερα μείγματα (αέρα/καυσίμου), ii) Καύση δύο σταδίων, με τον διαχωρισμό της καύσης σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ζώνη. Η μέθοδος αυτή πρακτικά χρησιμοποιεί την περίσσεια αέρα στην δευτερεύουσα βαθμίδα για να μειώσει τις εκπομπές NO. Και τέλος iii) την εισαγωγή αδρανών ουσιών σε περιβάλλοντα καύσης. Αυτές οι ουσίες απορροφούν μέρος της ενέργειας που εκλύεται κατά την

διάρκεια της θέρμανσης από την αρχική θερμοκρασία στην θερμοκρασία φλόγας. Η ανακυκλοφορία του ρεύματος αερίων είναι ένα παράδειγμα μίας τέτοιας μεθόδου σε εφαρμογή.

Οι επιρροές των διαφόρων παραμέτρων που αναφέρθηκαν στον σχηματισμό NOx, στο υπό εξέταση πειραματικό σύστημα σχολιάζεται στη συνέχεια, με βάση τα πινακοποιημένα αποτελέσματα και τις γραφικές παραστάσεις για κάθε σετ λειτουργικών συνθηκών.

5.5.2. Μορφές Σχηματισμού NOx εντός τη Φλόγας

Σε πρακτικά συστήματα καύσης μόνον ένα κλάσμα του περιεχομένου στο καύσιμο αζώτου μετατρέπεται σε NOx, το υπόλοιπο μπορεί να παραμείνει χημικά δεσμευμένο με την μορφή καταλοίπων που εμφανίζονται σαν αιθάλη ή μετατρέπονται σε άζωτο.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες, που επηρεάζουν την μετατροπή του αζώτου του καυσίμου είναι η στοιχειομετρία, ο βαθμός ανάμιξης του αζώτου-καυσίμου με το οξειδωτικό, ο οποίος καθορίζεται από τον βαθμό τυρβώδους ροής που υπάρχει στο σύστημα καύσης και τέλος την θερμοκρασία φλόγας.

5.6. Επίδραση της Θερμοκρασίας στα NOx

Τα σχήματα 4.1 - 4.4 για πίεση αέρα 8 mbar δείχνουν τις μετρηθείσες θερμοκρασίες φλόγας σε σταθερή κατάσταση για αυτές τις συνθήκες, με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις NO σε ppm, που καταγράφηκαν σε διαφορετικές ακτινικές αποστάσεις από τον κεντρικό άξονα και από κάθε θυρίδα.

Η θερμοκρασία όπως ήδη αναλύθηκε είναι η παράμετρος κλειδί για τις εκπομπές NOx. Η μέγιστη θερμοκρασία των 1234 °C βρέθηκε για τα 5 mbar πίεσης αέρα (1.16 λόγος Αέρα/Καυσίμου), για την οποία επίσης καταγράφηκε η υψηλότερη συγκέντρωση NO (διάγραμμα 3.5). Η κορυφαία τιμή των 78 ppm έχει ληφθεί με δείγμα από την θυρίδα 3, η οποία αντιπροσώπευε την θέση καταγραφής μέγιστης θερμοκρασίας. Προτείνεται ότι η στάθμη θα ήταν υψηλότερη (>78 ppm) αν είχαν ληφθεί μετρήσεις στην θυρίδα 2, όπου προέκυψε η μέγιστη θερμοκρασία.

Σύγκριση με αποτελέσματα Προγνωστικού Μοντέλου CFD :

Η τάση που παρουσιάζεται στα σχήματα, είναι σύμφωνη με τις θεωρητικές προβλέψεις από την ανάλυση με CFD που προηγήθηκε (δείτε τα σχήματα Α2 και Α1 στο παράρτημα για NO και Θερμοκρασία), με την θερμοκρασία και το NO να αυξάνονται ταυτόχρονα. Όπου υπάρχουν, μικρές αποκλίσεις από αυτή την τάση στα γραφήματα, όπως στα σχήματα 5.4.1, 5.4.2, αυτές αποδίδονται στην διαφορά σε κλίμακες ή σφάλματα στις μετρήσεις. Οι συγκεντρώσεις NO που παρουσιάζονται, όταν δεν αυξάνονται σημαντικά σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες φλόγας, παραμένουν στα ίδια επίπεδα, παρουσιάζοντας ένα σχεδόν οριζόντιο προφίλ ακτινικά, ειδικά για το 'πτωχότερο' μείγμα και 8 mbar πίεση αέρα (μεγάλη περίσσεια αέρα) (δείτε τα σχήματα 5.3.4, 5.4.2). Στα 5 mbar, έχουμε πιο σημαντικές διακυμάνσεις του NO (σχήμα 5.3.1).

Άλλες παρατηρήσεις :

Η θερμοκρασία είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας, που σχετίζεται με τον σχηματισμό θερμικού NO, με τους μηχανισμούς που έχουν περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, αλλά ανατρέχοντας στα δεδομένα των μετρήσεων, η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε σε κάποιο σημείο, σπάνια ήταν πάνω από 1500 K (1330°C) και ποτέ δεν ξεπέρασε τους 1800 K (1530°C), θερμοκρασία πάνω από την οποία θεωρητικά ο σχηματισμός θερμικού NO γίνεται αξιοπρόσεκτος.

Η τοπική συγκέντρωση οξυγόνου είναι επίσης πιθανό να έχει μεγάλη συμβολή στον σχηματισμό NO από το άζωτο του καυσίμου, για το σύστημα. Γενικά εφόσον οι κορυφαίες θερμοκρασίες φλόγας σε σχεδόν όλες τις μετρήσεις ήταν κάτω από τους 1300°C, αναμένεται μεγαλύτερη εξάρτηση των μέγιστων εκπομπών NO_X από τα τον λόγο μείγματος.

Για την περίπτωση λόγου (Αέρα/Καυσίμου) φ = 1.6, η μέγιστη συγκέντρωση NO των 60 ppm καταγράφηκε όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.3.3, σε ακτινική απόσταση 100 mm από το κέντρο και αξονικά στην θέση της πρώτης θυρίδας, όπου επίσης σημειώθηκε και η μεγαλύτερη θερμοκρασία (1190°C) για την ίδια πίεση αέρα. Το χαμηλότερο επίπεδο NO (περίπου 26 ppm) επίσης αντιστοιχεί στην θέση της πρώτης θυρίδας επίσκεψης, αλλά κοντά στο τοίχωμα, όπου έχει επίσης εντοπισθεί η ψυχρότερη περιοχή.

Για τις θυρίδες 2 και 4 πιο μακριά από την έξοδο του καυστήρα, τα ακτινικά προφίλ NO είναι σχετικά επίπεδα (με διακύμανση τιμών μέχρι 5 ppm) υποδηλώνοντας μικρότερη εξάρτηση από την θερμοκρασία, κάτι που είναι περισσότερο εμφανές στην θυρίδα 3 (σχετικό σχήμα 5.3.3). Στην θυρίδα 2, σημειώνεται επίσης η μεγαλύτερη μέση θερμοκρασία και σε αυτό τον λόγο μπορεί να αποδοθεί η σχεδόν μέγιστη συγκέντρωση NO που παρουσιάζεται σε όλες σχεδόν τις ακτινικές θέσεις, δημιουργώντας ένα σχεδόν οριζόντιο προφίλ.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι άλλο στέλεχος δειγματοληψίας χρησιμοποιήθηκε στην θυρίδα 3, συγκεκριμένα το πυρόμετρο αναρρόφησης.

Φάση Προθέρμανσης :

Η εξάρτηση του NO από την θερμοκρασία απεικονίζεται επίσης στην γραφική ανάλυψη των αποτελεσμάτων της φάσης ανόδου της θερμοκρασίας (προθέρμανσης). Από το σχήμα 5.7.1. με την απεικόνιση των NO/NO_X από την τελευταία (πίσω) θυρίδα, στον κεντρικό άξονα, σε συνάρτηση με τον χρόνο, παρατηρείται ότι τα επίπεδα του NO αυξάνουν σταθερά ακολουθώντας την καμπύλη της αύξησης θερμοκρασίας, όμως με χαμηλότερο ρυθμό και μικρότερη κλίση της καμπύλης.

Τα διαγράμματα 5.8.1, 5.8.4, 5.8.7 με στοιχεία από την δοκιμή 11, υποδεικνύουν την εξάρτηση των NO/NO_X από την θερμοκρασία, καθώς και τις σχεδόν ταυτόσημες συγκεντρώσεις τους. Αυτό αποδεικνύει την διαπίστωση στα προηγούμενα ότι το ποσοστό NO αντιστοιχεί σχεδόν στο σύνολο των εκπομπών NO_X. Η κορυφαία τιμή που εμφανίζεται στο δεύτερο μέρος της δοκιμής, οφείλεται στην σημαντικά μεγαλύτερη ισχύ που εφαρμόσθηκε.

5.7. Επίδραση της Στοιχειομετρίας στα NOx

Τα γραφήματα 5.3.1 – 5.4.4, δείχνουν την ακτινική διακύμανση των NO_X και NO για λόγους Αέρα Καυσίμου 1.16 και 1.6 αντίστοιχα. Το μεγαλύτερο επίπεδο NO μετρήθηκε για την πίεση 5 mbar (και φ = 1.16) στην φάση σταθερής κατάστασης. Έτσι προτείνεται, ότι αυτή η συνθήκη οδηγεί σε καλύτερο βαθμό ανάμιξης καυσίμου και οξειδωτικού και προσφέρει επίσης μεγαλύτερη αποδοτικότητα καύσης.

Θεωρητικά η λειτουργία με χαμηλή περίσσεια αέρα μπορεί να έχει θετική επίδραση στην μειώση της συγκέντρωσης NO_X λόγω της μείωσης της διαθέσιμης συγκέντρωσης οξυγόνου. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση, η επιρροή της θερμοκρασίας φαίνεται, και πάλι από τα διαθέσιμα αποτελέσματα, να κυριαρχεί έναντι της επιρροής της συγκέντρωσης οξυγόνου, μολονότι τα θερμοκρασιακά επίπεδα (κατά την διάρκεια των μετρήσεων NO_X) δεν ήταν τα μέγιστα που μπορεί να αναπτυχθούν στο σύστημα Η πτώση της θερμοκρασίας, που ακολουθεί την αύξηση του λόγου αέρα/καυσίμου φαίνεται ότι έχει τα πιο σημαντικά αποτελέσματα στον σχηματισμό NO_X.

Και οι δύο στοιχειομετρίες εμφανίζουν υψηλότερα επίπεδα NOx, στον κεντρικό άξονα του θαλάμου και κοντύτερα προς την έξοδο του καυστήρα (σχήματα 5.3.1, 5.3.5). Για πίεση αέρα 8 mbar, η μεγαλύτερη συγκέντρωση NO καταγράφεται στην θυρίδα 1, σε ακτινική απόσταση 100 mm από τον κεντρικό διαμήκη άξονα, ενώ για 5 mbar, στην θυρίδα 3. Ωστόσο ένα υψηλό επίπεδο NO 70 ppm, κοντά δηλαδή στο γενικό μέγιστο, ελήφθη από την θυρίδα 1 με 5 mbar, επίσης. Το υψηλότερο επίπεδο NO για 5 mbar ήταν 78 ppm ενώ για τα 8 mbar ήταν περίπου 60 ppm.

Η κορυφαία τιμή NO επίσης παρουσιάζεται να συμβαίνει πλησιέστερα στον καυστήρα στην πτωχότερη στοιχειομετρία.

Από την απεικόνιση της μεταβολής των ακτινικών προφίλ συγκέντρωσης NO μεταξύ της αξονικής γραμμής και του τοιχώματος του θαλάμου καύσης, φαίνεται ότι τα κορυφαία επίπεδα NO συμβαίνουν εκτός της φλόγας στον κεντρικό άξονα πλησίον του καυστήρα. Αυτό οφείλεται στην καύση της υψηλής συγκέντρωσης ατμού καυσίμου που υπάρχει στην περιοχή. Σε επόμενες θέσεις κατάντη της εξόδου του καυστήρα το επίπεδο ακτινικά του NO είναι σχετικά σταθερό εντός του θαλάμου, ειδικά σε πίεση 8 mbar. Στην περιοχή αυτή υπάρχει γενικά καλύτερη ανάμιξη και η ταχύτητα ροής είναι χαμηλότερη, δημιουργώντας πιο ομοιόμορφες συνθήκες και κατανομές.

Για το πτωχότερο μείγμα (πίεση αέρα 8 mbar) τα ακτινικά προφίλ από τις θυρίδες 2, 3 και 4 (γραφήματα 5.4.2 – 5.4.4) υποδεικνύουν μία μεταβολή του επιπέδου NO < 6 ppm, για τους λόγους που έχουν αναφερθεί. Οι ενδείξεις του αναλυτή από την θυρίδα 3 διαφέρουν σε μέγεθος κατά περίπου 20 ppm κατά μέσο όρο από τις υπόλοιπες όμως αυτές έγιναν με την χρήση του πυρομέτρου αναρρόφησης.

Στις θυρίδες 2, 3 και 4 το υψηλότερο επίπεδο NO συμβαίνει σε θέση 250 – 300 mm μακριά από την αξονική γραμμή και για τις δύο εξεταζόμενες πιέσεις αέρα. Αυτό το σημείο αντιστοιχεί όπως φαίνεται και στα διαγράμματα 4.2 – 4.4 στις μεγαλύτερες ακτινικές θερμοκρασίες, ενώ στην θυρίδα 1 αυτή η θερμοκρασία συμβαίνει αντίστοιχα σε 100 – 150 mm απόσταση από τον άξονα, όπως φαίνεται στο αντίστοιχο γράφημα. Τα επίπεδα NO πέφτουν σε όλες τις περιπτώσεις στην ελάχιστη τιμή της, στην εγγύτητα του τοιχώματος, όπως επίσης προβλέπεται από την θεωρητική μοντελοποίηση με το πρόγραμμα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής που έγινε στο UWCC (M. Ilbas).

5.8. Μετρήσεις στην Τελευταία Θυρίδα (στον Αγωγό Εξόδου Καυσαερίων)

Θεωρώντας τις μετρήσεις που φαίνονται στα γραφήματα 5.3.3, 5.3.6 και 5.8.1 – 5.8.6 για το τμήμα της απαγωγής καυσαερίων, το υψηλότερο επίπεδο (78 ppm) επίσης παρουσιάσθηκε σε πίεση αέρα 5 mbar. Σε αυτή την συνθήκη αναφέρεται και η μεγαλύτερη διακύμανση της τάξης των 10 ppm, σε διαφορετικές θέσεις της διαμέτρου της καμινάδας.

Η συγκέντρωση NOx τείνει να αυξηθεί προς την αντίθετη από την θυρίδα δειγματοληψίας πλευρά της εισόδου της καμινάδας, και αυτό οφείλεται στην διαμόρφωση του συστήματος καυσαερίων. Όπως φαίνεται και στα σχήματα 3.1 & 3.7, το τμήμα εξόδου της καμινάδας που ακολουθεί, είναι προσαρμοσμένο σε αυτή την πλευρά της διαμέτρου της καμινάδας, ακολουθώντας τη συντομότερη διαδρομή προς την έξοδο. Επίσης όπως αναμένονται από το μοντέλο CFD (σχήμα A2), οι υψηλότερες συγκεντρώσεις NO και NOx καταγράφονται προς αυτή την πλευρά.

Οι μετρήσεις στην τελευταία θυρίδα για πίεση 8 mbar, έγιναν με την χρήση και των δύο διαθέσιμων συσκευών δειγματοληψίας. Το σχήμα 5.3.6 υποδεικνύει την διαφορά στα αποτελέσματα που καταγράφηκαν, η οποία είναι της τάξης των 20 ppm κατά μέσο όρο. Το πιο καινούριο όργανο δειγματοληψίας, υδρόψυκτο και με χαλαζιακή επένδυση έδειξε ένα ομαλότερο προφίλ (χωρίς διακυμάνσεις) αλλά με υψηλότερες τιμές (55 ppm περίπου), ενώ το παλαιότερο πυρόμετρο αναρρόφησης έδωσε χαμηλότερες τιμές ((35 ppm min - 43 max) αλλά σύμφωνο με την αυξητική τάση, που περιγράφηκε ήδη για τα 5 mbar.

5.9. Αξονικά Διαγράμματα NO (σταθεροποιημένη κατάσταση)

Τα αξονικά προφίλ συγκέντρωσης NO παρουσιάζονται στα σχήματα 5.5.1, 5.5.2, 5.5.3, για τα 8 mbar, από τα διαθέσιμα αποτελέσματα, για διαφορετικές ακτινικές αποστάσεις από τον κεντρικό άξονα. Τα γραφήματα απεικονίζουν την τάση των προφίλ επιπέδου NO σε αξονική διεύθυνση και αυτή η τάση παρουσιάζεται όμοια και για τις διαθέσιμες ακτινικά θέσεις δειγματοληψίας. Τα επίπεδα NO φαίνεται να αυξάνονται αρχικά με την απόσταση από το ακροφύσιο του καυστήρα, φτάνοντας σε μία μέγιστη τιμή σε απόσταση που αντιστοιχεί στην $2^η$ θυρίδα, όπου επίσης έχει εντοπισθεί το μέγιστο της θερμοκρασίας για αυτές τις συνθήκες. Η γενικά υψηλότερη τιμή των 60 ppm έχει ωστόσο καταγραφεί στην θυρίδα 1.

Πιο πέρα και κατάντη του διασκορπιστή, τα επίπεδα NO μειώνονται καθώς δημιουργούνται οι συνθήκες περιοχής μετά την φλόγα, και τόσο η θερμοκρασία όσο και οι συγκεντρώσεις αερίων είναι χαμηλότερες σε αυτή τη θέση όπου τα επίπεδα NO φτάνουν τις τιμές σταθερής κατάστασης.

Η πτώση αυτή ακολουθείται από μια αύξηση, σε ακόμη πιο απομακρυσμένες από τον καυστήρα θέσεις και κοντά στην είσοδο του τμήματος απαγωγής καυσαερίων, καθώς λόγων της λειτουργίας του ανεμιστήρα απαγωγής όλα τα θερμά αέρια από το εσωτερικό του θαλάμου καύσης έλκονται προς την έξοδο, συμπεριλαμβανομένων NO και NO_X και των συστατικών που συντελούν στον σχηματισμό τους.

Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις NO_X δεν περιλαμβάνουν άλλες αζωτούχες ουσίες όπως το HCN και NH_3, που θεωρούνται ότι είναι ιδιαίτερα χαμηλής συγκέντρωσης, καθώς το NO, αντιπροσωπεύει το 95-99 % των συνολικών τιμών NO_X και τα ppm που γενικά καταγράφηκαν δεν ήταν υψηλά, υπολογίζοντας το μέγεθος της εγκατάστασης.

Η θέση των μετρήσεων δεν βοηθούσε στον προσδιορισμό τους, καθώς οι ουσίες αυτές σχηματίζονται κυρίως στην πρώτη ζώνη της φλόγας από την αρχική αποσύνθεση του καυσίμου. Το πρώτο μετρητικό σημείο (θυρίδα 1) ήταν τοποθετημένο σε μία σημαντική απόσταση (900 mm) από την έξοδο του καυστήρα, ήδη μακριά για να υπάρχει σημαντική παρουσία αυτών των ενδιάμεσων ενώσεων

5.10. Φάση Προθέρμανσης (Ανύψωσης Θερμοκρασίας)

Στην φάση ανύψωσης της θερμοκρασίας (Προθέρμανσης) και από τα αποτελέσματα για πίεση αέρα 5 mbar, από την δοκιμή Νο 11 στα σχήματα 5.7.1, 5.8.1 ÷ 5.8.8. παρατηρούνται τα ακόλουθα :

Οι μεταβολές των NO και NOx με τον χρόνο, την θερμοκρασία και την ισχύ, παρουσιάζονται σε αυτά τα γραφήματα. Οι διαφορές των NO και NOx παρατηρούνται να είναι πολύ μικρές, σχεδόν αμελητέες στις περισσότερες περιπτώσεις. Από τα γραφήματα 5.8.4, 5.8.5, τα επίπεδα NO/NOx αυξάνουν ακολουθώντας τις καμπύλες αύξησης θερμοκρασίας και ισχύος.

Η μέγιστη αύξηση που παρατηρείται προς το τελευταίο μέρος την δοκιμής δείχνεται στο διάγραμμα 5.8.3, να αντιστοιχεί σε μία μέγιστη αύξηση της ισχύος, που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας (ευνοϊκές συνθήκες για την δημιουργία θερμικού NO) και πιθανώς επίσης σχηματισμό NO καυσίμου, από την αύξηση της τροφοδοσίας καυσίμου. Οι εκπομπές NO/NO_X δείχνονται επίσης να μειώνονται βαθμιαία καθώς επίσης μειώνονται βαθμιαία η θερμοκρασία και η ισχύς στην φάση της διαδικασίας σβέσης. Η συγκέντρωση των NO/NO_X κατά την διάρκεια της προθέρμανσης για τα 5 mbar, τις συνθήκες δοκιμής 10 έχουν ήδη συζητηθεί σε προηγούμενο άρθρο.

Κατά την διάρκεια του μεταβατικού σταδίου, της προθέρμανσης, και ανεξάρτητα από τον ρυθμό παροχής καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε, η αύξηση της παροχής αέρα καύσης οδηγούσε, έστω και προσωρινά, σε σημαντική μείωση της θερμοκρασίας φλόγας και της καταγραφής συγκέντρωσης NO, υποδεικνύοντας την εξάρτηση του σχηματισμού NO_X τόσο από την θερμοκρασία, όπως προβλέπεται από τους μηχανισμούς σχηματισμού θερμικού και άμεσου NO όσο και από την συγκέντρωση οξυγόνου. Γενικά οι ενδείξεις επιπέδου NO παρατηρείται ότι ανταποκρίνονται ταχύτερα σε αλλαγές στην τροφοδοσία καυσίμου ή στην παροχη αέρα καυσίμου από ότι οι ενδείξεις θερμοκρασίας, δείχνοντας ότι η εξάρτηση των NOx από τον λόγο αέρα/καυσίμου είναι μεγαλύτερη.

5.11. Επίπεδα N_2O

Τα αποτελέσματα της δοκιμής 11, περιλαμβάνουν μετρήσεις των επιπέδων αερίου N_2O (υποξειδίου), που ελήφθησαν από την τελευταία θυρίδα και από ένα ακόμη σημείο του απαγωγού καυσαερίων (πριν από τον ψεκασμό νερού). Αυτές οι μετρήσεις απεικονίζονται γραφικά σε συνάρτηση με τον χρόνο και την ισχύ στα σχήματα 5.8.1 – 5.8.3, 5.8.5 – 5.8.6. Οι ενδείξεις N_2O παρατηρείται ότι είναι πολύ χαμηλές, σχεδόν αμελητέες καθώς αντιπροσωπεύουν μέχρι 3% των συνολικών επιπέδων NOx, δείχνοντας χαμηλούς ρυθμούς οξείδωσης αζώτου του καυσίμου. Η μέγιστη τιμή των 2.8 ppm αξιολογείται ότι είναι πολύ χαμηλή. Η διαφοροποίηση της συγκέντρωσης με τον χρόνο, την θερμοκρασία και την ισχύ δεν είναι τόσο σημαντική, ωστόσο τα σχετικά διαγράμματα δείχνουν τις τάσεις σχηματισμού του N_2O.

Ο σχηματισμός N_2O παρουσιάζει όπως αναμενόταν τις ίδιες τάσεις με τα συνολικά NO_X, όσον αφορά την σχέση του με την θερμοκρασία και την ισχύ, εμφανίζοντας μία κορυφαία τιμή στο σημείο (στον χρόνο επίτευξης) υψηλότερης θερμοκρασίας και επίσης παρουσιάζοντας μια ευαισθησία στις αλλαγές ισχύος, τόσο κατά την αύξηση (ανοδικό N_2O) όσο και κατά την πτώση (πτωτικό N_2O) των τιμών τους.

5.12. Διαφορές στα Αποτελέσματα λόγω Διαφορετικών Συσκευών Δειγματοληψίας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, δύο διαφορετικές συσκευές δειγματοληψίας χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις NO/NO_X. Το παλιότερο πυρόμετρο αναρρόφησης, το οποίο ήταν κατασκευασμένο από alumina για το τμήμα δειγματοληψίας εντός της φλόγας, με σύστημα στήριξης από ανοξείδωτο χάλυβα, είχε δε μήκος 720 mm και εσωτερική διάμετρο δειγματοληψίας 5 mm.

Ο πιο καινούριος ανοξείδωτος σωλήνας δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε αργότερα, ήταν επενδεδυμένο με χαλαζία, υλικό αδρανές στο άζωτο, έτσι ώστε να μην υπάρχουν αλλοιώσεις του δείγματος από τις αντιδράσεις του χάλυβα με το άζωτο και να υπάρχει βελτίωση της ακρίβειας και αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Αυτό η συσκευή είχε μεγαλύτερο μήκος (830 mm) και κυρίως είχε μεγαλύτερ εσωτερική διάμετρο δειγματοληψίας 6 mm.

Αυτή η διαφορά σε διάμετρο δειγματοληψίας μπορεί να ευθύνεται σε κάποιο βαθμό για την διαφοροποίηση των 20 ppm κατά μέσο όρο, που παρατηρήθηκε όταν χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο συσκευές. Μεγαλύτερος όγκος δείγματος περνούσε στην μονάδα δειγματοληψίας και αυτό μπορεί να επηρέασε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του αναλυτή. Επίσης η συσκευή με την χαλαζιακή επένδυση ήταν εφοδιασμένη και με σύστημα ψύξης με νερό εν αντιθέσει με το πυρόμετρο το οποίο δεν είχε τέτοιο σύστημα και αυτό μπορεί επίσης να μετέβαλλε τα αποτελέσματα, ειδικά σε μετρήσεις υψηλότερων θερμοκρασιών μέσα στον θάλαμο καύσης.

Η θερμοκρασία της 'καινούριας' συσκευής παρατηρήθηκε να παραμένει σταθερή γύρω από τους 35°C κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας, ενώ η θερμοκρασίας του καθετήρα του πυρομέτρου ξεπέρασε τους 70 ÷ 100°C σε κάποιες περιπτώσεις και ακτινικές θέσεις.

Ωστόσο τα αποτελέσματα που δόθηκαν από το πυρόμετρο μπορεί επίσης να είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικά λόγω των μικρότερων διαστάσεών του. Αυτός ο μετρητής προκαλούσε μικρότερη διαταραχή της ροής εσωτερικά του θαλάμου, από ότι ο σωλήνας χαλαζιακής επένδυσης, ο οποίος ήταν σημαντικά παχύτερος (25 mm εξωτερική διάμετρος), προκειμένου να συμπεριλάβει το σύστημα ψύξης.

Τέλος οι δύο συσκευές είχαν διαφορά και ως προς το σχήμα του άκρου τους, η διάταξη του πυρόμετρου παρουσιάζε μία γωνία προς την μία διεύθυνση έτσι ώστε σωστή τοποθέτηση και κατεύθυνση του στελέχους μέσα στον κλίβανο ήταν απαραίτητη, προκειμένου να βελτιωθεί η δειγματοληψία.

5.13. Μετρήσεις- Υπολογισμοί Ταχύτητας Αέρα Εισαγωγής

Η μέτρηση της παροχής του εισερχόμενου αέρα καύσης, στην είσοδό του στον αγωγό εισαγωγής αέρα, χρειαζόταν επίσης κατά την διάρκεια της πειραματικής εργασίας. Η παροχή αέρα όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχει σημαντική επίδραση μέσω της μεταβολής της στοιχειομετρίας του μείγματος καύσης, που εκφράζεται με τον λόγο Αέρα/Καυσίμου (ή καυσίμου/αέρα) και συνεπώς στα θερμοκρασιακά προφίλ και τους ρυθμούς και τρόπους σχηματισμού των NO_X.

Τα προφίλ ταχύτητας αέρα, που προσδιορίσθηκαν με την χρήση του Pitot - tube, σύμφωνα με την μέθοδο που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται

στον πίνακα 1 του κεφαλαίου 5-Β. Οι απαραίτητοι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της παροχής αέρα και εν συνεχεία του λόγου μείγματος, από τις δεδομένες μετρήσεις μανομετρικού ύψους και τα προφίλ ταχύτητας επεξηγούνται επίσης στο Παράρτημα Β. Οι λόγοι μείγματος που αντιστοιχούν σε διαφορετικές πιέσεις αέρα εισαγωγής και τα αποτελέσματά τους στα επίπεδα των NOx δείχνονται επίσης στο σχήμα 5.9.5.

Από τα προφίλ ταχύτητας των γραφημάτων 5.9.1, 5.9.2 μπορεί να διαπιστωθεί ότι όπως αναμένεται (από την θεωρία της μηχανικής ρευστών) τα προφίλ χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες προς τον κεντρικό άξονα του αγωγού, ενώ πλησιέστερα στα τοιχώματα η ταχύτητα του αέρα πέφτει σημαντικά λόγω των οριακών φαινομένων αποκόλλησης και των δυνάμεων τριβής. Η ταχύτητα του αέρα αυξάνεται με τις υψηλότερες πιέσεις εισαγωγής αέρα. Η μέση ταχύτητα που αντιστοιχούσε σε 5 mbar πίεσης ήταν 4 m/s, για 6 mbar μέση ταχύτητα ήταν 4.32 m/s και για 8 mbar αυξάνεται σε 5.6 m/s. Καθώς η παροχή αέρα είναι απευθείας ανάλογη με τις σχετικές αυξήσεις της ταχύτητας, αντίστοιχες αυξήσεις της παροχής παρατηρούνται, η οποία από 0.252 m3/s για τα 5 mbar, γίνεται 0.272 για τα 6 mbar και 0.353 για τα 8 mbar. Αντίστοιχα ο λόγος Αέρα/Καυσίμου αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης αέρα και την παρουσία περίσσειας αέρα καθώς η τροφοδοσία καυσίμου (παροχή καυσίμου) παραμένει σταθερή σε κάθε περίπτωση.

Έτσι, ο λόγος που αντιστοιχεί σε πίεση 5 mbar είναι 1.16, ενώ για τα 6 mbar γίνεται 1.26 και για τα 8 mbar έχουμε ένα μάλλον ασθενές μείγμα με λόγο 1.63 (Αέρα/Καυσίμου). Ο στοιχειομετρικός λόγος μείγματος για το σύστημα δινόταν να είναι 14.44. Φαίνεται λοιπόν ότι όλοι οι λόγοι μείγματος που χρησιμοποιήθηκαν είναι στην πλούσια πλευρά (πλούσια σε καύσιμο) του στοιχειομετρικού.

Η επίδραση της αυξημένη παροχής αέρα στα επίπεδα NO στα καυσαέρια φαίνεται να είναι σύμφωνος με τις θεωρητικές προβλέψεις. Οι μετρήσεις για ισχύ 800 KW, δείχνουν ότι τα επίπεδα NO είναι μειωμένα για την αυξημένη πίεση αέρα και παροχή από μία μέγιστη τιμή 112 ppm για τα 5 mbar σε μία μέγιστη τιμή 82 ppm για τα 8 mbar. Τα αποτελέσματα NO είναι ασυνήθιστα υψηλά αλλά μπορούν να θεωρηθούν μόνον αντιπροσωπευτικά της τάσης και όχι του ακριβούς επιπέδου, καθώς απαιτούνταν βαθμονόμηση του αναλυτή. Μέγιστες τιμές NO καταγράφηκαν προς το κεντρικό άξονα από την θυρίδα 4 και προς το κέντρο της διαμέτρου της καμινάδας.

5.14. Κάποια στοιχεία σχετικά με τα δεδομένα της διαδικασίας Ξήρανσης

Ο κλίβανος αμέσως μετά την εγκατάσταση του υποβλήθηκε σε διαδικασία Ξηρανσης. Η ξήρανση εξυπηρετεί την απομάκρυνση του αρχικού περιεχομένου σε υγρασία του πυρίμαχου μονωτικού υλικού, μέσω μίας διαδικασίας λειτουργίας του κλιβανου σε συνθήκες χαμηλής φλόγας για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε το πυρίμαχο μονωτικό να ξηρανθεί. Αν η περιεχόμενη υγρασία του μονωτικού δεν αφαιρεθεί, πριν από την κανονική θέση σε λειτουργία του κλιβάνου τότε μπορεί να προκληθούν σοβαρές ζημιές (αλλοιώσεις της ομοιομορφίας των φυσαλίδων και της μονωτικής απόδοσής του) από την συμπύκνωση του υγρού στο εσωτερικό του πυρίμαχου μονωτικού όταν αυτό υποβληθεί, 'εν ψυχρώ', στις υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μέσα στον θάλαμο.

Εκτός αυτού αποτελεί μία πρώτη δοκιμή των λειτουργικών χαρακτηριστικών του.

Η διαδικασία που εφαρμόσθηκε στον κλίβανο ισχύος 2 MW περιελάμβανε μία συνεχόμενη λειτουργία του επί 72 ώρες, ξεκινώντας από συνθήκες χαμηλής φλόγας και χαμηλής συνεπώς ισχύος, που προοδευτικά αυξάνονταν με αργό βήμα, ως την μέγιστη ικανότητα του καυστήρα στα τελευταία στάδια. Κατά την διάρκεια της λειτουργίας αυτής, καταγράφονταν και κρατήθηκε αρχείο με όσο το δυνατόν περισσότερες παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος, όπως θερμοκρασίες, κατανάλωση καυσίμου (και ισχύος) και συγκεντρώσεις αερίων στην έξοδο καυσαερίων όπως των NO, CO_2, O_2, CO, προκειμένου να ληφθεί μια πρώτη ιδέα των χαρακτηριστικών του συστήματος και να επαληθευθούν οι προδιαγραφές του κατασκευαστή.

Αντιπροσωπευτικά δείγματα αυτών των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 15 ενώ τα διαγράμματα 5.10.1, 5.10.2, 5.10.3 δημιουργήθηκαν από αυτά τα δεδομένα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί κατά την διάρκεια της Ξήρανσης οι θερμοκρασίες ήταν μεγαλύτερες από 1640 °C στο τελευταίο στάδιο, μετά από περισσότερες από 60 ώρες συνεχούς λειτουργίας. Επίσης επετεύχθη μέγιστη ισχύς 1.6 MW προς το τέλος της διαδικασίας. Σε αυτή την τελευταία φάση, η απόδοση του καυστήρα δοκιμάσθηκε με την διατήρηση για 5 ώρες της λειτουργίας σε ισχείς μεγαλύτερες του 1.5 MW. Η τιμή του λ επίσης παρατηρήθηκε να καταλήγει στην τιμή 1.3 στα τελευταία στάδια της διαδικασίας, από μία αρχική 3.95

Στο γράφημα 5.10.1 απεικονίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας με την ισχύ και με τον χρόνο για μετρήσεις θερμοκρασίας από τρεις από τις θυρίδες, την θυρίδα 1 (εμπρός) την θυρίδα 3 (μεσαία) και την θυρίδα στην είσοδο του αγωγού καυσαερίων. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι στα αρχικά στάδια οι θερμοκρασίες ήταν της τάξης των 260°C και η ισχύς 0.1 MW, με συνθήκες χαμηλής φλόγας. Η θερμοκρασία φαίνεται να αυξάνει με εκθετικό τρόπο σε όλες τις θυρίδες, μέχρι τιμές μεγαλύτερες των 1500°C που αντιστοιχούν σε ισχύ μεγαλύτερη των 1.5 MW. Ο ρυθμός αύξησης της ισχύος κρατήθηκε αργός και με κατά το δυνατό ομοιόμορφα βήματα σε όλη της διαδικασία, έτσι ώστε ο χρόνος από την ανάφλεξη να μπορεί να αναπαρασταθεί στον άξονα της ισχύος.

Κατά τον χρόνο αύξησης της θερμοκρασίας, η ένδειξη από την θυρίδα 1 φαίνεται να αναπτύσσει τις υψηλότερες τιμές καθώς προχωρά η διαδικασία, ενώ στα πρώτα στάδια η θερμοκρασία στην θυρίδα εξόδου είναι υψηλότερη. Μετά από περίπου 50 ώρες, ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας αρχίζει να πέφτει ραγδαία δείχνοντας την έναρξη της σταθεροποίησης (ισορροπίας) καύσης. Σε μεταγενέστερους χρόνους η σταθεροποίηση ενισχύεται σε ένα επίπεδο περίπου 1600°C. Ο χρόνος που χρειάσθηκε για την εμφάνιση σταθερής κατάστασης θεωρείται πολύ μεγάλος και αυτό δικαιολογείται από τον χρόνο που απαιτούνταν για την επαρκή ξήρανση της επένδυσης πάχους 220 mm στην εσωτερική επιφάνεια του τοιχώματος του θαλάμου. Δηλαδή το πάχος του μονωτικού στρώματος επηρέασε τον χρόνο για την επίτευξη της σταθεροποίησης.

Τα διαγράμματα 5.10.2 και 5.10.3 δείχνουν την μεταβολή στην συγκέντρωση O2 και CO2 στα καυσαέρια, σε συνάρτηση με τον χρόνο από την έναυση και με την ισχύ, από μετρήσεις που ελήφθησαν από το τμήμα απαγωγής καυσαερίων. Και οι δύο συγκεντρώσεις φαίνεται ότι ομαλοποιούνται με αργό ρυθμό στα επίπεδα που προβλέπονται από στις οδηγίες του κατασκευαστή, για καλή απόδοση καύσης. Έτσι, η συγκέντρωση, CO_2 τελικά αυξάνεται σε περίπου 12 % και η συγκέντρωση O_2 στο τμήμα καυσαερίων πέφτει σε 4 %.

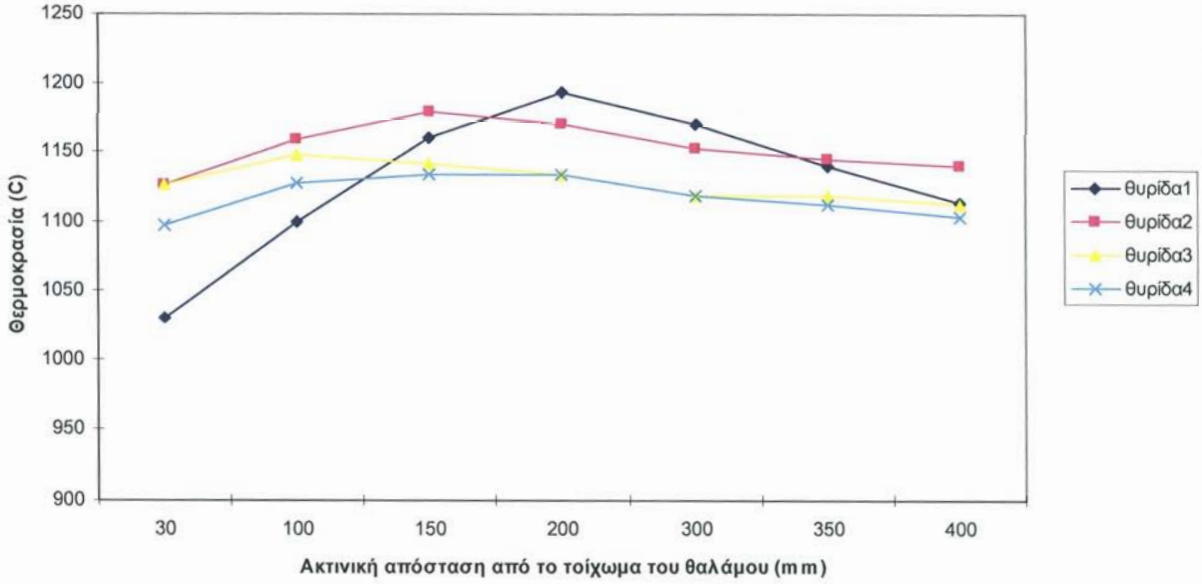
Και τα δύο αέρια επηρεάζονται από την βαθμό ολοκλήρωσης της καύσης και την στοιχειομετρία του μείγματος αέρα/καυσίμου. Η συγκέντρωση του οξυγόνου μειώνεται καθώς η καύση γίνεται πληρέστερη και καταναλώνεται στην διάρκειά της. Η συγκέντρωση CO_2 αυξάνεται με την αύξηση της ισχύος καθώς αυξάνεται η τροφοδοσία καυσίμου, και καίγεται περίσσεια καυσίμου.

Η αρχική συγκέντρωση του O_2 καταγράφεται ότι είναι 20 % κατ'όγκο καθώς πλεονάζον οξυγόνο υπάρχει ακόμη στο περιβάλλον της καύσης στα αρχικά στάδια της καύσης και εκείνη του CO_2, το οποίο είναι ένα προϊόν της καύσης, είναι περίπου 2% αρχικά καθώς η ένταση της καύσης είναι ακόμη χαμηλή όπως και η κατανάλωση καυσίμου.

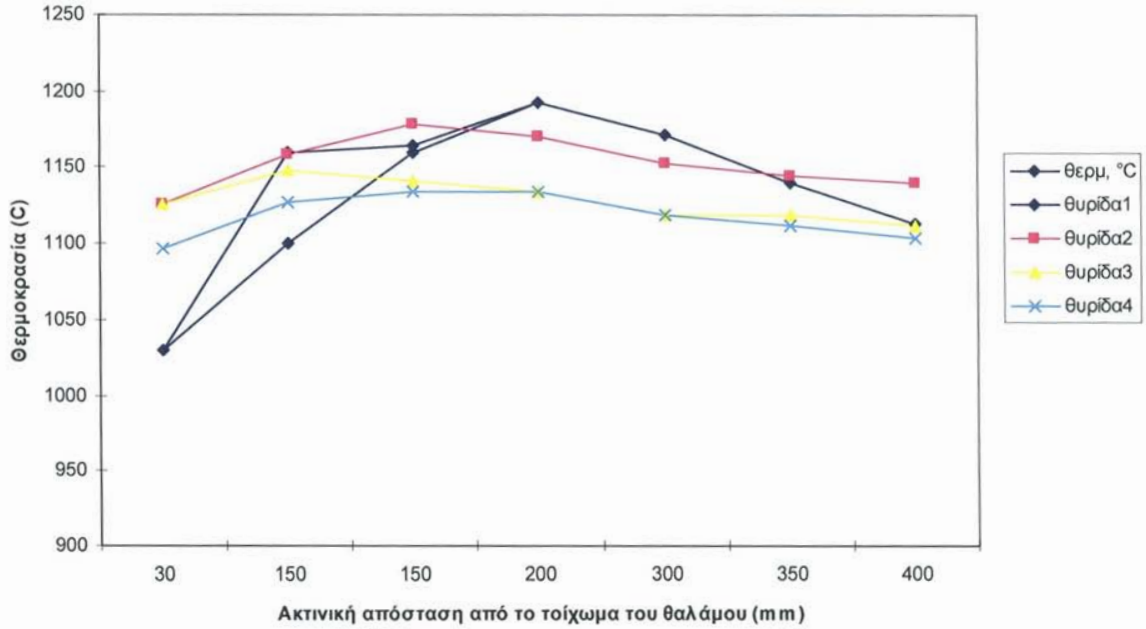
Και τα δύο αυτά αέρια έφτασαν στα ίδια επίπεδα συγκέντρωσης (περίπου of 9 % κατ'όγκον) σε θερμοκρασία 1100°C και σε ισχύ 0.65 MW.

5 – A Σχήματα & Γραφικές Παραστάσεις 5.1.1. ÷ 5.8.8.

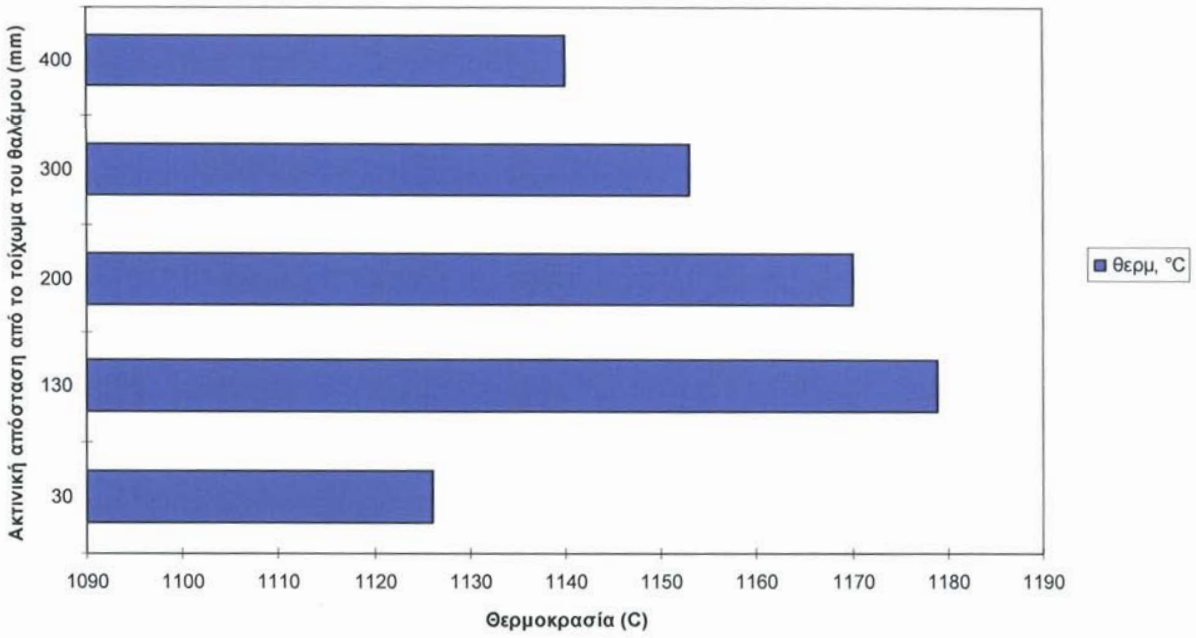
Σχήμα 5.1.1. - Προφίλ θερμοκρασιών από τις θυρίδες 1,2,3,4 , 8 mbar



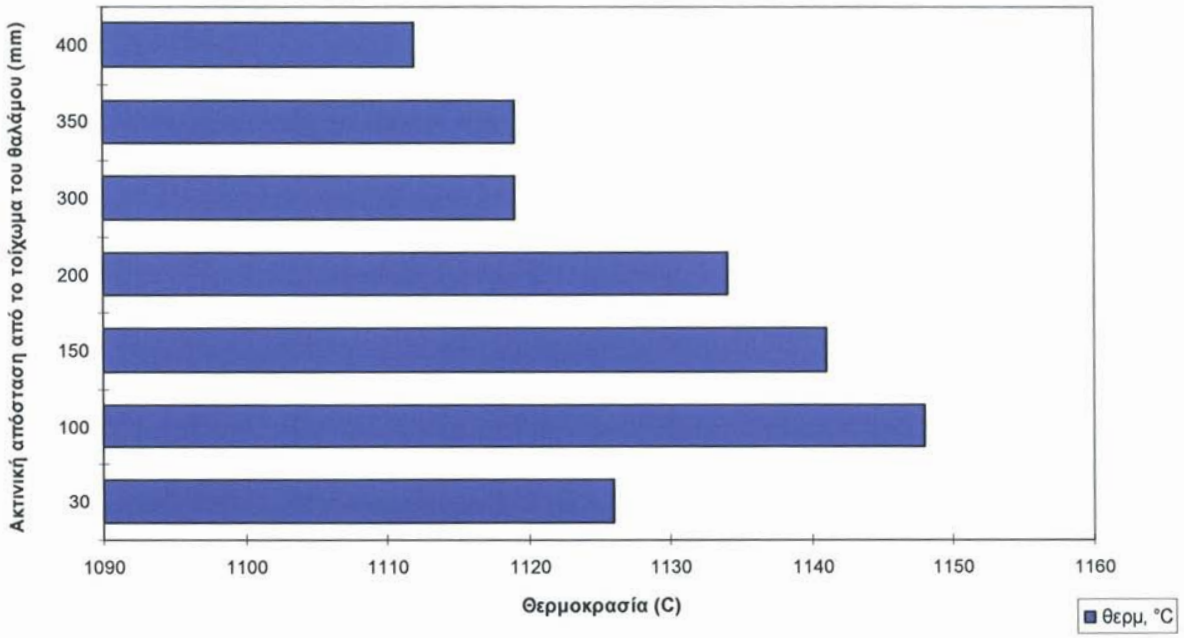
Σχήμα 5.1.1. - Προφίλ θερμοκρασιών από τις θυρίδες 1,2,3,4 , 8 mbar



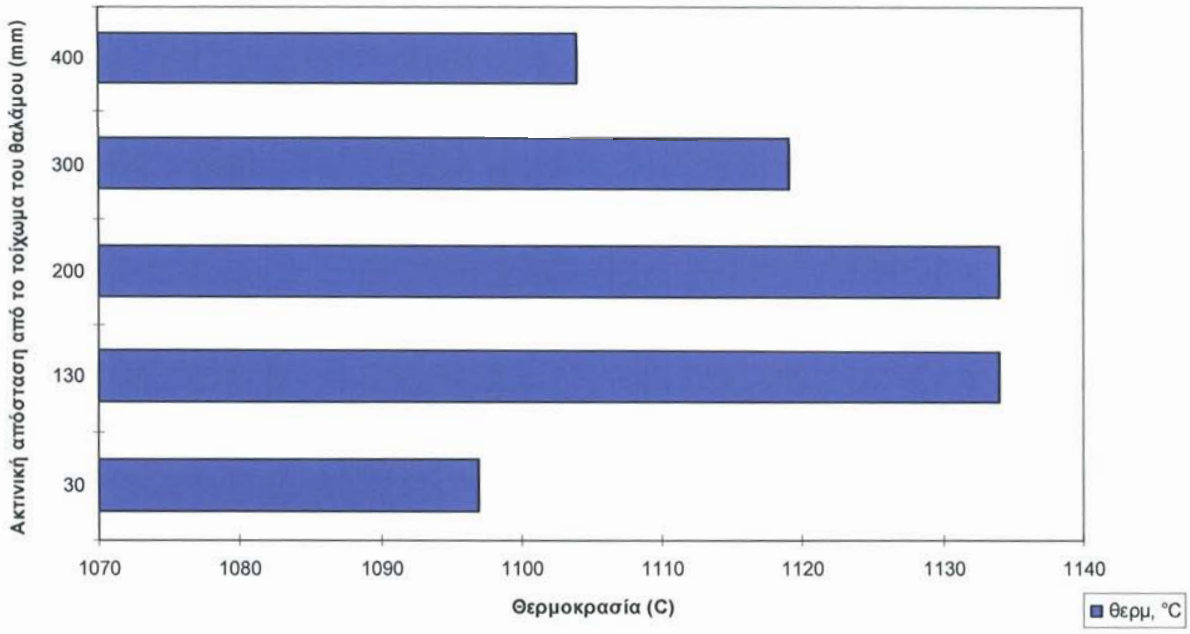
Σχήμα 5.1.3. - Προφίλ θερμοκρασιών, θυρίδα 2, σταθερή κατάσταση, 8 mbar



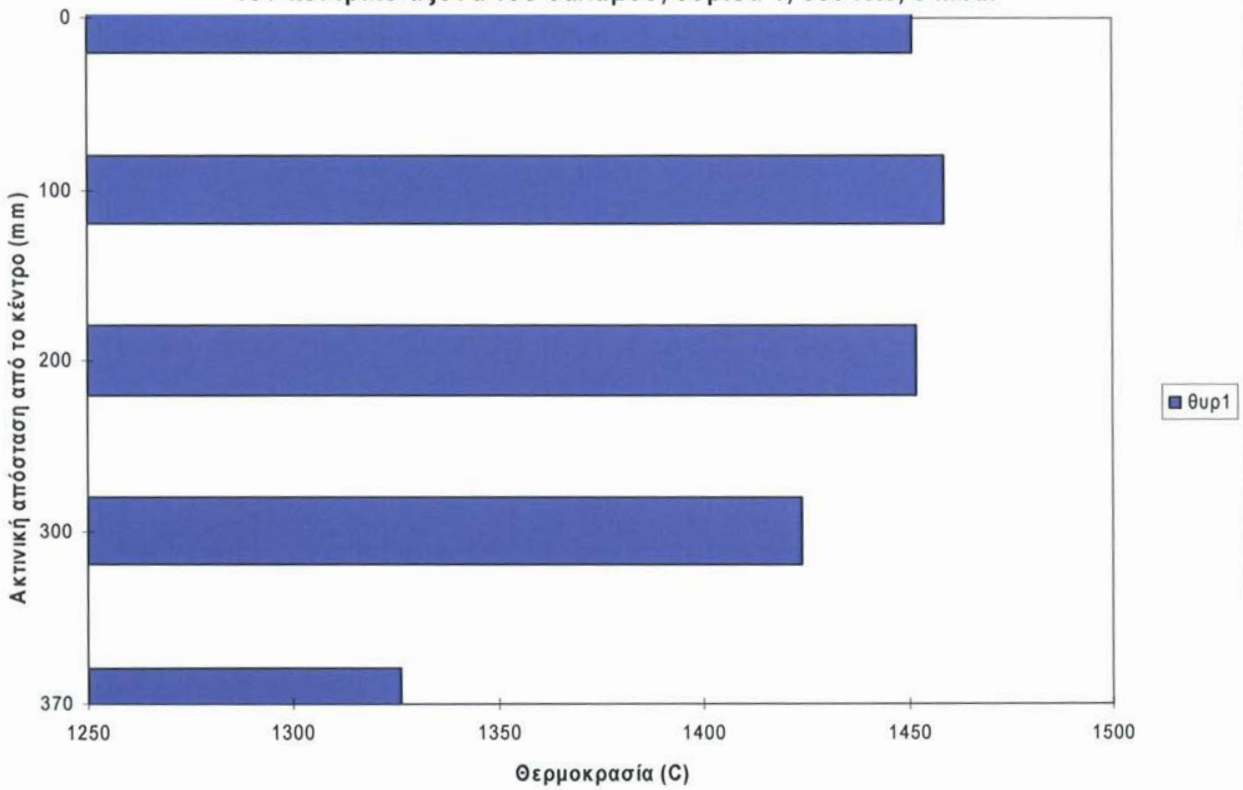
Σχήμα 5.1.4. - Προφίλ θερμοκρασιών, θυρίδα 3, σταθερή κατάσταση, 8mbar



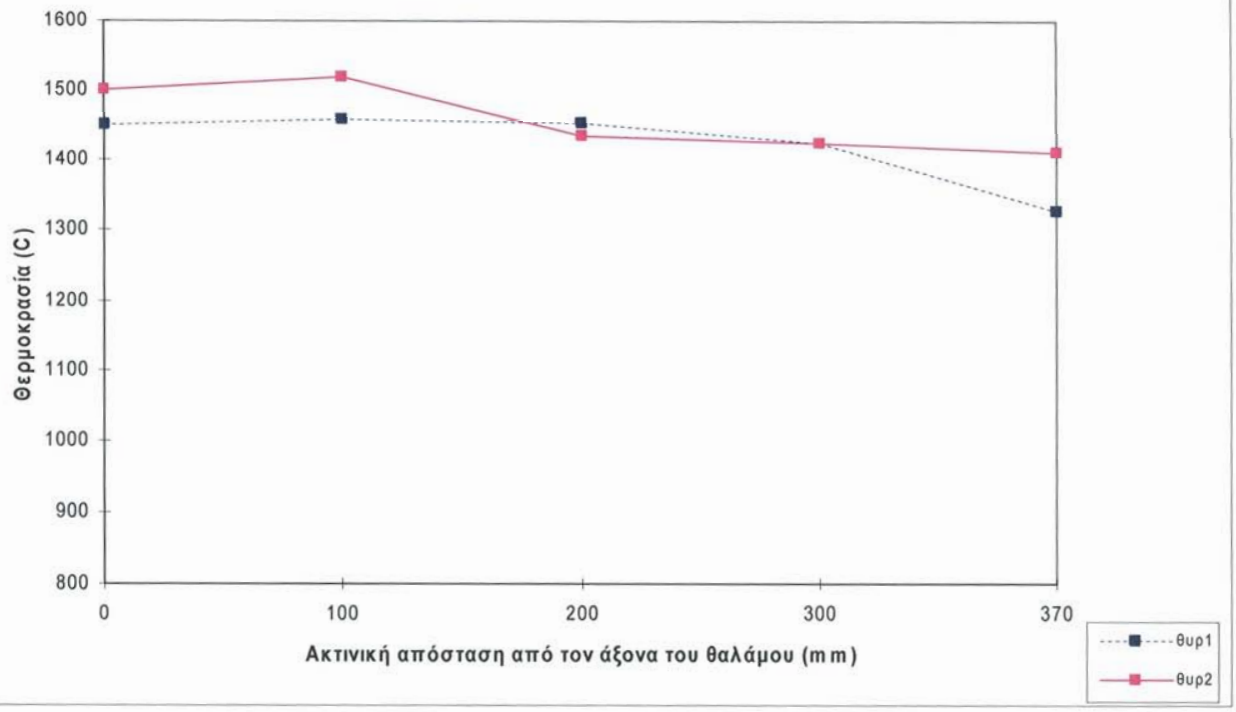
Σχήμα 5.1.5. - Προφίλ θερμοκρασιών, θυρίδα 4, σταθερή κατάσταση, 8 mbar



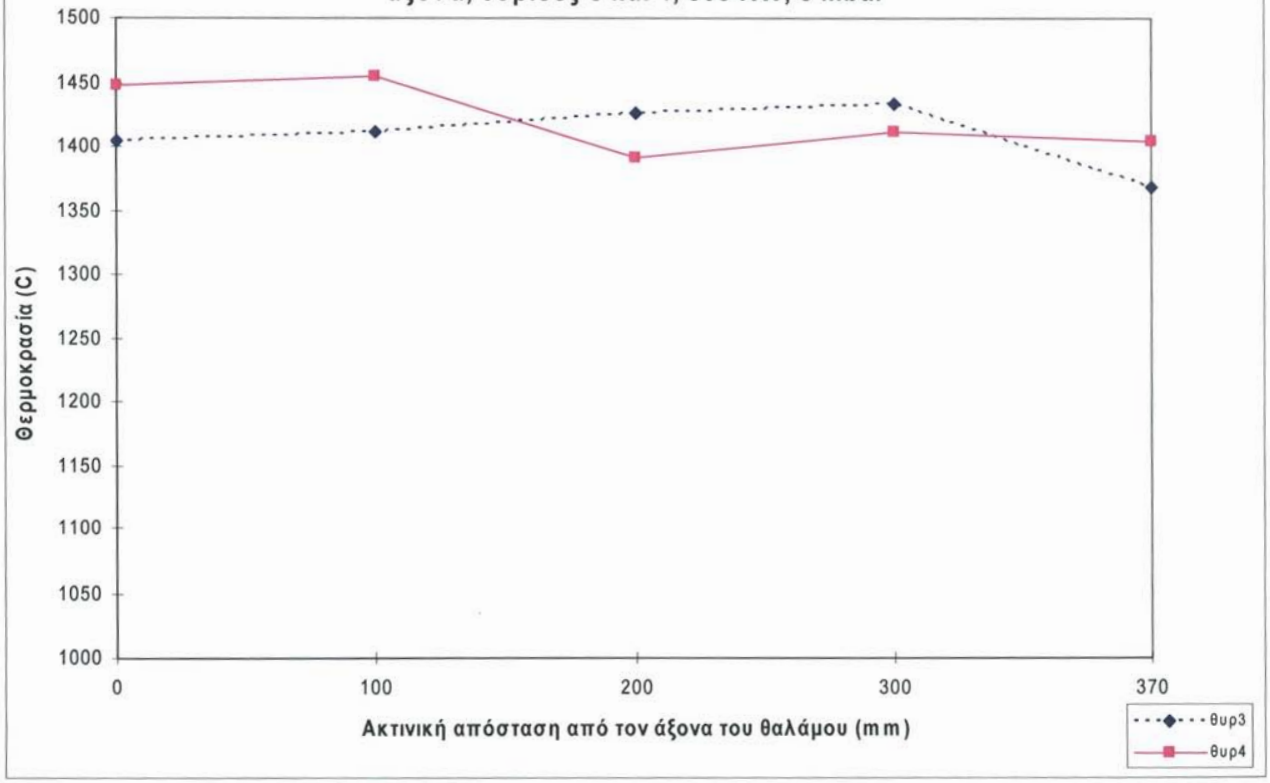
Σχήμα 5.1.6 : Προφίλ θερμοκρασιών σε διάφορες ακτινικές αποστάσεις από τον κεντρικό άξονα του θαλάμου, θυρίδα 1, 800 KW, 5 mbar

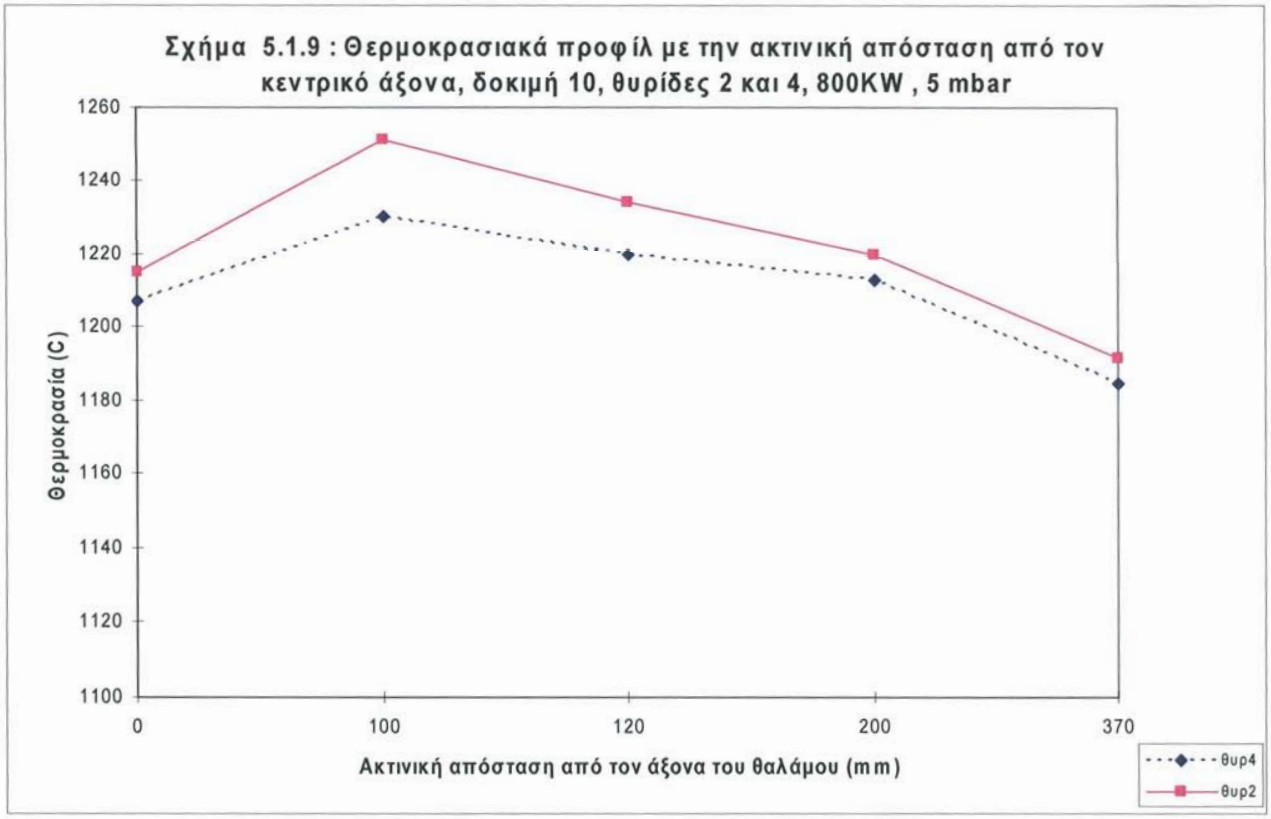


Σχήμα 5.1.7 : Προφίλ θερμοκρασιών με ακτινική απόσταση από τον κεντρικό άξονα, θυρίδες 1 και 2, 800 KW, 5 mbar

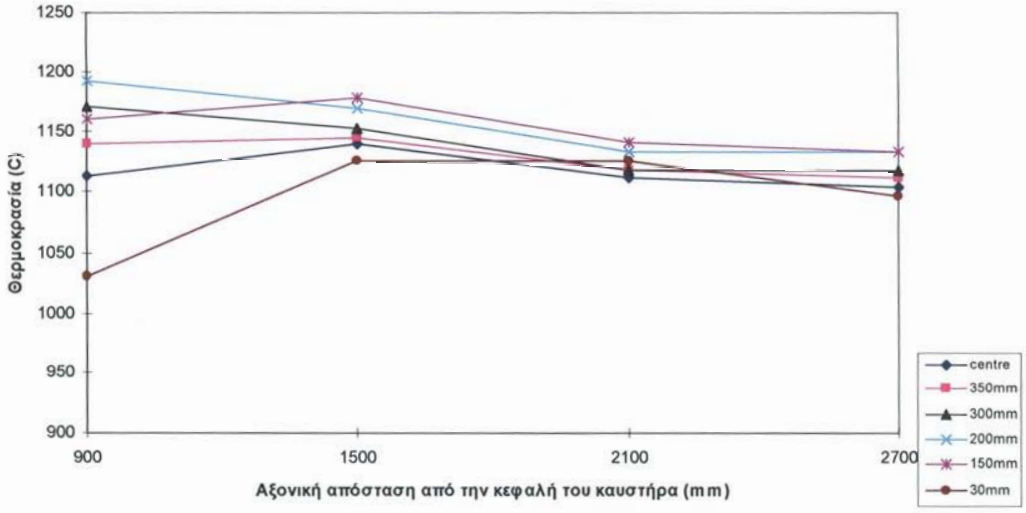


Σχήμα 5.1.8 : Προφίλ θερμοκρασιών με ακτινική απόσταση από τον κεντρικό άξονα, θυρίδες 3 και 4, 800 KW, 5 mbar

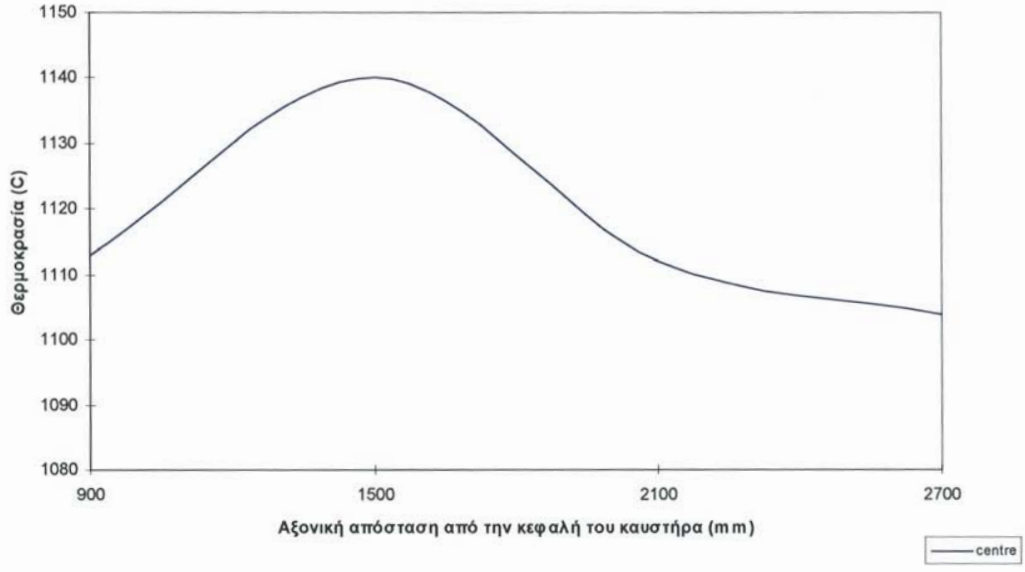



Σχήμα 5.1.9 : Θερμοκρασιακά προφίλ με την ακτινική απόσταση από τον κεντρικό άξονα, δοκιμή 10, θυρίδες 2 και 4, 800KW , 5 mbar
1260
1240
1220
1200
1180
1160
1140
1120
1100
Θερμοκρασία (C)
0
100
120
200
370
Ακτινική απόσταση από τον άξονα του θαλάμου (mm)
θυρ4
θυρ2

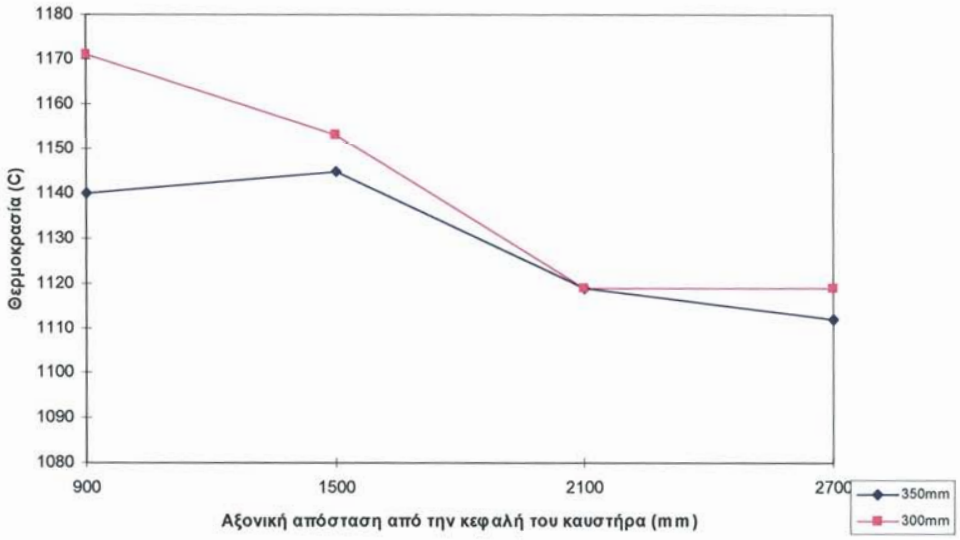
Σχήμα 5.2.1. - Αξονικά προφίλ θερμοκρασιών, για διαφορετικές ακτινικές θέσεις, σταθερή κατάσταση, 8 mbar



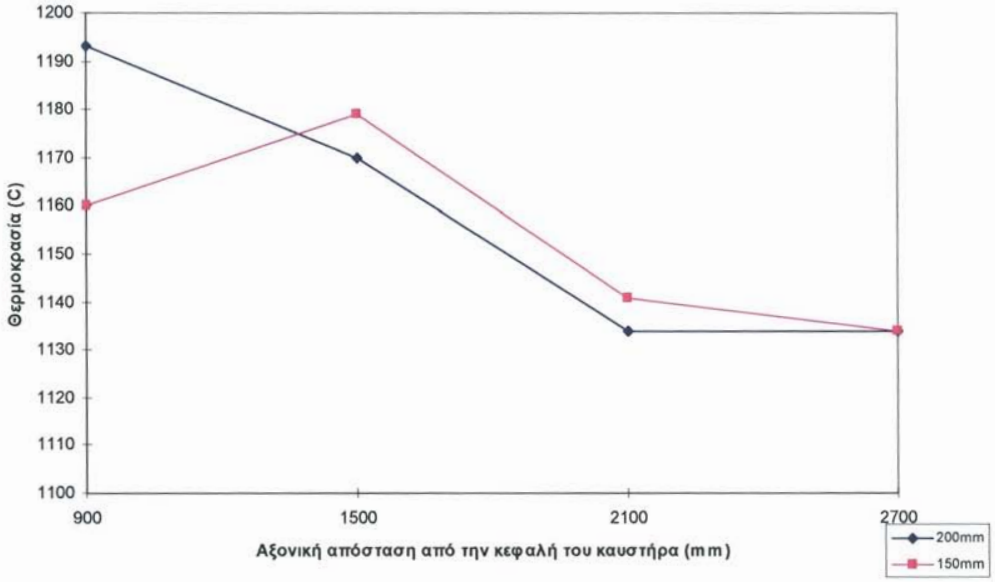
Σχήμα 5.2.2. - Αξονικό προφίλ θερμοκρασιών, στον κεντρικό άξονα του θαλάμου, σταθερή κατάσταση, 8 mbar



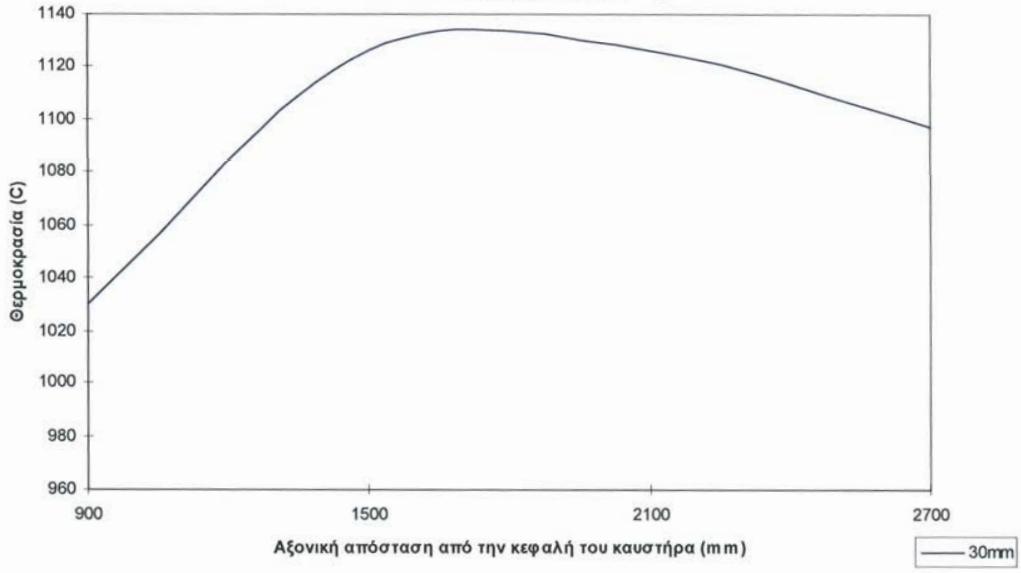
Σχήμα 5.2.3. - Αξονικό προφίλ θερμοκρασιών, για ακτινικές αποστάσεις 300 mm και 350 mm από τον άξονα, σταθερή κατάσταση, 8 mbar



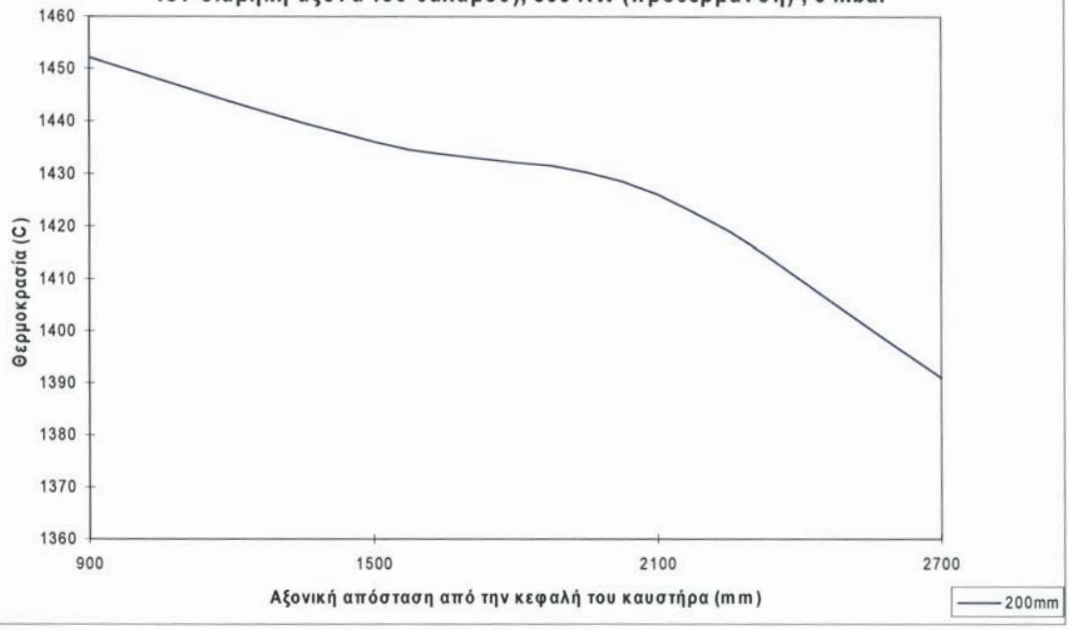
Σχήμα 5.2.4. - Αξονικά προφίλ θερμοκρασιών, σε δύο ακτινικές θέσεις (150 mm & 200 mm), σταθερή κατάσταση, 8 mbar



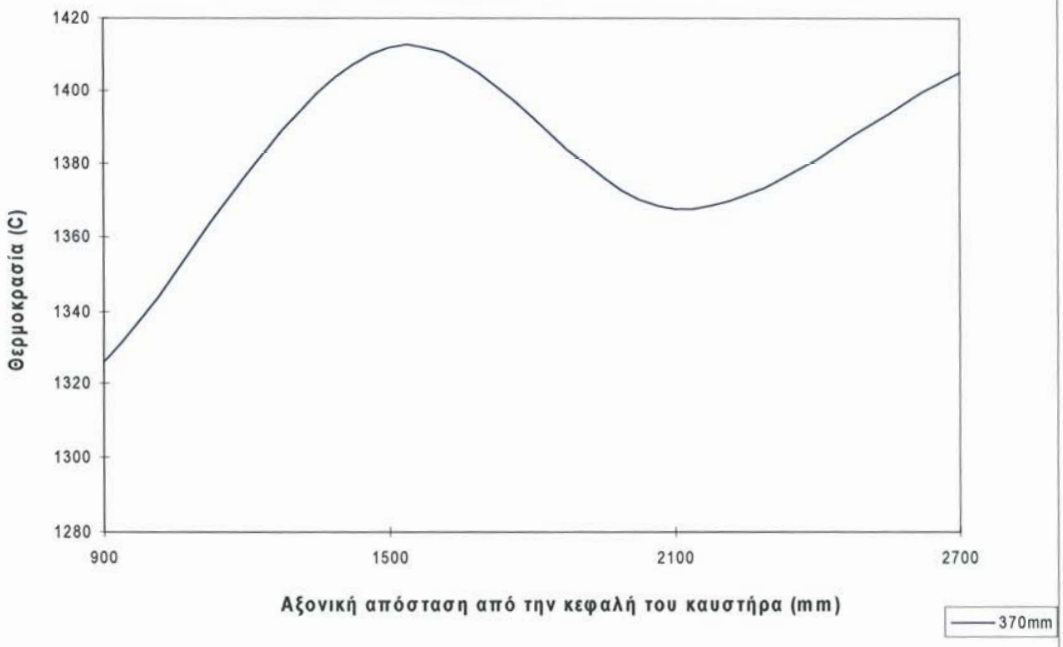
Σχήμα 5.2.5 - Αξονικό προφίλ θερμοκρασιών, σε ακτινική απόσταση 30 mm από το τοίχωμα, σταθερή κατάσταση 8 mbar



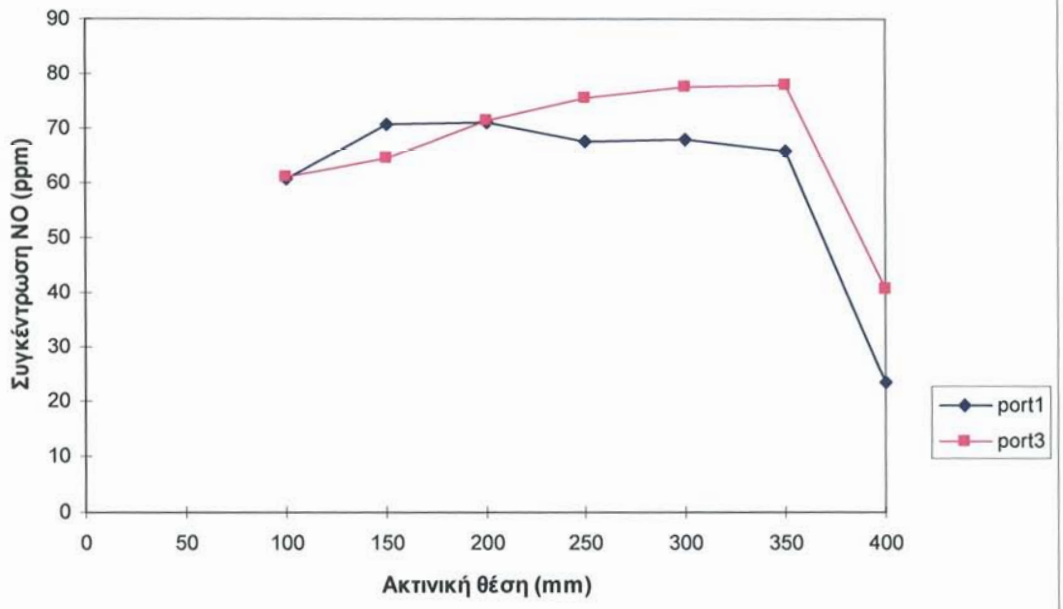
Σχήμα 5.2.6 : Αξονικό προφίλ θερμοκρασιών, σε ακτινική θέση 200 mm (από τον διαμήκη άξονα του θαλάμου), 800 KW (προθέρμανση) , 5 mbar



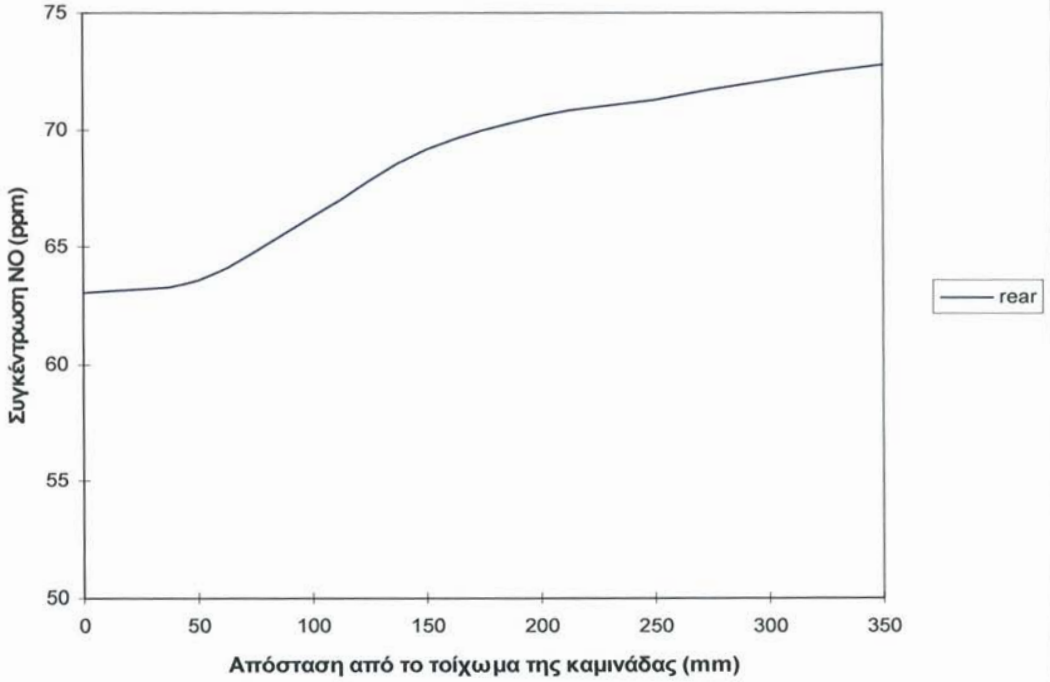
Σχήμα 5.2.7 : Αξονικό προφίλ θερμοκρασιών, σε ακτινική θέση 370 mm (από τον διαμήκη άξονα του θαλάμου), 800 KW (προθέρμανση), 5 mbar



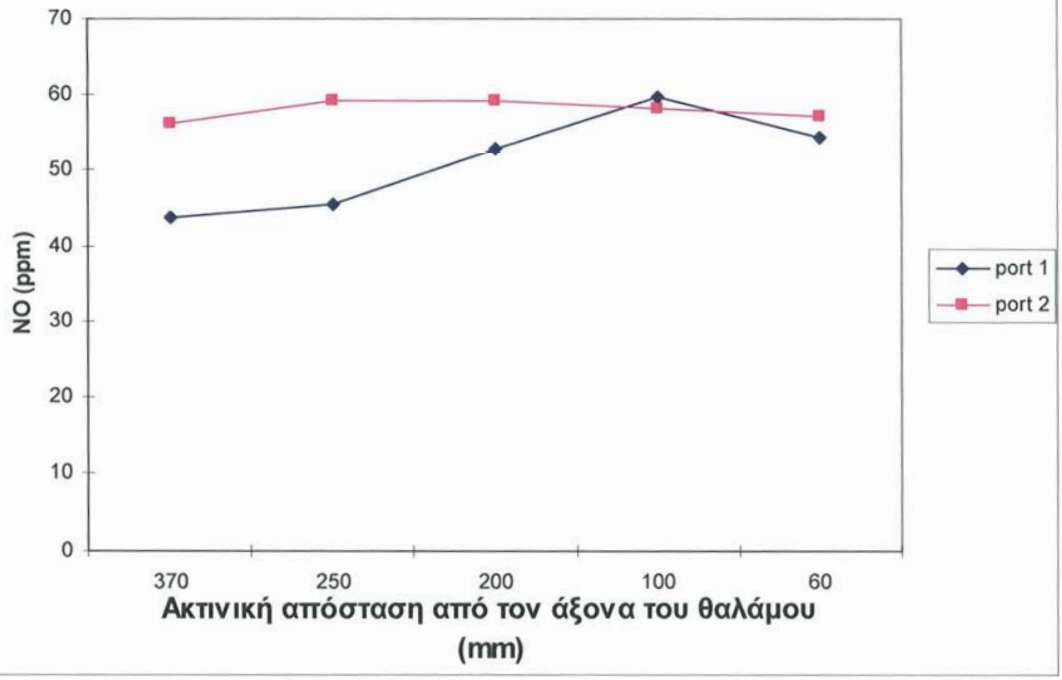
Σχήμα 5.3.1. : Προφίλ NO, θυρίδες 1 και 3, 5 mbar, σταθερή κατάσταση



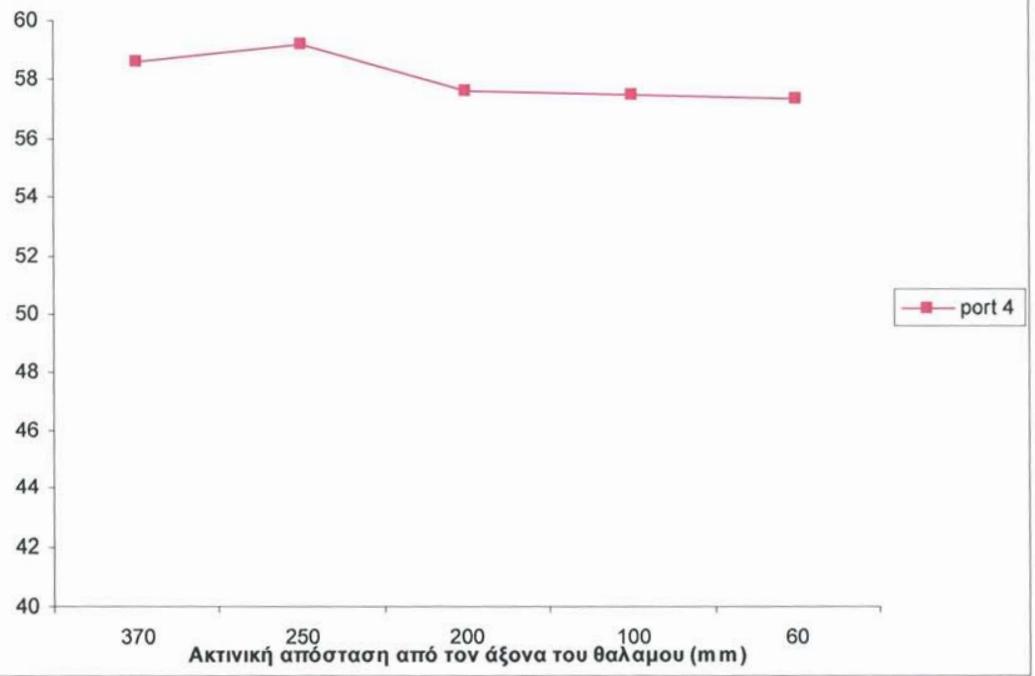
Σχήμα 5.3.2. : Προφίλ NO στην τελευταία θυρίδα (αγωγός καυσαερίων), 5 mbar, σταθερή κατάσταση

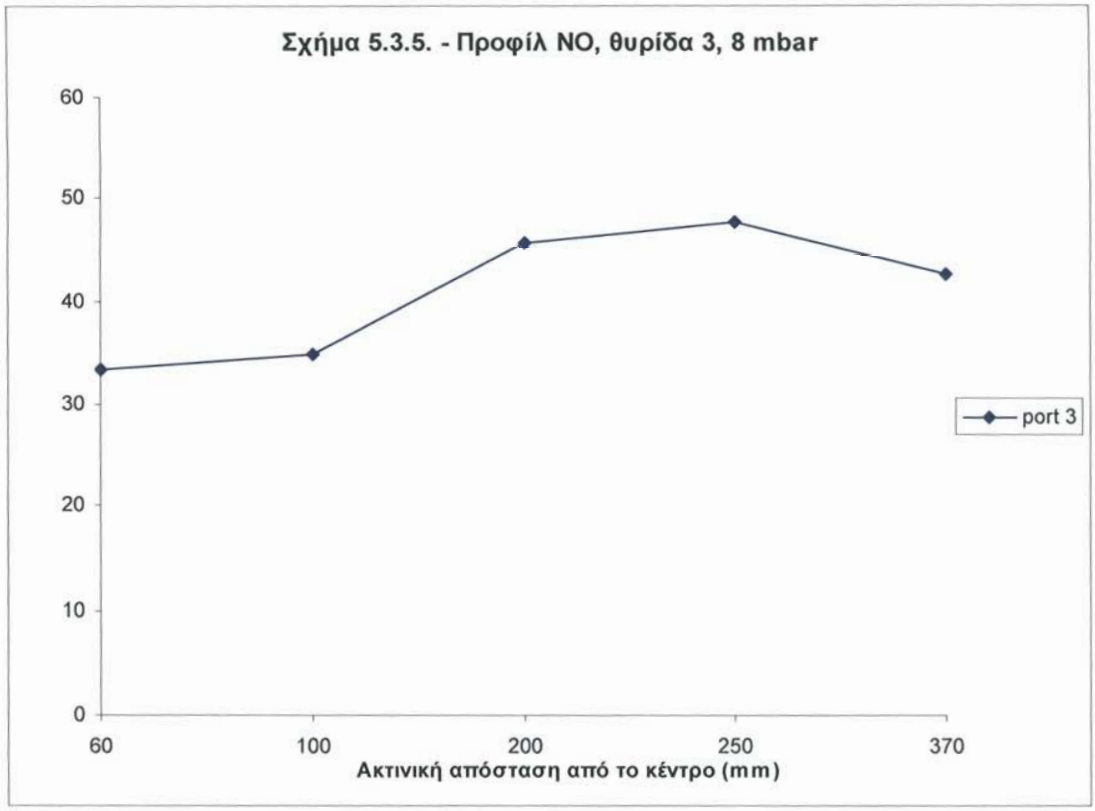


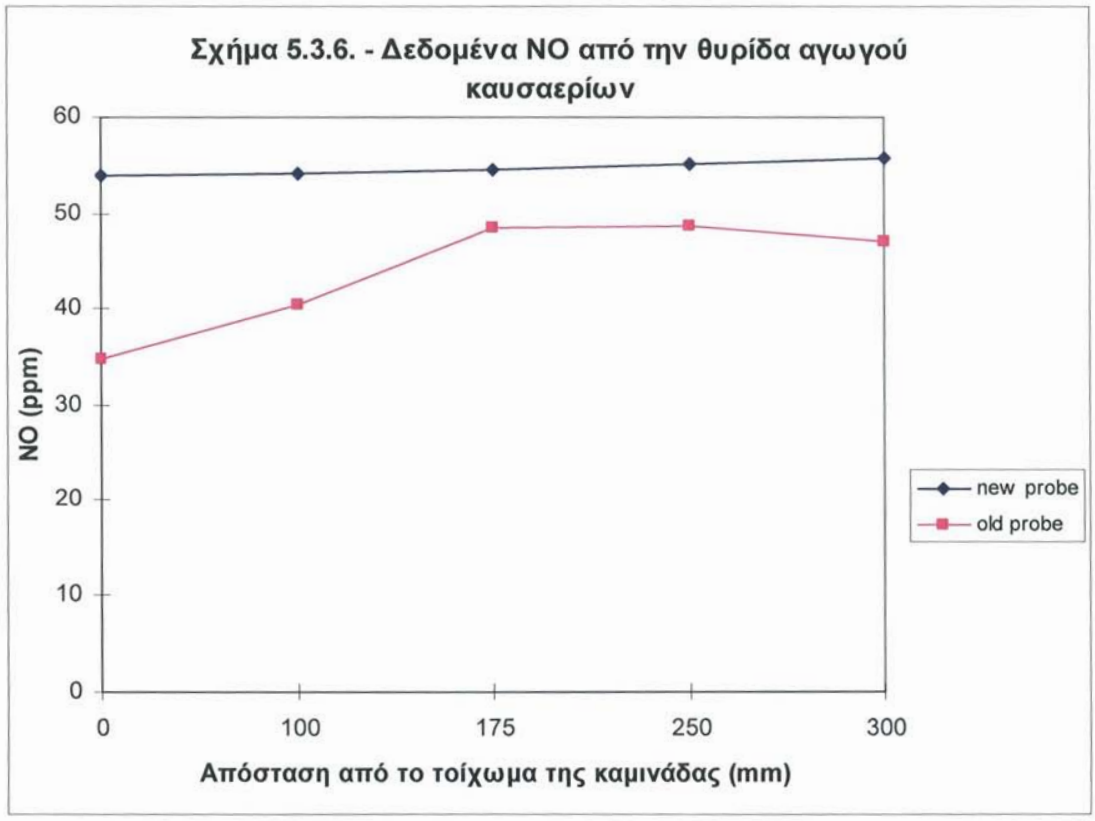
Σχήμα 5.3.3. - Προφίλ NO, θυρίδες 1 & 2, πίεση αέρα 8 mbar



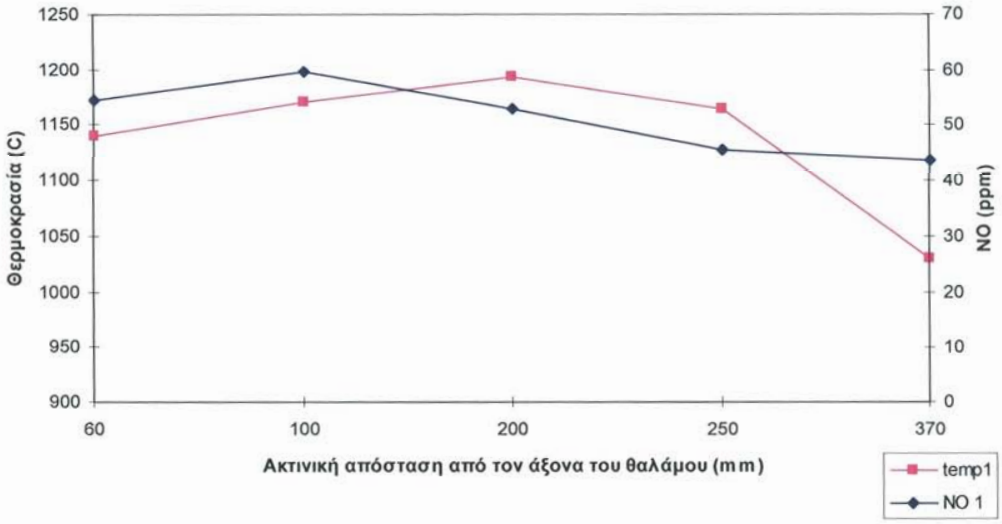
Σχήμα 5.3.4. - Προφίλ NO, θυρίδα 4, πίεση αέρα 8 mbar



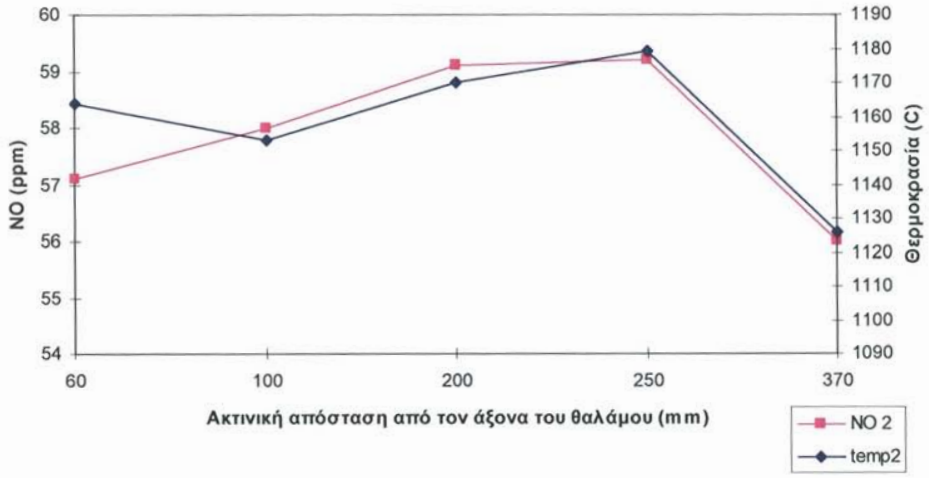

Σχήμα 5.3.5. - Προφίλ NO, θυρίδα 3, 8 mbar
60
50
40
30
20
10
0
60
100
200
250
370
Ακτινική απόσταση από το κέντρο (mm)
port 3


Σχήμα 5.3.6. - Δεδομένα NO από την θυρίδα αγωγού καυσαερίων
60
50
40
30
20
10
0
NO (ppm)
0
100
175
250
300
Απόσταση από το τοίχωμα της καμινάδας (mm)
new probe
old probe

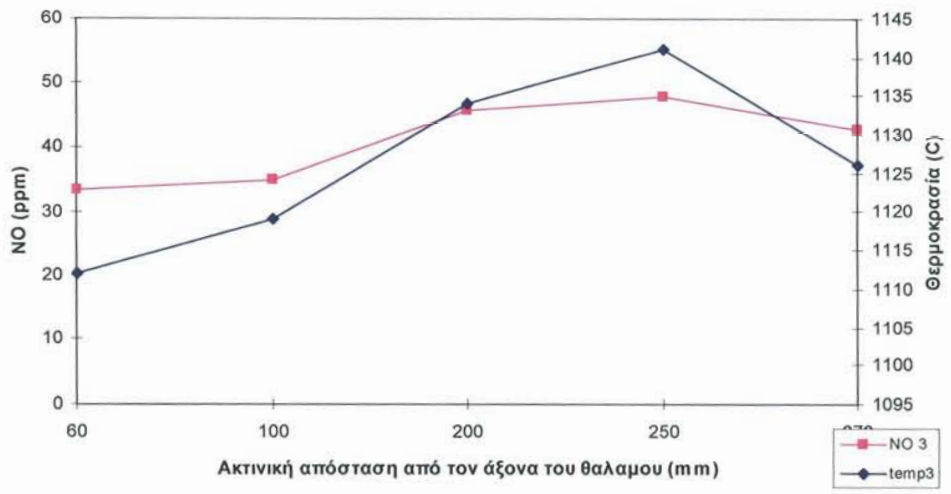
Σχήμα 5.4.1. - Προφίλ NO και Θερμοκρασίας, θυρίδα 1 , 8 mbar



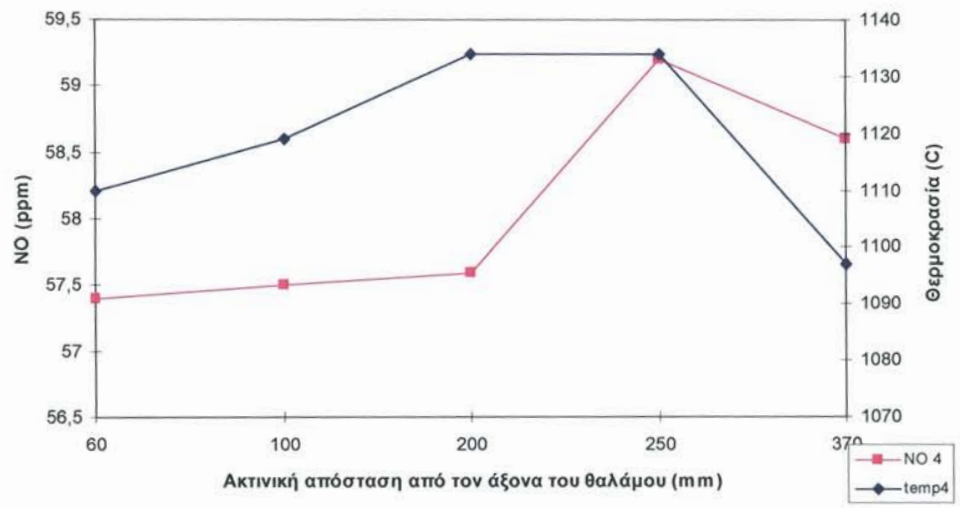
Σχήμα 5.4.2. - Προφίλ NO και Θερμοκρασίας, θυρίδα 2, 8 mbar



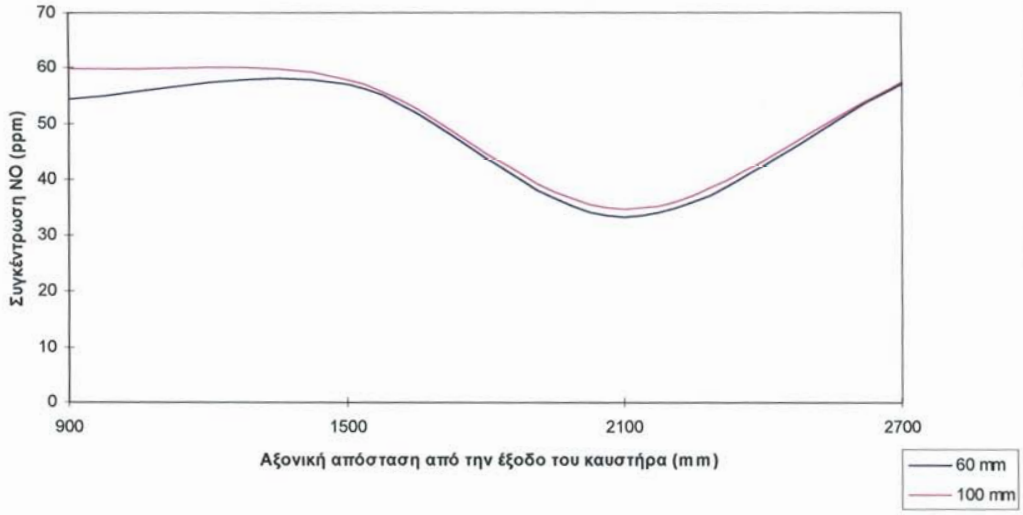
Σχήμα 5.4.3. - Προφίλ NO και Θερμοκρασίας, θυρίδα 3 , 8 mbar



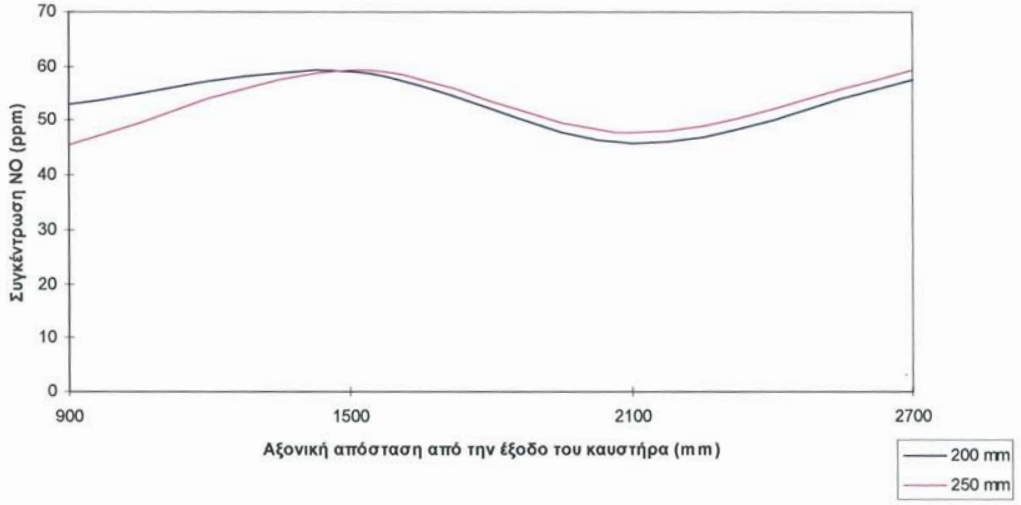
Σχήμα 5.4.4. - Προφίλ NO και Θερμοκρασίας, θυρίδα 4 , 8 mbar



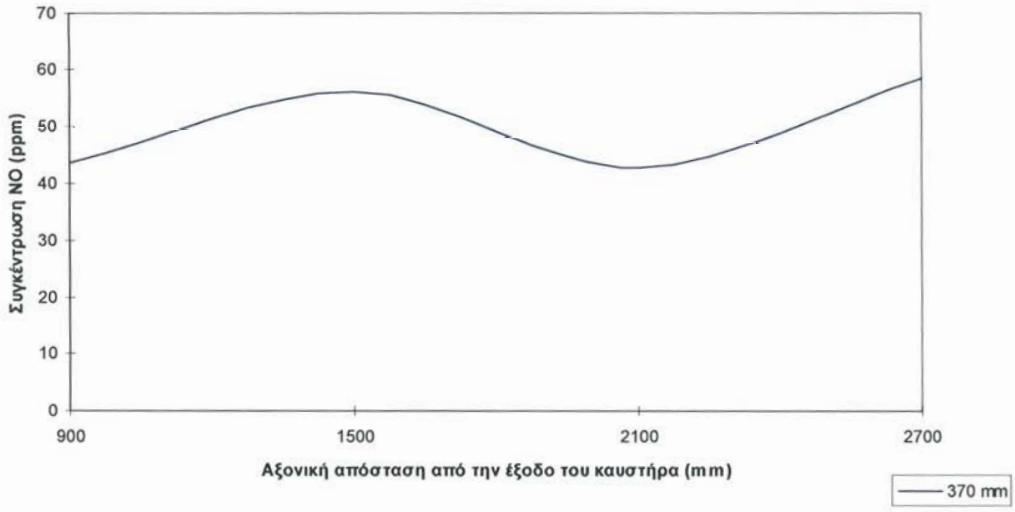
Σχήμα 5.5.1. - Αξονικά προφίλ NO σε ακτινικές αποστάσεις 60 mm και 100 mm, 8 mbar, σταθερή κατάσταση



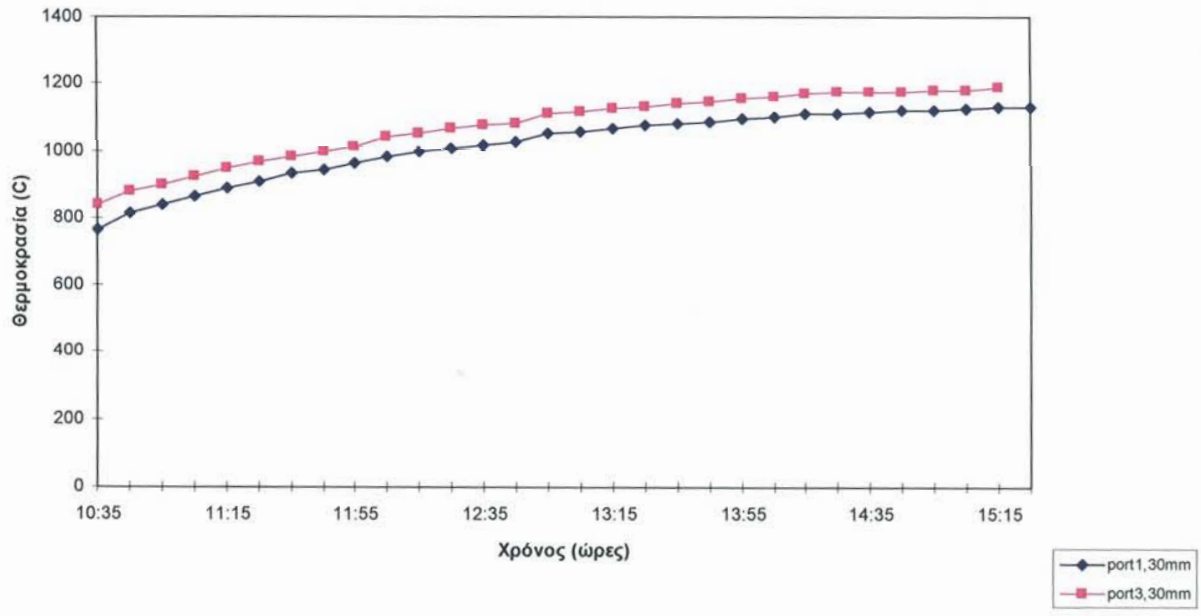
Σχήμα 5.5.2. - Αξονικά προφίλ NO σε δύο ακτινικές αποστάσεις 200 mm και 250 mm, 8 mbar, σταθερή κατάσταση



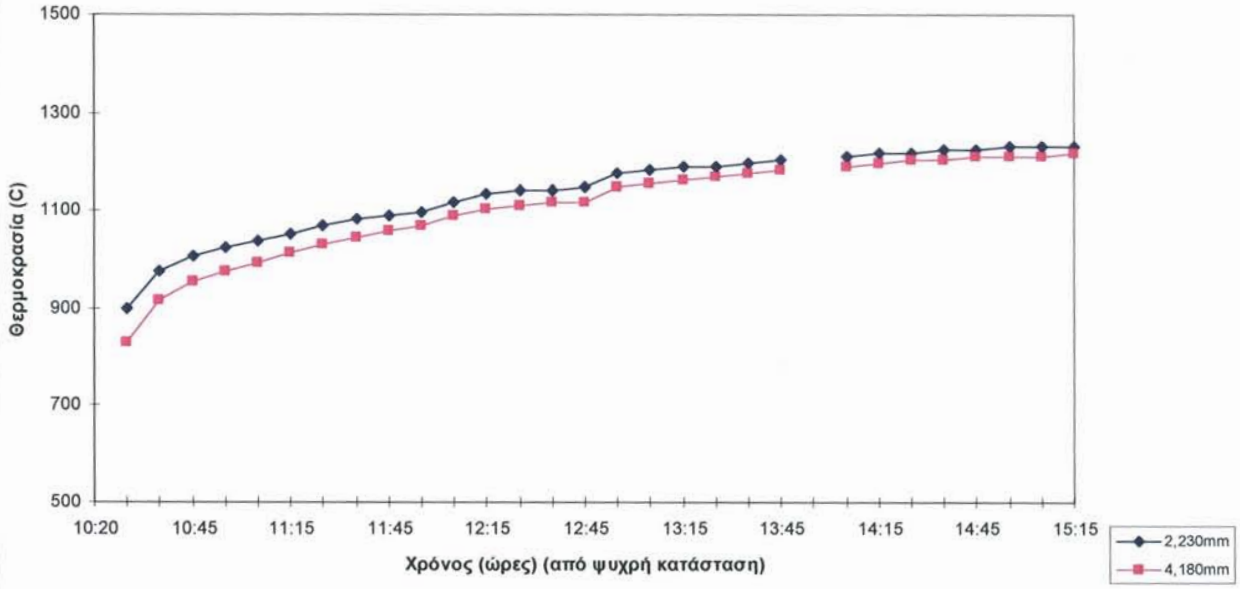
Σχήμα 5.5.3. - Αξονικό προφίλ NO, σε ακτινική απόσταση 370 mm, 8 mbar



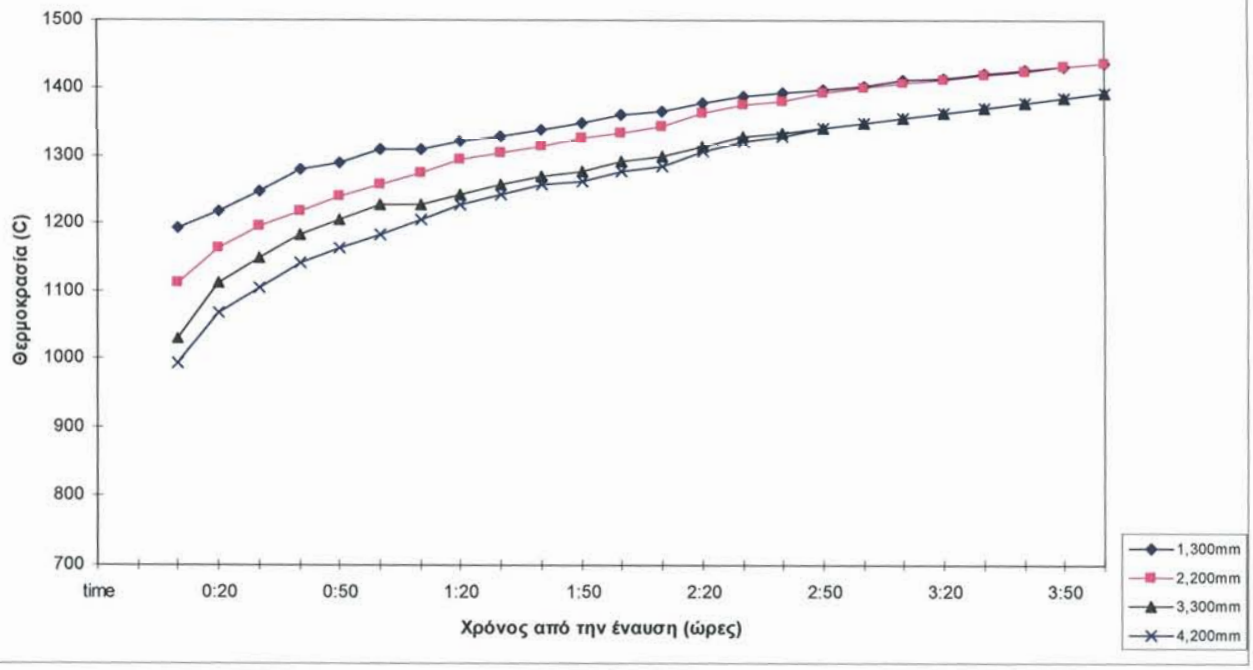
Σχήμα 5.6.1. - Μεταβολή της Θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της φάσης Προθέρμανσης, 5 mbar, 800 KW, θυρίδα 1 & 3, δοκιμή 10



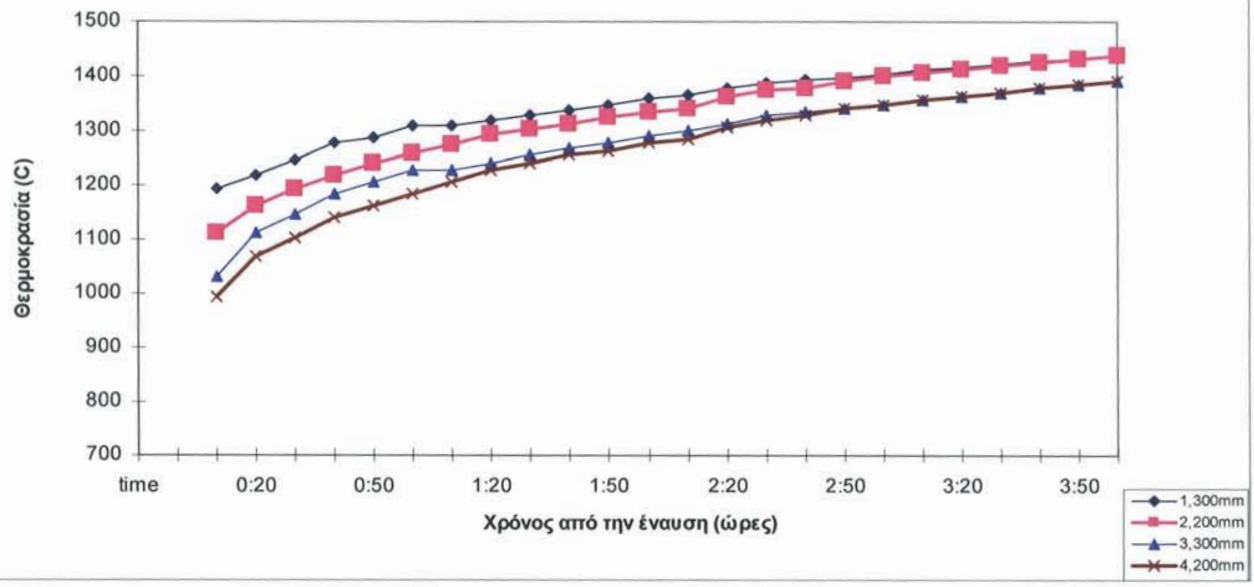
Σχήμα 5.6.2. - Ανύψωση θερμοκρασίας, Φάση Προθέρμανσης, θυρίδες 2&4 σε διαφορετικές ακτινικές θέσεις, 800 KW, 5 mbar, δοκιμή 10



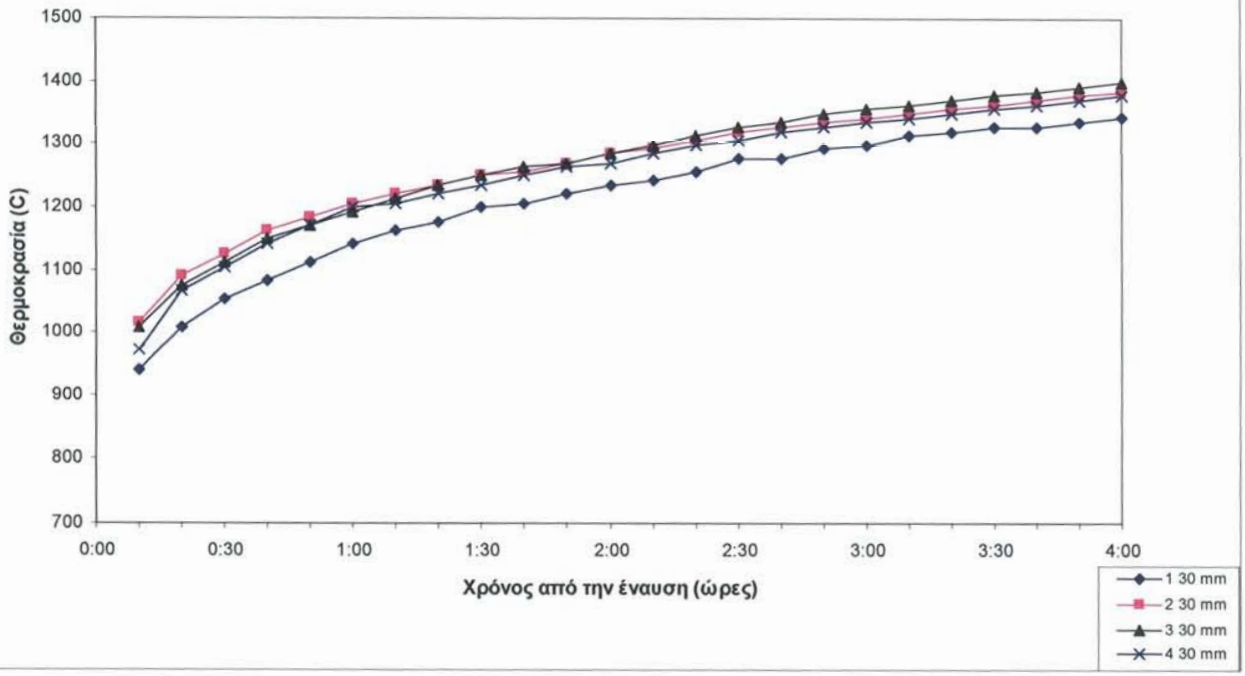
Σχήμα 5.6.3., Φάση Προθέρμανσης, Ανύψωση θερμοκρασίας στις 4 θυρίδες στα 720 mm, 620 mm, 800 KW, 5 mbar, δοκιμές 7&8



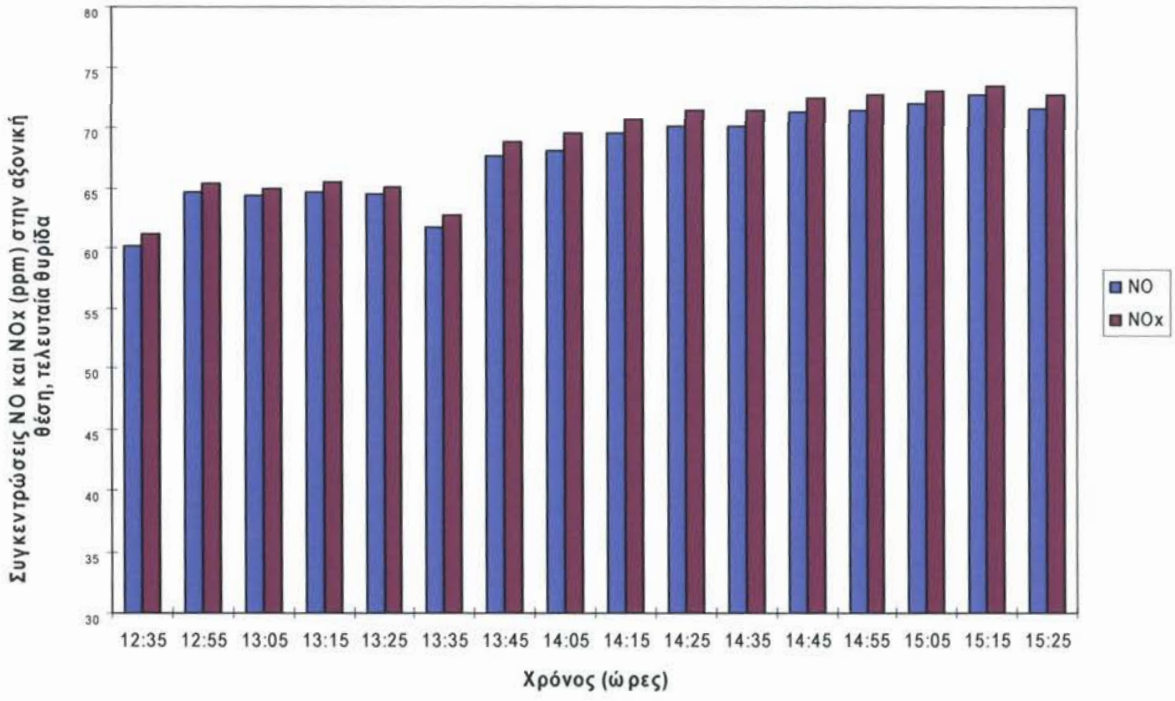
Σχήμα 5.6.4. Ανύψωση θερμοκρασίας, Προθέρμανση, από 4 θυρίδες σε ακτινική απόσταση 100 mm από τον άξονα, 5 mbar



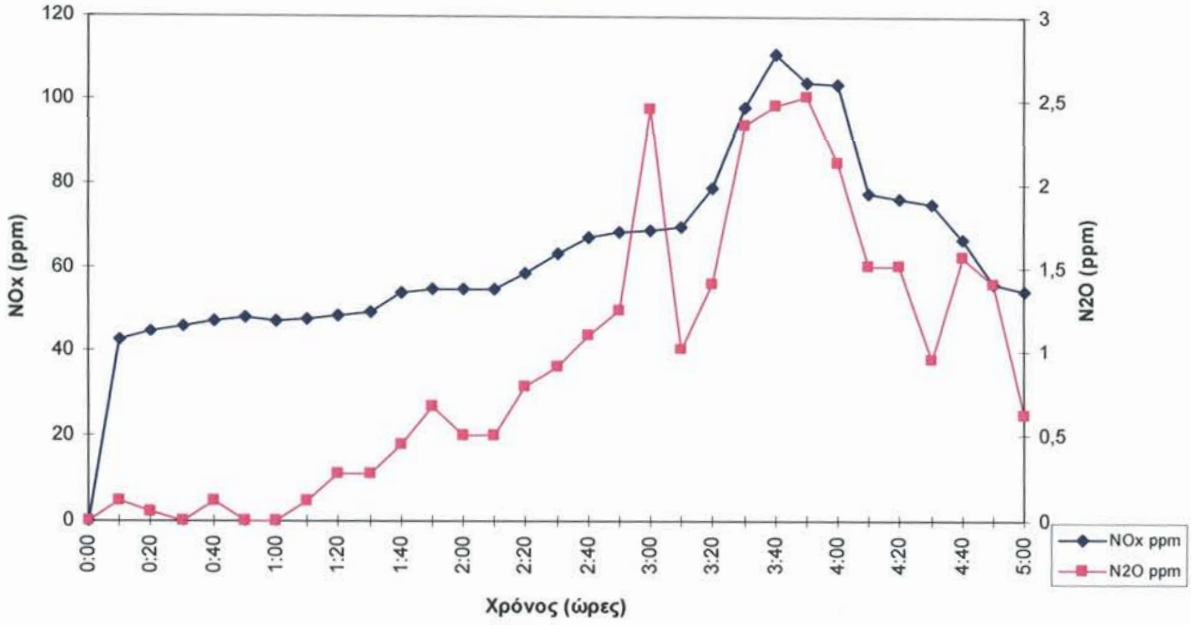
Σχήμα 5.6.5. - Ανύψωση θερμοκρασίας, Φάση Προθέρμανσης, από 4 θυρίδες στην ακτινική θέση 30mm, Μέγ. Ισχύς 800 KW, 5 mbar



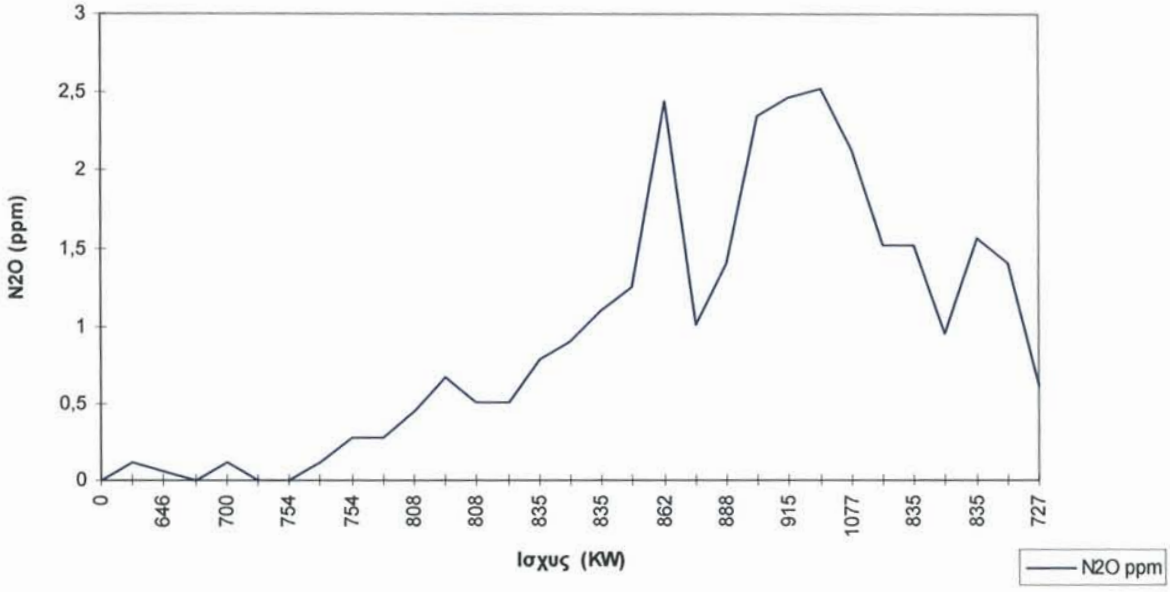
Σχήμα 5.7.1. - Συγκεντρώσεις NO & Nox, με τον χρόνο από την έναυση, (Φάση Προθέρμανσης, Μέγιστη Ισχύς 800 KW Max, 5mbar)



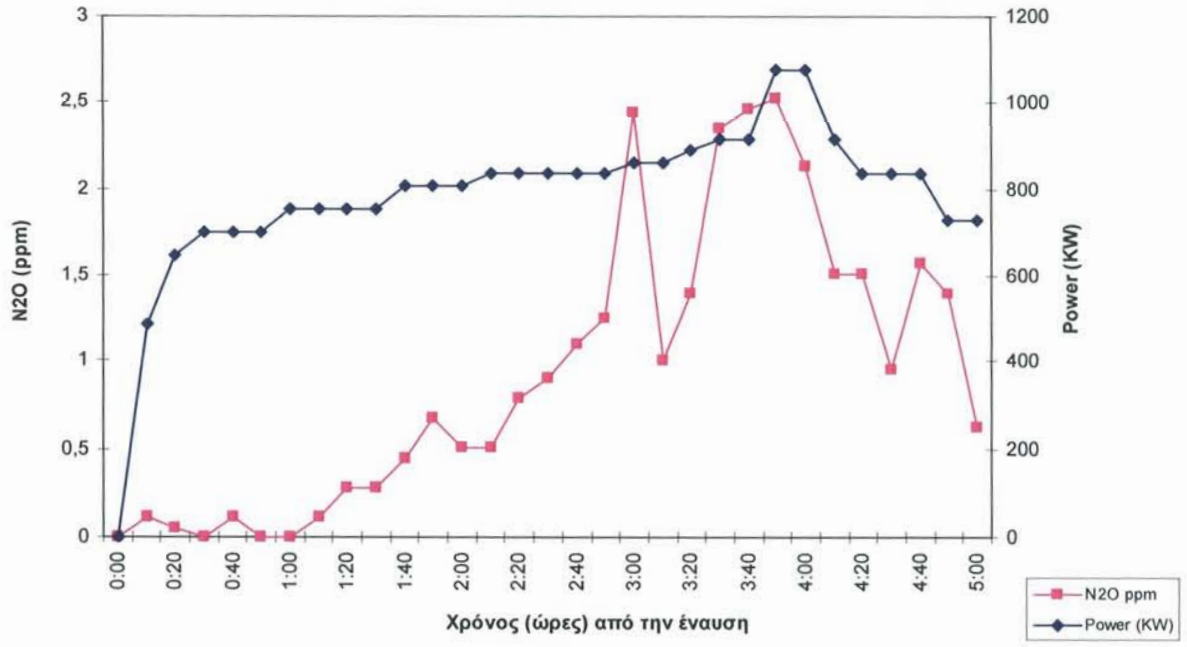
Σχήμα 5.8.1. - Γράφημα NOx και N2O με τον χρόνο από την έναυση - δοκιμή 11



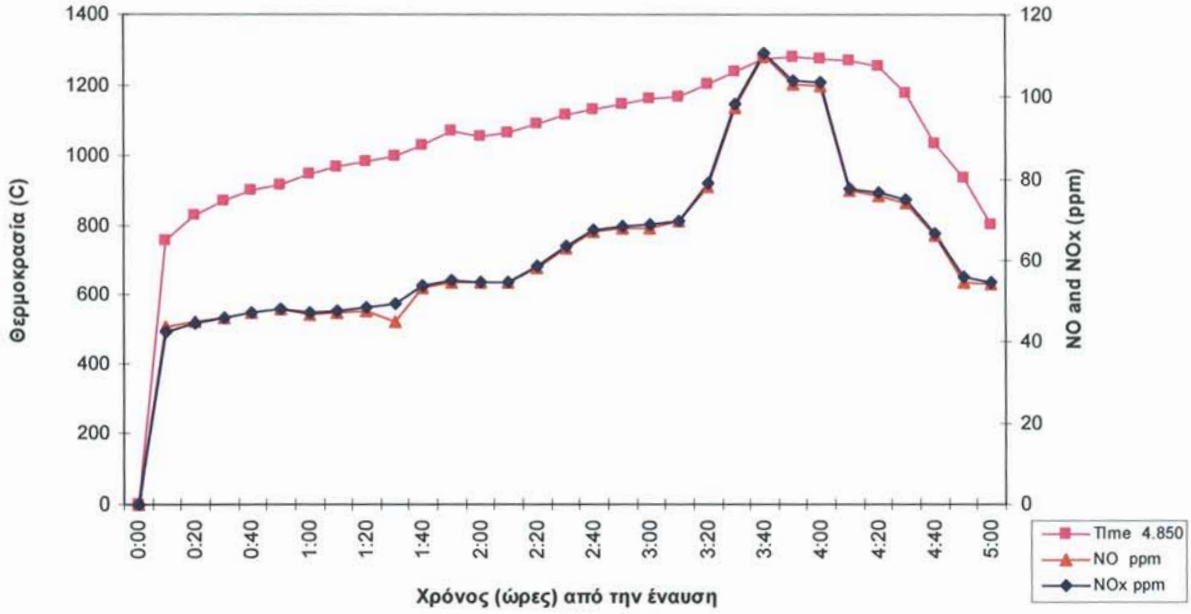
Σχήμα 5.8.2. - Γράφημα N2O με την Ισχύ - δοκιμή 11



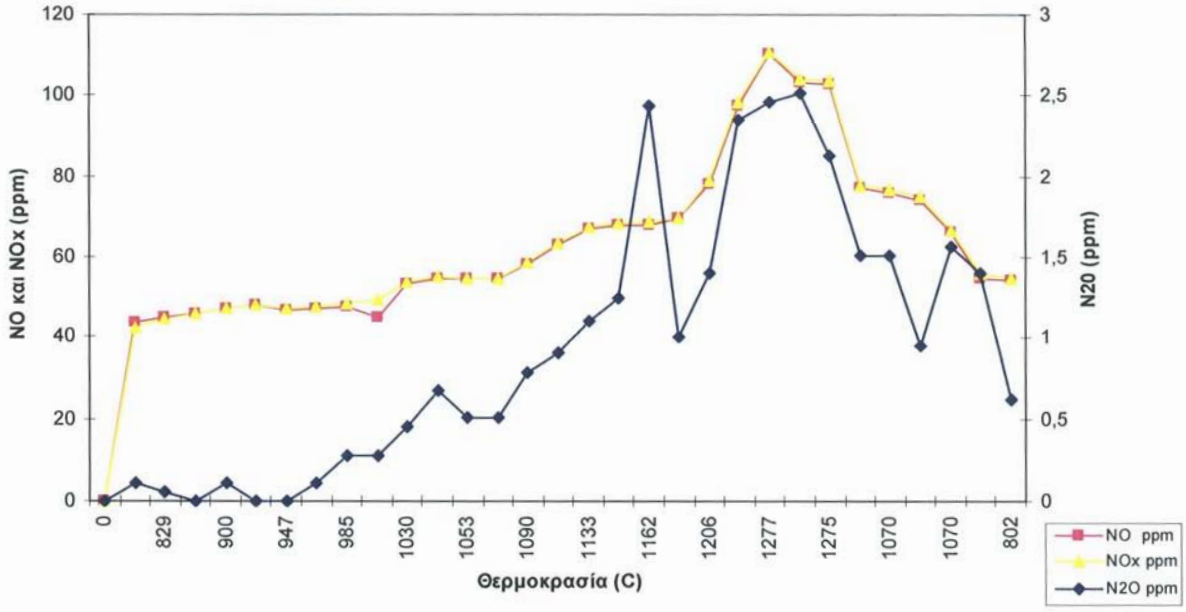
Σχήμα 5.8.3. - Γράφημα Ισχύος και N2O με τον χρόνο - δοκιμή 11



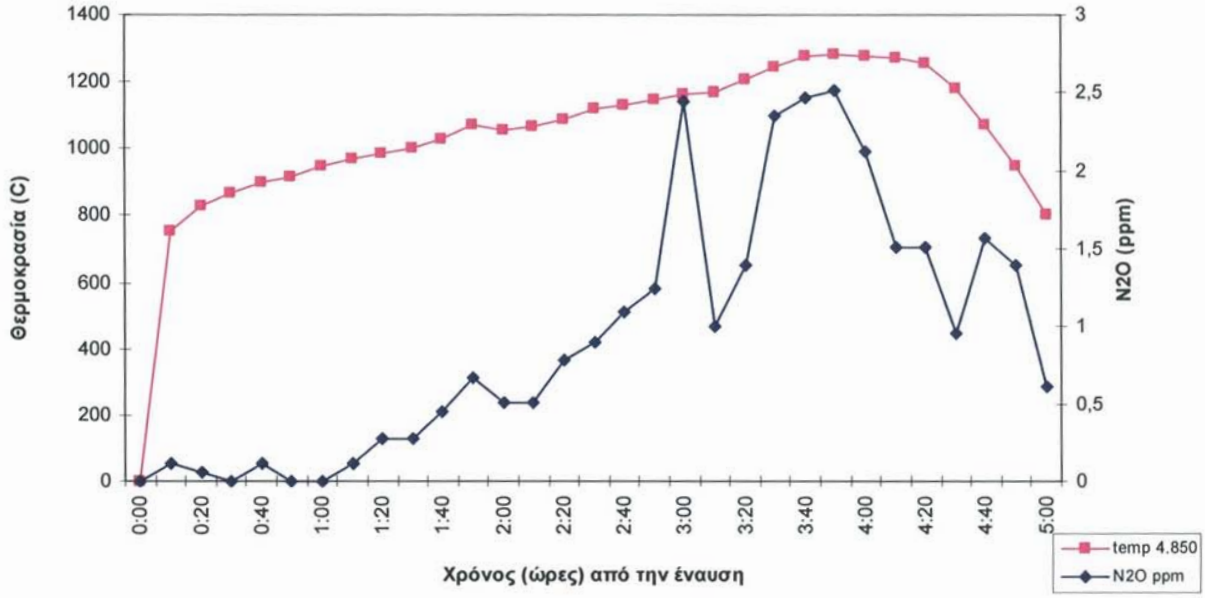
Σχήμα 5.8.4. - Γράφημα NO και NOx με την θερμοκρασία, δοκιμή 11 - μεταβατική κατάσταση



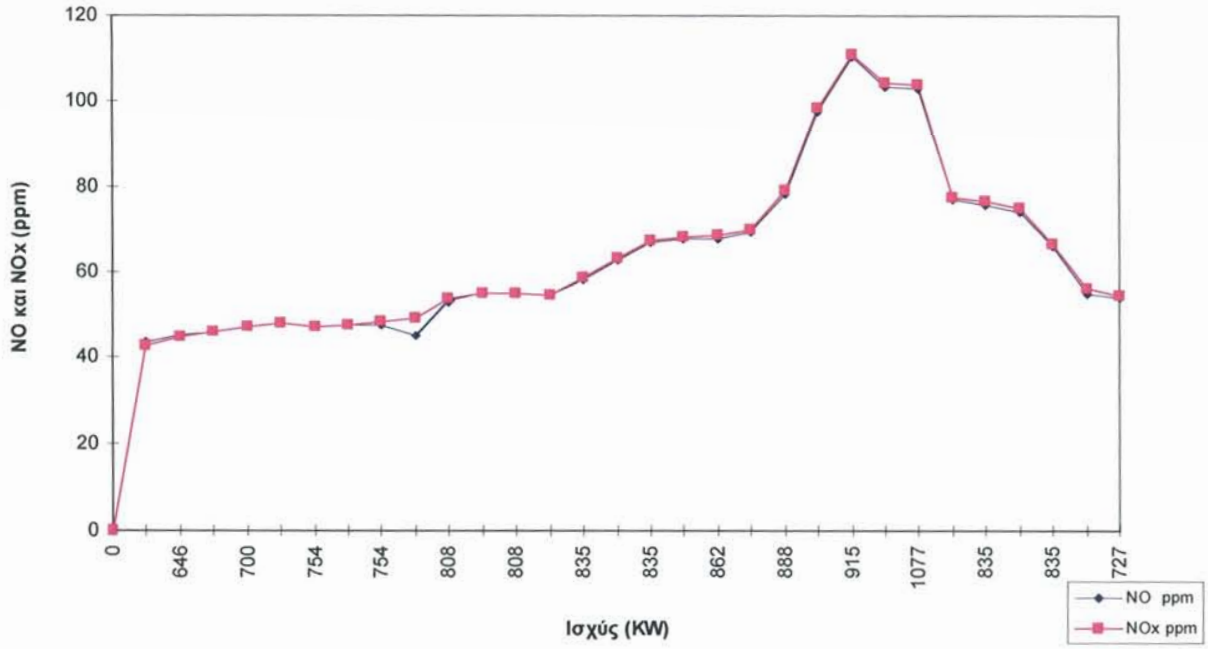
Σχήμα 5.8.5. - Γράφημα NO, NOx & N2O με την θερμοκρασία



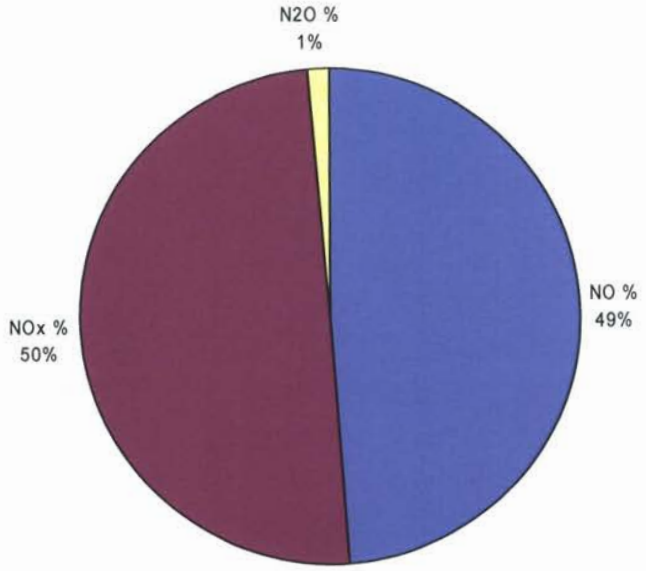
Σχήμα 5.8.6 - Γράφημα N2O και Θερμοκρασίας με τον Χρόνο από την έναυση - δοκιμή 11



Σχήμα 5.8.7. - Γράφημα NO και NOx με την Ισχύ, δοκιμή 11



Σχήμα 5.8.8. - NO, N_2O, Nox μέσες ποσοστιαίες συγκεντρώσεις, από την δοκιμή 11)



5 – Β Δεδομένα Δοκιμών 1 ÷ 11 και Διαδικασίας Ξήρανσης - Μετρήσεις

RESULTS FURNACE

Time	Elapsed Time	Level	Drop	Power	Temperature	NO	NOx	N20 mg/m3	N20 ppm	CH4 mg/m3	CH4 ppm
12:20	00:00	44.8	0	0		0	0	0	0	82.944	116.12
12:25	00:05			0.242		34.5	35.5	0.2	0.112	58.457	81.84
12:30	00:10	43.9	0.9	0.485	756	43.5	42.5	0.2	0.112	50.329	70.46
12:35	00:15			0.565	793	44.4	44.2	2.1	1.176	45.033	63.05
12:40	00:20	42.7	1.2	0.646	829	45.1	44.6	0.1	0.056	41.792	58.51
12:45	00:25			0.673	849	45.4	45.5	0.2	0.112	38.581	54.01
12:50	00:30	41.3	1.3	0.700	869	45.8	45.9	0	0	32.145	45.00
12:55	00:35			0.700	885	46.8	46.9	0	0	25.63	35.88
13:00	00:40	39.8	1.3	0.700	900	47.2	47.1	0.2	0.112	19.829	27.76
13:05	00:45			0.700	908	47.7	47.4	0.3	0.168	16.529	23.14
13:10	00:50	38.4	1.3	0.700	916	47.9	48	0	0	14.444	20.22
13:15	00:55			0.700	932	47.4	47.6	0	0	13.684	19.16
13:20	01:00	37.1	1.3	0.700	947	46.9	47.2	0	0	12.528	17.54
13:25	01:05			0.727	959	47.2	47.4	0	0	11.723	16.41
13:30	01:10	35.7	1.4	0.754	970	47.4	47.5	0.2	0.112	10.87	15.22
13:35	01:15			0.754	978	47.5	48.0	0.5	0.28	10.119	14.17
13:40	01:20	34.3	1.4	0.754	985	47.5	48.5	0.5	0.28	9.787	13.70
13:45	01:25			0.754	993	47.4	48.1	0.7	0.392	9.463	13.25
13:50	01:30	33	1.4	0.754	1000	45	49.2	0.5	0.28	9.136	12.79
13:55	01:35			0.781	1015	49.2	51.6	0.3	0.168	8.572	12.00
14:00	01:40	31.5	1.5	0.808	1030	53.3	53.9	0.8	0.448	8.324	11.65
14:05	01:45			0.808	1051	54.1	54.5	0.7	0.392	8.141	11.40
14:10	01:50	30	1.5	0.808	1071	54.9	55	1.2	0.672	7.9	11.06
14:15	01:55			0.808	1062	54.9	54.9	1	0.56	7.749	10.85
14:20	02:00	28.6	1.5	0.808	1053	54.8	54.8	0.9	0.504	7.103	9.94
14:25	02:05			0.808	1060	54.7	54.8	0.3	0.168	7.044	9.86
14:30	02:10	27.1	1.5	0.808	1067	54.5	54.7				
14:35	02:15			0.821	1079	57.8	58	0.9	0.504	6.78	9.49
14:40	02:20	25.5	1.55	0.835	1090	58.2	58.8	1.4	0.784	5.752	8.05
14:45	02:25			0.835	1105	59.3	59.8				
14:50	02:30		1.55	0.835	1119	63.1	63.5				
14:55	02:35			0.835	1126	66.9	67.2				
15:00	02:40		1.55	0.835	1133	67.2	67.4				
15:05	02:45			0.835	1141	67.2	68.2				
15:10	02:50		1.55	0.835	1148	68.1	68.5				
15:15	02:55			0.848	1155	68.7	69	4.9	2.744	18.986	26.58
15:20	03:00	39	1.6	0.862	1162	68	68.8	4.9	2.744	6.383	8.94
15:25	03:05			0.862	1166	69	69.3	2	1.12	5.319	7.45
15:30	03:10	37.7	1.6	0.862	1170	69.5	69.9	1.8	1.008	5.267	7.37
15:35	03:15			0.875	1188	69.5	70.2	1.9	1.064	5.006	7.01
15:40	03:20	36.1	1.65	0.888	1206	78.3	79	2.5	1.4	4.951	6.93
15:45	03:25			0.902	1224	87.9	88.7	2.4	1.344	4.785	6.70
15:50	03:30	34.4	1.7	0.915	1242	97.4	98.3	4.2	2.352	4.046	5.66
15:55	03:35			0.915	1259	103.9	104.6	4.2	2.352	3.884	5.44
16:00	03:40	34.1	1.7	0.915	1277	110.4	110.9	4.4	2.464	4.113	5.76
16:05	03:45	33.1	1	0.942	1284	114	114.1	4.5	2.52	4.332	6.06
16:10	03:50	32.1	1.8	0.969	1281	103	104.1	4.5	2.52	4.285	6.00
16:15	03:55			0.969	1278	103.3	104.3	3.5	1.96	4.164	5.83
16:20	04:00		1.8	0.969	1275	103.0	103.8	3.8	2.128	4.314	6.04
16:25	04:05			0.902	1272	102.7	103.2	3.1	1.736	4.033	5.65
16:30	04:10		1.55	0.835		77.1	77.7	2.7	1.512	4.048	5.67
16:35	04:15	36.6		0.860		76	75.4	3.6	2.016	3.699	5.18
16:40	04:20		1.55	0.835		75.9	76.6	2.7	1.512	3.868	5.42
16:45	04:25			0.835		74.3	74.9	2.2	1.232	3.76	5.26
16:50	04:30		1.55	0.835		74	75.2	1.7	0.952	3.732	5.22
16:55	04:35			0.835		65.8	67.1	2.4	1.344	3.581	5.01
17:00	04:40		1.55	0.835		66.1	66.6	2.8	1.568	3.564	4.99
17:05	04:45	32.2		0.781		66.3	66.1	2	1.12	3.583	5.02
17:10	04:50		1.35	0.727		54.9	56.1	2.5	1.4	3.511	4.92
17:15	04:55	30.8	1.35	0.727		54.5	55.1	1.1	0.616	5.402	7.56
17:20											

PITOT TUBE MEASUREMENTS

Manometer slope = 20° to horizontal
Air duct cross-sectional area = 0.063 m^2

a)Air pressure = 5 mbar

Measurement positions-X(m)	Manometer h-(m)	Velocity U-(m/s)	Air flowrate Q-(m^3/s)
0.00+Rp	0.003x0.2(C.F)	3.10	0.1953
0.05 "	0.005x0.2	4.00	0.2521
0.10 "	0.006x0.2	4.38	0.2759
0.15 "	0.006x0.2	4.38	0.2759
0.20 "	0.007x0.2	4.73	0.2980
0.25 "	0.006x0.2	4.38	0.2759
0.30 "	0.005x0.2	4.00	0.2521
0.35-Rp	0.003x0.2	3.10	0.1953

Average velocity (Ua)= Total of velocities/8 =4 m/s
Air flowrate (Qa) = U_a x A_d = 0.252 m^3/s

b) Air pressure 6mbar

Measurement positions-X(m)	Manometer h-(m)	Velocity U-(m/s)	Air flowrate Q-(m^3/s)
0.00+Rp	0.005x0.2(C.F)	4.00	0.2521
0.05 "	0.006x0.2	4.38	0.2759
0.10 "	0.006x0.2	4.38	0.2759
0.15 "	0.006x0.2	4.38	0.2759
0.20 "	0.007x0.2	4.73	0.2980
0.25 "	0.007x0.2	4.73	0.2980
0.30 "	0.006x0.2	4.38	0.2759
0.35-Rp	0.004x0.2	3.58	0.2255

Average velocity (Ua)= Total of velocities/8 =4.32 m/s
Air flowrate (Qa) = U_a x A_d = 0.272 m^3/s

Rp = Pitot tube radius
Ad = Air duct cross-sectional area
C.F= Manometer correction factor for the angle of 20°

NOx MEASUREMENTS

Q=800 KW

a) Rear port, after 4 hours warming up, 5mbar air pressure;

Mixture ratio(Air/Fuel)= (A/F)r/(A/F)s, (A/F)s=14.44
ϕ= (0.308/0.0187)/14.44=**1.14**

Radial Distance(mm)	NO-(ppm)	Qoil(kg/s)	Qair(kg/s)	Tmax(C)
700	109.7	0.0187	0.308	1377
650	110.2	"	"	"
600	112.7			
550	55.60			
500	54.20			

b) Rear/ 8mbar air pressure;

Mixture ratio(Air/Fuel)= (A/F)r/(A/F)s, (A/F)s=14.44
ϕ= (0.400/0.0187)/14.44=**1.48**

Radial Distance(mm)	NO-(ppm)	Qoil(kg/s)	Qair(kg/s)	Tmax(C)
700	77.00	0.0187	0.400	1325
650	79.70	"	"	"
600	82.00			
550	40.80			
500	39.70			

c) Port 4, after 4 hours warming up, 4th cam, 5mbar air pressure;

ϕ= (0.308/0.0187)/14.44=**1.14**

Radial Distance(mm)	NO-(ppm)	Qoil(kg/s)	Qair(kg/s)	Tmax(C)
70.00	117.1	0.0187	0.308	1380
120.0	111.7	"	"	"
170.0	105.6			
220.0	45.50			
370.0	36.40			

2 MW OIL - FIRED FURNACE EXPERIMENTAL DATA

TEST NO 2 - DATE : 21/6/95

Time	Fuel	Thermocouples , degrees C							Water	Flue gases concs. (Testoterm)						NOx Analyser		Cam	Comment
	level	1	2	3	4	Rear	Fan	After	pres.	O2	CO2	CO	NO	NOx	λ	NO	NOx	no.,	
(hours)	(cm)						(<150)	Water	(bar)	%	%	%	ppm	ppm		ppm	ppm	pres.	
14:40	43,5				1068	853	46	83		6,6	10,9		0		1,43			3	
14:50	41,5				1177	931	47	84	3	5,1	11,7	0	0		1,33			2 mbar	
15:00	39,5				1249	993		84		4,3	12,3	0	0		1,27				
15:10	38				1298	1075	50	85		4,6	12,1	0	4		1,29			4	
15:20	36				1342	1142	50	85	4	4,6	12,1		3,4		1,29			2 mbar	
15:30	34,5				1371	1177	50	86		4,6	12,1		2,8		1,29				
15:40	32,5				1398	1227		86					1,8						
15:50	31																		

2 MW OIL - FIRED FURNACE EXPERIMENTAL DATA

TEST NO 3 - DATE : 22/6/95

Time	Fuel	Thermocouples , degrees C							Water	Flue gases concs. (Testoterm)						NOx Analyser		Cam	Comment
	level	1	2	3	4	Rear	Fan	After	pres.	O2	CO2	CO	NO	NOx	λ	NO	NOx	no.,	
(hours)	(cm)						(<150)	Water	(bar)	%	%	%	ppm	ppm		ppm	ppm	pres.	
10:08	45									20,2	-	-	-	-	-			3	
10:15	42,5				1054	940	39	78,7	3	-									testoterm
10:25	40,8				1075	1000	46,9	81											problem
20:35	38,5				1177	1075	47	82											
10:45	36				1220	1119	45	82	4										
10:55																			

119

2 MW OIL - FIRED FURNACE EXPERIMENTAL DATA

TEST NO 4 - DATE : 27/6/95

Time	Fuel	Thermocouples , degrees C							Water	Flue gases concs. (Testoterm)						NOx Analyser		Cam	Comment
	level	1	2	3	4	Rear	Fan	After	pres.	O2	CO2	CO	NO	NOx	λ	NO	NOx	no.,	
(hours)	(cm)						(<150)	Water	(bar)	%	%	%	ppm	ppm		ppm	ppm	pres.	
11:40	45																	2	
11:50	43,4			1055	1038		40	79	5							0,7		5 mbar	
12:00	41,6			1136	1126		43	80								-			
12:10	39,8			1192	1177		45	81								0,6		3	
12:20	38,1			1237	1220		49	82								1		4	
12:30	36,4			1263	1242		52	83								1,2		6 mbar	
12:40	34,6			1292	1270		53	83								1,2			
12:50	32,9			1318	1298		55	83								1,4			
13:00	31,1			1338	1320		51	84	6							1,4			
13:10	29,4			1354	1334		52	84								1,2			
13:20	27,3			1372	1355		51	84								1,2			
13:30	26			1386	1369		52	85								0,9			
13:40	*			1398	1377		52	85								0,8			* refill tank
13:50	*			1410	1392			85	6							0,8			
14:00	38			1422	1405		54	85								0,8			
14:10	36,7			1431	1413		55	85								0,7			
14:20	34,5			1439	1426		53	85								0,6		5	
14:30	33,1			1448	1433		54	85	7							-		8 mbar	
14:40	31			1475	1462		56	86								-		6	
14:50	29			1507	1483		52	86								-		8 mbar	
15:00	27,3			1509	1490		52	86								-			

120

2 MW OIL - FIRED FURNACE EXPERIMENTAL DATA

TEST NO 5 - DATE : 5/7/95

Time	Fuel	Thermocouples , degrees C							Water	Flue gases concs. (Testoterm)						NOx Analyser		Cam	Comment
	level	1	2	3	4	Rear	Fan	After	pres.	O2	CO2	CO	NO	NOx	λ	NO	NOx	no.,	
(hours)	(cm)						(<150)	Water	(bar)	%	%	%	ppm	ppm		ppm	ppm	pres.	
11:10	45																		no water
																			cooling
11:55	44,3																	2	restart
12:07	42,1			1092	1060		44	79	5									3	
12:15	40,8			1172	1134		48	81										4	
12:25	39,3			1228	1199			82	6									5 mbar	
12:35	37,5			1263	1235			82											
12:45	35,9			1298	1270			83										5	
12:55	34			1327	1299		49	83										6 mbar	
13:05	32,2			1352	1327			84										6	
13:15	30,4			1375	1348			84										7 mbar	
13:25	28,5			1407	1384			85											
13:35	26,7			1425	1405		59	85										7	
13:45	*			1463	1441			86										7 mbar	* refill tank
13:55	*			1499	1476			86										8	
14:05	31,9			1520	1504			86	7									7 mbar	
14:15	30,5			1550	1533		65	87										7	
14:25	28,5			1557	1540			87										7 mbar	
14:35	26,6			1563	1547			87											

124

2 MW OIL - FIRED FURNACE EXPERIMENTAL DATA

TEST NO 6 - DATE : 12/7/95

Time	Fuel	Thermocouples , degrees C							Water	Flue gases concs. (Testoterm)						NOx Analyser		Cam	Comment
	level	1	2	3	4	Rear	Fan	After	pres.	O2	CO2	CO	NO	NOx	λ	NO	NOx	no.,	
(hours)	(cm)	450 mm	820 mm	450 mm	820 mm		(<150)	Water	(bar)	%	%	%	ppm	ppm		ppm	ppm	pres.	
10:35	46	992	1090	1068	970			78	4									2	
10:45	44,3	1053	1144	1112	1045			80	4										
10:55	42,5	1097	1189	1155	1104			80	4										
11:05	40,9	1134	1227	1191	1141			81											
11:15	38,9	1170	1261	1220	1184			82										3	
11:25	37,4	1220	1312	1270	1227		62	82										5 mbar	
11:35	35,6	1249	1334	1291	1256		66	83											
11:45	34,2	1270	1356	1320	1285		66	83											
11:55	32,5	1292	1372	1334	1306		66	83											
12:05	30,7	1313	1387	1355	1320		-	83											
12:15	29	1320	1399	1369	1334		-	98	6										
12:25	*	1334	1412	1384	1356		-	84	6										*refill tank
12:30							-	84	6									4	
																		5 mbar	
12:40	42,5	1363	1444	1412	1384		-	84											
12:50	41,1	1384	1458	1433	1405		-	84											
13:00	38,9	1398	1473	1447	1419		-	84											
13:10	37,4	1412	1483	1454	1433			85											
13:20	35,9	1419	1490	1469	1441			85											
13:30	34,2	1426	1500	1476	1448			85											
13:40	32,3	1433	1509	1490	1462			98	5										
13:50	30,5	1447	1518	1497	1469			105	5										
14:00	28,7	1454	1527	1505	1483			116	5										
14:10	27	1462	1535	1511	1490			111	6										
14:20	25,3	1468	1539	1518	1497			85	6										
14:30	23,6	1476	1546	1526	1504			115	5										
14:35		*1476	*1566	*1526	*1512			115	4										

* posn: 450 mm 720 mm 450 mm 720 mm

2 MW OIL - FIRED FURNACE EXPERIMENTAL DATA

TEST NO 7 - DATE : 17/7/95

Time	Fuel	Thermocouples , degrees C							Water	Flue gases concs. (Testoterm)						NOx Analyser		Cam	Comment
	level	1	2	3	4	Rear	Fan	After	pres.	O2	CO2	CO	NO	NOx	λ	NO	NOx	no.,	
(hours)	(cm)	450 mm	620 mm	450 mm	620 mm		(<150)	Water	(bar)	%	%	%	ppm	ppm		ppm	ppm	pres.	
11:10	53,3	829	1036	908	900	23			3							33,1	33,3	1	
11:20	51,8	939	1112	1008	993	23	50		3							30		5 mbar	
11:30	50,3	1008	1164	1075	1068	23		78,9	3							30,8			
11:40	48,7	1053	1195	1112	1104		55	80	3							40,4			
11:50	47,2	1082	1219	1148	1141	26		81	3							53,4		2	
12:00	45,6	1112	1240	1170	1163			81	3							46,2		5 mbar	
12:10	44	1141	1258	1191	1184	25	58	82	3							41,8			
12:20	42,4	1163	1274	1213	1206			82	3							51			
12:30	40,8	1177	1294	1235	1227	27		82	3							58,3		3	
																		5 mbar	
12:40	39,3	1199	1304	1249	1242		60	83	3							58,9			
12:50	37,6	1206	1314	1263	1256			83	3							58,2			
13:00	36	1220	1325	1270	1263			83	4							59,1			
13:10	34,5	1235	1334	1285	1277		59		4							56,8	58		
13:20	*	1242	1342	1299	1285			83	4							55	56,8		*refill tank
13:30	40,3	1256	1362	1313	1306		60	84	4							58		4	
13:40	38,7	1277	1375	1327	1320	29			4							57,8	59,1	5 mbar	
13:50	37,2	1277	1379	1334	1327			84	4							55,7			
14:00	35,5	1292	1391	1348	1341	30	63	84	4							56,8			
14:10	33,8	1299	1400	1356	1348			84	4							56,7	57,2		
14:20	32,2	1313	1406	1363	1356	32		84	4							57	57,3		
14:30	30,6	1320	1412	1370	1363			84	4							57,6	59,3		
14:40	29	1327	1418	1377	1370			84	4							61,5			
14:50	27,4	1327	1424	1384	1377	35		85	4							68,6			
15:00	25,8	1334	1431	1391	1384	36	65	84	4							75,4			
15:10	24,2	1342	1436	1398	1391			84	4							76,5			

2 MW OIL - FIRED FURNACE EXPERIMENTAL DATA

TEST NO 8 - DATE : 21/7/95

Time	Fuel	Thermocouples , degrees C							Water	Flue gases concs. (Testoterm)						NOx Analyser		Cam	Comment
	level	1	2	3	4	Rear	Fan	After	pres.	O2	CO2	CO	NO	NOx	λ	NO	NOx	no.,	
(hours)	(cm)	720 mm	450 mm	720 mm	450 mm		(<150)	Water	(bar)	%	%	%	ppm	ppm		ppm	ppm	pres.	
11:45	56								3									1	
11:55	54,5	1193	1015	1030	970				3							51,6		5 mbar	2 mbar
12:05	52,8	1219	1090	1112	1068			78,9	5							67,7		2	*not in time
12:15	51,1	1248	1126	1148	1104	33	47	82	5							76,5	77,5	5 mbar	thermo.
12:25	49,5	1278	1163	1184	1141	33	48	81,3	5							77,5			problem
12:35	47,8	1289	1184	1206	1170			82	5							73,2			
12:45	46,2	1308	1206	1227	1199			82	5							68		3	
12:55	44,5	1308	1220	1227	1206	28	48	82	5							55,6	57,1	5 mbar	
13:05	42,8	1320	1234	1242	1220			82	5							56,7			
13:15	41,3	1328	1249	1256	1235			82	5							56,2			
13:25	39,7	1338	1256	1270	1249		51	83	5							56			
13:35	38,2	1348	1270	1277	1263			83	5							58	60,6		
13:45	36,6	1360	1285	1292	1270			83	5							57,7		4	
13:55	35	1366	1292	1299	1285			83	5							57		5 mbar	
14:05	33,4	1378	1306	1313	1299	30	54	83	5							57,8			
14:15	31,8	1387	1320	1327	1306			83	5							57,4	58		
14:25	30,2	1393	1327	1334	1320			84	5							54,9			
14:35	28,6	1397	1334	1341	1327			84	5							54,2			
14:45	27	1403	1341	1348	1334	32	58	84	5							53,2			
14:55	25,3	1412	1348	1355	1341			84	5							53,1	53,9		
15:05	*	1415	1356	1362	1348			84	5							51,7			*refill tank
15:15	*	1422	1363	1369	1356	33	58	84	5							51,9			
15:25	40,3	1427	1370	1377	1363			84	5							52,6			
15:35	38,7	1431	1377	1384	1370			84	5							55,3	56,2		
15:45	37,2	1437	1384	1391	1377	36	58	84	5							58			
15:55	35,7	1442	1384	1398	1384			85	5							58,6			
16:05	34,1	1446	1391	1398	1391			85	5							57,6			
16:15	32,4	1448	1398	1405	1391	40	60	85	5							58	58,8		
16:25	30,7	1452	1398	1405	1398			85	5							58			
16:35	29,3	1457	1405	1412	1405			85	5							58,8			
16:45	27,7	1459	1405	1412	1405	42	60	85	5							59,9	60,8		
16:52		*1452	1405	*1426	1405		179									60,6			*620
16:52		*1424	1405	*1433	1412											61			*520

Table 9 :TEST NO 9 - DATE : 10/8/95

Time (hours)	Fuel level (cm)	Thermocouples readings, °C 1 600 mm	2 450 mm	3 570 mm	4 450 mm	Rear	Fan (<150)	After Water	Water pres. (bar)	Dx Analyser NO ppm	NOx ppm	Cam no., pres.	Comment
10:04	48,5												
10:10	47,6	1038	877	900	714	24		75	4			2,5	
10:20	46,2	1086	947	970	805	32	41	76	4				
10:30	44,9	1088	962	985	837	37	46	77	4				
10:40	43,5	1106	985	1008	877	38	47	77					
10:50	42,1	1152	1038	1060	931			78				3,3	
11:00	40,7	1170	1068	1082	962	30		79					
11:10	39,3	1160	1060	1075	970	27	52	79				3,5	
11:20	37,9	1164	1068	1082	977	32		79					
11:30	36,5	1171	1075	1097	1000		54						
11:40	35,2	1179	1082	1104	1008								
11:50		-550		-550									
12:00	32,3	1180	1104	1126	1038	35	58	80				4,8	
12:10	30,8	1127	1075	1097	1023								
12:20	29,5	1120	1075	1090	1015		63						
12:30	28,2	1124	1075	1097	1023								
12:40	26,8	1127	1075	1097	1023								
12:50	25,5	1128	1082	1104	1030	37	65					5,8	
13:00	24,2	1130	1082	1104	1038								
13:10													
13:30		1149	1112	1134	1068								
13:40	37	1148	1112	1126	1068								
13:50	35,6	1149	1112	1134	1075								
13:50		-620		-620									
13:50		1179	1112	1126	1075								
14:00		-570		-570		29	64	81					
14:00	34,2	1149	1112	1134	1075								
14:10	32,7	1155	1119	1134	1082								
14:20	31,2	1157	1119	1141	1082								
14:30	29,7	1160	1126	1141	1090								
14:35		-820		-820									
14:35		1113	1126	1112	1090								
14:40	28,3	-720		-720									
14:40		1171	1126	1119	1090								
14:45		-620		-620									
14:45		1193	1126	1134	1090								
14:50		-570		-520									
		1164	1126	1148	1090								
		-770		-770									
		1140	1126	1119	1097								
		-450	-820	-450	-820								
		1030	1140	1126	1104								

Table 9b : Test 9 - 10/8/95
Steady - State Temperature Measurements

Radial dist. (mm)	Temperatures, °C 1		2		3		4
820	1113	820	1140	820	1112	820	1104
770	1140	770	1147	770	1119	770	1112
720	1171	720	1153	720	1119	720	1119
620	1193	620	1170	620	1134	620	1134
570	1164	570	1170	570	1141	570	1134
550	1160	550	1179	550	1141	550	1134
520	1104			520	1148		
450	1030	450	1126	450	1126	450	1097

Table 10a : TEST NO 10 - DATE : 17/8/95

me (ours)	Fuel level (cm)	Thermocouples , degrees C 1 450	2 650	3 450	4 600	Rear	Fan (<150)	After Water	Water pres. (bar)	NOx Analyser NO ppm	NOx ppm	Cam no., pres.	Comment
0:20	52,6												
0:25	51,8	653	900	722	829							2,4	
10:35	1,3	764	977	837	916								
10:45	1,3	815	1008	877	954								
10:55	1,3	840	1023	900	977							3,5	
11:05	1,3	866	1038	924	993								
11:15	1,3	891	1053	947	1015							4,5	
11:25	1,3	910	1068	970	1030								
11:35	1,3	931	1082	985	1045								
11:45	1,4	945	1090	1000	1060								
11:55	1,4	962	1097	1015	1068							5,5	
12:05	1,4	981	1119	1045	1090								
12:15	1,4	997	1134	1053	1104								
12:25	1,4	1007	1141	1068	1112								
12:35	1,4	1016	1141	1075	1119					60,2	61,1		
12:45	1,5	1027	1148	1082	1119							6,5	
12:55	1,5	1051	1177	1112	1148					64,6	65,3		
13:05	1,5	1059	1184	1119	1155					64,3	65,5		
13:15	1,5	1069	1191	1127	1162					64,7	65,6		
13:25	1,5	1075	1191	1134	1170					64,5	65,1		
13:35	1,5	1083	1199	1141	1177					61,8	62,8		
13:45	1,5	1089	1206	1148	1185					67,7	68,8		
13:55	1,5												
14:05	1,5	1102	1213	1162	1192					68,1	69,6		
14:15	1,5	1110	1220	1170	1199					69,6	70,7		
14:25	1,5	1112	1220	1177	1206					70,2	71,4		
14:35	1,5	1115	1227	1177	1206					70,2	71,4		
14:45	1,5	1122	1227	1177	1213					71,3	72,5		
14:55	1,5	1124	1234	1184	1213					71,4	72,7		
15:05	1,5	1128	1234	1184	1213					72,1	73		
15:15	1,5	1132	1234	1192	1220					72,7	73,5		
15:25	1,5	1133	1234	1192	1220					71,6	72,8		

Table 10b :

NO/NOx Results - Test 10 / 5 mbar Air Pressure

Warming - Up Phase (rear) time	NO	NOx	Steady - State Phase distance from wall	NO (ppm) port1	port3	distance from wall	rear
12:35	60,2	61,1					
12:55	64,6	65,3					
13:05	64,3	65	0			0	63,1
13:15	64,7	65,5	50			50	63,6
13:25	64,5	65,1	100	60,8	61	100	66,3
13:35	61,8	62,8	150	70,6	64,6	150	69,2
13:45	67,7	68,8	200	71	71,5	200	70,6
14:05	68,1	69,6	250	67,5	75,6	250	71,3
14:15	69,6	70,7	300	68,1	77,5	300	72,1
14:25	70,2	71,4	350	65,9	78	350	72,8
14:35	70,2	71,4	400	23,3	40,6		
14:45	71,3	72,5	(mm)			(mm)	
14:55	71,4	72,7					
15:05	72,1	73					
15:15	72,7	73,5					
15:25	71,6	72,8					

TEST 11 (24/8)											
TIme	Level drop	Power	Temperatures (°C)			NO	NOx	N2O	N2O	CH4	CH4
(hours)	(cm)	(KW)	1.450	2.720	4.850	ppm	ppm	mg/m3	ppm	mg/m3	ppm
0:00	0	0	0	0	0	0	0		0		116,12
0:10	0,9	484,628	644	884	756	43,5	42,5		0,112		70,46
0:20	1,2	646,17	727	939	829	45,1	44,6		0,056		58,51
0:30	1,3	700,018	773	970	869	45,8	45,9		0		45
0:40	1,3	700,018	810	993	900	47,2	47,1		0,112		27,26
0:50	1,3	700,018	834	1008	916	47,9	48		0		20,22
1:00	1,4	753,865	857	1023	947	46,9	47,2		0		17,54
1:10	1,4	753,865	878	1038	970	47,4	47,5		0,112		15,22
1:20	1,4	753,865	896	1045	985	47,5	48,5		0,28		13,7
1:30	1,4	753,865	900	1060	1000	45	49,2		0,28		12,79
1:40	1,5	807,713	947	1090	1030	53,3	53,9		0,448		11,65
1:50	1,5	807,713	966	1104	1071	54,9	55		0,672		11,06
2:00	1,5	807,713	977	1112	1053	54,8	54,8		0,504		9,94
2:10	1,55	834,637	987	1119	1067	54,5	54,7		0,504		9,49
2:20	1,55	834,637	1004	1141	1090	58,2	58,8		0,784		8,05
2:30	1,55	834,637	1031	1177	1119	63,1	63,5				
2:40	1,55	834,637	1055	1192	1133	67,2	67,4				
2:50	1,55	834,637	1075	1199	1148	68,1	68,5				
3:00	1,6	861,56	1088	1206	1162	68	68,8		2,744		8,94
3:10	1,6	861,56	1097	1213	1170	69,5	69,9		1,008		7,37
3:20	1,65	888,484	1126	1249	1206	78,3	79		1,4		6,93
3:30	1,7	915,408	1165	1285	1242	97,4	98,3		2,352		5,66
3:40	1,7	915,408	1202	1327	1277	110,4	110,9		2,464		5,76
3:50	2	1076,95	1210	1334	1281	103,3	104,1		2,52		6
4:00	2	1076,95	1198	1327	1275	103	103,8		2,128		6,04
4:10	1,7	915,408	1152	1263	1270	77,1	77,7		1,512		5,67
4:20	1,55	834,637	1147	1245		75,9	76,6		1,512		5,42
4:30	1,55	834,637	1139	1227		74	75,2		0,952		5,22
4:40	1,55	834,637	1130	1220		66,1	66,6		1,568		4,99
4:50	1,35	726,942	1095	1177		54,9	56,1		1,4		4,92
5:00	1,35	726,942				54,2	54,5		0,616		7,56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα και δεδομένα που συνελλέγησαν με αυτή την εργασία επέτρεψαν να γίνουν ορισμένες χρήσιμες παρατηρήσεις σχετικά με τα χαρακτηριστικά του συστήματος καύσης που εξετάσθηκε, όσον αφορά την θερμοκρασιακή κατανομή μέσα στον θάλαμο καύσης και τις εκπομπές NO/NO_X. Μία καινούρια ομάδα δεδομένων σχετικά με το πρόσφατα τοποθετημένο σε λειτουργία κλίβανο του εργαστηρίου καύσης, συνελλέγη και βοήθησε να εμπλουτισθούν οι υπάρχουσες γνώσεις για την συμπεριφορά του συστήματος. Η σύγκριση των ευρημάτων, με αποτελέσματα από άλλες πειραματικές εργασίες και κυρίως με τις θεωρητικές προβλέψεις ενός προκαταρκτικού μοντέλου CFD επέτρεψε την εξαγωγή διαφόρων συμπερασμάτων για τα λειτουργικά χαρακτηριστικά. Επίσης διαμορφώθηκαν προτάσεις για μελλοντική εργασία που απαιτείται προκειμένου να βελτιωθεί η κατανόηση των χαρακτηριστικών του συστήματος και να γίνει δυνατή η δημιουργία περισσότερο λεπτομερών και αξιόπιστων βάσεων δεδομένων.

Ορισμένα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από την πειραματική εργασία είναι τα εξής :

(1) Ο κλίβανος διαπιστώθηκε ότι έχει χαμηλή παραγωγή ρύπων, συγκεκριμένα όσων αφορά τις εκπομπές NO, NO_X και N_2O και συνυπολογίζοντας το μέγεθος του συστήματος καυστήρα/κλιβάνου και την ονομαστική ισχύ. Τα καταγεγραμμένα επίπεδα NO και NO_X παρουσιάζουν μία μέγιστη τιμή 114 ppm για την μέγιστη τιμή ισχύος (1.076 MW). Στις μέσες περιοχές ισχύος 0.8 – 1.0 MW που κυρίως εξετάσθηκαν, τα επίπεδα NO στο εσωτερικό του κλιβάνου, βρέθηκαν να είναι στην πλειοψηφία των μετρήσεων χαμηλότερα ή ίσα των 60 ppm, παρουσιάζοντας τοπικά μέγιστη τιμή 78 ppm. Επίσης, τα επίπεδα συγκέντρωσης N_2O που μετρήθηκαν στο τμήμα απαγωγής καυσαερίων ήταν χαμηλότερα των 5 ppm (μέγιστη τιμή 2.8 ppm).

(2) Η παραγωγή NO_X βρέθηκε να επηρεάζεται άμεσα από το ποσοστό του αέρα καύσης που χρησιμοποιείται, δηλαδή από τον λόγο αέρα/καυσίμου. Οι δύο κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την μετρηθείσα συγκέντρωση NO_X, κατανοήθηκε ότι είναι οι μεταβολές θερμοκρασίας και λόγου αέρα/καυσίμου του μείγματος. Η χρήση

περίσσειας αέρα στο μείγμα καύσης οδήγησε στην μείωση των επιπέδων NO/NO_X σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

Διαπιστώθηκε η εξάρτηση του μηχανισμού σχηματισμού NO_X τόσο από την θερμοκρασία, όπως προβλέπουν οι γνωστοί μηχανισμοί σχηματισμού θερμικού και αμέσου NO, όσο και από την διαθέσιμη συγκέντρωση οξυγόνου.

α) Από τις μετρήσεις σε κατάσταση σταθεροποιημένης καύσης και θερμοκρασιών (Steady-state), η αύξηση του λόγου αέρα/καυσίμου από 1.16 σε 1.63 οδήγησε σε ελάττωση των εκπομπών NO, κατά 25% περίπου σε μέση τιμή. Τα επίπεδα συγκέντρωσης NO για φ = 1.63 και σε διαφορετικές ακτινικά και αξονικά θέσεις σε ολόκληρο τον θάλαμο καύσης (και τον αγωγό εξόδου των καυσαερίων) κυμάνθηκαν μεταξύ 45-60 ppm (με την υδρόψυκτη συσκευή δειγματοληψίας με χαλαζιακή επένδυση) ή 35-50 ppm (μετρήσεις με πυρόμετρο) για μέγιστη θερμοκρασία 1190 °C.

Για τον λόγο φ = 1.16 (μείγμα πλουσιότερο σε καύσιμο, σχεδόν στοιχειομετρικό) οι τιμές συγκέντρωσης NO που μετρήθηκαν κυμάνθηκαν μεταξύ 60 - 78 ppm για μέγιστη θερμοκρασία φλόγας 1234 °C και ισχύ 800 KW.

Αυτό το αποτέλεσμα είναι επίσης σύμφωνο με τις θεωρητικές προβλέψεις, υποδεικνύοντας ότι η περίσσεια αέρα στο μείγμα ενισχύει την μείωση εκπομπών NO_X.

β) Η επιρροή της θερμοκρασίας φάνηκε ότι είναι σημαντικότερη. Οι θέσεις των μεγίστων τιμών θερμοκρασίας και μεγίστων συγκεντρώσεων NO παρατηρήθηκε ότι συμπίπτουν και για τα δύο σετ συνθηκών λειτουργίας που εξετάσθηκαν. Μία σχεδόν γραμμική εξάρτηση του NO από την θερμοκρασία (γραφήματα 5.8.4, 5.8.5) παρουσιάζεται σε όλες τις θέσεις μετρήσεων. Η επίδραση της θερμοκρασίας (μέσω των μηχανισμών σχηματισμού θερμικού και αμέσου NO) φαίνεται να κυριαρχεί έναντι της επίδρασης μεταβολών στην συγκέντρωση οξυγόνου, παρότι τα θερμοκρασιακά επίπεδα των δοκιμών δεν ήταν ιδιαίτερα υψηλά για την ονομαστική ισχύ του συστήματος.

γ) Η συγκέντρωση NO επίσης φάνηκε να συσχετίζεται με την ισχύ (δηλαδή την τροφοδοσία καυσίμου) και τις διακυμάνσεις της. Από τις μετρήσεις που

έγιναν στην μεταβατική περίοδο προθέρμανσης - ανύψωσης της θερμοκρασίας (warming-up), παρατηρήθηκε ότι τα επίπεδα NO αυξάνονταν ακολουθώντας αυξήσεις της ισχύος, και έφτασαν στην μέγιστη τιμή τους (114 ppm) στην μέγιστη καταγραφή κατανάλωσης ισχύος (1.076 MW). Στην φάση σταδιακής σβέσης που ακολουθούσε, τόσο οι συγκεντρώσεις NO όσο και η ισχύς μειώνονταν με όμοιο τρόπο. Οι διακυμάνσεις της ισχύος επίσης επηρέαζαν αντίστοιχα την συγκέντρωση NO.

δ) Όσο περισσότερος ήταν ο χρόνος διατήρησης υψηλών θερμοκρασιών (άνω των 1400 °C) στο σύστημα, σε ορισμένες αρχικές δοκιμές, τόσο υψηλότερη ήταν η καταγραφή τιμής συγκέντρωσης NO (78 ppm, για φ = 1.16), δείχνοντας την επίδραση του χρόνου παραμονής.

(3) Η αναλογία NO/NO_X βρέθηκε ότι ήταν σταθερά μεγαλύτερη του 95 % κατά την διάρκεια της πειραματικής λειτουργίας του κλιβανου, για όλους τους λόγους αέρα/καυσίμου που δοκιμάσθηκαν (σχήμα 5.8.8). Η καταγεγραμμένη συγκέντρωση NO αντιπροσώπευε σε ορισμένες περιπτώσεις περισσότερο του 99% των συνολικών εκπομπών NO_X ($NO + NO_2$), επιβεβαιώνοντας τις θεωρητικές υποθέσεις. Δηλαδή οι εκπομπές NO_2 του συστήματος ήταν πάντα χαμηλότερες του 5% των συνολικών NO_X.

Επίσης τα επίπεδα του N_2O στα καυσαέρια, βρέθηκαν πολύ χαμηλά, αντιπροσωπεύοντας στην μέγιστη τιμή τους το 3 % της συνολικής συγκέντρωσης NOx. Προκύπτει ότι οι ρυθμοί οξείδωσης του αζώτου του καυσίμου ήταν χαμηλοί.

Οι καταγραφές συγκεντρώσεων NO, NO_X και N_2O έδειξαν τις ίδιες τάσεις και αποκρίσεις σε αλλαγές των συνθηκών λειτουργίας.

(4) Σχετικά με τα επίπεδα NO, στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης, σχετικά μικρή μεταβολή τους παρατηρήθηκε τόσο σε αξονική όσο και σε ακτινική διεύθυνση, και οι κατανομές που καταγράφηκαν ήταν σχετικά επίπεδες, με διακύμανση τιμών της τάξης των ± 5 ppm (γραφήματα 5.3.1.- 5.3.6, 5.5.1 – 5.5.3). Περισσότερη διαφοροποίηση καταγράφηκε για το σχεδόν στοιχειομετρικό μείγμα (φ = 1,16)

(5) Ο συνολικός βαθμός ανάμιξης, η ταχύτητα της ροής αέρα και η αρχική θερμοκρασία καύσης, παρατηρήθηκε να επηρεάζουν την κατανομή του NO στο εσωτερικό του θαλάμου.

(6) Μεταβολές του λόγου αέρα/καυσίμου για σταθερή τιμή ισχύος και παροχής - τροφοδοσίας καυσίμου, παρατηρήθηκε ότι είχαν σημαντική επιρροή στην θερμοκρασία της φλόγας. Όταν η αναλογία αέρα/καυσίμου αυξήθηκε από τιμή κοντά στην στοιχειομετρικη (1.16) σε τιμή 'πτωχότερη' (1.63) τα θερμοκρασιακά επίπεδα μειώθηκαν σημαντικά. Η μέγιστη θερμοκρασία των 1234 °C καταγράφηκε για λόγο φ = 1.16 ενώ για φ = 1.63, η μέγιστη θερμοκρασία ήταν 1190 °C για την ίδια ισχύ (0.8 MW). Με διαφορετική πίεση τροφοδοσίας καυσίμου (αλλά και καινούριο ακροφύσιο) επιτεύχθηκαν υψηλότερες θερμοκρασίες (μέχρι και 1460 °C) με λόγο φ = 1.16, και ίδια ισχύ.

(7) Οι μέγιστες τιμές θερμοκρασίας σημειώθηκαν κοντύτερα προς την έξοδο του καυστήρα και στην κύρια ζώνη καύσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις (και στα 5 mbar πίεση αέρα) υψηλότερες θερμοκρασίες διατηρήθηκαν στην θυρίδα 2 και ξεπέρασαν ελαφρά (κατά 15 °C) τις τιμές στην θυρίδα 1.

Οι μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται σε ακτινική απόσταση από τον κεντρικό άξονα (διαμήκη) του θαλάμου (στα 200 mm για τα 8 mbar, 100 mm για τα 5 mbar), σε μικρή απόκλιση από τις θεωρητικές προβλέψεις.

Οι ελάχιστες θερμοκρασίες καταγράφηκαν κοντά στα τοιχώματα του κλιβάνου και ιδιαίτερα κοντά στην έξοδο του καυστήρα όπως ήταν αναμενόμενο και από το μοντέλο CFD (υπολογιστικής ρευστοδυναμικής). Για 8 mbar πίεση αέρα η ελάχιστη θερμοκρασία ήταν 1036 °C σε αυτό το σημείο.

(8) Μεγαλύτερες θερμοκρασίες μπορεί να είχαν καταγραφεί αν οι μετρήσεις γίνονταν σε επίπεδο υψηλότερο του κεντρικού άξονα. Οι προβλέψεις του CFD επίσης υποδεικνύουν μία τέτοια κατανομή σαν αποτέλεσμα του ελκυσμού των καυσαερίων από το σύστημα απαγωγής και της έλλειψης συμμετρίας.

(9) Τα αποτελέσματα φάνηκε να συμφωνούν με τις προβλέψεις του υπολογιστικού μοντέλου CFD (FLUENT). Μολονότι απευθείας σύγκριση των

αριθμητικών τιμών του μοντέλου δεν μπορεί να γίνει, καθώς τα δεδομένα από το FLUENT αναφέρονταν σε σταθερή λειτουργία στην ονομαστική ισχύ του Κλιβάνου (2 MW) και συνεπώς σε υψηλότερες θερμοκρασίες, οι τάσεις των κατανομών θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων NO/NOX ακολουθούν τις προβλέψεις που αναπαρίστανται γραφικά στο Παράρτημα Α. Τα ψυχρότερα σημεία παυ προβλέπονται στο σχήμα Α1 της ανάλυσης CFD επαληθεύονται από τα αποτελέσματα των μετρήσεων σταθεροποιημένης κατάστασης κοντά στα τοιχώματα και στην περιοχή ανακυκλοφορίας κοντά στην έξοδο του καυστήρα (δείτε σχετικά παρ. 5.2.1 σελ. 62). Η μετρηθείσα κατανομή θερμοκρασιών στην θερμότερη περιοχή επίσης συμβαδίζει με τις προβλέψεις του προγνωστικού μοντέλου.
Επίσης η κατανομή των συγκεντρώσεων NO στο εσωτερικό του θαλάμου αλλά και η συσχέτιση των συγκεντρώσεων με την θερμοκρασία επίσης φάνηκε να ακολουθεί τις τάσεις των προβλέψεων του μοντέλου CFD (δείτε σχετικά παρ. 5.5. και 5.6). Το ίδιο ισχύει και για τις μετρήσεις συγκεντρώσεων CO2 και O2 στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης και στο αγωγό εξόδου καυσαερίων, που ακολουθούν τις τάσεις που περιγράφονται στα σχήματα Α5 και Α6 (Παράρτημα Α) από το προγνωστικό μοντέλο.

(10) Η μεταβολή των θερμοκρασιών, σε διαφορετικές θέσεις αξονικά ή ακτινικά δεν αποδείχθηκε σημαντική, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο προσδιορισμός των θέσεων κορυφαίων θερμοκρασιών υπό διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες, είναι δυνατό να εμπεριέχει σφάλματα λόγω πιθανών ανακριβειών των οργάνων.

(11) Βρέθηκε ότι ακολουθώντας μία σταθερή διαδικασία ρύθμισης της ισχύος και της παροχής αέρα καύσης, κατά την διάρκεια της πειραματικής λειτουργίας του κλιβάνου, 4,5 (φ = 1.6) ως 5 ώρες (φ = 1.16) προθέρμανσης (σταδιακής αύξησης της θερμοκρασίας) χρειάζονταν προτού επιτευχθεί η σταθερή κατάσταση καύσης, με ισχύ 0.8 MW. Αυτό αντιστοιχούσε σε 1,5 ως 3 ώρες, μετά την τελευταία αλλαγή θέσης ρύθμισης της βαλβίδας παροχής αέρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η εργασία αυτή περιέγραψε κάποια από τα χαρακτηριστικά του συστήματος καύσης, όπως την θερμοκρασιακή κατανομή και τις εκπομπές κυρίως οξειδίων του αζώτου, ενώ έγιναν κάποιες προτάσεις σχετικά με τους παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν αυτά τα χαρακτηριστικά. Αναμφίβολα, τα χαρακτηριστικά μπορούσαν να διερευνηθούν περισσότερο και τα αποτελέσματα να συμπληρωθούν με περισσότερες και πιο εκτεταμμένης διάρκειας δοκιμές της λειτουργίας του συστήματος.

Λόγω των χρονικών περιορισμών διαθεσιμότητας του εργαστηρίου και του απαιτούμενου αργού ρυθμού προθέρμανσης, δεν ήταν δυνατή η λήψη πολύ μεγάλου αριθμού μετρήσεων και σε πολλές διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, μολονότι αρκετά στοιχεία συνελλέγησαν από τις 12 δοκιμαστικές λειτουργίες που πραγματοποιήθηκαν.

Επίσης δεν ήταν δυνατή πρακτικά η προσπέλαση και λήψη μετρήσεων σε ολόκληρο τον εσωτερικό χώρο του θαλάμου καύσης, κυρίως σε διαφορετικά ύψη για τα οποία υπήρχε η ένδειξη διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων, ειδικά ως προς τις συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου.

Τέλος δεν ήταν δυνατή η λειτουργία σε ισχείς κοντά στην ονομαστική των 2 MW, κυρίως λόγω χρονικών περιορισμών αλλά και για λόγους ασφαλείας δεδομένου και του ότι ο κλίβανος ήταν ακόμη σε δοκιμαστική λειτουργία. Έτσι δεν μπορεί να γίνει απευθείας σύγκριση αριθμητικά των αποτελεσμάτων με τα προγνωστικά του μοντέλου CFD. Ωστόσο ήταν δυνατή η σύγκριση των τάσεων και των κατανομών.

Συμπερασματικά μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων μπορούν να γίνουν οι εξής προτάσεις για μελλοντική έρευνα :

(α) Θα ήταν χρήσιμη μία περισσότερο εκτεταμμένη χρονικά και λεπτομερής μελέτη του συστήματος και ανάλυση των αποτελεσμάτων, προκειμένου να προσδιορισθούν καλύτερα οι επιμέρους επιδράσεις των κυρίαρχων μηχανισμών σχηματισμού NO_X (θερμικού, αμέσου και καυσίμου) και οι βαθμοί εξάρτησης του

σχηματισμού NO_X από τις διάφορες παραμέτρους της λειτουργίας (όπως η θερμοκρασία, ο αέρας καύσης, η ισχύς) με μεγαλύτερη βεβαιότητα και λεπτομέρεια και για διαφορετικές συνθήκες. Μία τέτοια μελέτη θα βοηθούσε να αναπτυχθούν μέθοδοι βελτίωσης της απόδοσης καύσης του συστήματος και περαιτέρω μείωσης των εκπομπών. Μεγαλύτερος διαθέσιμος χρόνος λειτουργίας απαιτείται καθώς η σταδιακή ανύψωση θερμοκρασίας για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του συστήματος είναι χρονοβόρα διαδικασία.

(β) Με την προοπτική βελτίωσης της απόδοσης και μείωσης των εκπομπών, θα έπρεπε να διεξαχθούν περισσότερες μετρήσεις των NO/NO_X, σε περισσότερες θέσεις και λόγους αέρα/καυσίμου. Περισσότερες μετρήσεις χρειάζονταν ειδικά για τον πλησιέστερο στον στοιχειομετρικό λόγο μείγματος (φ = 1.16), και από τις θυρίδες 2 και 4. καθώς στην θυρίδα 2 σημειώνεται ότι έχει καταγραφεί η μέγιστη συγκέντρωση για το συγκεκριμένο λόγο αέρα/καυσίμου και στην 4 η ελάχιστη. Η καταγραφή των επιπέδων εκπομπών NO και NO_X σε περισσότερες θέσεις και στην σταθεροποιημένη κατάσταση θα μπορούσαν να βελτιώσουν την κατανόηση των τάσεων στα σχετικά γραφήματα, και την κατανόηση των τρόπων σχηματισμού NO_X.

(γ) Η επίδραση της θερμοκρασίας και του λόγου μείγματος αέρα/καυσίμου θα έπρεπε να μελετηθεί περισσότερο με την διερεύνηση μεγαλύτερου εύρους συνθηκών λειτουργίας. Όπως έχει αναφερθεί, διάφοροι λόγοι αέρα/καυσίμου πλουσιότεροι και πτωχότεροι σε καύσιμο θα έπρεπε να εφαρμοσθούν ώστε να εξετασθεί σε μεγαλύτερο βάθος η επίδρασή τους στην θερμοκρασία και τις εκπομπές και να καθορισθεί έτσι ένας 'ιδανικός' λόγος φ για ελάχιστες εκπομπές χωρίς απώλειες στην απόδοση της καύσης και την ισχύ.

(δ) Οι περιοχές υψηλότερων θερμοκρασιών πάνω από 1400°C δηλαδή, θα έπρεπε να εξετασθούν, με ταυτόχρονες καταγραφές των NO/NO_X ώστε να εξετασθούν τα αποτελέσματα του σχηματισμού θερμικού NO, και ο ρυθμός αύξησης των εκπομπών που αναμένεται να συμβεί.

Επίσης, θα πρέπει να μελετηθεί η λειτουργία σε ισχείς μεγαλύτερες του 1.1 MW και κοντά στην ονομαστική ισχύ του συστήματος.

Διαφορετικές πιέσεις τροφοδοσίας και επιστροφής καυσίμου θα πρέπει να εφαρμοσθούν για να προσδιορισθούν οι επιδράσεις τόσο στην ανάπτυξη θερμοκρασίας και στην τελική τιμή της όσο και στις εκπομπές καυσαερίων.

(ε) Οι περιοχές ψηλότερα από τον κεντρικό άξονα, στο πάνω μισό της διατομής του θαλάμου καύσης πρέπει να εξετασθούν σχετικά με τις θερμοκρασίες και τις εκπομπές NO_X. Προβλέπεται ότι υψηλότερες συγκεντρώσεις NO και υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες θα μετρηθούν σε αυτό το τμήμα του θαλάμου. Αν γίνει εφικτή η πραγματοποίηση μετρήσεων σε αυτές τις θέσεις, οι οποίες δεν ήταν προσπελάσιμες στην διάρκεια αυτής της εργασίας, τότε θα μπορούσαν να σχεδιασθούν ισοθερμοκρασιακές γραμμές για το εσωτερικό του κλιβάνου και να επιβεβαιωθούν οι προβλέψεις της προκαταρκτικής υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, που είχε προηγηθεί.

Τέλος η περιοχή πιο κοντά στην έξοδο του καυστήρα, η οποία επίσης δεν ήταν προσπελάσιμη (μετρήσεις μπορούσαν να γίνουν σε ελάχιστη αξονική απόσταση 900 mm από τον διασκορπιστή) κατά την διάρκεια της εργασίας εξαιτίας της θέσης του οπτικού τμήματος LDA (laser doppler anemometry), θα έπρεπε επίσης να εξετασθεί περισσότερο. Οι συνθήκες στην ζώνη αυτή, με την ανακυκλοφορία των προϊόντων της καύσης, όπως προβλέπονται από την ανάλυση CFD μπορούσαν έτσι να επιβεβαιωθούν με ακρίβεια και να μετρηθούν τα επίπεδα NO_X/θερμοκρασίας πλησίον του ακροφυσίου, καθώς αναμένονται να είναι ψηλότερα από τα καταγεγραμμένα. Έτσι θα είχαμε μία λεπτομερέστερη απεικόνιση των στοιχείων θερμοκρασίας και συγκεντρώσεων, σε ολόκληρο το χώρο του θαλάμου.

(στ) Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων η μείωση των εκπομπών NO_X φαίνεται να συσχετίζεται κυρίως με την ποσότητα περίσσειας αέρα καύσης που χρησιμοποιείται. Η μελέτη των διαθέσιμων αποτελεσμάτων δείχνει ότι, τουλάχιστον, η λειτουργία σε μεγαλύτερους λόγους αέρα/καυσίμου (χρήση περίσσειας αέρα) μπορεί να προταθεί σαν μία απλή μέθοδος για την περαιτέρω ελάττωση των εκπομπών NO_X από τον κλίβανο αυτό, ωστόσο τα όρια εφαρμογής αυτής της αύξησης και οι λόγοι για τους οποίους αυτό συμβαίνει πρέπει να καθορισθούν σαφέστερα. Αυτή η χρήση περίσσειας αέρα θα επηρεάσει την αποδοτικότητα και την κατανάλωση καυσίμου για την ίδια απαίτηση ισχύος.

Καύση δύο βαθμίδων ή ελαφρά εκτός στοιχειομετρικού σημείου μπορεί επίσης να προταθεί, λαμβάνοντας υπόψη ότι η υλοποίησή της προϋποθέτει οικονομικό και χρονικό κόστος για μετατροπές. Επεμβάσεις στο σύστημα έγχυσης αέρα/καυσίμου του καυστήρα, δεν αιτιολογούνται από τις καταγεγραμμένες τιμές εκπομπών. Το σύστημα δεν θεωρείται ότι απαιτεί την εφαρμογή ειδικών μέτρων ελέγχου των εκπομπών ρύπων.

(ζ) Για να βελτιωθεί η ακρίβεια των καταγραφών παροχής καυσίμου τροφοδοσίας και της ισχύος, προτείνεται να χρησιμοποιηθεί ένα ψηφιακό παροχόμετρο. Παροχόμετρο θα πρέπει επίσης να επιτηρεί τον ρυθμό παροχής στην βαλβίδα επιστροφής καυσίμου, καθώς αυτός επηρεάζει την εκτίμηση της πραγματικής στάθμης ισχύος.

Η μέτρηση της παροχής με την χρήση του Pitot - tube θα πρέπει επίσης να επαναληφθεί και επιβεβαιωθεί με την χρήση ενός κατάλληλα καλιμπραρισμένου ταχυμέτρου ροής. Αυτό δεν θεωρήθηκε απαραίτητο σε αυτή την εργασία αλλά μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια των μετρήσεων παροχής αέρα εισαγωγής.

(η) Για μια λεπτομερέστερη ανάλυση του συστήματος, θα πρέπει να εφαρμόζεται με συνέπεια η διόρθωση θερμοκρασίας (που δίνεται σε πίνακες του κατασκευαστή) στις ενδείξεις των θερμοστοιχείων.

(θ) Η βαθμονόμηση των δύο δειγματοληπτικών συσκευών αερίου που χρησιμοποιήθηκαν, με την δοκιμή των αποτελεσμάτων τους σε άλλες πειραματικές διατάξεις ή σε ειδικό εργαστήριο ή με σύγκρισή τους με ασφαλή αποτελέσματα από άλλα συστήματα, θεωρείται σημαντική για να προσδιορισθεί η αξιοπιστία και ακρίβεια της κάθε ομάδας δεδομένων.

(ι) Τέλος, ο έλεγχος των αποτελεσμάτων με αυτά από μία τρισδιάστατη ανάλυση με το υπολογιστικό πακέτο CFD μπορεί να βοηθήσει την κατανόηση των αποτελεσμάτων και να διευκολύνει την σύγκρισή τους με τις θεωρητικές προβλέψεις. Ένα τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να επιτρέψει πιο λεπτομερή ανάλυση ολοκλήρου του εσωτερικού του κλιβάνου, την μελέτη περισσότερων περιοχών και την περισσότερο αντιπροσωπευτική σύγκριση, καθώς το δισδιάστατο επίπεδο στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις μπορεί επίσης να συμπεριληφθεί σε αυτή και ενδιάμεσες περιοχές να εμπλουτίσουν την εικόνα των αποτελεσμάτων. Η επιφάνεια της διατομής

του κλιβάνου που παρουσιάζεται στις δισδιάστατες προκαταρκτικές προβλέψεις του υπολογιστικού πακέτου ήταν κάθετη στην επιφάνεια των μετρήσεων. Ωστόσο, η τρισδιάστατη ανάλυση ήταν επίσης σε εξέλιξη τον καιρό λήψης των μετρήσεων [45].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

1. **Barnard, J.A. & Bradley, J.N.** : "Flame and Combustion", 2nd edition, 1985, Chapman and Hall.

2. **Chomiak, J. :** "Combustion, A Study in Theory, Fact and Application", edited by Gupta, A.K., Lilley, D.G., Abacus Press, 1990.

3. **Matthews, S.A. & Sawyer, R.F.** : "Combustion Source of Unregulated Gas Phase Nitrogenous Species", Berkeley Laboratory report no LBL-10280, 1979.

4. **Gilpin, A**. : "Control of Air Pollution", 1st edition, 1963, Butterworths.

5. **Seinfeld, J.H**. : "Air Pollution, Physical & Chemical Fundamentals", 1975, Mc Graw Hill.

6. **Jeffrey, A.** : "Fossil Fuel Combustion and Greenhouse Effect"

7. **Wark, K. & Warner, C.** : "Air Pollution, its Origin and Control", 1976, IEP Dun - Donnelley Pbl.

8. **Jones, J.C**.: "Combustion Science", 1st edition, 1993, Millenium Books.

9. **Sedighi, K.** : "The Combustion of Fuels and the Factors influencing Pollutants Formation", PhD Thesis, UWCC, 1990.

10. **Hampartsoumian, E., Nimmo, W., Sedighi, K. et al** : "The Formation and Reduction of NOx from an Air-Staged Fuel Oil Flame", Paper presented at , 1989.

11. **Mirzaie, H**. : "Ultra-Low NOx Combustors", Ph.D. Thesis, UWCC, 1990

12. **Jones, W.P.** :"Testing and Measurement Techniques in Heat Transfer and Combustion", AGARD CP-281, 19, 1980.

13. **Beer, J.M. & Chigier, N.A.** : "Combustion Aerodynamics", 1972, Applied Science Publishers.

14. **Fenimore, C.P.** : "Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames", 13th International Symposium on Combustion, p.373, Combustion Institute, Pittsburgh, 1971.

15. **Hayhurst, A.N. & Vince, I.M**. : "Nitric Oxide Formation from N2 in Flames: the Importance of 'Prompt NO'", Progress in Energy and Combustion Science, 6, p.35, 1980.

16. **Zeldovich, Y.A.B**. : "Oxidation of Nitrogen in Combustion", Academy of Science, Institute of Chemical Physics, Moscow, 1947.

17. **Edwards, J.B**. : "Combustion, Formation and Emission of Trace Species", 2nd edition, 1977, Ann Arbor Science Publishers.

18. **Baulch, D.L., Drysdale, D.D., Horne, D.G., Lloyd, A**.: "Evaluated Kinetic Data for High Temperature Reactions", Volume 2, CRC Press, 1971.

19. **Lavoie, G.A. et al.** : Combustion Science and Technology, 1313, 1970.

20. **Sarofim,A. & Flagan, R.C**. : "NOx Control for Stationary Combustion Sources", Progress in Energy and Combustion Science, 2, p.1, 1976.

21. **Campbell, I.M. and Trush, B.A.** Trans . Faraday Soc., 641265, 1968.

22. **Westenberg, A.A**., Combustion Science and Technology, 4.59, 1971.

23. **Bowman, C.T.** : "Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion", Progress in Energy and Combustion Science, 1, p.33, 1976.

24. **Molte, P.C. & Pratt, D.R.,** Combustion Science and Technology, 9 , 221, 1974.

25. **Martin, G.B. et al** : " An Investigation of the Conversion of Various Fuel Nitrogen Compounds to Nitrogen Oxides in Oil Combustion", AICHE Symposium Series 68, 126, p.45, 1972.

26. **De Soete, G.G.** : "Overall Reaction Rates of NO and N2 Formation from the Fuel Nitrogen", 15th International Symposium on Combustion, p.1093, 1974.

27. **Mirzaie, H. and Syred N.** : "Ultra Low NOx Combustors Using Cyclon Combustors Technology", paper, UWCC, 1989.

28. **Hori, M.** : "Nitrogen Dioxide Formation by the Mixing of Hot Combustion Gas with Cold Air", 22nd Symposium on Combustion, p.1175, Combustion Institute, 1988.

29. **Newhall, H.K.** : "Kinetics of Engine-Generated Nitrogen Oxides and Carbon Monoxide,12th International Symposium on Combustion, Combustion Institute, p.603, Pittsburgh, 1969.

30. **Sano, Taeko** : "NO2 Formation in the Mixing Region of Hot Gas with the Cool Air", Combustion Science and Technology, 38, p.129, 1984.

31. **Hao, W.M.** et al : "Nitrous Oxide Concentration in Coal, Oil and Gas Furnace Flames", Combustion Science and Technology, 55, p.23, 1987.

32. **Muzio, L.J. et al** : "Errors in Grab Sample Measurements of N2O fro Combustion Sources", JAPCA, 39, p.287, 1989.

33. **Williams, A.** : "Combustion of Sprays of Liquid Fuels", 1976, ELEC Science Pbl..

34. **Turner, D.W. et al** : "Influence of Combustion Modification and Fuel Nitrogen Content on Nitrogen Oxides Emission from Fuel Oil Combustion" AICHE Symposium, Series 68, 126, p.55, 1972.

35. **Pershing, D.W. et al** : "Influence of Design Variables on the Production of Thermal and Fuel NO from Residual Oil and Coal Combustion" AICHE Symposium Series 71, 148, p.19, 1975.

36. **Duterque, J.** : "Further Result on Nitrogen Oxides Production in Combustion Zone", Combustion Science and Technology, 25, p.85, 1981.

37. **Takagi, T. et al** : "Nitric Oxide Formation from Fuel Nitrogen in Staged Combustion : Role of HCN and NHi" Combustion and Flame, 35, p.17, 1972.

38. **Yamagishi, K. et al** : "Study of NOx Emission Characteristic in Two Stage Combustion" 15th International Symposium on Combustion, p.1157, Combustion Institute, 1975.

39. **Miller, J.A. et al** : " A Chemical Kinetic Model for Selection Reduction of Nitric Oxide by Ammonia", Combustion and Flame, 43, p.81, 1981.

40. **NOL - 50 Nu - Way Burner** Operating Manual, 1995.

41. **Streeter, V., Wylie, B.** : "Fluid Mechanics", 7th edition, Mc Graw Hill, 1979.

42. **Heitor, M.V., Moreira, L.N.** : "Thermocouples and Sample Probes for Combustion Studies", Progress in Energy and Combustion Science, Vol.19, 1993.

43. **Al - Sharifi, F.A.** : "The Measurement and Correction of Mean Temperature in Swirling Flames", UWCC, Report No563, 1980.

44. **CRE Group Ltd., Report** on Emissions from Gasifier Engine and 2 MW Oil - Fired Furnace at UWCC, 1995.

45. **Ilbas, M., O'Doherty, T., Bowen, P., Syred, N.** : "Evaluation of the Effectiveness of a NOx Post Processor in Predicting the Performance of Natural Gas Fired Cyclone an Swirl Combustors", 3rd International Conference on Combustion for a Clean Environment, Vol. 1, Portugal, 1995

46. **Newhall ,H.K. et al** : " Kinetics of Nitric Oxide Formation in High Pressure Flames",13th International Symposium on Combustion, 1971, p. 381.

47. **Gilchrist, J.D.** : "Fuels, Furnaces and Refractories", International Series on Materials Science and Technology, Vol.21, Pergamon Press.

48. **Tromans, S.** : "The Environmental Protection Act, with Comments by ...", p. 43-16, 1993, Sweet & Maxwell.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ CFD

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ CFD

Οι μέθοδοι μοντελοποίησης με την χρήση Υπολογιστικής Δυναμικής Ρευστών χρησιμοποιούνται προκειμένου να βοηθήσουν στην κατανόηση και αντίληψη των χαρακτηριστικών απόδοσης των συστημάτων καύσης, και στην επίλυση και ανάλυση των περίπλοκων στοιχείων αεροδυναμικής μέσα σε ζώνες καύσης.

Τα πειραματικά αποτελέσματα μπορούν να φανούν χρήσιμα στην ανάλυση CFD σαν δεδομένα για την ανάπτυξη των προγνωστικών μοντέλων χαρακτηριστικών ενός συστήματος (όπως η κατανομή θερμοκρασιών, οι συγκεντρώσεις αερίων και γενικά η συμπεριφορά του συστήματος) κατά την λειτουργία του σε συγκεκριμένες συνθήκες.

Τέτοια πειραματικά δεδομένα, χρήσιμα να εισαχθούν σε υπολογιστικά μοντέλα ενός συστήματος καύσης, περιλαμβάνουν τις παροχές αέρα και καυσίμου, τις θερμοκρασίες σε διάφορες θέσεις του εσωτερικού του θαλάμου καύσης, τα μεγέθη σταγονιδίων καυσίμου και η διασπορά τους, η ταχύτητα των σταγονιδίων, οι συγκεντρώσεις αερίων κλπ. Οι αρχικές συνθήκες του εξεταζόμενου συστήματος πρέπει να είναι γνωστές με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.

Για την συλλογή των στοιχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι όπως η Laser Doppler Anemometry (LDA), Phase Doppler Anemometry (PDA), οι μετρήσεις ταχυτήτων, καταγραφές παροχών αέρα/καυσίμου, δειγματοληψίες καυσαερίων και ανάλυση εκπομπών κλπ. Έτσι ορισμένα από τα στοιχεία που προέκυψαν από την παρούσα εργασία θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμα σε εφαρμογές μοντέλων CFD.

Γενικά οι κώδικες CFD, μπορούν να προβλέψουν με μεγάλη ακρίβεια, τα αεροδυναμικά στοιχεία του συστήματος με την προϋπόθεση να έχουν ορισθεί κατάλληλα οι συνθήκες εισόδου και εξόδου από τον θάλαμο καύσης και να έχει χρησιμοποιηθεί το σωστό μοντέλο τυρβώδους ροής.

Τα αποτελέσματα και οι προβλέψεις των υπολογιστικών μοντέλων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μεγαλύτερη κατανόηση του συστήματος και την βελτίωση της αποδοτικότητας της καύσης, προτείνοντας ακόμα και τρόπους για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας του.

Για την ανάπτυξη και εξάσκηση σχετικών τεχνικών μοντελοποίησης υπολογιστικής ρευστομηχανικής, στο Πανεπιστήμιο της Ουαλίας ήταν διαθέσιμο το λογισμικό πακέτο CFD FLUENT.

Για τις προκαταρκτικές προβλέψεις που έγιναν κατά την διάρκεια της εργασίας αυτής, χρησιμοποιήθηκε μοντέλο τυρβώδους ροής K-E. Αυτό το μοντέλο παράγει καλύτερα αποτελέσματα για ροές 'χαμηλής συστροφής' (low swirl) με χαμηλό βαθμό συστροφής S όπως συμβαίνει και σε αυτή του εξεταζόμενου συστήματος καύσης ισχύος 2 MW. Η καλύτερη εφαρμοσιμότητα αυτού του μοντέλου διαπιστώθηκε και με την χρήση αρχικά μοντέλου RSM και την σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Το μοντέλο PDF (Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητα - Probability Density Function) χρησιμοποιήθηκε σαν μοντέλο καύσης και 9 χημικές ουσίες (συγκεκριμένα οι C_5H_{12}, CH_4, O_2, N_2, OH, H_2, CO, CO_2, H_2O) χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του μοντέλου. Αυτές αντιπροσωπεύουν τις θεωρούμενες κυρίαρχες ουσίες της καύσης για το σύστημα.

Άλλα παραδείγματα δεδομένων που χρειάσθηκε να εισαχθούν στο μοντέλο ήταν ένας αριθμός σταγονιδίων ρευστού στην ζώνη εισόδου (10 σταγονίδια) για την εξομοίωση του διασκορπισμού καυσίμου. Η μέση διάμετρος σταγονιδίου ορισθηκε σε 100μm. Η γωνία εισόδου των σταγονιδίων μέσα στον θάλαμο δόθηκε ότι είναι 60° (γωνία ψεκασμού του ακροφυσίου).

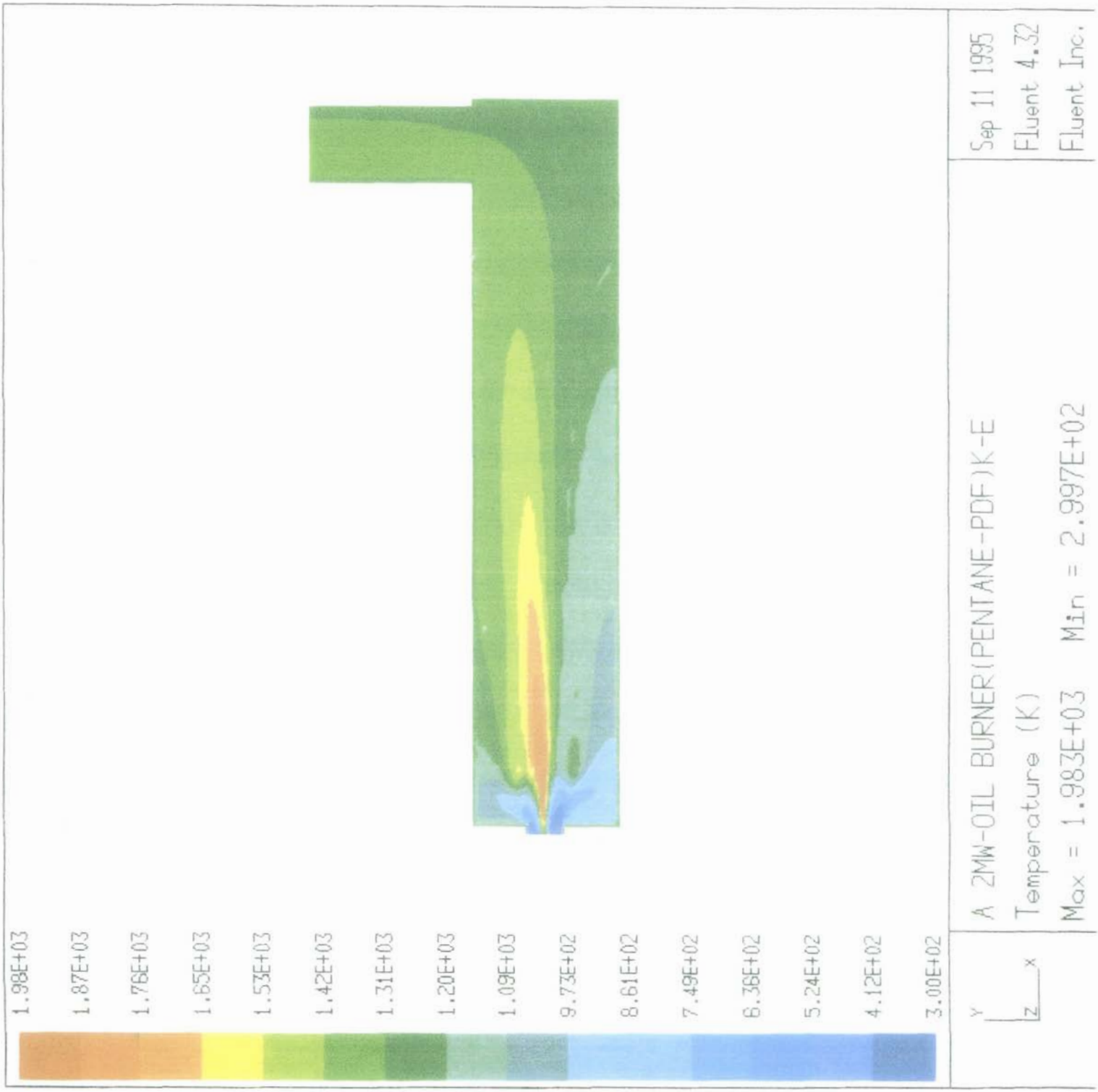
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης που έγινε έτσι στα πλαίσια παράλληλης εργασίας διδακτορικής διατριβής και παραχωρήθηκαν (από τον Mustafa Ilbas (PhD UWCC)) παρουσιάζονται γραφικά στις παραστάσεις Α1 – Α9 που ακολουθούν, και απεικονίζουν τις προβλέψεις για το σύστημα συμπεριλαμβανομένων των μεγίστων και ελαχίστων τιμών για διάφορες μεταβλητές ποσότητες (θερμοκρασίες, συγκεντρώσεις αερίων, ταχύτητες κλπ). Τα αποτελέσματα θεωρούνται προκαταρκτικά λόγω έλλειψης ακόμη εκείνη την περίοδο δυνατότητας πειραματικών

μετρήσεων και ακριβών πληροφοριών, όπως για τις αρχικές συνθήκες των σταγονιδίων (ταχύτητα, μέγεθος, κλπ), καθώς ο καυστήρας δεν είχε τεθεί σε λειτουργία ακόμη.

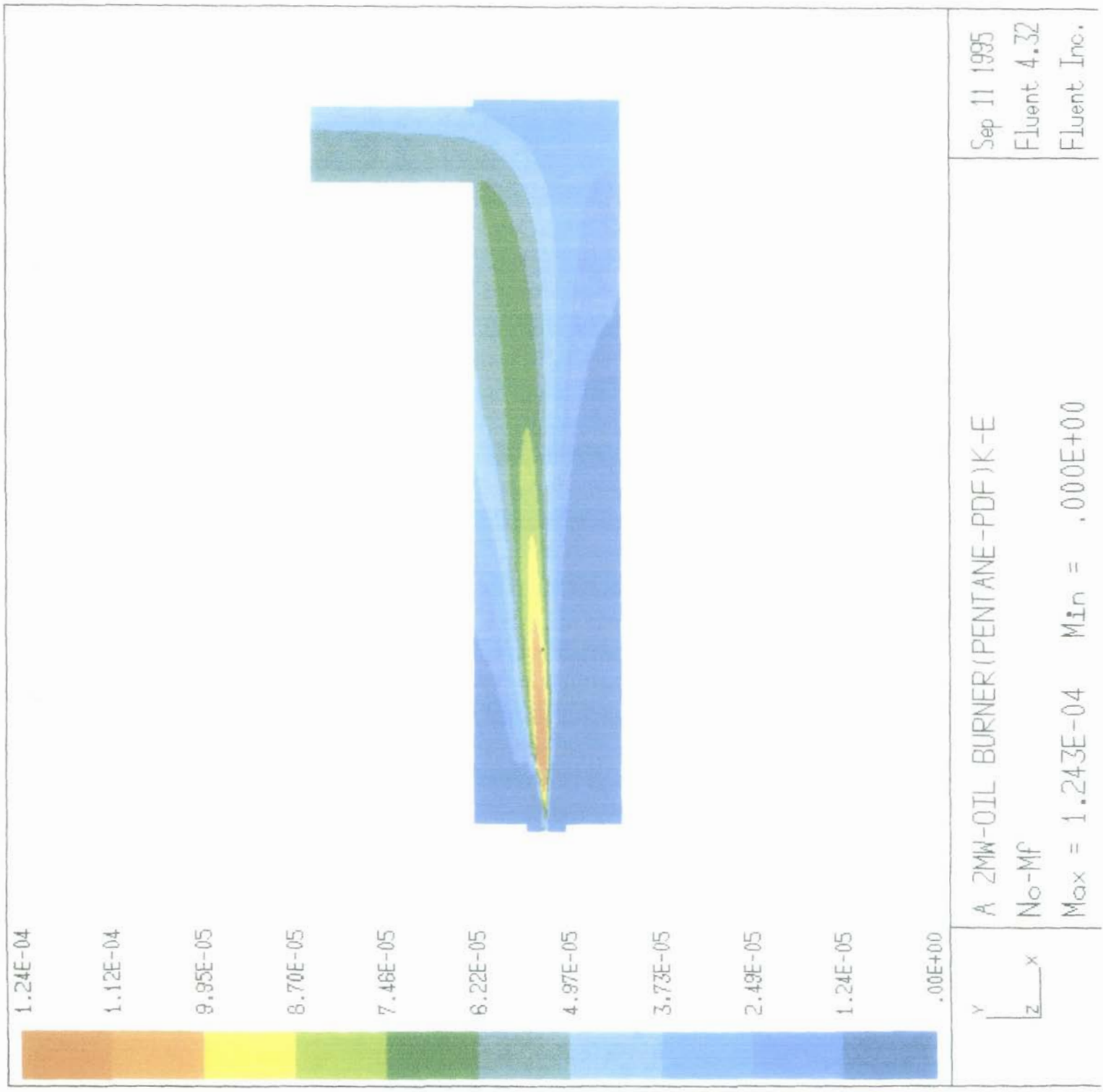
Σε κάθε περίπτωση, το μοντέλο αυτό, έδωσε μία βάση για σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις θεωρητικές προβλέψεις για τις συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του συστήματος.

Τα αποτελέσματα απεικονίζουν την θερμοκρασιακή κατανομή, την κατανομή συγκεντρώσεων NO, συγκεντρώσεις (κατά μάζα) άλλων αερίων όπως τα O_2, CO_2, HCN, κατανομές ταχυτήτων κατά άξονα U και V, χαρακτηριστικά σταγονιδίων (τροχιές εξόδου από το ακροφύσιο) και άλλα.

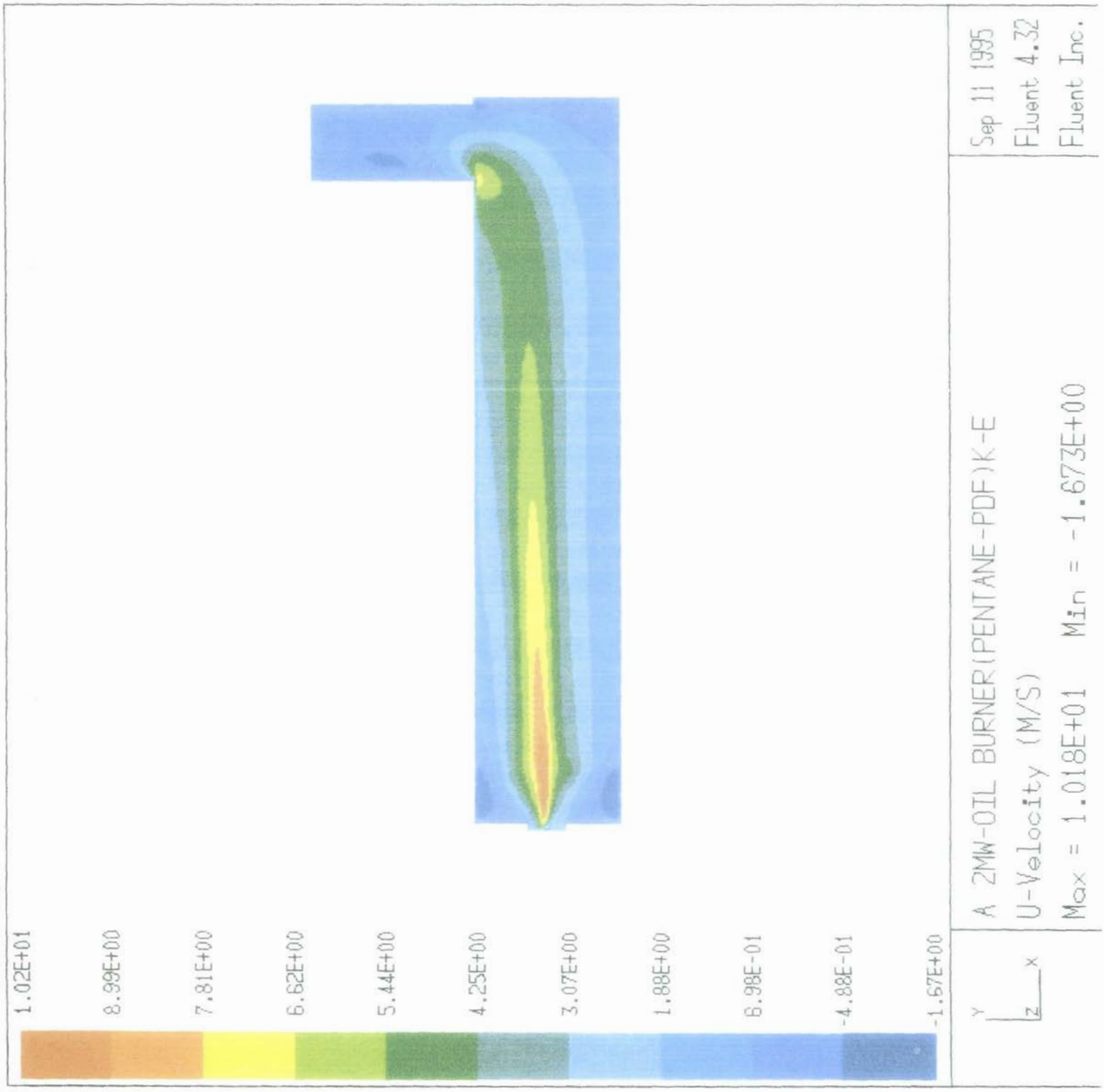
Σχήμα Α1 : Πρόγνωση της θερμοκρασιακής κατανομής με CFD (σε βαθμούς Κ)



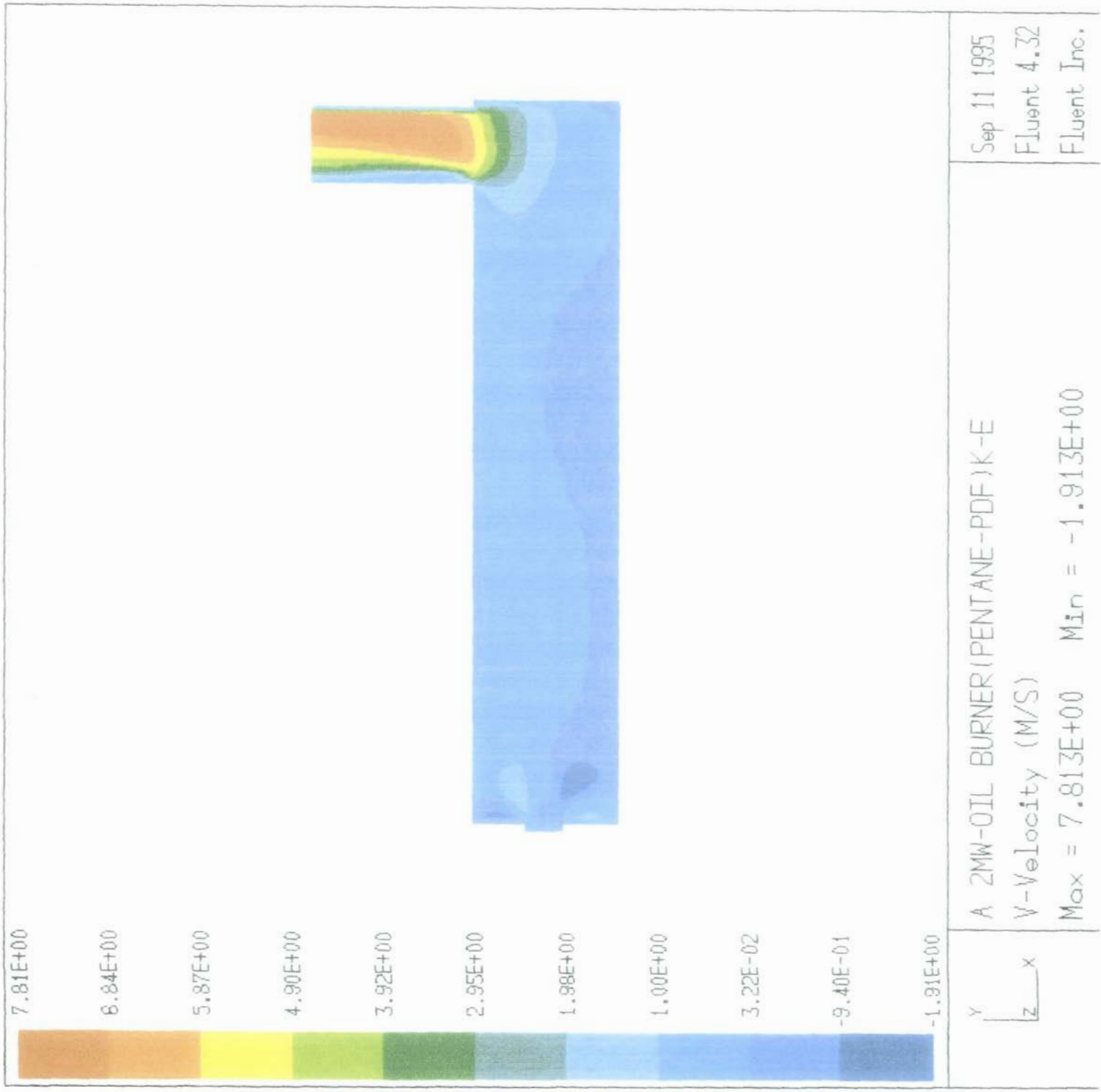
Σχήμα Α2 : Πρόγνωση της συγκέντρωσης NO με CFD (κλάσμα μάζας)



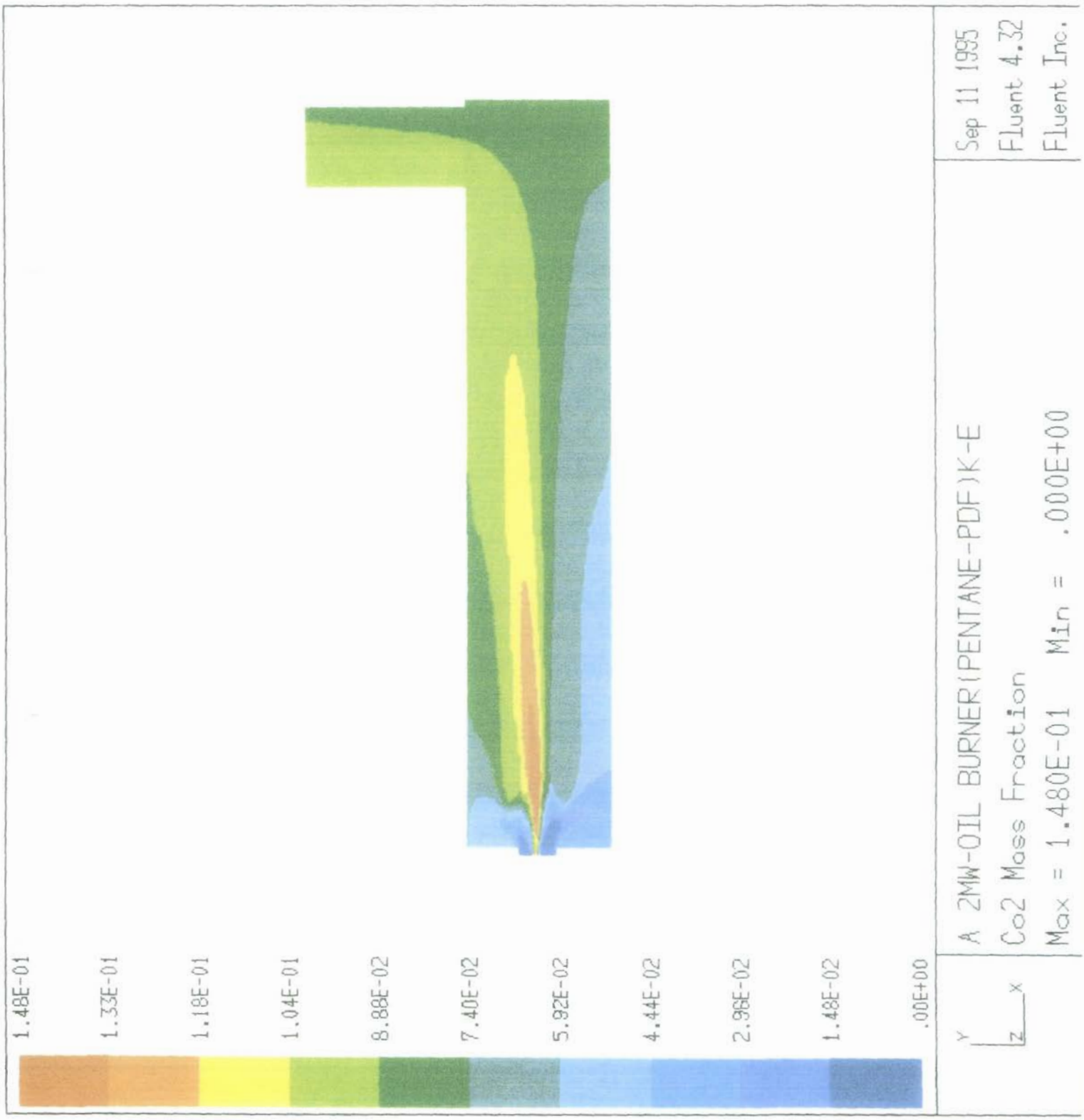
Σχήμα Α3 : Πρόγνωση της ταχύτητας-U των αερίων στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης με CFD (m/s)



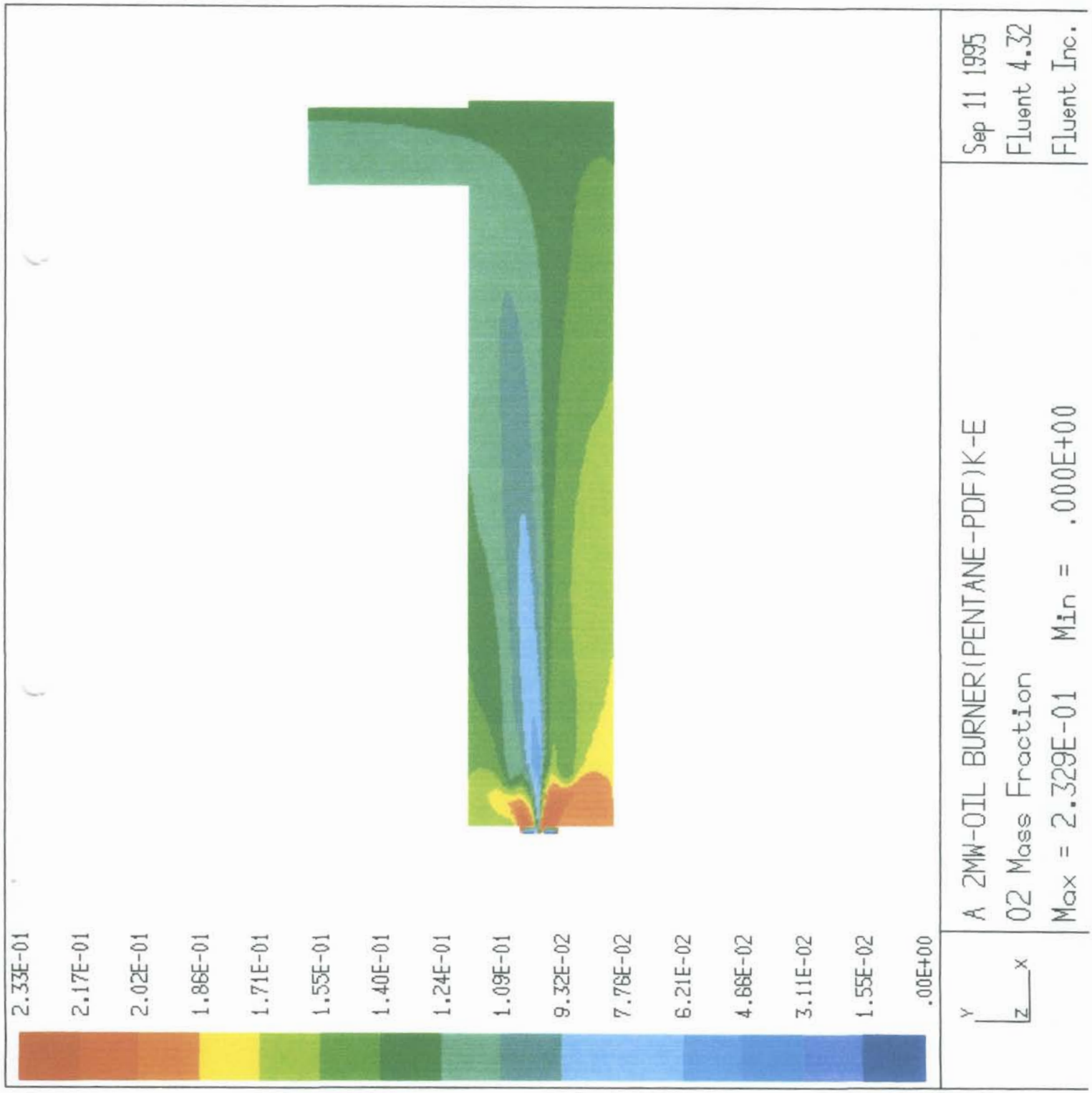
Σχήμα Α4 : Πρόγνωση της ταχύτητας-V των αερίων στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης με CFD (m/s)



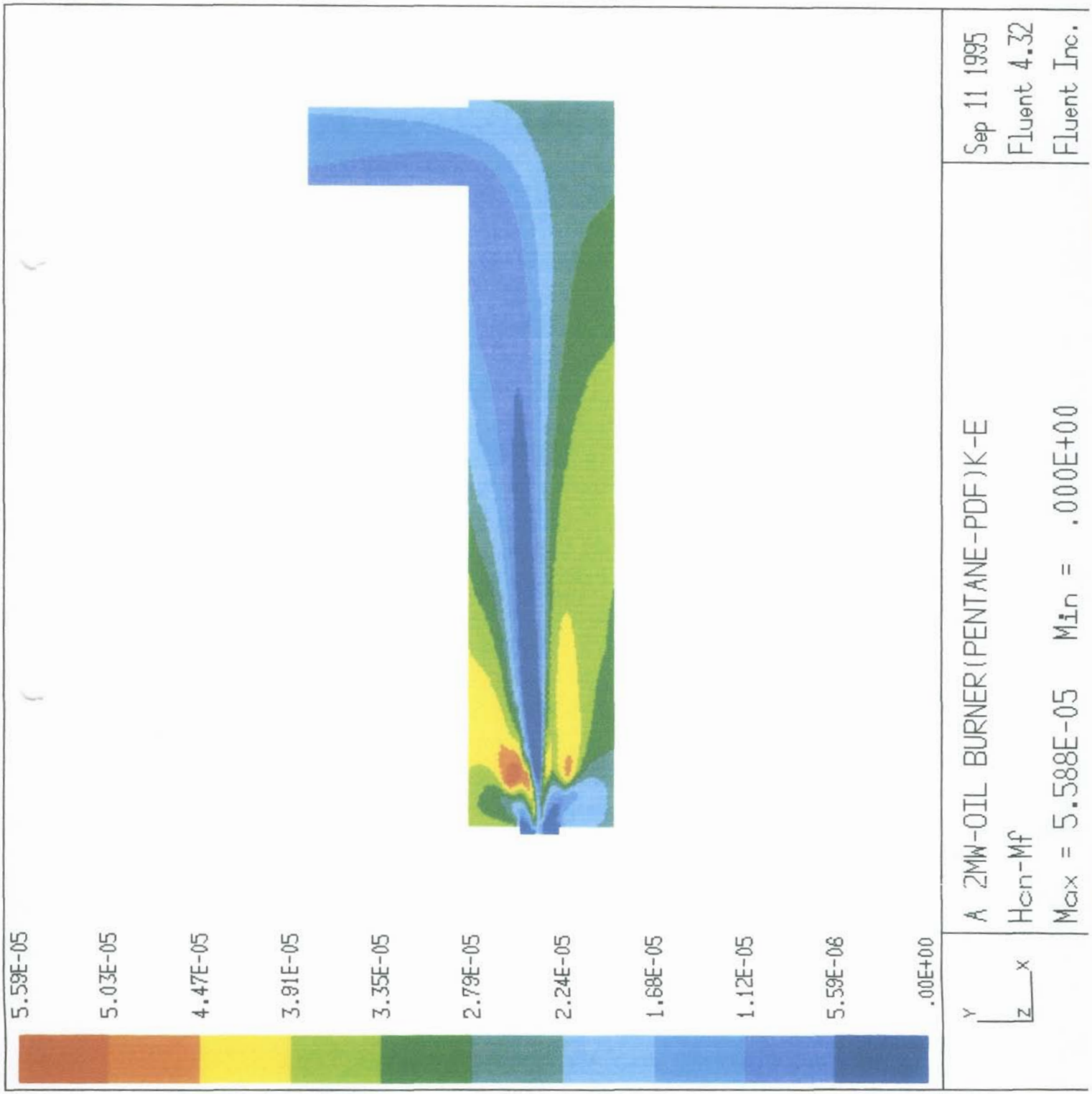
Σχήμα Α5 : Πρόγνωση της συγκέντρωσης CO_2 με CFD (κλάσμα μάζας)



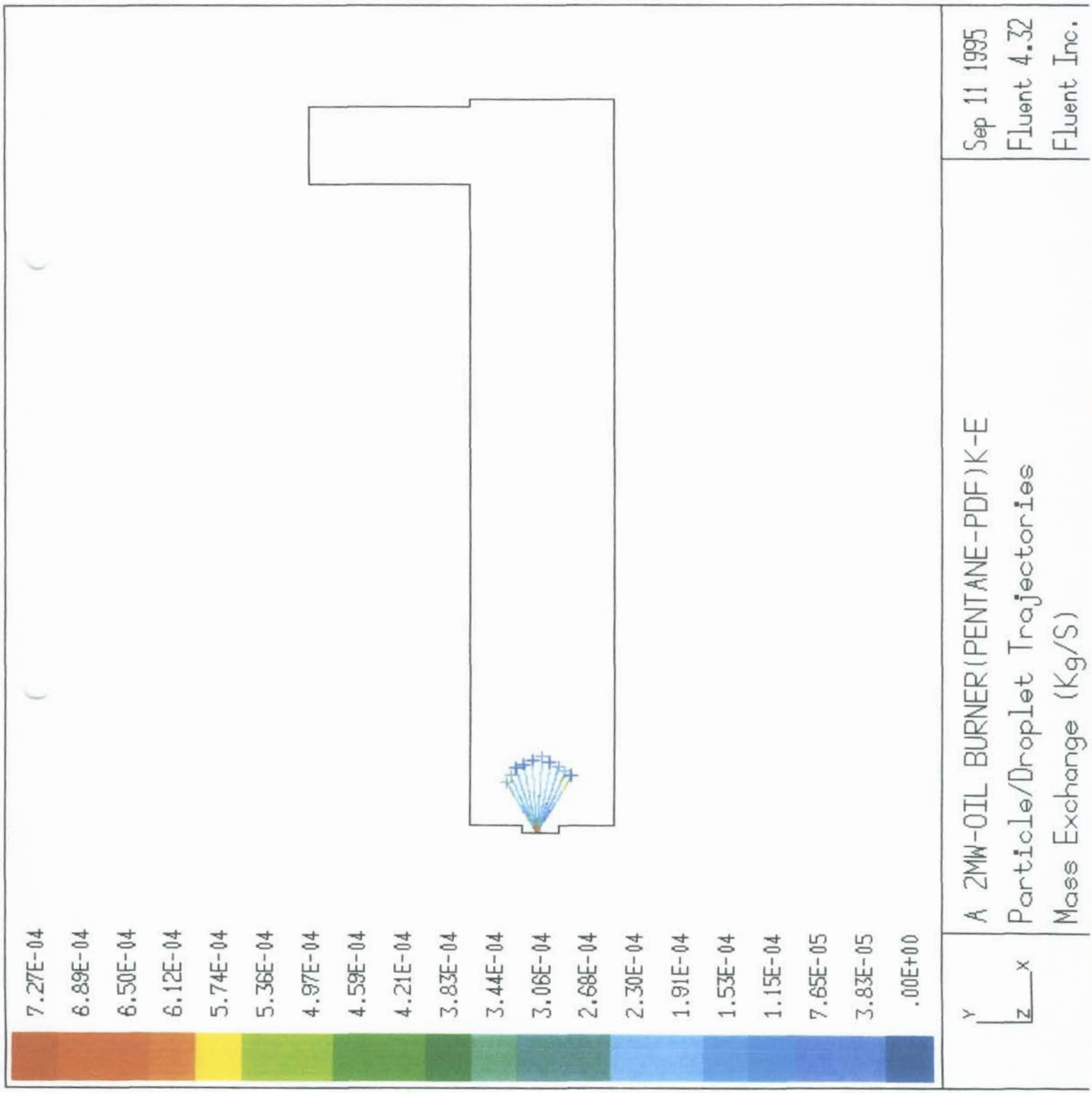
Σχήμα Α6 : Πρόγνωση της συγκέντρωσης O_2 με CFD (κλάσμα μάζας)



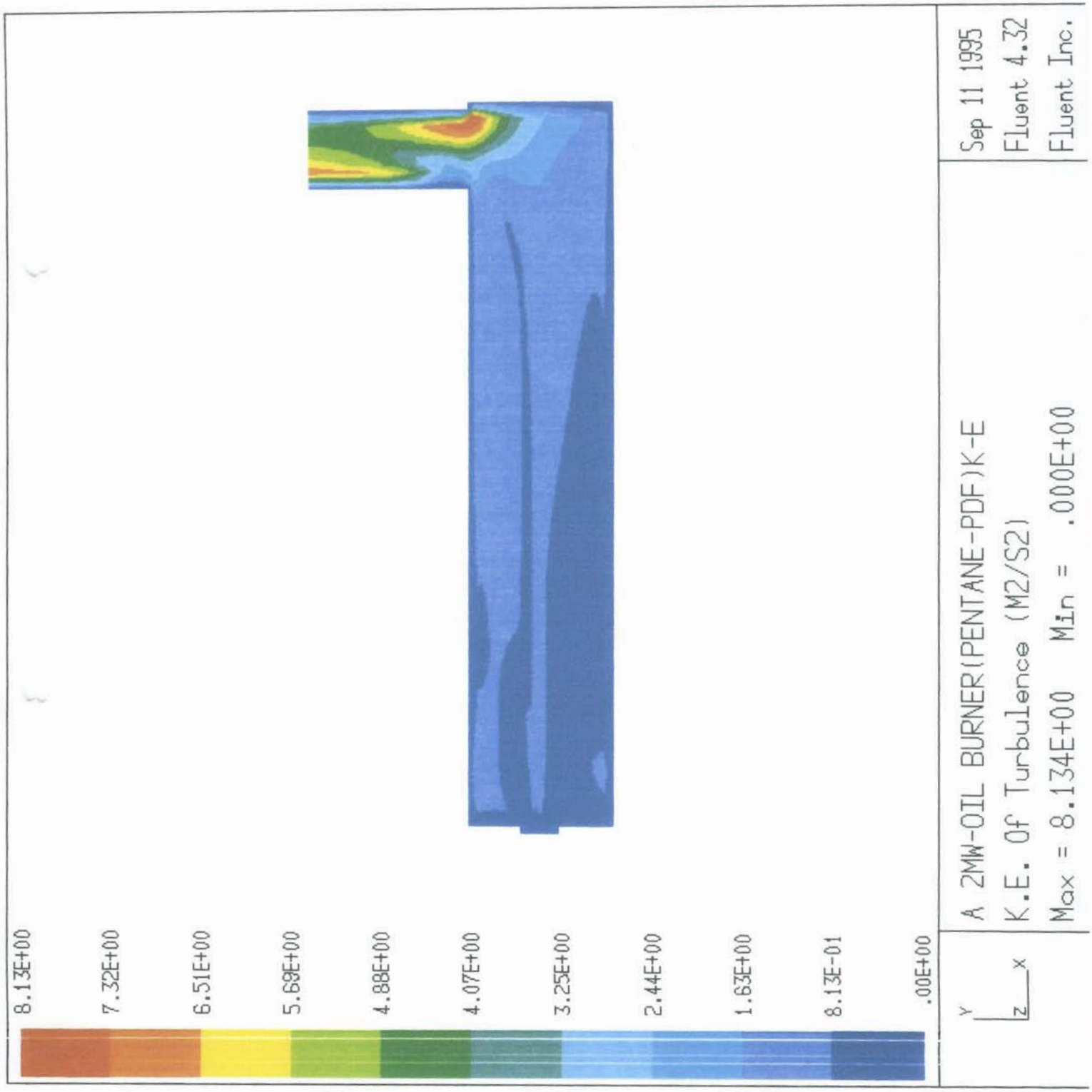
Σχήμα Α7 : Πρόγνωση της συγκέντρωσης HCN με CFD (κλάσμα μάζας)



Σχήμα Α8 : Πρόγνωση των τροχιών σωματιδίων/σταγονιδίων με CFD (γωνία 60°) σε kg/s, εναλλαγή μάζας



Σχήμα Α9 : Πρόγνωση της Κινετικής Ενέργειας Τύρβης με CFD (m^2/s^2)



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΙΣΧΥΟΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Β ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΙΣΧΥΟΣ

Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα, η ταχύτητα του αέρα εισαγωγής υπολογίζεται με την χρήση ενός σωλήνα Pitot (tube), από την μέτρηση της διαφορικής στατικής πίεσης και από την πυκνότητα των αερίων σύμφωνα με την εξίσωση (45).

Στους πίνακες μετρήσεων, οι ενδείξεις του κεκλιμμένου μανόμετρου σε μέτρα υποδεικνύουν την διαφορική στατική πίεση. Με βάση τα στοιχεία από την βαθμονόμηση του οργάνου, οι μετρήσεις του μανομέτρου διορθώθηκαν πολλαπλασιάζοντας τις με έναν συντελεστή διόρθωσης 0.20,

Δηλαδή, 0.003 m x 0.2 = 0.0006 m = διορθωμένη ένδειξη ύψους μανομέτρου

Η ταχύτητα μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση :

$$u = \sqrt{16016 \times h_{corrected}} \text{ m/s}$$

Π.χ. αν θεωρήσουμε, u = 3.10 m/s, για την πρώτη θέση μέτρησης.

Η μέση ταχύτητα που δίνεται ως : U_a = Άθροισμα όλων των ταχυτήτων/8 (αριθμός θέσεων λήψης μετρήσεων μέσα στον αγωγό) λαμβάνεται σαν αντιπροσωπευτική της πραγματικής ταχύτητας του ρεύματος αέρα που παροχευτεύεται προς τον καυστήρα. Η μέση παροχή αέρα Qa μπορεί να εξαχθεί ως εξής :

$$Q_a = U_a \times A_d ,$$

όπου Ad = η επιφάνεια της διατομής του αγωγού, η οποία μετρήθηκε σε 0.063 m^2 .

Η γνώση της παροχής αέρα που υπολογίζεται με αυτό τον τρόπο, για κάθε μία από τις τρεις διαφορετικές πιέσεις εισαγωγής αέρα που χρησιμοποιήθηκαν (5,6 και 8 mbar) και με δεδομένη την παροχή καυσίμου, επιτρέπει τον υπολογισμό του λόγου αέρα/καυσίμου και της ισχύος.

Ο λόγος Αέρα/Καυσίμου λαμβάνεται ως η αναλογία των κατά μάζα παροχών του αέρα εισαγωγής προς την τροφοδοσία καυσίμου.

Η παροχή τροφοδοσίας καυσίμου υπολογίζεται από την μέτρηση της πτώσης στάθμης στην δεξαμενή αποθήκευσης, που καταγράφοταν κατά την διάρκεια των δοκιμών.

Η συνήθης πτώση στάθμη ήταν 1.5 ως 1.6 cm/10 λεπτά για λειτουργία του κλιβάνου σε 800 KW, και η παροχή καυσίμου που αντιστοιχεί σε αυτή την πτώση υπολογίζεται σε 0.0187 kg/s σύμφωνα με την σχέση :

Παροχή καυσίμου (σε m^3/s) = πτώση στάθμης (m) × επιφάνεια δεξαμενής (m^2) × πυκνότητα καυσίμου (kg/m^3) / χρόνος που απαιτήθηκε για την πτώση (οι ενδείξεις καταγράφονταν κάθε 10 λεπτά = 600 secs)

Η αναλογία (ο λόγος) μείγματος υπολογίζεται τότε ως εξής :

$$\varphi = (Qair/Qoil)actual/14.44.$$

,όπου ο στοιχειομετρικός λόγος 14.44 ελήφθη σαν δεδομένο για το σύστημα.

Ο λόγος μπορεί να εκφρασθεί επίσης σαν αναλογία κατά μάζας παροχών του αέρα προς το καύσιμο.

Για παράδειγμα, για πίεση αέρα 5 mbar και ισχύ 800 KW, και για την $1^η$ θέση μέτρησης, κοντύτερα προς το τοίχωμα του αγωγού :

Μέτρηση ταχύτητας : u = 3.1 m/s
Μέση ταχύτητα : U_a = 4 m/s

Μέση παροχή αέρα : $Q_a = u_a \times A_d = 4 \times 0.063\ m^3/s = 0.252\ (m^3/s)$

$= 0.252 \times 1.25\ (kg/s)$

$= 0.308\ (kg/s)$

όπου 1.25 kg/m3 η πυκνότητα του αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία 25 °C και πίεση 1.0125 bar).

Παροχή καυσίμου (μέση τιμή) = 0.0187 kg/s

Λόγος μείγματος, $\varphi = (0.308/0.0187)/14.44 = 1.16$

Η ισχύς υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την παροχή καυσίμου με την Ανωτέρα Θερμογόνο Δύναμη (Gross Calorific Value) του καυσίμου δίνοντας αποτέλεσμα σε MJ/s = (MW)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – ΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΑΝΤΟΧΟΥ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (ΜΕΙΓΜΑ LIGHT FUEL OIL – GAS FUEL OIL)

Ref.:

Date: December '89

INTRACAST GL

These data represent average properties obtained from commercial product lots and should not be considered guaranteed specifications.

Type of product	:	DENSE REFRACTORY CASTABLE
Class	:	PRE Class A - Group 160 - ASTM cl T
Maximum recommended temperature	:	1650°C
Main component	:	Bubble Alumina
Nature of bond	:	Hydraulic
State of delivery	:	Dry powder
Packing	:	25kg bags
Storing time	:	At least 6 months in normal storage conditions
Method of installation	:	Cast vibration
Water required for mixing	:	10/12 litres for 100kg - depending on conditions (mixing, temperature etc)
Particle size	:	3mm
Weight per unit in place	:	1.65T/m³

PROPERTIES	STANDARDS or METHODS	UNITS	AVERAGE VALUES
CHEMICAL ANALYSIS (calcined basis)			
Al_2O_3	PRE R 25	%	67
Fe_2O_3	PRE R 25	%	0.6
CaO	PRE R 25	%	2.5
PHYSICAL PROPERTIES			
Measured on test pieces cast with 10.5% water			
- bulk density after drying @ 110°C	PRE R 27	$g.cm^{-3}$	1.70
- cold crushing strength after drying @ 110°C	PRE R 27	$N.mm^{-2}$	55
after firing at 1200°C	PRE R 28	$N.mm^{-2}$	40
- permanent linear change after firing at 1200°C	PRE R 28	%	-0.25
after firing at 1600°C	PRE R 28	%	-0.40
THERMAL CONDUCTIVITY at mean temperature of 800°C	ASTM C417	W/m°K	1.2
of 1200°C	ASTM C417	W/m°K	1.35

KER MONOLITHICS LTD
P.O. Box TR2, Whitehall Estate LEEDS LS12 4UH
Tel (0532) 636268 Telex 557244 Fax (0532) 790539

KER

TECHNICAL DATA

ARELCRETE IC14R

A low iron insulating castable

Setting	:	Hydro ceramic
Installation	:	Vibration casting
Quantity required per m^3	:	1.65 tonnes
Mixing water	:	4.25-5.0 litres/25 kg bag
Maximum service temperature	:	1400°C

Chemicla Analysis on Fired Sample

Al_2O_3	:	55.4 %
SiO_2	:	33.0 %
CaO	:	7.1 %
Fe_2O_3	:	2.8 %
TiO_2	:	<1.2 %
MgO	:	<1.0 %
Alkalis	:	<1.5 %

Bulk Density (kg/m^3)

Dried at 110°C : 1625(101 lbs/cu.f.t)

Cold Crushing Strength (kg/cm^2)

Dried at 110°C : 400(5700lb/Sq.in)

Fired at 1400°C : 280(4000lb/Sq.in)

Permanent Linear Change (%)

After firing for 3 hrs : -0.60 %

1400°C

Health & Safety

For further information on ARELCRETE IC14R, please refer to separate Health and Safety data sheet.

.....

This issue : June 1992

Note: This technical data is for guidance only and whilst reasonable conformity with data is ensured by regular sample testing, the fact that natural raw materials are used, means that the data should not be taken as a precise specification.

ROBERT · LICKLEY REFRACTORIES LIMITED

Health & Safety Data Sheet

Date:

1) **Product Identification**	
Product Name	ARELCRETE IC14R
Description	Dry Mixed Castable Refractories
Supplier	Robert Lickley Refractories Ltd P.O. Box 24, Dudley, West Midlands
Contact	M.J. Wright (0902 880123)
2) **Components/ Ingredients**	**Alumino Silicate - 5.0 mgs/m^3** **Calcium Aluminate - 5.0 mgs/m^3** **Cristobalite - 0.4 mgs/m^3** **Quartz - 0.4 mgs/m^3** **OES Values are respirable on 8 hour TWA** **HSE guidance note EH-40/94**
3) **Health Hazard Data**	**Irritation to eyes and nasal passages.**
4) **First Aid Measures**	
Skin	**Wash with mild detergent and water.**
Eyes	**Rinse with copious amounts of water.** **Seek medical attention if necessary.**
Inhalation	Remove to fresh air. Seek medical attention if necessary.
Ingestion	Seek medical advice.
5) **Fire-Fighting Measures**	Product is heat resistant and non combustible. Flash point - not applicable. Extinguisher type - general purpose for packaging material only.
6) **Accidential Release Measures**	Remove using vacuum cleaner. Remaining traces can be flushed to the drains with water.
7) **Handling and Storage**	Avoid direct contact with skin. Ensure adequate ventilation of working area. Store in dry area away from fierce heat that may cause damage to packaging.

Exposure Controls/ Personal Protection	Please note that this material contains up to 1% quartz and 3.4% Cristobalite
Ventilation	Maintain good ventilation/extraction during installation and wrecking operation.
Respiratory	Use approved equipment if conditions so require, i.e. dust mask.
Hand protection	Wear non-porous anti-slip gloves.
Eye protection	Wear suitable eye protection.
Other protection	Safety footwear and overalls are recommended.
Physical and Chemical Properties	Material is light brown in colour with a loose packing density of 1165/m^3. Slightly soluble in water.
10) Stability and reactivity	Stable in the form supplied. Reacts with water exothermically and yields alkaline mixture.
11) Toxicological Information	Respiratory problems may occur if exposed to fine dusts over a prolonged time period.
12) Ecological Information	Product is inert in the form supplied. Upon contact with water, the material becomes slightly alkaline. There is no known bio-accumulation, potential or aquatic toxicity associates with the product.
13) Disposal Considerations	Unused material can be disposed of in a solid waste landfill. Before wrecking operations are carried out, customers are advised to evaluate changes to the product that may be induced by the introduction of substances and operating conditions outside the control of the vendor.
14) Transport Information	No special precautions are required.
15) Regulatory Information	
16) Other Information	

DAVE BEADIE . 45.4

081 257 4653 John Fitzgibbon
77

FROM: JEREMYS OIL DIST.LTD., TO: 1995- 1-18 16:22 P.01

PRODUCT SAFETY DATA SHEET

SHELL GAS OIL CI
Shell U.K. Oil, Shell-Mex House, Strand, London WC2R 0DX. 071 257 3000
~~Telephone 01-257-3000~~
Data Sheet No. F32005 Version: 04 05 88 40537
BRANDNAME: SHELL GAS OIL CI

Gross CV: 45.4 MJ/kg
exactly same as pump diesel
N 38.8 MJ/litre

PRODUCT INFORMATION

APPROVED USES

Shell Gas Oil CI is approved for use as:
a fuel for use in off road diesel powered vehicles and stationary engines.
If Shell Gas Oil CI is used for a purpose not covered in this section, Shell Gas Oil CI would be grateful to receive information on the application.

KNOWN MISUSES/ABUSES

Shell Gas Oil CI is not to be used as:
a fuel on public roads (this practice is illegal); a solvent or cleaning agent. It should never be siphoned by sucking the liquid up a tube by mouth, or stored near sources of heat or ignition.

COMPOSITION

Shell Gas Oil CI is a preparation made from:
complex and variable mixtures of hydrocarbons, mainly in the C10 to C22 range, and additives. The hydrocarbon types are typically in the following ranges by volume: paraffins/napthenes 30% to 75%: olefins 1% to 35%: aromatics 10% to 60%. Sulphur, Nitrogen and Oxygen compounds and additives can also be present in very small quantities. An HM Customs and Excise marker 'Quinizarin' is added at 2 ppm together with a red marker dye

PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Physical State:	Mobile Liquid at Ambient Temperatures
Appearance:	Clear Red
Odour:	Characteristic
Density @ 15 Deg. C.:	0.82 to 0.87
IBP.:	170 Deg. C.
FBP.:	370 Deg. C.
Vapour Density (Air = 1):	>5
Vapour Pressure @ 40 Deg. C.:	<0.1 kPa.
Viscosity @ 40 Deg. C.:	1.5 to 5.5 cSt.
Sol. in Water:	Very Low
Acidity/Alkalinity:	Mildly Acidic

FIRE AND EXPLOSION HAZARDS

Flash Point (Pensky Martin Closed Cup):	> 60 Deg. C.
Flammability Limits — Upper:	6% vol.
— Lower:	1% vol.
Autoignition Temperature:	c220 Deg. C.
Extinguishants — Large Fire:	Foam/Water Fog — NEVER USE WATER JET
Extinguishants — Small Fire:	Foam/Dry Powder/CO2/Halon/Sand/Earth

SUPPLY CLASSIFICATION

Dangerous for Supply	St Andrew's Cross
Symbols:	Possible risk of irreversible effects
Risk Phrases:	In case of fire use foam/dry powder/CO2/Halon
Safety Phrases:	— NEVER USE WATER Avoid contact with skin Keep out of reach of children If swallowed seek medical advice immediately and show this container or label — DO NOT INDUCE VOMITING
Contains:	Catalytically Cracked Oils

Shell Gas Oil CI is designed for use in closed systems. When it has to be handled, eg during maintenance operations, use protective clothing.

TRANSPORT CLASSIFICATION

Dangerous for Conveyance but not by road in the UK	
Substance Identification Number:	1202
Symbol:	Flammable Liquid
IMO Hazard Class:	3.3
Page Number:	3151
ADR/RID Hazard Class:	3
Item No.:	32(c)
Hazard Identification No.:	30
Packing Group:	III
Hazchem Code:	None
Substance Identification Number:	1270 may be used for composite loads. See exemption certificate No 3 1983.

163

STORAGE PRECAUTIONS

The main considerations relating to the storage of Shell Gas Oil CI are the suitability of the storage vessel and the avoidance of sources of